

Vize elektrických sítí 2050+

Koncepce budoucích elektrizačních soustav

Pracoviště: KEE
Číslo dokumentu: 22190-013-2024
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Miloslava Tesařová, Martin Vinš, Lenka Raková, Karel Noháč, Filip Zmeko
Vedoucí projektu: Jakub Talla
Počet stran: 121
Datum vydání: 12/2024
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:
ČEPS, a.s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10
Česká republika

Zpracovatel / dodavatel:
Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation
Centre for Electrical
Engineering
Univerzitní 8, 306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:
doc. Ing. Jakub Talla
tel. +420 377634128
talic@fel.zcu.cz

Tato zpráva vznikla s podporou projektu TAČR NCK TN02000025 NCE II DP009, WP01

Anotace

Tato výzkumná zpráva nabízí komplexní přehled transformačních trendů, technologických inovací a strategických scénářů, které budou formovat elektrizační soustavy budoucnosti. Představeny jsou nové koncepty uspořádání a řízení elektrizačních soustav. Na základě analýzy trendů a směrů v oblasti koncepcí/architektury ES je prezentována vlastní vize uspořádání budoucí ES využívající výkonové elektronické technologie.

Klíčová slova

Transformace energetiky, budoucí elektrizační soustava, alternativní koncepte ES, celulární soustava, Web-of-Cells, energetická buňka, výkonové elektronické technologie

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Vision of electricity networks 2050+

Future power system architectures

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report offers a comprehensive overview of the energy transition trends, technological innovations and strategic scenarios that will shape the future electric power systems. New electric power system architectures are presented. Based on the analysis of trends and directions in the field of concepts/architecture of the electric power systems, a vision of the architecture of the future the electric power systems using power electronic technologies is presented.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Energy transition, future electric power system, alternative power system concepts, cellular power system, Web-of-Cells, energy cell, power electronic technology

Obsah

OBSAH	3
1 ÚVOD	4
2 TRENDY V ENERGETICE, SOUVISEJÍCÍ ZMĚNY A DŮSLEDKY	5
2.1 OBECNÁ STRUKTURA VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE V EVROPĚ V ROCE 2050	5
2.1.1 Scénáře vývoje energetiky a energetického mixu v Evropě	7
2.1.2 Další studie budoucího energetického mixu	10
2.2 OBECNÁ STRUKTURA SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE V EVROPĚ V ROCE 2050	11
2.2.1 Scénáře vývoje spotřeby elektřiny v Evropě.....	12
2.3 KOMBINACE PŘEDCHOZÍCH SCÉNÁŘŮ PRO ODHAD ABSOLUTNÍHO VÝVOJE VÝROBY/SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	15
2.4 OČEKÁVANÉ ZMĚNY V ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAVÁCH A JEJICH DŮSLEDKY	16
2.5 POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY	20
3 NOVÉ KONCEPCE USPOŘÁDÁNÍ A ŘÍZENÍ ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ	22
3.1 WEB OF CELLS CONCEPT, CELLULAR POWER/ENERGY SYSTEMS.....	27
3.1.1 Popis konceptu WoC.....	27
3.1.2 Energetická buňka/subsystém.....	28
3.1.3 Projekty a výzkumná pracoviště zabývající se konceptem WoC a celulárními sítěmi.....	30
3.2 HOLONICKÉ (HOLARCHICKÉ) ENERGETICKÉ SYSTÉMY	39
3.2.1 Holony a holarchie	40
3.2.2 Holonický multiagentní systém.....	43
3.2.3 Pracoviště zabývající se koncepcí holonických systémů.....	45
3.3 FRAKTÁLNÍ SYSTÉMY.....	46
3.3.1 Pracoviště zabývající se fraktální architekturou energetických systémů.....	46
3.4 ENERGY INTERNET	50
3.4.1 Pracoviště zabývající Energy Internetem	54
3.5 POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY	56
4 SPOLEČENSKÉ VÝZVY A JEJICH TECHNICKÉ DOPADY NA ES	62
4.1 KOMUNITNÍ ENERGETIKA	62
4.1.1 Základní informace o komunitní energetice	62
4.1.2 Současný stav komunitní energetiky v EU	67
4.1.3 Současný stav komunitní energetiky v ČR.....	71
4.1.4 Technický dopad energetických komunit na ES.....	74
4.2 PODPŮRNÉ SLUŽBY NA STRANĚ VÝROBY A SPOTŘEBY ELEKTŘINY	75
4.2.1 Flexibilita decentralizovaných zdrojů.....	79
4.2.2 Aktivní řízení spotřeby	80
4.2.3 Současný a budoucí stav podpůrných služeb v DS v ČR	84
4.3 TRANSAKTIVNÍ ENERGETICKÉ SYSTÉMY	86
4.4 POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY	92
5 BUDOUCÍ KONCEPCE A PROVOZ ES ČR	97
5.1 DOPADY VYSOKÉHO PODÍLU OZE NA PROVOZ A ROZVOJ PS A DS	97
5.2 PŘEDSTAVA O BUDOUCÍ KONCEPCI USPOŘÁDÁNÍ A ŘÍZENÍ ES ČR.....	101
5.2.1 Východiska.....	101
5.2.2 Naše vize budoucí koncepce a provozu ES.....	102
5.3 TECHNOLOGIE PRO BUDOUCÍ ES	107
5.4 POUŽITÁ LITERATURA A ODKAZY	109
6 MANAŽERSKÉ SHRNTÍ	111
SLOVNÍK POJMŮ Z OBLASTI BUDOUCÍCH ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ	117

1 Úvod

V kontextu klimatických cílů Evropské unie, které mimo jiné směřují k dosažení uhlíkové neutrality v oblasti energetiky do roku 2050, bude v příštích dekádách docházet k dynamické transformaci evropské i domácí energetiky. Hlavní hybnou silou této transformace bude kombinace dekarbonizace, decentralizace, digitalizace a narůstající elektrifikace. Tyto trendy budou mít vliv na vývoj elektrizační soustavy.

Dekarbonizace povede k útlumu zdrojů využívajících fosilní paliva a výraznému nárůstu podílu obnovitelných zdrojů energie v energetickém mixu, zejména fotovoltaických a větrných elektráren. Výroba z relativně malého počtu velkých (synchronních) výrobních jednotek se snadno predikovatelnou a regulovatelnou výrobou se přesune na mnoho menších (nesynchronních) jednotek. Značný podíl intermitentních zdrojů (s kolísavou výrobou) se očekává zejména v distribučních sítích. Kombinace velkých systémových zdrojů a velkého množství malých distribuovaných zdrojů může činit soustavu obtížně modelovatelnou a tudíž i říditelnou.

Snahy o zvýšenou integraci OZE a maximální využití jejich potenciálu vedou k vývoji nových koncepcí řízení a uspořádání energetických systémů. Jednou z myšlenek je rozdělení ES na samostatné, ale spolupracující části s určitou mírou autonomie, což umožní lokální optimalizaci výkonové rovnováhy a řízení spotřeby a přispěje k zajištění flexibility a odolnosti vůči výkyvům výroby z obnovitelných zdrojů. Trend decentralizace ale přinese zásadní změnu paradigmatu v řízení a uspořádání elektrizačních soustav. Změny v koncepci ES nebudou revolučním aktem, ale bude to evoluční proces, na který se musí provozovatelé sítě připravit.

Budoucnost energetiky bude založena na nízkouhlíkových zdrojích, technologických inovacích a efektivním řízení výkonové rovnováhy. Významnou roli v tomto procesu sehraje flexibilita výroby a spotřeby, spolu s rozvojem technologií akumulace energie. Digitalizace a rozvoj informačních a komunikačních technologií budou hrát zásadní roli při optimalizaci provozu elektrizačních soustav a posílení jejich odolnosti. Digitalizace zároveň otevře prostor pro nové obchodní modely, které umožní uživatelům sítě se aktivně zapojit do obchodování s elektrickou energií.

Tato výzkumná zpráva nabízí komplexní přehled transformačních trendů, technologických inovací a strategických scénářů, které budou formovat elektrizační soustavy budoucnosti. Na základě analýzy trendů a směrů v oblasti koncepcí/architektury budoucích ES je prezentována vlastní vize uspořádání budoucí ES využívající výkonové elektronické technologie.

2 Trendy v energetice, související změny a důsledky

Od poloviny 20. století došlo v Evropě k významným změnám v oblasti energetiky. Tyto změny byly ovlivněny formováním mezinárodních společenství, mezinárodními dohodami a ve 21. století také nařízením EU. Současná transformace evropské energetiky je především vyvolána snahou o dekarbonizaci a postupným přechodem na klimatickou neutralitu, plánovanou do roku 2050, tzv. Zelená dohoda pro Evropu [1] s balíčkem opatření Fit for 55 [2].

Kromě společensko-politického tlaku na udržitelnost energetiky, dostupnost energií a bezpečnost dodávek v rámci EU, se na vývoji energetiky významnou měrou podílí technologické inovace.

Hlavní globální trendy mající vliv na vývoj (evoluci) elektrizační soustavy:

- **Dekarbonizace** – společensko-politický tlak na snižování uhlíkové stopy energetických zdrojů, náhrada zdrojů využívajících fosilní paliva obnovitelnými zdroji, využití jiných technologií, jiné chování zdrojů (proměnlivost dodávky, menší setrvačnost)
- **Decentralizace** – přechod od malého počtu centralizovaných zdrojů s velkým instalovaným výkonem k většímu počtu malých decentralizovaných zdrojů, stále složitější kombinace centralizované a decentralizované výroby, distribuované řízení včetně flexibilního zatížení, skladování a vlastní výroby. Příležitost prosumerů obchodovat na místní úrovni (místní trh).
- **Integrace** – stále integrovanější trhy s elektřinou, větší propojení dříve nezávislých sítí a/nebo trhů s elektřinou, integrovanější energetické systémy včetně propojení sektorů (doprava, vytápění a chlazení).
- **Digitalizace** – vzrůstající implementace informačních a komunikačních technologií (ICT) a datových aplikací. Usnadnění spravedlivého přístupu na trh a zvýšení transparentnosti.
- **Inkluze** (Začlenění / dostupnost pro všechny) - rostoucí poptávka po udržitelné, místně a cenově dostupné energii pro každého, včetně rostoucí elektrifikace (např. průmyslových procesů, dopravy, vytápění a chlazení budov).

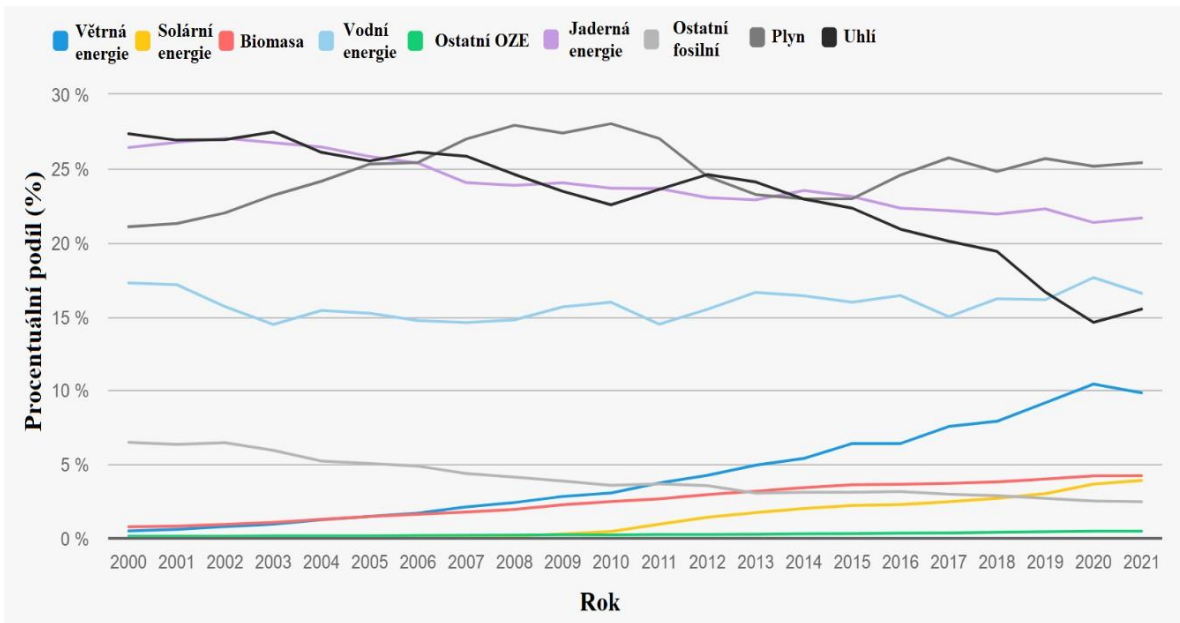
2.1 Obecná struktura výroby elektrické energie v Evropě v roce 2050

S ohledem na strategii EU pro dosažení klimatické neutrality do roku 2050 jsou jednotlivé státy EU nuceny k přechodu k udržitelným zdrojům energie a snižování závislosti na fosilních palivech.

Rozdíl vývoje mezi zeměmi EU a zbytkem Evropy (nečlenskými zeměmi) je pro návrhy scénářů konečných energetických mixů zanedbán. Předpokládá se přistoupení zbytku zemí Evropy k roku 2050 do EU, a tak jejich závazání ke stejným cílům v oblasti energetiky, případně harmonizace těchto cílů i v případě nečlenství z politických a/nebo ekonomických důvodů. Prezentované scénáře tak zahrnují i v současnosti nečlenské země analyzované v kapitole 1 v [5].

Podíl obnovitelných zdrojů energie na celkové elektrické energii vyrobené v Evropě se zvýšil z 15,9 % v roce 2004 na 41,2 % v roce 2022 [3]. Mezi nejdůležitější obnovitelné zdroje energie (OZE) patří vodní, větrná, sluneční a geotermální energie, ale také biomasa a bioplyn. Vývoj

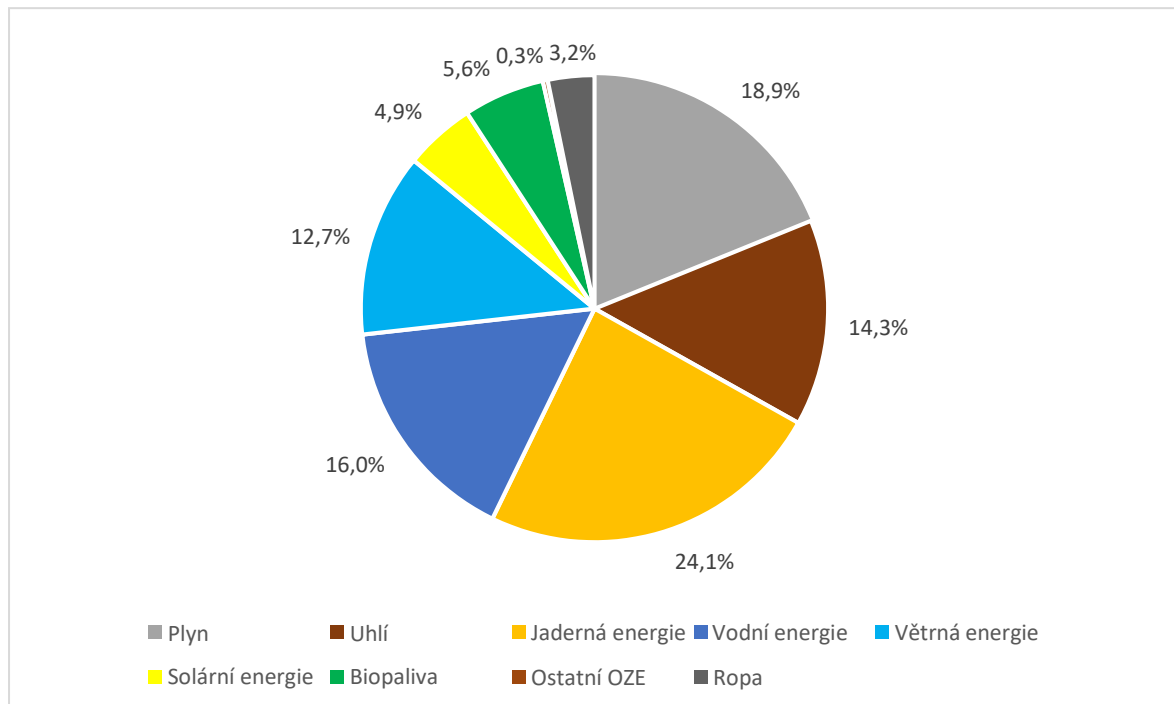
využívání OZE pro výrobu elektřiny v Evropě lze vidět na Obr. 1.



Obr. 1 Detailní vývoj procentuálního podílu jednotlivých zdrojů energie na výrobě elektřiny v Evropě (převzato a upraveno z [4])

Pro odhady budoucích scénářů vývoje evropské energetiky je nejprve třeba stanovit aktuální stav, který je znázorněn na Obr. 2. Tento výchozí stav byl stanoven dle váženého průměru mixů jednotlivých zemí, kde váhou je absolutní výroba elektrické energie jednotlivých zemí [5].

Údaje o aktuálních energetických mixech evropských států, byly čerpány z [6].



Obr. 2 Grafické znázornění výchozího energetického mixu Evropy v roce 2022 (převzato a upraveno z [6])

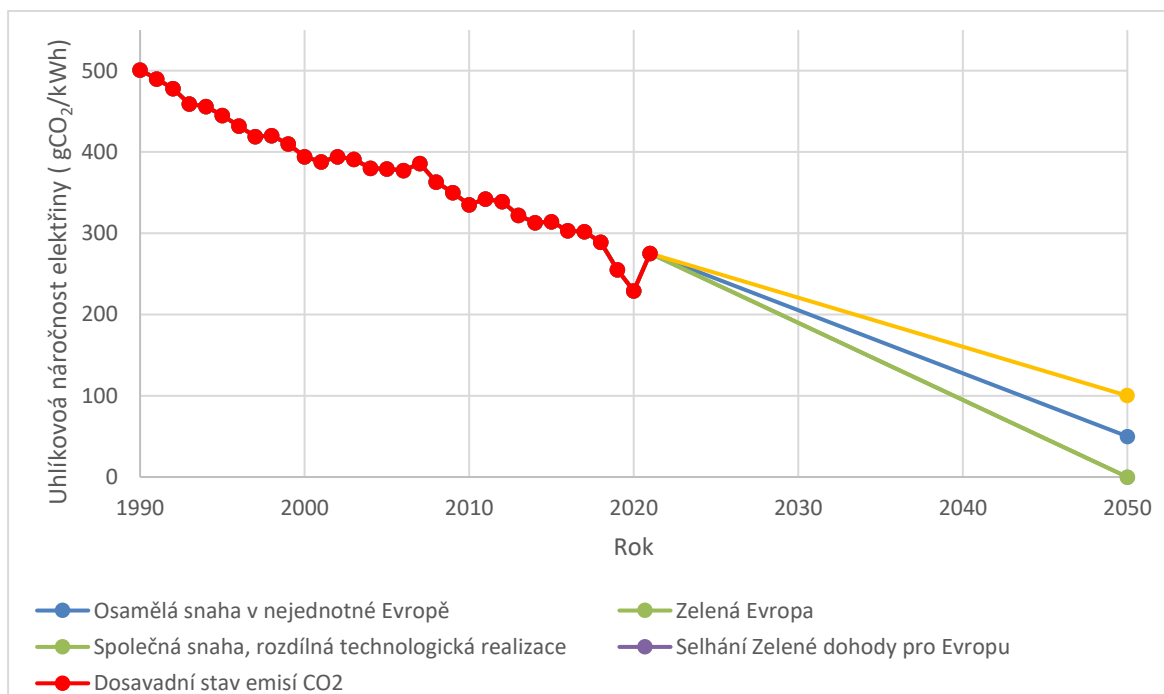
2.1.1 Scénáře vývoje energetiky a energetického mixu v Evropě

Energetický mix v Evropě (členských i aktuálně nečlenských státech EU) v roce 2050 bude záviset na geopolitickém a hospodářském vývoji Evropy, ochotě členských států EU plnit cíle evropské snahy o přechod na čistou energetiku a na míře prosazování svých národních zájmů. V dokumentu [5] jsou prezentovány a vzájemně porovnány čtyři různé scénáře vývoje energetiky v Evropě a jejich dopad na výsledný energetický mix v roce 2050:

- Zelená Evropa
- Společná snaha, rozdílná technologická realizace
- Osamělé snahy v nejednotné Evropě
- Selhání Zelené dohody pro Evropu

Hlavním kritériem pro formulaci a pravděpodobnost jednotlivých scénářů je uhlíková náročnost výroby elektrické energie. Toto srovnání přímo stanovuje, do jaké míry se podařilo v jednotlivých scénářích splnit klimatické cíle EU. Lineární regrese současného vývoje tak popisuje mírně pesimistický scénář, optimistické scénáře naopak uvažují dosažení uhlíkové neutrality (zrychlení trendu snižování emisí dle aktuálně závazných legislativních cílů). Ekvivalentní zpomalení trendu snižování emisí potom popisuje nejpesimističtější scénář.

Z Obr. 3 je patrné, že se dosažení uhlíkové neutrality povedlo pouze ve scénářích „Zelená Evropa“ a „Společná snaha“, rozdílná technická realizace (křivky vývoje se překrývají). Lze také říct, že scénář Osamělé snahy v nejednotné Evropě charakterizuje, zatímco scénář „Selhání Zelené dohody pro Evropu“, jak již název napovídá, představuje selhání ve snaze dosáhnout uhlíkově neutrální energetiky v roce 2050.



Obr. 3 Porovnání předpokládané uhlíkové intenzity výroby elektřiny v roce 2050 mezi jednotlivými scénáři [7]

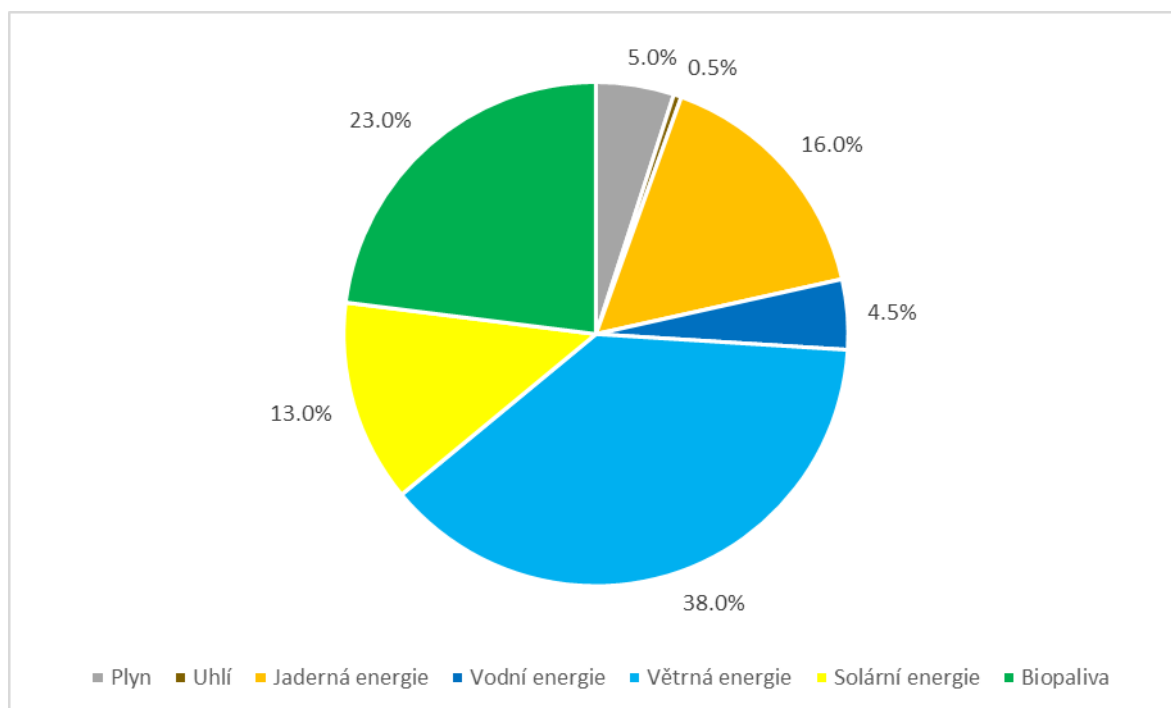
První dva nejoptimističtější a ze současného pohledu nejpravděpodobnější scénáře, které počítají s dosažením uhlíkové neutrality, se liší preferovanými zdroji výroby elektrické energie. Zatímco scénář „Zelená Evropa“ počítá se změnou (zpřísněním) taxonomie podporovaných

zdrojů a zastavením podpory pro fosilní plynové zdroje, scénář „Společná snaha, rozdílná technická realizace“ (vyhodnocen jako nejpravděpodobnější scénář) počítá s pokračováním dosavadního stavu, a tedy s využitím fosilních plynových zdrojů minimálně do roku 2050. Tento předpoklad je v souladu s aktuálně platnou taxonomií podporovaných zdrojů EU, kam patří jak jaderné zdroje, tak plynové zdroje. Detailnější popis jednotlivých scénářů, jakožto i předpokladů jejich formulace je v příložené výzkumné zprávě [5].

Scénář Zelená Evropa

Scénář „Zelená Evropa“ vychází z rostoucí evropské integrace a celoevropských investic do přechodu na udržitelnou energetiku. Díky stimulům ze strany EU úspěšně došlo k propojení jednotlivých sektorů. Veřejné a soukromé investice do technologií obnovitelných zdrojů energie a inteligentní infrastruktury budov snížily náklady na tyto technologie, což vedlo k širokému rozšíření obnovitelných zdrojů energie pro výrobu elektřiny a ekologické výroby vodíku.

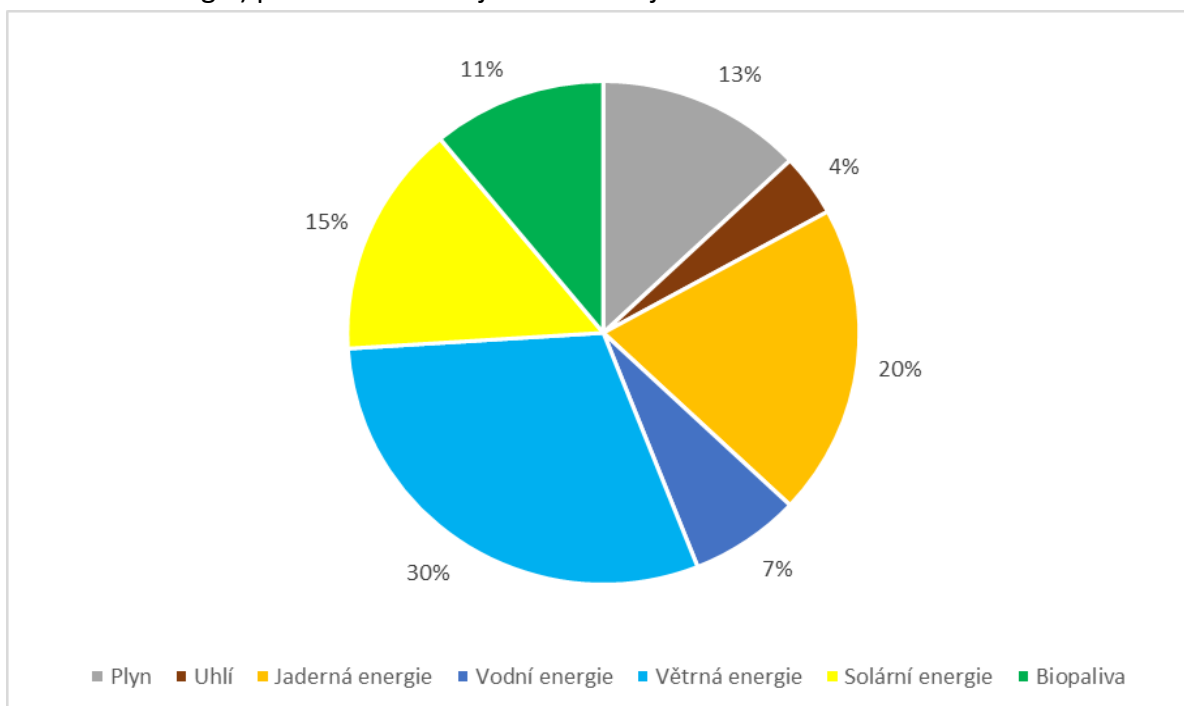
Téměř všechny uhelné elektrárny byly vyřazeny z provozu a jen posledních pár zemí ve východní a jihovýchodní Evropě stále využívá malé množství elektráren spalujících uhlí. Avšak tyto elektrárny jsou provozovány s implementovanými technologiemi na zachytávání uhlíku. Nejvíce elektřiny pak v roce 2050 vyrábějí větrné elektrárny. Tento scénář také předpokládá výrobu významného množství ekologického vodíku a ambiciózní ceny za emise CO₂. V tomto scénáři zajišťují čisté zdroje energie 94,5 % z energetického mixu (78,5 % obnovitelné zdroje a 16 % jaderná energie). Energetický mix pro Evropu pro tento scénář vývoje je znázorněn na následujícím obrázku. Jedná se tedy o scénář, kdy není podporován plyn (5% podíl plynu je pouze reziduálních).



Obr. 4 Předpokládaný energetický mix Evropy v roce 2050 pro scénář bez podpory plynu [5]

Scénář Společná snaha, rozdílná technická realizace

V nejpravděpodobnějším scénáři „Společná snaha, rozdílná technická realizace“ se EU podařilo dosáhnout svých klimatických cílů, avšak ponechala jednotlivým členským státům do jisté míry volnou ruku v jejich provedení (potenciální nečlenské státy se přizpůsobily). Ne všechny státy mají totiž stejný potenciál pro rozvoj obnovitelných zdrojů energie a uvítají možnost stavět svou budoucnost na jaderné energii a dalších nových technologiích. Výsledkem je tak energetický sektor, ve kterém jsou ve velké míře využívány obnovitelné zdroje energie, ale také jaderná energie a v menší míře vodíkové technologie a fosilní paliva s implementovanými technologiemi zachytávání uhlíku. Výroba elektřiny je tedy v roce 2050 uhlíkově neutrální díky strategickým investicím do nových energetických technologií a technologií využívajících přírodní zdroje. Energetický mix pro rok 2050 (podíl na výrobě elektrické energie) pro tento scénář je na následujícím obrázku.



Obr. 5 Předpokládaný energetický mix Evropy v roce 2050 pro scénář s podporou plynu [5]

V porovnání se scénářem „Zelená Evropa“ zahrnuje tento scénář vyšší podíl jaderné energie v energetickém mixu (20 %), ale nižší využití obnovitelných zdrojů (63 %).

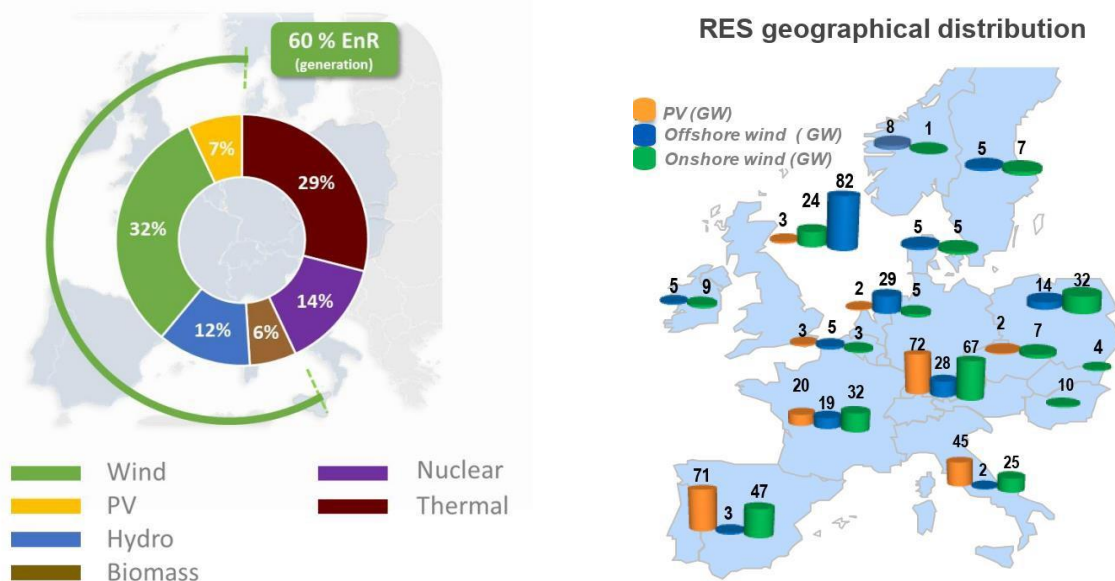
Všechny čtyři scénáře počítají se zvýšením podílu obnovitelných zdrojů oproti současným hodnotám, na podíl necelých 50 až necelých 80 %, nejpravděpodobnější scénáře 63 %, resp. 80 %. Výroba elektřiny z nízkouhlíkových zdrojů (OZE + jaderná energie) tvoří napříč různými scénáři podíl od 65 % do 94,5 %, nejpravděpodobnější scénáře 87 %, resp. 95 %. Rozdíl mezi podíly jaderné energie na výrobě elektřiny není mezi scénáři nikterak veliký. Ostatní scénáře a detailnější popisy zde uvedených scénářů je možno nalézt v [5] v kapitole 2.5.

Každopádně to povede na vysoký podíl OZE, tj. intermitentních zdrojů (s kolísavou výrobou), distribuovaných zdrojů a tzv. nesynchronních výrobních jednotek (tj. připojených do sítě přes měniče).

2.1.2 Další studie budoucího energetického mixu

Společnost EDF vypracovala v roce 2015 studii, která zkoumá dopady integrace velkého podílu variabilní výroby z obnovitelných zdrojů do výrobního mixu evropské propojené elektrizační soustavy [8]. Dokument řeší několik aspektů systémové integrace zejména variabilní výroby, včetně charakterizace variabilní výroby OZE, potřeby výrobní a propojovací infrastruktury, dopadů na krátkodobý provoz soustavy a ziskovost trhu.

EDF vychází ze scénáře, že v roce 2030 bude 60 % elektřiny vyrobené v EU pocházet z OZE. Větrné a fotovoltaické elektrárny zdroje by pokryly 40 % roční potřeby energie v EU. Rozdělení instalovaných výkonů FVE a větrných elektráren napříč Evropou se předpokládá velmi nerovnoměrné (Obr. 6).



Obr. 6 Předpokládané instalované výkony různých zdrojů a jejich rozdělení napříč Evropou [8], [9]

Podíl OZE na vyrobené elektrické energii nebo instalovaném výkonu se bude v roce 2050 v jednotlivých evropských zemích lišit z důvodu rozdílné geografické polohy, potenciálu OZE, příklonu k využívání JE apod.

Scénáře výroby elektřiny a instalovaných výkonů pro různé typy zdrojů/paliv pro 28 evropských států (včetně ČR) pro horizont 2030 a 2050, byly vytvořeny také v projektu EU-SysFlex (2018) [9]. Projekt EU-SysFlex, podporovaný Evropskou komisí, měl za cíl identifikovat rozsáhlé nasazení flexibilních řešení pro evropský energetický systém s vysokým podílem obnovitelných zdrojů energie (RES). Projekt pracoval se dvěma scénáři Energy Transition (2030, 52 % elektřiny vyrobené v EU+Švýcarsko+Norsko z OZE, s 65,5 % carbon-free) a Renewable Ambition (2050, 66 % z OZE a 73,1 % carbon-free), vycházejících ze scénáře evropské komise EU Reference Scenario 2016.

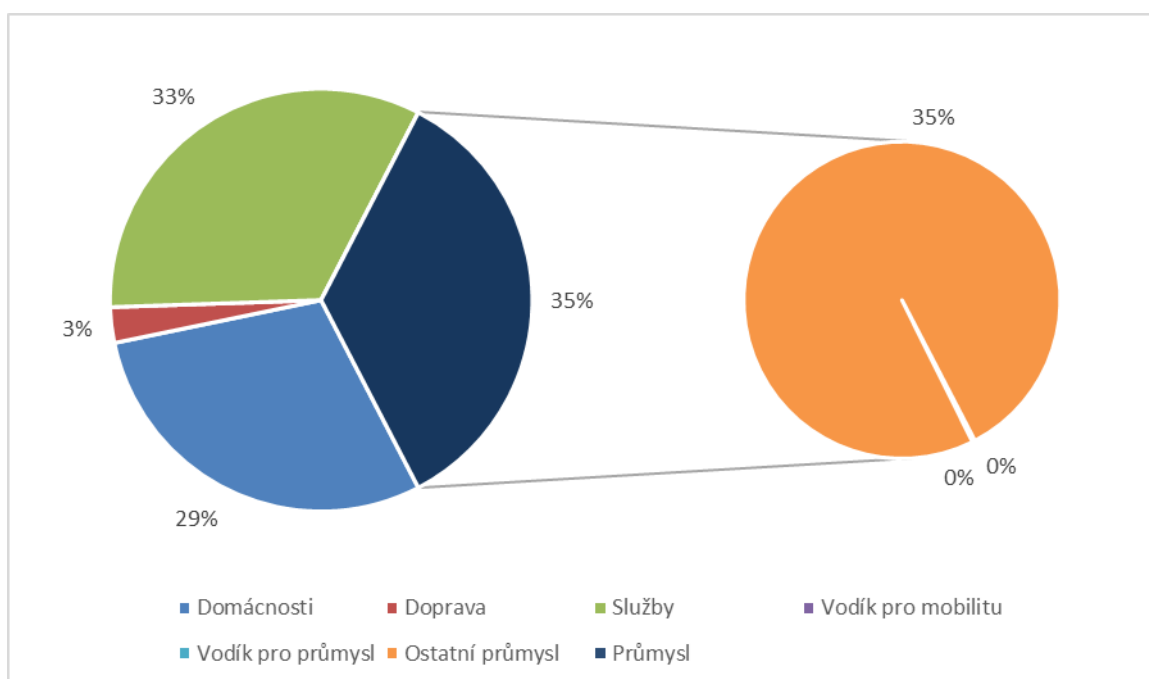
Oba výše uvedené scénáře budoucího vývoje výroby elektrické energie a instalovaných výkonů vznikly před rokem 2020, před úpravami cílů snížení uhlíkových emisí EU. Oba scénáře tak vychází z předpokladu snížení emisí při výrobě elektrické energie o 70 % oproti roku 1990, jež byly v roce 2020 upraveny na dosažení uhlíkové neutrality. Z Obr. 9 v sekci výroby je patrné, že se jedná o poměrně vysokou předpokládanou úroveň emisí, s jakou nepočítá ani nejpesimističtější scénář vlastní analýzy FEL. Lze tak předpokládat, že podíly obnovitelných

zdrojů energie (obzvláště intermitentních) v těchto scénářích budou proti novějším predikcím (a tak i skutečnosti) k roku 2050 podhodnocené. Obecně potom platí, že predikce energetických mixů vycházející ze stejného předpokladu (většinou před rokem 2020) se mohou výrazněji lišit od novějších. Ve vlastní analýze FEL jsou potom některé starší predikce IEA srovnány s reálným vývojem energetického mixu a tento rozdíl je z nich jasně patrný [5].

2.2 Obecná struktura spotřeby elektrické energie v Evropě v roce 2050

V dokumentu [5] je provedena analýza aktuálního stavu spotřeby elektřiny evropských států, členěno na jednotlivé oblasti Evropy a jednotlivé sektory spotřeby: domácnosti, průmysl, doprava a služby.

Pro odhady budoucích scénářů vývoje evropské spotřeby elektrické energie je nejprve třeba stanovit aktuální stav pro Evropu jako celek, který je znázorněn na Obr. 7. Tento výchozí stav byl stanoven dle váženého průměru spotřeb jednotlivých zemí, kde váhou je absolutní spotřeba elektrické energie [5]. Údaje o aktuální spotřebě elektřiny a jejím rozdělení do jednotlivých sektorů pro jednotlivé evropské státy byly čerpány z [10].



Obr. 7 Grafické znázornění aktuální spotřeby elektřiny v Evropě pro rok 2022 [10]

Vzhledem k ambiciózním cílům Evropské zelené dohody, která usiluje o dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050, a to jak ve výrobě (předchozí podkapitola), tak ve vybraných segmentech spotřeby elektrické energie, je pro validní odhad budoucí struktury spotřeby nezbytné soustředit se na tyto klíčové sektory: domácnosti a dopravu, jelikož je v těchto segmentech v důsledku elektrifikace očekáváno významné zvyšování spotřeby elektrické energie. U domácností se bude jednat primárně o elektrifikaci/stupeň elektrifikace vytápění/chlazení a u dopravy o rozvoj elektromobility, případně využívání alternativních paliv.

Pozn.: vliv na spotřebu průmyslu je až sekundární. Podstatný kumulativní nárůst spotřeby elektrické energie v samotném průmyslu se neočekává, avšak v rámci jeho dekarbonizace se

očekává postupný růst výroby zeleného vodíku pomocí elektrolyzérů (typicky během špičkové výroby OZE), což bylo do sektoru průmyslu zařazeno. Tento vodík bude potom mimo jiné využit k dekarbonizaci průmyslových procesů využívajících přímé spalování fosilních paliv a v dopravě. Nicméně značný vliv na segment průmyslu je dán pouze zvolenou kategorizací. Stejně tak by šlo takovou výrobu vodíku označit do jisté míry jako akumulaci elektrické energie, nebo např. spotřebu elektrické energie pro výrobu alternativních paliv v segmentu dopravy. Podrobnější popisy jednotlivých segmentů a zahrnutých položek jsou uvedeny v [\[5\]](#) v kapitole 6.

2.2.1 Scénáře vývoje spotřeby elektřiny v Evropě

Dále jsou uvedeny dva nejpravděpodobnější scénáře vývoje spotřeby elektrické energie. U obou scénářů se počítá se stabilním růstem spotřeby v domácnostech (nahrazení topných kotlů tepelnými čerpadly) a stabilním růstem spotřeby ve službách (rozvoj datových center). Scénáře se především liší ve vývoji spotřeby v dopravě – jedna s nízkou a druhá s vysokou procentuální spotřebou elektrické energie (dána rozvojem elektromobility). Tyto scénáře představují nejpravděpodobnější varianty z hlediska aktuálně nastaveného vývoje v rámci dekarbonizace vybraných segmentů spotřeby Evropy do roku 2050 a navazují na nejpravděpodobnější scénáře vývoje energetických mixů výroby.

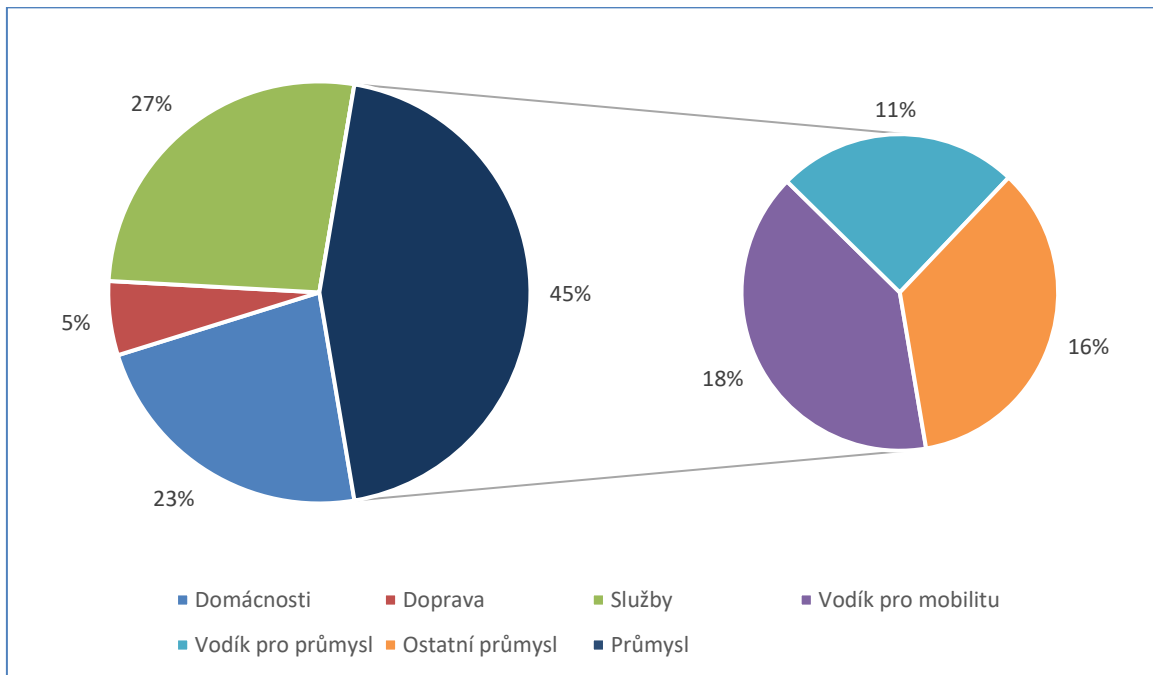
Scénáře vývoje spotřeby elektrické energie v Evropě:

- Vodíková budoucnost
- Elektrická mobilita

Scénář Vodíková budoucnost

V tomto scénáři se počítá s nízkým procentuálním podílem elektrických vozidel v dopravě, kde se dále předpokládá, že elektrická vozidla nebudou přijímána v dominantním měřítku a sektor dopravy se bude více zaměřovat na alternativní paliva, jako je vodík, nebo syntetická paliva. Výroba vodíku bude zajišťována převážně elektrolýzou, což výrazně zvýší spotřebu elektrické energie v průmyslu. Tento scénář zohledňuje vodík jako klíčový prvek pro dekarbonizaci těžké dopravy a průmyslových procesů. To přímo navazuje na druhý nejpravděpodobnější scénář vývoje výrobního mixu elektrické energie v roce 2050, tedy „Zelená Evropa“. Dramatická integrace obnovitelných zdrojů s fluktuující výrobou, která by v tomto scénáři tvořila více než 50 % energetického mixu se zjevným nedostatkem flexibilních zdrojů by pravděpodobně vedla k nutnosti dramatického rozvoje vodíkového hospodářství jakožto prostředku pro regulaci výkonových špiček způsobených těmito fluktuujícími obnovitelnými zdroji. To by následně vedlo k rozvoji vodíkové mobility a přechodu fosilního průmyslu na vodík jako palivo.

Struktura spotřeby elektrické energie při uvažování rozvoje vodíkové technologie v dopravě je znázorněna na Obr. 8.

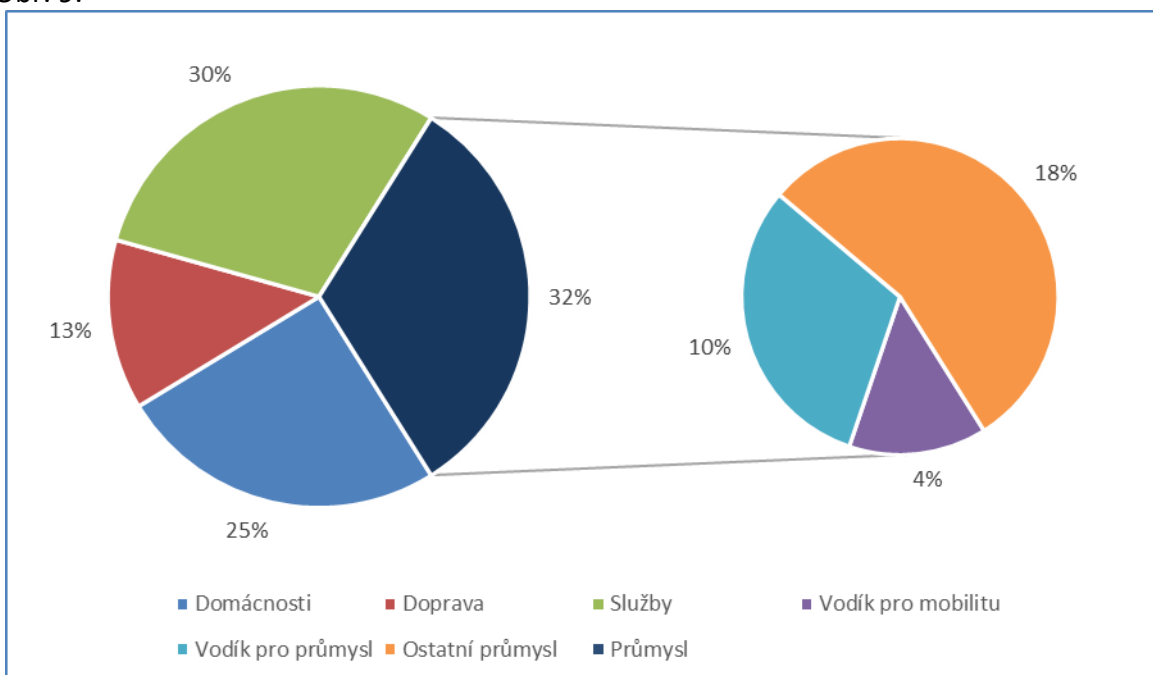


Obr. 8 Grafické znázornění scénáře vodíkové budoucnosti v Evropě pro rok 2050 [5]

Scénář Elektrická mobilita

Ve scénáři elektrické mobility je předpokládán velmi výrazný nárůst spotřeby elektrické energie v dopravě. Uvažuje se, že elektrická vozidla se stanou dominantním způsobem osobní i nákladní dopravy. Tento přístup by vedl k výraznému nárůstu spotřeby elektrické energie přímo v sektoru dopravy, zejména díky rychlému rozšíření dobíjecí infrastruktury a korespondujícího růstu počtu elektrických vozidel na silnicích. Tento scénář by přímo navazoval na nejpravděpodobnější scénář „Společná snaha, rozdílná technologická realizace“ vývoje energetických mixů, čímž je v [5] tento směr vývoje výroby/spotřeby vyhodnocen jako nejpravděpodobnější.

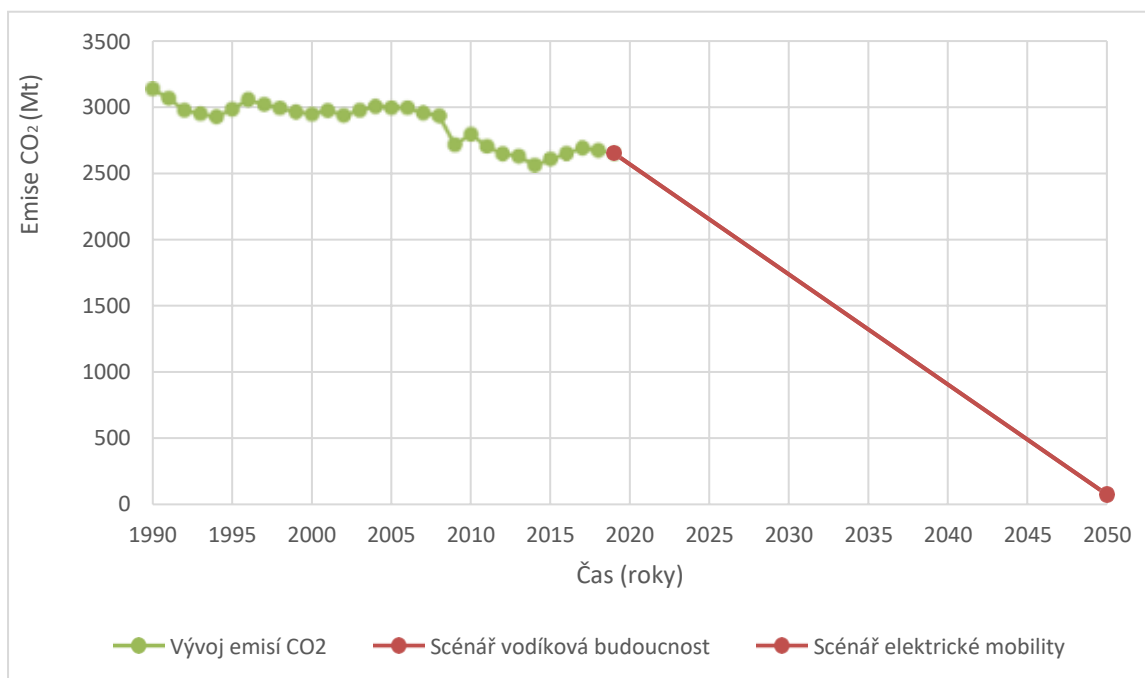
Struktura spotřeby elektrické energie při uvažování rozvoje elektromobility je znázorněna na Obr. 9.



Detailní popisy scénářů, včetně odkazů na zdroje dat, z nichž se při tvorbě scénářů vycházelo, jsou uvedeny v dokumentu [5].

Oba tyto scénáře předpokládají výrazné snížení emisí do roku 2050 ve vybraných segmentech (souvisí s dosažením legislativních cílů), což bylo vyhodnoceno jako nejpravděpodobnější vzhledem k předchozím analýzám hlavních faktorů ovlivňujících výrobu elektrické energie. Emise CO₂ v EU budou obecně uvažovány jako bilančně nulové, tam kde tohoto nepůjde dosáhnout, bude využita technologie na zachytávání uhlíku. S nulovými emisemi CO₂ se tedy **nepočítá** zejména v sektoru nákladní, námořní a letecké dopravy. Je třeba také poznamenat, že prezentované odhady vývoje jednotlivých segmentů spotřeby jsou založeny pouze na aktuálních informacích a poznacích a mohou se v budoucnu s určitou technologickou, případně jinou inovací, nebo legislativou měnit.

Graf znázorněný na Obr. 10 ukazuje vývoj emisí během let ve sledovaných sektorech. Sečteny jsou tak jednotlivé emise ze sektorů dopravy, průmyslu, domácností a komerčních a veřejných služeb. Z grafu je patrný menší trend poklesu emisí od roku 2005. Dekarbonizaci v těchto sektorech tak bude třeba urychlovat [11]. Křivky pro oba scénáře vývoje se překrývají.



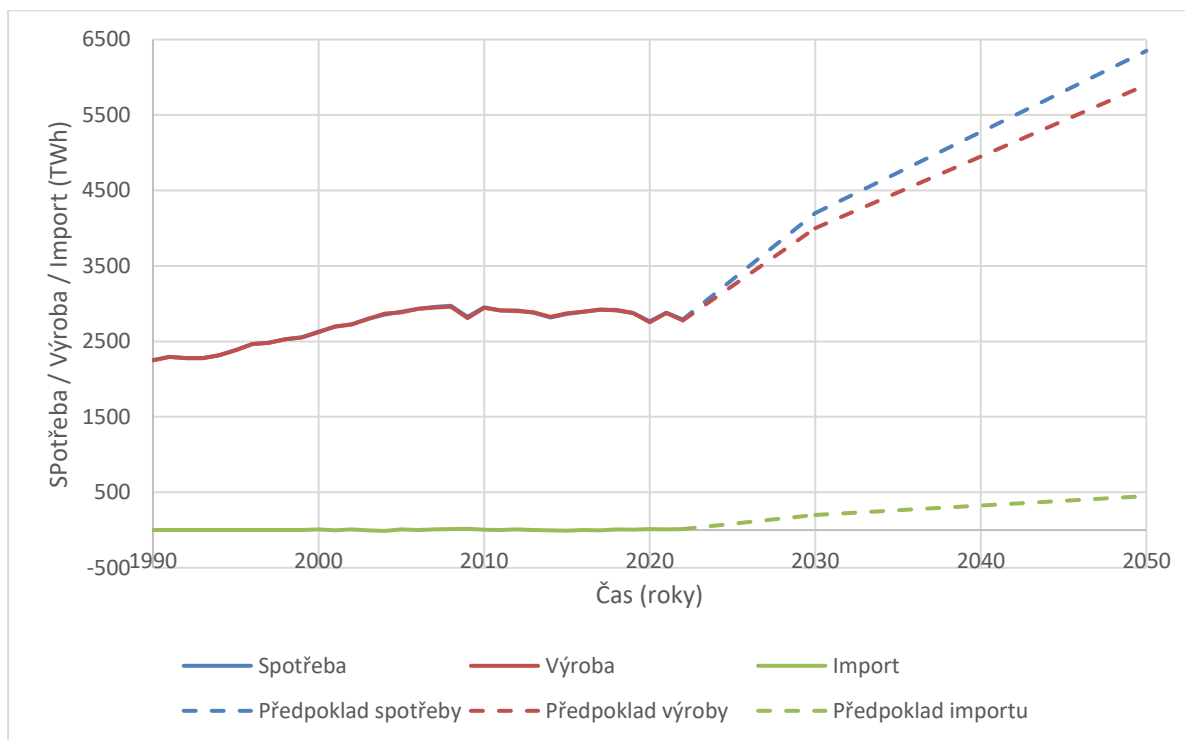
Obr. 10 Grafické znázornění vývoje emisí CO₂ a predikce podle scénářů (převzato a upraveno z [11])

Pozn.: v rámci rozsahu provedené práce bohužel nebyl dostatek prostoru pro přesnější odhady charakteru vlastního průběhu snižování emisí CO₂ ve spotřebě elektrické energie. Nicméně s ohledem na aktuálně platnou legislativu (zákaz výroby spalovacích motorů k roku 2035 a další), aktuálně úřadující Evropskou komisí a velikost již vynaložených investic do zapojených odvětví velmi pravděpodobně dojde v roce 2050 (i s potenciálním posunutím některých legislativních cílů) ke snížení emisí k výše uvedené hodnotě (nebo jí velmi blízké). I v případě radikální změny politiky Evropské komise v dalším(ch) volebním(ch) období(ch) vzhledem k již podniknutým krokům byla významná změna aktuálně předpokládaných směrů vývoje vyhodnocena jako nepříliš pravděpodobná.

2.3 Kombinace předchozích scénářů pro odhad absolutního vývoje výroby/spotřeby elektrické energie

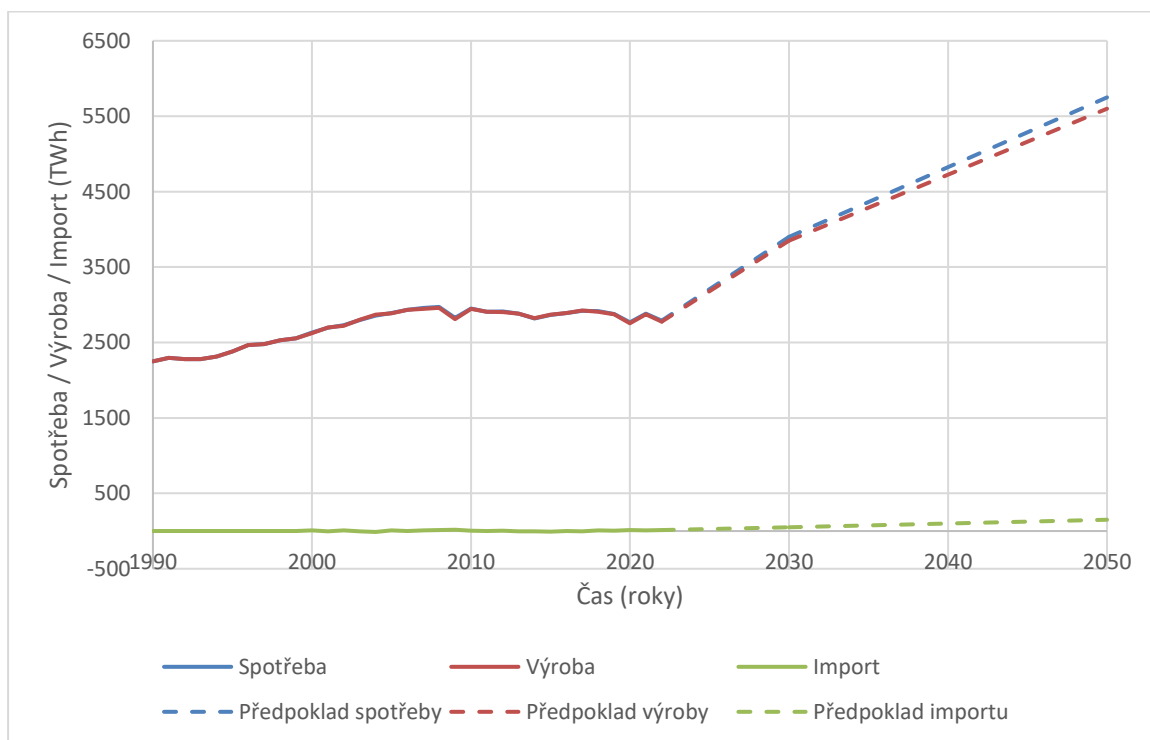
Tato sekce se zaměřuje na analýzu dvou hlavních kombinací scénářů z pohledu celkových absolutních hodnot bilancí elektrické energie. Jejím cílem je poskytnout ucelený přehled o potenciálním vývoji absolutní výroby, spotřeby a importu/exportu elektrické energie. Každý ze scénářů je doplněn grafy, které znázorňují tento vývoj hodnot od roku 1990 až po potenciální vývoj do roku 2050. Tyto grafy poskytují jasnější přehled pro porovnání a znázornění klíčových trendů, jež budou potenciálně formovat budoucnost energetického sektoru. Analýza se opírá o projekce ke dvěma klíčovými datům, ke kterým jsou legislativně ukotveny konkrétní cíle, tedy rok 2030 a rok 2050. Ostatní vývoj je uvažován jako lineární mezi těmito body.

Scénář spotřeby „Vodíková budoucnost“ a scénář výroby „Zelená Evropa“ se zaměřují na rozvoj vodíkových technologií jako klíčového prostředku pro dekarbonizaci průmyslu a dopravy (viz Obr. 11). Výroba vodíku je v nich plánována prostřednictvím elektrolýzy, což umožní efektivní využití přebytků elektrické energie z obnovitelných zdrojů. V tomto scénáři se počítá s významnou integrací obnovitelných zdrojů energie do energetického mixu, přičemž více než 50% výroby elektřiny by pocházelo z fluktuujících obnovitelných zdrojů. Nedostatek flexibilních zdrojů by pravděpodobně vedl k nutnosti rozsáhlého rozvoje vodíkového hospodářství, které by nejen umožnilo regulaci výkonových špiček, ale také podpořilo rozvoj vodíkové mobility a přechod průmyslu k vodíkovým palivům.



Obr. 11 Grafické znázornění předpokládané spotřeby, výroby a importu elektrické energie pro scénáře „Vodíková budoucnost“ a „Zelená Evropa“ (převzato a upraveno z [12])

Scénář spotřeby „Elektrická mobilita“ a scénář výroby „Společná snaha, rozdílná technologická realizace“ předpokládá stabilní růst spotřeby elektrické energie v domácnostech, přičemž výrazný nárůst spotřeby bude především v sektoru dopravy díky rozvoji elektromobility (viz Obr. 12).



Obr. 12 Grafické znázornění předpokládané spotřeby, výroby a importu elektrické energie pro scénáře „Elektrická mobilita“ a „Společná snaha, rozdílná technologická realizace“ (převzato a upraveno z [12])

Tento scénář je založen na politickém rozhodnutí, kdy došlo k většímu vývoji a implementaci technologií využívající jadernou energii a nižším využití obnovitelných zdrojů při zachování diverzifikovaného mixu dodávek energie, který koresponduje s aktuálně nastaveným politickým vývojem a je tak vyhodnocen jako směr nejpravděpodobnějšího vývoje.

2.4 Očekávané změny v elektrizačních soustavách a jejich důsledky

Současné energetické systémy se vyznačují těmito charakteristickými rysy:

- Samostatné rozvodné soustavy pro různé formy energie (elektřina, plyn, vytápění ...)
- Dominují rotační zdroje, synchronní s predikovatelnou/regulovatelnou výrobou
- Centrální výroba a (hierarchické) řízení
- Tok energie v jednom směru (od výroby k odběratelům) – pasivní odběratelé
- Z velké části systémy založené na „hardwaru“.

Současná transformace evropské energetiky, vyvolána především postupným přechodem na klimatickou neutralitu, a globální trendy (dekarbonizace, decentralizace, integrace, digitalizace, elektrifikace) mají vliv na vývoj (evoluci) elektrizační soustavy. Dále budou diskutovány zásadní změny, které lze očekávat.

Náhrada zdrojů využívajících fosilní paliva obnovitelnými zdroji

- Značný podíl intermitentních zdrojů (s kolísavou výrobou)
- Přesun výroby z relativně malého počtu velkých (synchronních) jednotek na mnoho menších (nesynchronních) jednotek
- Masivní penetrace (intermitentních) obnovitelných zdrojů energie do distribučních sítí
- Kombinace velkých systémových zdrojů a velkého množství malých distribuovaných zdrojů

Změny v technologiích výrobních jednotek (synchronní versus nesynchronní) přináší řadu problémů při řízení ES, např. nižší setrvačnost, nižší zkratové proudy a s tím spojená obtížnější lokalizace poruch, výskyt přepětí a možné poškození zařízení. VTE způsobují kolísání napětí, malé FVE připojené 1f či 2f zhoršují nesymetrii napětí. Více o změnách v provozu ES způsobené zdroji s měniči, např. [13] (kap.1 a Tab. 1) a [14] (kap.2).

Na druhou stranu polovodičové měniče, jež jsou součástí nesynchronních výrobních jednotek, jsou schopné dynamicky řídit jalový výkon a tím upravovat napěťové poměry v místě připojení, deformační výkon, tj. filtrovat harmonické v síti, regulovat zpětně složku proudů (provádět napěťovou/výkonovou symetrizaci sítě), dynamicky řídit činný výkon (např. grid forming funkcionalita), či dynamicky řídit přetoky. Pro řadu těchto aplikací se využívají měniče typu STATCOM (statické kompenzátory), paralelní aktivní filtry (shunt active power active filters), linkové kondicionéry apod. Většinu těchto úloh je ale možné řešit úpravou algoritmů řízení měničů nesynchronních výrobních jednotek (např. FVE, BESS pro nižší až střední výkony, až po HVDC měniče pro hladinu vvn), ale i významně expandujících spotřebičů jako jsou nabíjecí stanice elektromobilů. Mezi technologie umožňující vytvoření tzv. aktivního uzlu sítě (tj. uzlu umožňujícího aktivní regulaci výkonových toků), většinou kombinujícího AC i DC linky a změnu napěťové hladiny, patří tzv. energy routery, solid state transformery apod.

Ztrátu setrvačnosti sítě je nutné částečně nahrazovat dynamikou řízení nesynchronních zdrojů (a spotřebičů). Z toho plynou budoucí nároky na řízení/architekturu ES (více v následující kapitole 3). Nižší zkratové proudy a s tím spojená i lokalizace poruch bude vyžadovat investice do digitalizace ochran a zvýšení jejich selektivity či radikálně změnit jejich princip. Schopnost dodání zkratového proudu polovodičovými měniči je závislá na jejich proudovém dimenzování (tj. proudové rezervě). Ta bývá zpravidla poměrně nízká oproti nominálnímu proudu (z ekonomických důvodů). Např. výrobce SMA uvádí až 1,4 násobek nominálního proudu po dobu 50ms (běžnou hodnotu uvádí ale do 1.2 násobku In) a cca nominální proud po dobu delší [15]. V podobných mezích se pohybuje i např. výrobce SolarEdge [16] (tj. cca 1,2 násobek nominálního proudu po dobu 30 ms). Blízký 1f/3f zkrat může být také problematický z hlediska řízení polovodičových měničů a může vést na rychlou reakci vnitřních ochran a odpojení tohoto zdroje (tj. nedodání zkratového proudu), nebo k deformaci zkratového proudu vyššími harmonickými z důvodu generování nízké efektivní hodnoty napětí. Mezi nové ochrany AC i DC sítí patří např. mikroprocesorem řízené polovodičové vypínače SSCB (solid state circuit breakery) a hybridní vypínače, polovodičové ochrany zemních spojení pro neúčinně uzemněné sítě, aktivní diagnostika prvků sítě (např. transformátorů) atd.

Obecně nižší výtěžnost OZE povede na navýšení instalovaných výkonů zdrojů v ES. Na stejný vyrobený výkon bude potřeba vyšší instalovaný výkon zdrojů, to povede k posilování sítí anebo jiný způsob řízení sítí či využití akumulace.

Vysoký podíl intermitentních decentralizovaných zdrojů způsobí změny v časovém profilu dodávky a změny ve výkonových tocích. Dají se očekávat větší rozdíly mezi okamžitou výrobou

a spotřebou, které budou muset být vyrovnávány, což povede k rychlým a výraznějším změnám ve výkonových tocích. Díky změnám v geografickém rozložení instalovaných zdrojů dojde i ke změně rozložení výkonových toků v sítích distribučních i přenosových.

Z hlediska propojených sítí (velkých celků), kde jsou oblasti se soustředěnou výrobou, např. velké větrné farmy, dochází k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti, což klade nároky na kapacitu přenosových koridorů (interconnections). Zde může být využita technologie HVDC dosahující vyšší přenosové kapacity, nebo congestion management nebo flexibilita přerozdělování výkonů pro zajištění přenosové kapacity linek.

- Sítě se mohou dostat blíž ke svým provozním limitům

Nárůst výkonových toků ve výrobních špičkách povede k vyššímu využití stávajících sítí, při nárazových tocích může docházet k přiblížení se kritickému zatížení sítě či síťových komponent. Vyšší využití stávajících sítí na všech napěťových úrovních povede k nutnosti posilování sítí.

Z důvodu ztížené predikovatelnosti výroby z intermitentních zdrojů bude nutné počítat s určitým stupněm nejistoty při provozu a řízení sítí. To bude vyžadovat i jiný přístup k modelování, aby se správně odhadla rezerva od kritického stavu. Intermitentní a decentralní zdroje budou klást větší nároky na měření aktuálního stavu soustavy (pozorovatelnost soustavy¹, rychlost měření a přenos dat, zpracování většího množství dat).

- Výroba se nebude řídit spotřebou, ale bude využívána kombinace řízení výroby a řízení spotřeby
- Aktivní odběratelé, flexibilita odběratelů a akumulace, odběratelé se stávají i producenty (prosumery)
- Aktivace nových hráčů na trhu (např. agregátoři)

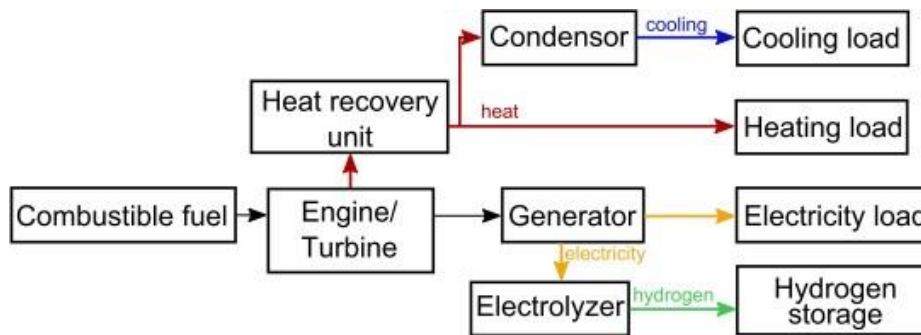
Vyšší podíl intermitentních zdrojů bude klást vyšší nároky na řízení a zálohování pro zajištění bezpečnosti dodávek. Pro zajištění stability soustavy bude potřeba zapojit do řízení i stranu spotřeby, tj. využívat flexibilitu na straně spotřeby i výroby (využití úložišť, demand side response na straně zátěže), a případně instalovat zařízení pro stabilizaci chodu soustavy.

- Spotřeba elektrické energie se výrazně zvýší (e-mobilita, vytápění) zejména na nižších napěťových hladinách

Tlak na omezení CO₂ vede k vyššímu stupni elektrifikace, např. veřejná doprava, elektromobilita, průmysl a rezidenční vytápění.

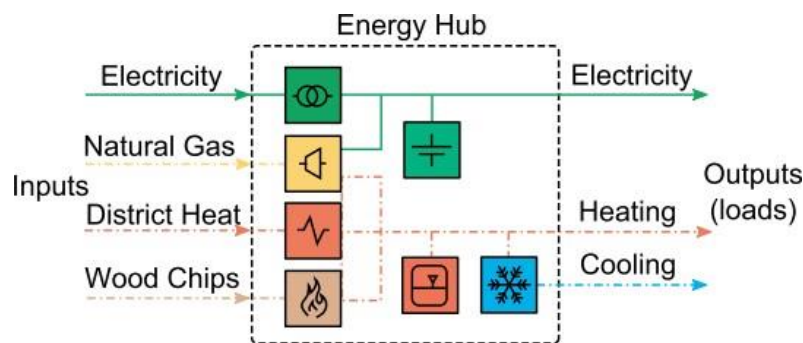
- Využití více forem energie, využití technologií Power-to-X a X-to-Power
- Polygenerace - Výroba více než jedné užitečné formy energie ve výrobní jednotce (elektřina, teplo, chlad, vodík)

¹ Pozorovatelnost, v angličtině Observability, se týká schopnosti odvodit vnitřní stavy systému na základě jeho vnějších výstupů. V energetických systémech je tento koncept zásadní pro monitorování a řízení dynamiky systému, což operátorům umožňuje pochopit chování systému na základě měřitelných dat.



Příklad polygeneračního zařízení - komponenty a toky energie

- Multi-energy systems, energetické huby (energy hub)



Příklad konfigurace energetického hubu / uzlu

- Vzrůstající penetrace ICT, data-driven management
- Přejít k decentralizovanému způsobu řízení v důsledku rozvoje ICT

Beze změn v ES to povede na:

- Složitý energetický systém – velký počet zúčastněných jednotek, mnoho vzájemných vazeb, složitý systém řízení (i se změnami v ES lze očekávat složitější systém, než je ten současný).
- Větší pravděpodobnost výpadků napájení nebo blackoutů.
- Výrazné zvýšení celkových nákladů za dodávky elektrické energie.

To vyžaduje

- Nové koncepce pro uspořádání a řízení energetických systémů, které zajistí odpovídající odolnost, spolehlivost, flexibilitu a efektivitu systému.
- Různé typy energetických systémů musí být schopny fungovat v různých měřítkách, přiměřeně místní situaci a s velkou nezávislostí.

2.5 Použitá literatura a odkazy

- [1] An official website of the European Union, https://commission.europa.eu/index_en. The European Green Deal. Online. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_cs
- [2] EUROPEAN COMMISSION. 'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, 2021.
- [3] Eurostat, Data Browser, <https://ec.europa.eu/eurostat/en/>. Environment and energy - Energy - Energy statistics - quantities - Energy statistics - quantities, annual data - Share of energy from renewable sources. 2022. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.2908/NRG_IND_REN. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/443b1751-1e2f-4f7c-ac26-244ed307cac4?lang=en>
- [4] Ember Electricity Data Explorer, ember-climate.org. Home - Data - Electricity Data Explorer. Online. Dostupné z: <https://ember-climate.org/data/data-explorer/>
- [5] VINŠ, Martin et al. Vize elektrických sítí 2050+: Trendy a scénáře výroby/spotřeby Evropy. Výzkumná zpráva. Západočeská univerzita v Plzni, Research and Innovation Centre for Electrical Engineering. 2024.
- [6] RITCHIE, Hannah et al. Our World in Data, <https://ourworldindata.org/>. 2022. Online. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy>
- [7] Our World in Data, <https://ourworldindata.org/>. Carbon intensity of electricity generation, 2000 to 2022. Online. Dostupné z: https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart®ion=Europe&country=~OWID_EUR. [Přístup získán 07 05 2023]
- [8] BURTIN, Alain; SILVA, Vera. Technical and economic analysis of the European electricity system with 60% RES. 2015.
- [9] EU-SysFlex, <https://eu-sysflex.com/>. EU-SysFlex Scenarios and Network Sensitivities. 2018. Online. Dostupné z: http://eu-sysflex.com/wp-content/uploads/2018/12/D2.2_EU-SysFlex_Scenarios_and_Network_Sensitivities_v1.pdf
- [10] Eurostat, Data Browser, <https://ec.europa.eu/eurostat/en/>. Supply, transformation and consumption of electricity. 2024. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.2908/NRG_CB_E. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/38bd1cd8-3805-440a-8236-cfea8e583a44?lang=en>
- [11] Iea, <https://www.iea.org/>. Europe – Countries & Regions. 2022. Online. Dostupné z: www.iea.org/regions/europe/emissions#how-much-co2-do-countries-in-europe-emit. [Přístup získán 22 08 2024]
- [12] BROWN, S.; JONES, D. European Electricity Review 2024: Europe's electricity transition takes crucial strides forward. London: Ember, 2024.

- [13] Capabilities and requirements definition for power electronics based technology for secure and efficient system operation and control - Reference: 821 - 2020. Dostupné z: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/821-capabilities-and-requirements-definition-for-power-electronics-based-technology-for-secure-and-efficient-system-operation-and-control.html>
- [14] GREEN, I., et al. Modelling of inverter-based generation for power system dynamic studies. 2018. Online. Dostupné z: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/727-modelling-of-inverter-based-generation-for-power-system-dynamic-studies.html>
- [15] Short-Circuit Currents - Information on short-circuit currents in SMA PV inverters, SMA Solar Technology AG, Online. Dostupné z: <https://files.sma.de/downloads/lscpv-TI-en-22.pdf>
- [16] Technical Note – Short-Circuit Currents in SolarEdge Three Phase Inverters, SolarEdge, 2021, Online. Dostupné z <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-short-circuit-currents-three-phase-inverters-tech-note.pdf>

3 Nové koncepce uspořádání a řízení energetických systémů

Snahy o zvýšenou integraci OZE a maximální využití jejich potenciálu vedly k vývoji nových koncepcí řízení a uspořádání energetických systémů. Vývoj se zatím soustřeďuje především na nižší hladiny napětí, blíže ke koncovému uživateli a decentralním zdrojům (DECE) menších výkonů, nicméně existují i koncepty zahrnující vyšší napěťové hladiny. Vychází se většinou z konceptu SmartGrids a jejich spolupráce a aplikuje se přístup bottom-up (zdola-nahoru).

Fyzická struktura energetického systému s jeho hierarchickými vrstvami (napěťovými hladinami) zůstane v budoucnosti patrně nezměněna. Problémem je koordinace vysokého počtu malých, decentralizovaných jednotek na hladinách nn a vn na jedné straně a na straně druhé větších bloků na hladinách vvn a zvn určených pro udržování výkonové rovnováhy. Pro udržení frekvenční a napěťové stability ES bude v budoucnu zapotřebí udržovat výkonovou bilanci nejen na straně zdrojů (systémové i DECE), ale i na straně spotřeby (aktivní zákazníci, elektromobily, energetická společenství). Výsledkem je složitý energetický systém s velkým počtem zúčastněných jednotek a mnoha vzájemnými vazbami. Řízení takového systému začíná být značně komplikované (v krajním případě by mohlo vést k neovladatelnosti celého systému) a náročnější na tzv. pozorovatelnost soustavy (observability). S nárůstem počtu decentralizovaných jednotek se mohou místní poměry značně lišit, může docházet k provozu distribučních sítí na hranici bezpečného provozu a k přetížením některých částí sítí, které nemusí být zachyceny. Snížení výkonových toků v síti či napříč sítěmi různých napěťových hladin může být dosaženo co nejvyrovnanější výrobou a spotřebou na lokální úrovni.

Tyto výzvy vyvolaly nutnost přehodnotit stávající koncepci energetického systému. První myšlenky se začaly objevovat zhruba před 15 lety. Rozsah navrhovaných změn se pohyboval od spíše evolučních, vyžadujících pouze minimální změny v koncepci systému, až po velmi radikální změny celé architektury systému.

Mezi „evoluční“ iniciativy lze zařadit např. tyto projekty:

- Projekt [7RP EcoGrid EU](#) (2011–2015) pracoval na vývoji a testování nového tržního konceptu umožňujícího zlepšit mechanismus výkonové rovnováhy zavedením 5minutové cenové odezvy v reálném čase, která by do regulace přímo začlenila i menších zákazníky.
- Projekt H2020 [SmartNet](#) (2015–2018) se ubíral stejným směrem a pokoušel se přehodnotit systémovou architekturu a odpovídající tržní uspořádání a zahrnout do podpůrných služeb subjekty z oblasti distribuce. V rámci tohoto projektu byl vyvinut koncept založený na koordinaci mezi TSO (provozovateli přenosové soustavy) a DSO (provozovateli distribuční soustavy). Tento projekt zkoumal implementaci trhu s flexibilitou, jehož cílem je poskytnout optimalizované nástroje a postupy pro zlepšení koordinace mezi provozovateli sítí na národní a místní úrovni (TSO a DSO). Zahrnuje také výměnu informací pro monitorování a pro získávání podpůrných služeb (rezerva a výkonová rovnováha, regulace napětí, congestion management) pomocí zařízení v distribučních sítích (flexibilní zatížení a distribuovaná výroba). V rámci projektu bylo vyvinuto a vyhodnoceno pět různých schémat koordinace. V rámci projektu vznikly tři národní pilotní projekty (Itálie, Dánsko a Španělsko).

- Projekt H2020 [Coordinet](#) (2019 - 2022) dále rozvinul přístupy pro koordinaci mezi TSO a DSO, které byly v projektu SmartNet vyvinuty a které se zaměřují na tržní řešení. Cílem projektu bylo demonstrovat různé způsoby koordinace TSO a DSO zajišťujících flexibilitu (10 pilotů v Řecku, Španělsku a Švédsku).

Radikálnější přístupy se pokoušejí změnit celkovou architekturu systému, zejména s cílem **rozdělit energetický systém do oddělených částí s různou mírou autonomie** [1]:

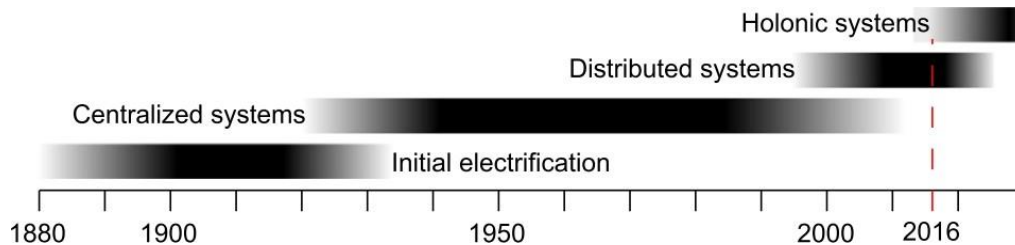
- Koncept vyvinutý v rámci dánského projektu [Cell Project](#) pod vedením Energinet.dk se zaměřil na rozdělení energetického systému do virtuálních oblastí z hlediska řízení plně autonomních, takzvaných buněk (cells).
- Rozdělením sítě na semi-autonomní jednotky se zabýval projekt H2020 [Fractal Grid](#) nebo projekt [C/Sells](#).
- Projekt [FP7 ELECTRA IRP](#) navrhnul nový způsob decentralizovaného řízení založený na buňkách pod názvem Web-of-Cells. Energetický systém je rozdělen na propojené části (buňky), které jsou schopny udržovat dohodnutou výměnu energie na svých hranicích s využitím vnitřní flexibility (flexibilita výroby/spotřeby, akumulátory). Buňka je zodpovědná za vlastní rovnováhu výkonů a řízení napětí. Provozní stav, včetně výměny energie a výkonové rezervy, lze pak průběžně optimalizovat koordinací napříč buňkami.
- Projekt [ZellNetz2050](#) rozšiřuje pojem buňky na energetickou buňku (Energy Cell), která zahrnuje nejen infrastrukturu elektrických sítí, ale může obsahovat infrastrukturu i jiných forem/nosičů energie (teplo, zemní plyn, vodík).

Koncept Web-of-Cells (WoC) a z něj odvozené koncepty vychází z rozdělení systému na dílčí buňky/subsystémy. Definice (energetické) buňky/subsystému není pevně daná, v zásadě se jedná o „nepřekrývající se topologické podmnožiny energetického systému mající odpovědnost za provoz, která nezávisí na jejich velikosti“. Architektura systému má jasně definovanou hierarchickou nebo modulární strukturu. Buňky/subsystémy mohou být plně autonomní (např. autonomní systémy vyvíjené NREL) nebo mít určitou míru autonomie (WoC, ZellNetz2050) a řídí se autonomními pravidly. Pravidla vzájemné interakce zajišťují jejich spolupráci s ostatními jednotkami v rámci celého systému (synergie), neboť autonomie propojených subsystémů bez pravidel interakce by mohla vést k chaotickému chování. Buňky/subsystémy mají sdílenou odpovědnost za řízení celého energetického systému. Při velkém počtu decentralizovaných systémů se doporučuje víceúrovňový systém řízení.

Z rozdělení systému na dílčí subsystémy (zde tzv. holony) vychází také **holonické** (někdy také holiarchické) **systémy**. I zde jsou holony nezávislými jednotkami, které mají určitý stupeň autonomie, ale zároveň jsou součástí většího celku a také podléhají kontrole z jedné nebo více vyšších úrovní. Holon může obsahovat jiné holony nebo být součástí jiných holonů. Holony, které jsou organizovány tímto způsobem, tvoří hierarchickou strukturu, tzv. holarchii. Nemusí se ale jednat o pevně danou strukturu jako v případě WoC, ale díky vlastnostem holonů se může struktura systému dynamicky měnit a přizpůsobovat se novým situacím. Může docházet k dělení (separaci na menší holony), slučování (rekombinaci za účelem vytvoření větších holonů) a ke změně přidružení (reorganizaci hierarchických závislostí) holonů. Koncept holonických systémů vyvažuje důležitost globálních a lokálních cílů [2]. Zvláštní skupinou holonických systémů jsou pak **fraktální systémy**, kdy jednotlivé části (zde tzv. fraktály) vykazují sebedobnost nebo rekurzivnost na různých úrovních granularity.

V úvahách o podobě budoucích energetických sítí se objevuje i myšlenka tzv. energetického internetu (**Energy Internet**). Jedná se o koncepci inspirovanou internetovou sítí, kde nejsou pevně definované hierarchie, ale uplatňuje se síťový přístup s „rovnými“ uzly.

Návrh architektury energetického systému je doprovázen návrhem strategie řízení i struktury trhu a nových obchodních modelů. Z prostudovaných materiálů je jasný trend evoluce centrálně řízených systémů k distribuovaným systémům. V souvislosti s tím se v literatuře často zmiňují Multi-Agent Systems (MAS).



Časová osa evoluce energetických systémů [2]

Nástin budoucí ES [3]:

- Kombinace centralizované a distribuované výroby
- Kyber-fyzikální systémy (cyber-physical systems)
- Využití flexibility napříč systémem na všech úrovních
- Provázanost s jinými energetickými systémy (plyn, vytápění, chlazení ...)
- Odklon od centralizovaného řízení k distribuovanému/decentralizovanému
- Fungování na základě přijetí principu „holarchie“.

Holistická architektura energetického systému

Holistický přístup znamená komplexní pohled na problémy a situace, který zohledňuje vzájemné vztahy a interakce mezi různými částmi systému. ETIP¹ (European Technology & Innovation Platforms) definuje holistickou architekturu takto:

Holistická architektura energetického systému je architektura, ve které jsou všechny relevantní součásti energetického systému (elektrické sítě, výrobní a akumulační zařízení, zákaznická zařízení a trh s elektřinou) sloučeny do jediné struktury. Holistická architektura sjednocuje veškeré interakce v rámci samotného energetického systému, mezi provozovateli sítě, výroby a akumulace, spotřebiteli a prosumery a trhem, čímž vytváří možnost je harmonizovat a profitovat ze synergického využití chytrých technologií [4].

Z tohoto pohledu lze řadit mezi holistické architektury nejen holistické systémy jako takové, ale i koncepci WoC či jiné koncepce (viz [4]).

¹ Evropské technologické a inovační platformy (ETIP) byly vytvořeny Evropskou komisí v rámci nového integrovaného strategického plánu energetických technologií (SET plan) spojením všech zainteresovaných a zúčastněných stran a odborníků z energetického sektoru. Úlohou ETIP Smart Networks for Energy Transition (SNET) je poskytovat rady ohledně předvídatelně důležitého výzkumu, vývoje a inovací (RD&I) na podporu evropské energetické transformace. Více se dozvíte na: <https://www.etip-snet.eu>.

KLÍČOVÁ SLOVA Z OBLASTI BUDOUCÍCH ENERGETICKÝCH SYSTÉMŮ

▪ **System of Systems (SoS) - Systém systémů**

Systém je skupina vzájemně se ovlivňujících, vzájemně propojených a vzájemně závislých složek, které tvoří komplexní a jednotný celek. Tyto nezávislé a případně distribuované systémy sdružují své zdroje dohromady a vytvářejí nový a složitější systém.

Systém systémů (SoS) je soubor více nezávislých systémů, které tvoří součást většího, složitějšího systému. Jednotlivé systémy v SoS spolupracují, aby poskytovaly funkce a výkon, které by žádný z nezávislých systémů nebo základních systémů nemohl sám o sobě dosáhnout (synergetický efekt).

▪ **Intergrid**

Hybridní kombinace střídavých a stejnosměrných architektur obsahujících ..., piko-, nano-, mikro-, ..., megasítě, které jsou dynamicky odděleny a hierarchicky propojeny, aby vytvořily novou strukturu elektrické sítě: intergrid. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2276937>

▪ **Web of Cells (WoC) concept, Cellular/Cell Power/Energy System**

Energetický systém je rozdělen na subsystémy/buňky. Subsystémy, vyznačující se určitým stupněm soběstačnosti a autonomie, mohou být hierarchicky uspořádány, tj. subsystém obsahuje další subsystémy nižší úrovně atd. Buňky/subsystémy mohou být plně autonomní nebo mít určitou míru autonomie a řídí se autonomními pravidly. Pravidla vzájemné interakce zajišťují jejich spolupráci s ostatními jednotkami v rámci celého systému. Buňky/subsystémy mají sdílenou odpovědnost za řízení celého energetického systému.

▪ **Holonic/Holarchy Power/Energy System**

Obdobně jako u konceptu Web-of-Cells, i tento koncept se vychází z rozdělení systému na dílčí subsystémy, tzv. holony. Holony jsou nezávislé jednotky, které mají určitý stupeň autonomie, ale zároveň jsou součástí většího celku a také podléhají kontrole z jedné nebo více vyšších úrovní. Holon může obsahovat jiné holony nebo být součástí jiných holonů. Holony, které jsou organizovány tímto způsobem, tvoří holarchii. Nemusí se ale jednat o pevně danou strukturu jako v případě WoC, ale díky vlastnostem holonů se může struktura systému dynamicky měnit a přizpůsobovat se novým situacím.

▪ **Fractal systems**

Zvláštní skupinou holonických systémů jsou fraktální systémy, kdy jednotlivé části (zde tzv. fraktály) vykazují sebepodobnost nebo rekurzivnost na různých úrovních granularity. Fraktální architektura systému je tvořena sobě podobnými fraktálovými objekty, které lze rozdělit na jiné fraktálové objekty mající stejnou organizační strukturu a cíle jako nadřazený fraktál. Sebepodobnost pomáhá fraktálům sledovat společné cíle, zatímco sebeorganizace umožňuje fraktálovým objektům uspořádat svou vnitřní strukturu podle svých individuálních cílů.

▪ **Multi-Agent Systems (MAS)**

Jsou zajímavým přístupem pro realizaci funkcí distribuované automatizace a řízení v komponentách inteligentního energetického systému. MAS se skládá z distribuovaných jednotek nazývaných „agenti“, přičemž každý agent řídí své vlastní činnosti. Rozhodovací proces je obvykle založen na místních znalostech (tj. stavových informacích) a informacích (tj. zprávách) přijatých od jiných agentů. Tato technologie nabízí pohodlný způsob, jak se vyrovnat s dynamikou uvnitř velkých komplexních systémů, díky čemuž je řízení systému decentralizované. Agentem je myšlena entita, jež monitoruje své okolí pomocí senzorů a

ovlivňuje jej pomocí aktuátorů. Inteligentní agenti reprezentují kybernetická zařízení, která zachycují data vysílaná ze senzorů a informují aktuátory o požadované akci.

- **Cyber-physical systems**

Kyber-fyzikální systémy jsou systémy složené z fyzických systémů (hardware), softwarových systémů a potenciálně dalších typů systémů (např. lidských systémů). Ty jsou úzce integrovány a propojeny tak, aby poskytovaly určité globální chování.

- **Energy Internet**

Jedná se o koncepci budoucích energetických sítí inspirovanou internetovou sítí, kde nejsou pevně definované hierarchie, ale uplatňuje se síťový přístup s „rovnými“ uzly. Tento koncept propojuje principy internetu a energetických sítí s cílem vytvořit inteligentní, decentralizovaný a flexibilní elektrický systém s řízením a optimalizací toku energie v reálném čase. Zdroje a spotřebitelé energie jsou připojeni k síti, kde mohou volně nakupovat a prodávat energii pomocí inteligentních systémů řízení. Tento koncept vyžaduje pokročilé digitální technologie, jako jsou chytré elektroměry, blockchain pro řízení transakcí, a pokročilé algoritmy pro optimalizaci toků energie. Každý uzel v síti funguje podobně jako uzel na internetu, kde může být výrobcem i spotřebitelem energie.

- **Blockchain-Based Energy Grids/Systems**

Energetické systémy využívající technologii blockchainu. Blockchain je rozhraní, které zajišťuje bezpečné a transparentní transakce mezi účastníky trhu (peer-to-peer), eliminující potřebu centrální autority.

- **Transactive Energy**

Transaktivní energii lze definovat jako systém ekonomických a kontrolních mechanismů, který umožňuje dynamickou rovnováhu nabídky a poptávky napříč celou elektrickou infrastrukturou s využitím hodnoty/ceny jako klíčového provozního parametru. TE systémy tak lze charakterizovat jako typ tržně orientovaného řízení. Tento koncept je založen na decentralizovaném modelu, který umožňuje jednotlivým entitám (výrobcům i spotřebitelům) vzájemně komunikovat a obchodovat s energií.

- **Sector coupling**

Jedná se o vzájemnou integraci rozdílných energetických odvětví, obvykle teplárenství, plynárenství, elektřiny a dopravy. Ve sdruženém systému jsou tyto sektory propojeny způsobem, který jim umožňuje vzájemnou výměnu energie. Hlavním cílem je efektivnější a vzájemně propojené využívání zdrojů. Sector coupling je o propojení energetického sektoru s průmyslem, dopravou a stavebnictvím a jejich společné optimalizaci.

- **Multi energy systems (MES)**

Multienergetické systémy integrují různé energetické systémy, jako je elektřina, zemní plyn a sítě dálkového vytápění a chlazení. MES mohou zahrnovat i dopravní systémy, systémy zásobování vodou, bezpečnostní sítě atd. MES představují příležitost ke zvýšení technické, ekonomické a environmentální výkonnosti oproti klasickým energetickým systémům, jejichž sektory jsou řešeny odděleně nebo nezávisle.

- **Interoperability in energy systems**

Interoperabilita je schopnost produktu nebo systému spolupracovat s jinými produkty nebo systémy za účelem sdílení zdrojů.

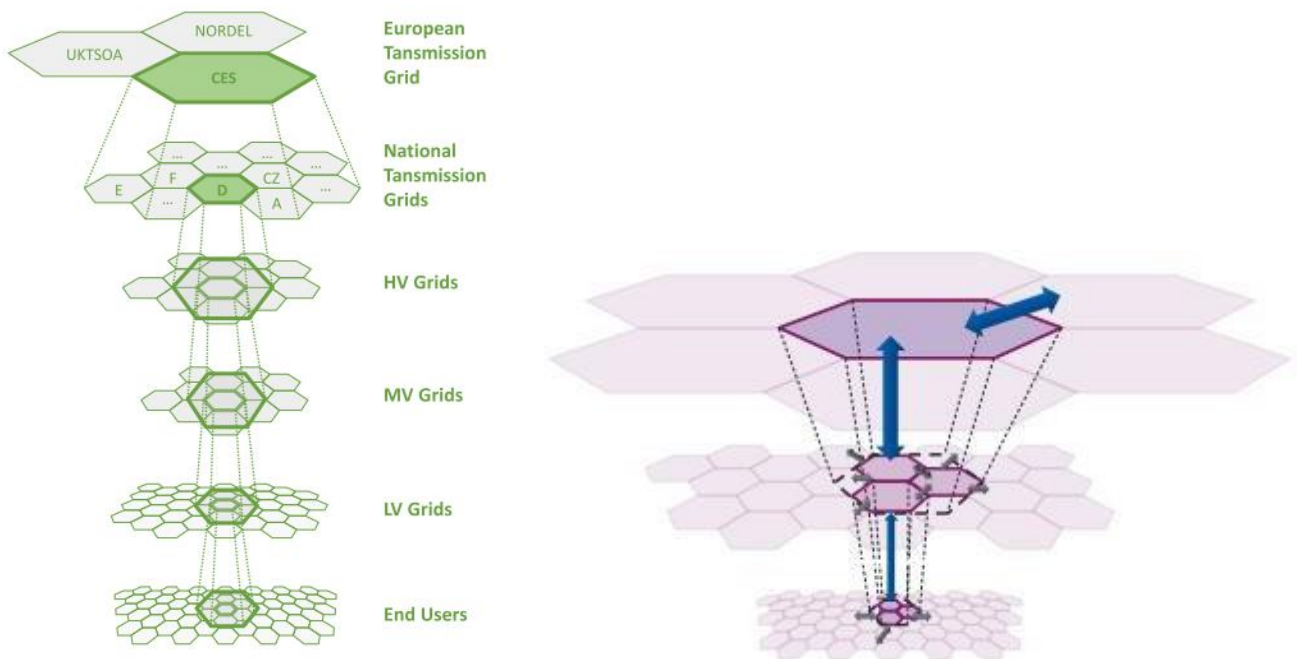
3.1 Web of Cells concept, Cellular Power/Energy Systems

Snazší a flexibilnější řízení složitých energetických systémů, s velkým počtem zúčastněných jednotek a mnoho vzájemnými vazbami, umožňuje **rozdělení energetických soustav na menší celky, tzv. subsystémy**. Myšlenka reorganizovat ES do pokud možno soběstačných a autonomních subsystémů se objevila nezávisle napříč světem a vývoji se věnuje řada předních pracovišť po celém světě, včetně našeho pracoviště. Uvažované subsystémy se mohou lišit svým vnitřním uspořádáním, mírou autonomie, složitostí vazeb mezi subsystémy, uspořádáním subsystémů do různých řídicích struktur apod.

3.1.1 Popis konceptu WoC

Jedním z konceptů rozdělení energetických soustav na menší celky, tzv. subsystémy, je **koncept Web-of-Cells** (někdy také uváděný jako Cell Power System, nebo obdoba Cluster Power System concept).

Energetický systém je rozdělen na subsystémy/buňky. Subsystémy, vyznačující se určitým stupněm soběstačnosti a autonomie, mohou být hierarchicky uspořádány (to odpovídá fyzické struktuře elektrizační soustavy s jejími hierarchickými vrstvami - napěťovými hladinami), tj. subsystém obsahuje další subsystémy nižší úrovně atd.



Hierarchická struktura ES rozdělená na subsystémy (energetické buňky) a naznačení vazeb mezi nimi, zdroj: projekt ZellNetz2050

Subsystémy (energetické buňky) mohou být různé velikosti. Velikosti energetických buněk (EC) se mohou pohybovat od jednotlivých budov nebo zařízení až po celé (síťové) oblasti. Subsystém může představovat jediného uživatele (prosumer) či mikrosíť, ale i celou zásobovací oblast (lokální distribuční soustavu). Subsystémy jsou propojeny fyzicky i virtuálně (standardizované interakce), vyměňují si mezi sebou toky energie a data. Vyvážení výroby a spotřeby probíhá na co nejlokálnější úrovni, pak teprve nastává interakce se sousední nebo nadřazenou buňkou.

Základní charakteristiky konceptu Web-of-Cells:

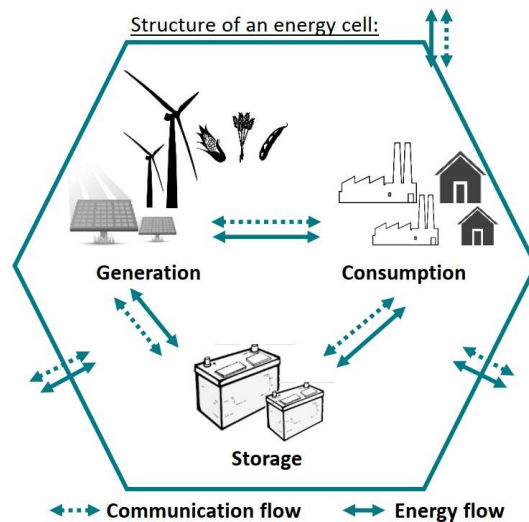
- **Decentralizace řízení:** Namísto centrálního řízení, kde jsou všechny klíčové funkce řízeny z jednoho bodu, WoC koncept navrhuje, aby byla energetická soustava rozdělena na menší "buňky" (cells), které mají schopnost řídit se samostatně, ale přesto jsou schopny spolupracovat s ostatními jednotkami v rámci celého systému. Tato spolupráce je klíčová pro zajištění stability a efektivity energetických sítí.
- **Autonomie a spolupráce mezi buňkami:** Každá buňka je schopna monitorovat a řídit lokální výkonovou rovnováhu mezi spotřebou a výrobou energie. Pokud se objeví odchylky, buňka se snaží tyto problémy vyřešit sama bez nutnosti zásahu z vyšší úrovně řízení. Snaha o řešení lokálních problémů lokálně. Přestože jsou buňky autonomní, jsou fyzicky propojené s ostatními buňkami a mohou spolupracovat na zajištění rovnováhy systému. Pokud jedna buňka nemá dostatečné výkonové rezervy, může získat podporu od sousedních buněk.
- **Flexibilita:** Buňky jsou navrženy tak, aby byly flexibilní a schopné reagovat na změny, jako jsou výkyvy ve spotřebě nebo ve výrobě energie. Tato schopnost adaptace je důležitá zejména při začleňování intermitentních zdrojů.
- **Resilience (odolnost):** Tato koncepce zvyšuje odolnosti energetických systémů. Pokud dojde k výpadku v jedné části systému, ostatní části jsou schopny pokračovat v provozu a případně i kompenzovat ztrátu.
- **Využití v energetice:** WoC je navržen především pro budoucí energetické systémy s vysokým podílem distribuovaných obnovitelných zdrojů energie. Umožňuje lepší integraci těchto zdrojů do sítě tím, že snižuje závislost na centrálních řídicích mechanismech a umožňuje efektivnější reakci na lokální výkyvy v nabídce a poptávce po energii.

3.1.2 Energetická buňka/subsystém

- Představuje určitou celistvou oblast nebo logický celek soustavy.
- Obsahuje ideálně spotřebu, výrobu a akumulaci, pro dosažení soběstačnosti a maximální flexibility (Nízká flexibilita uvnitř buňky vede k velkým přenosům výkonů mezi buňkami).
- Probíhá výměna toků energií a informací s okolím.
- Může obsahovat infrastrukturu nejen pro distribuci elektřiny, ale i jiných forem/nosičů energie (teplo, zemní plyn, vodík) - **Energetická buňka (Energy cell – EC**, viz projekt ZellNetz2050), tj. multi-energy system.
- Subsystémy mohou, ale nemusí být schopny ostrovního provozu (Nemá smysl, aby každá EC byla za každou cenu soběstačná a schopná ostrovního provozu. Je to určitá výhoda, ale mohlo by to vést ke zbytečně velkým instalovaným kapacitám ve výrobě a akumulaci, a tedy velkým investicím. Může být nakonec výhodnější „sdílení“ kapacit mezi EC) [5].
- Subsystémy jsou fyzicky propojeny se sousedními subsystémy pro zajištění výkonových

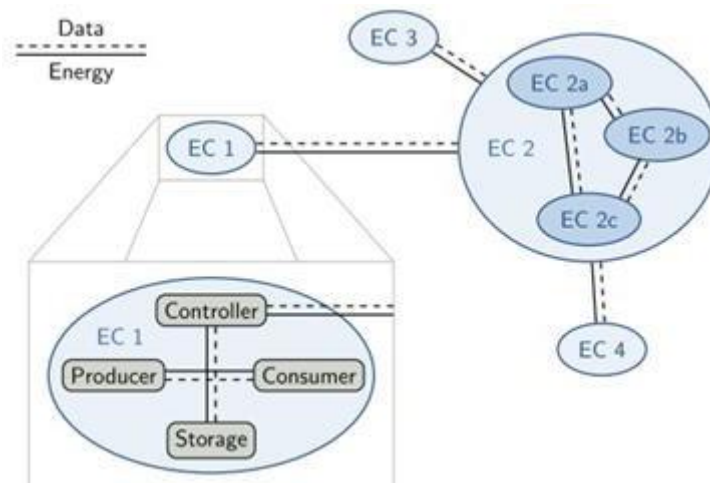
přenosů (mohou, ale nemusí být propojeny přes energy routery – opět, někde to má smysl, jinde ne).

- Subsystémy jsou interně řízeny, omezený počet zúčastněných jednotek vede k snazšímu způsobu řízení a optimalizace provozu subsystému. Subsystémy se snaží řešit místní úkoly lokálně, interagují s okolím a předávají energii, kterou není možné uvnitř subsystému spotřebovat.



Struktura energetické buňky, zdroj: projekt C/Sells

- Subsystém může obsahovat jiné subsystémy. Hierarchická vícevrstvá struktura energetických buněk se uplatní v systémech s větším počtem zúčastněných jednotek.



Příklad malé sítě tvořené energetickými buňkami s hierarchickou strukturou a naznačenými fyzickými a informačními vazbami

EC 1 představuje typickou energetickou buňku (EC), obsahující výrobu, spotřebu, a akumulaci. Všechny tyto tři složky EC jsou připojeny k řídicí jednotce, která si může vyměňovat energii a informace se sousední EC 2. EC 2 obsahuje tři další EC (nebo jinak řečeno je hierarchicky propojena se třemi dalšími EC – EC 2a, 2b a 2c) a je propojena se třemi sousedními EC na stejné úrovni (EC 1, EC 3 a EC 4).

Vazby mezi EC mohou být horizontální, ale i vertikální (to odpovídá hierarchickému uspořádání ES). Poznámka: zajištění vertikálních vazeb nemusí představovat žádný problém, neboť se vychází ze stávající topologie sítí. U horizontálních vazeb na stejné úrovni to již problém může být na vyšších napěťových hladinách, např. propojení uzlových oblastí vn či vvn doposud provozovaných samostatně; to je ale technicky řešitelný problém.

Úkolem subsystému nemusí být prvotně zajištění výkonové rovnováhy, ale například zajištění flexibility v dané oblasti k zajištění místní propustnosti sítě. Nevyužitý výkon jednoho subsystému je přenesen do sousedních na stejné úrovni, případně do subsystému vyšší úrovně (a obráceně), včetně přenosu všech informací potřebných pro provoz sítě a trhu s elektřinou. Na vyšší úrovni jsou řešeny úkoly vyžadující větší přehled o celém systému, např. zajištění rovnováhy výkonů napříč všemi subsystémy nejvyšší úrovně nebo optimalizace chodu soustavy. EC je částečně autonomní, ale může být „požádána“ vykonávat i další úkoly pro bezpečný a optimální provoz celého systému (viz projekt ZellNetz2050).

Výhody tohoto uspořádání a řízení ES

- Optimální využití portfolia a potenciálu místních zdrojů.
- Co nejvyrovnanější energetická bilance na místní úrovni → omezení výkonových toků napříč soustavou → menší nároky na případné rozšiřování a posilování sítí.
- Efektivní využití flexibility a provázanost energetických sítí (technologicky, ekonomicky, organizačně).
- Decentralizované řízení → snížení složitosti řízení celého systému → rozdělení na podružné jednotky.
- Vyšší odolnost soustavy (resilience) díky decentralizaci a místní autonomii, porucha nepostihne velký celek.
- Možná rekurzivita → architektura řídicího systému aplikovatelná na všechny úrovně EC, stejné postupy a modely.

3.1.3 Projekty a výzkumná pracoviště zabývající se konceptem WoC a celulárními sítěmi

Přístupy ke konceptu WoC se mohou v různých projektech mírně lišit, ale obecná myšlenka zůstává stejná.

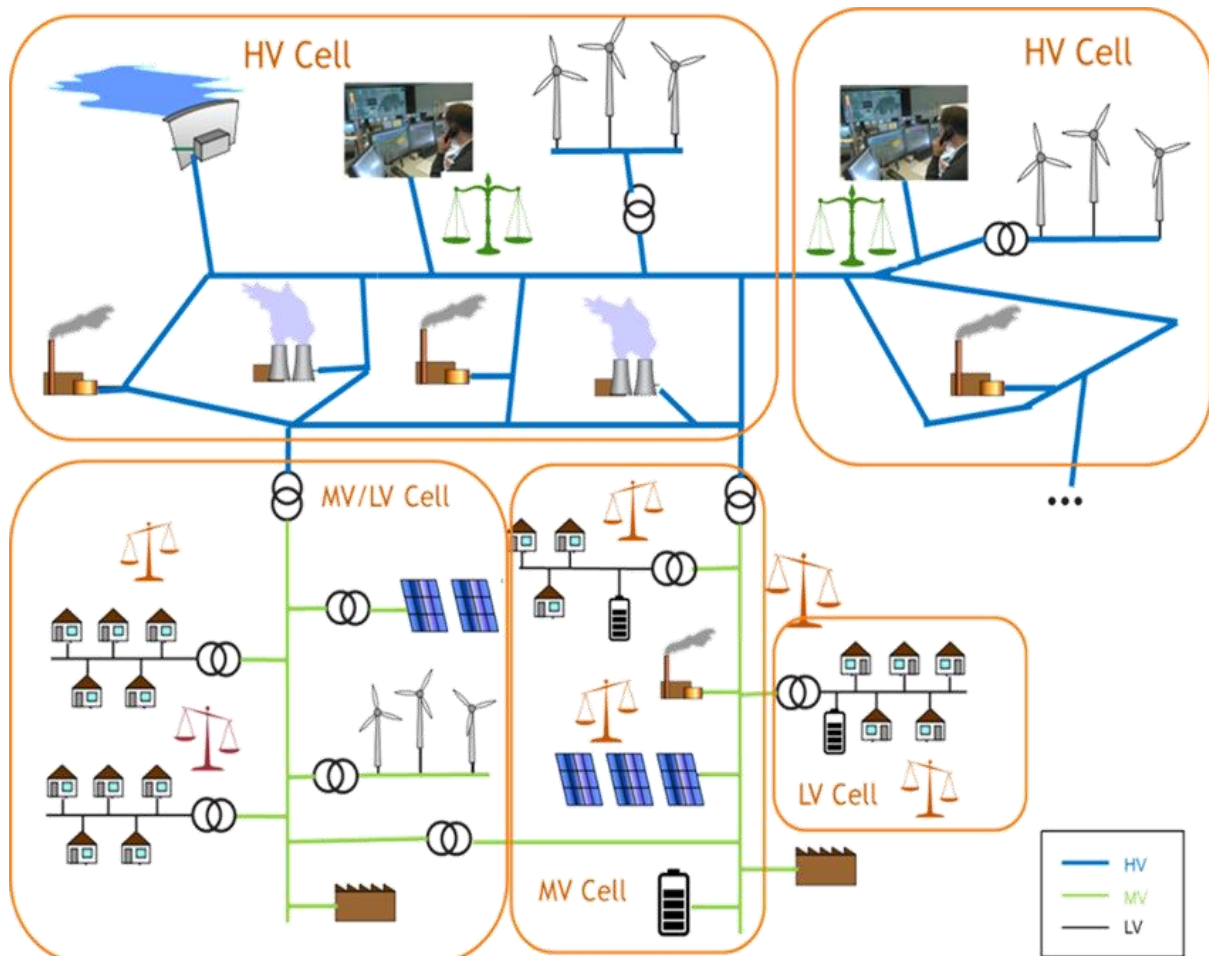
Evropský projekt ELECTRA IRP (2015 - 2018)

Web-of-Cells (WoC) je koncepce řízení, která vznikla v rámci tohoto evropského projektu zaměřeného na chytré sítě. Projekt patří mezi nejrozsáhlejší výzkumné projekty na toto téma na evropské úrovni [[ELECTRA IRP](#)]. Cílem projektu bylo vyvinout nová řešení řízení ES pro období 2035+.

WoC rozděluje síť na propojené buňky, každá buňka funguje částečně nezávisle a řídí místní výrobu a spotřebu energie. Tyto buňky jsou propojeny, což jim umožňuje vzájemně se podporovat a stabilizovat širší síť. Buňka může zahrnovat i více napěťových hladin, buňky nemusí být energeticky soběstačné.

Buňka je definována jako část energetické sítě schopná udržovat dohodnutou výměnu energie

na jejích hranicích pomocí vnitřní flexibility jakéhokoli typu dostupné z flexibilních generátorů/zátěží a/nebo akumulačních systémů. Celková míra vnitřní flexibility v každé buňce musí být alespoň taková, aby kompenzovala nejistoty výroby a spotřeby v buňce při normálním provozu.




Příklad architektury Web-of-Cell, zdroj projekt ELECTRA IRP

Projekt navrhnul nový systém distribuovaného řízení založený na rozdělení systému na buňky. Buňka je řízena dispečinkem, který přebírá odpovědnost za aktivaci výkonových rezerv v reálném čase ve své buňce (buňkách). Případné nerovnováhy jsou řešeny spoluprací buněk. Problémy s frekvencí a napětím jsou řešeny na místní úrovni, to omezuje složitost systému řízení, nejsou potřeba informace o globálním stavu systému. Jednou z klíčových inovací v projektu ELECTRA je vývoj pokročilých strategií řízení napětí a frekvence přizpůsobených této decentralizované struktuře [6] a [7]. Například strategie Post-Primary Voltage Control (PPVC) je navržena tak, aby udržela stabilitu napětí v každé buňce a zároveň minimalizovala ztráty v síti [8].

Porovnání navrženého řídicího schéma se stávajícím je uvedeno v následující tabulce.

Tabulka - Navržené řídicí schéma implementované do každé buňky, obsahující 6 high-level funkcionalit



	CURRENT	Wtb-of-Cells
BALANCE FREQUENCY CONTROL	-	Inertia Steering Control
	Frequency Containment Control (FCC)	(Adaptive) Balance Restoration Control (BRC)
	Frequency Restoration Control (FRC)	(Adaptive) Frequency Restoration Control (aFCC)
	-	-
VOLTAGE CONTROL	Primary Voltage Control	Primary Voltage Control
	Secondary Voltage Control	Post-Primary Voltage Control (PPVC)
	Tertiary Voltage Control	

V rámci projektu byl vypracován návrh konceptu trhu podpůrných služeb [9]. Koncepte WoC byla testována simulačně a laboratorně na sítích s 3 až 6 buňkami [10] a [11].

Na stránce projektu [ELECTRA IRP](#) jsou publikovány nejdůležitější výstupy projektu. Dokument [12] přehledně sumarizuje výsledky projektu.

Pracoviště podílející se na projektu:

- Transmission & Distribution Technologies Department, RSE - Ricerca sul Sistema Energetico, Milano, Italy (Luciano Martini, M. Cabiati, C. Tornelli)
- Center for Energy, AIT - Austrian Institute of Technology, Vienna, Austria (Thomas I. Strasser, Helfried Brunner)
- Energy and Environment División, TECNALIA, Derio, Spain (Emilio Rodriguez)
- Energy Department, VITO, Antwerp, Belgium (Chris Caerts)
- Electronic & Electrical Engineering Department, University of Strathclyde, Glasgow, UK (Graeme M. Burt)
- Center for Electric Power and Energy, Department of Electrical Engineering, DTU - Technical University of Denmark (Mattia Marinelli)
- Institute of Power Engineering, Gdańsk, Poland
- Institute of Physical Energetics, Smart Grid Research Centre, Riga, Latvia
- Department of Energy Systems, SINTEF Energy Research, Trondheim, Norway
- a další.

Projekt ZellNetz2050 (2019 - 2022)

Projekt financovaný německou vládou, představitel „německé“ koncepce [Zellulares Energiesystem](#) - Cellular Energy System (CES), která vychází z dokumentů VDE (Verband der Elektrotechnik - Elektrotechnická asociace) [\[13\]](#) a [\[14\]](#).

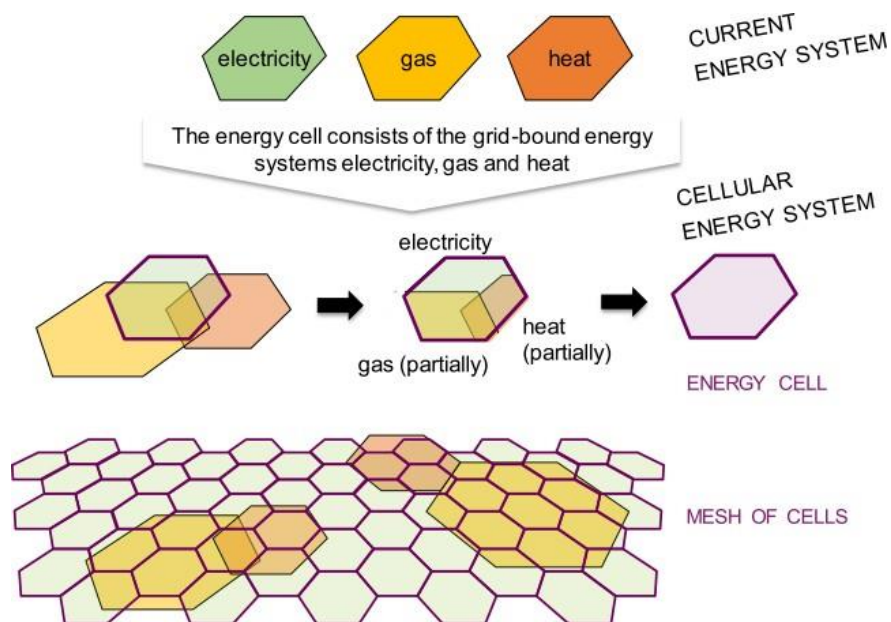
[Projekt ZellNetz2050](#) měl za cíl řešit výzvy spojené s přechodem na energetický systém se 100% podílem OZE do roku 2050. Tento projekt se zaměřil na vývoj jednoho z nejdětalnějších modelů německého energetického systému pro rok 2050, který je využíván jak v optimalizačních modelech, tak v modelech reálného provozu soustavy.

Hlavní cíle projektu:

- **Ekonomická proveditelnost a efektivita** celulárního energetického systému.
- **Návrh modelu trhu** pro integraci malých poskytovatelů flexibility.
- **Řízení a provozovatelnost** celulárního energetického systému.
- **Optimalizace využití místní flexibility** ve vztahu k přenosové kapacitě.

Klíčové výstupy projektu:

- Detailní energetický model pro Německo.
- Model celulárního energetického trhu.
- Organizační a strukturální model pro energetický systém složený z energetických buněk.
- Koncepce automatizace a komunikace, modely flexibility.
- Demonstrace systému na reálných systémech.



Vymezení energetických buněk (Energy cell), zdroj: projekt ZellNetz2050

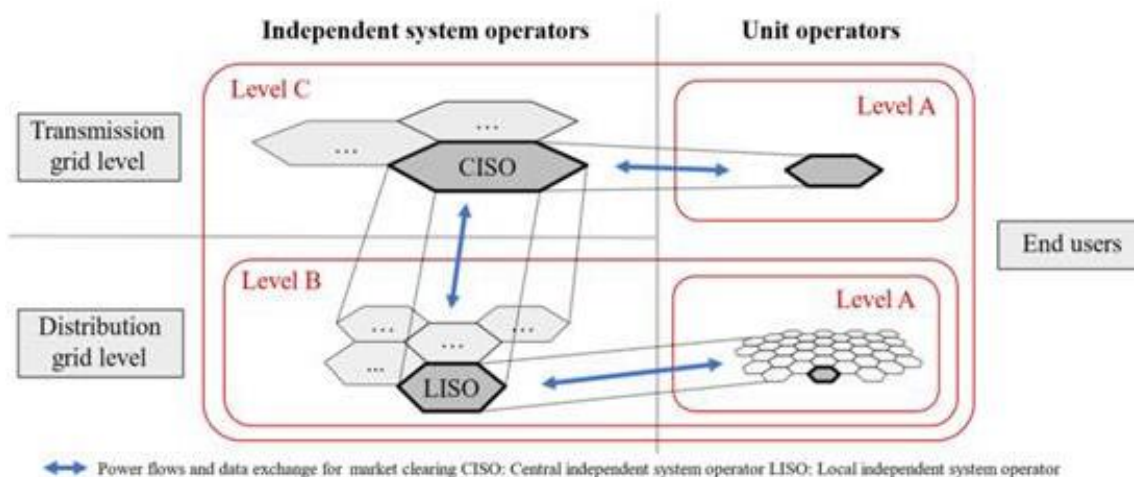
Oproti předchozímu projektu se netýká pouze elektrických sítí, ale subsystém (buňka) může obsahovat infrastrukturu i jiných forem/nosičů energie (teplo, zemní plyn, vodík) - **Energetická buňka (Energy cell – EC)**. EC se skládá z infrastruktury příslušných energetických sektorů, v nichž se vyrovnávání výroby a spotřeby napříč všemi formami energie provádí ve spolupráci se sousedními EC a je pod dohledem „energy cell managementu“. Vymezení EC odpovídá

primárně geografickému rozsahu infrastruktury na jedné hierarchické úrovni. Obvykle se rozsah infrastruktury různých energetických sektorů na jedné hierarchické úrovni neshoduje, proto se energetické buňky různých sektorů mohou na stejné úrovni překrývat (viz obrázek níže). Vymezení buňky se řídí elektrickým systémem, který je brán jako hlavní systém, protože zažívá největší volatilitu a bude k němu připojena většina OZE a zátěží.

Ve srovnání s jinými projekty se ZellNetz2050 nesnaží, aby energetické buňky byly soběstačné. Naopak, dynamický celosystémový trh se snaží snížit srovnatelně ztrátové skladování nebo přeměnu energie na minimum.

V rámci projektu byl navržen model celulárního energetického trhu. ES je uspořádána vertikálně a se skládá ze tří rozdílných úrovní energetických buněk:

- Úroveň A obsahuje všechny koncové zákazníky nezávisle na jejich velikosti a napěťové hladině, např. obytné budovy, průmyslová zařízení, elektrárny, větrné elektrárny atd.
- Úroveň B obsahuje všechny distribuční soustavy, tedy sítě nízkého a vysokého napětí v elektrické soustavě obvykle provozované radiálně
- Úroveň C obsahuje přenosové soustavy na meziregionální, národní a mezinárodní úrovni



Model celulárního energetického trhu, zdroj: projekt ZellNetz2050

EC je spravována energy cell managementem (ECM), jehož úkolem je monitorovat, řídit a regulovat technologie zásobování, jakož i toky energie a informací do, uvnitř a z EC. Rozhodovací částí ECM je systémový operátor. Na úrovni B řídí buňku lokální nezávislý provozovatel sítě (LISO) – podobá se dnešním provozovatelům distribuční soustavy, na úrovni C centrální provozovatel sítě (CISO) - provozovatelé přenosových soustav. Chování EC na dané úrovni je dáno dynamickými cenami elektřiny, které odráží aktuální výkonovou bilanci, ale berou v úvahu i potenciální přetížení sítě, což znamená, že tato metoda slouží také jako preventivní řízení přetížení (congestion management). Flexibilita se využívá pro rovnováhu celkové výroby a spotřeby, ale také pro zabránění přetížení určitých částí sítě. Počítá se také s podpůrnými službami pro vyrovnání odchylek způsobených poruchami v síti. Navrhovaný model trhu a role různých subjektů se značně liší od evropského současného stavu.

Navržený celulární systém s optimalizačním modelem byl odzkoušen na off-line simulacích pro různé scénáře a porovnán s jinými přístupy řízení. Dále byl podroben on-line simulacím v realistickém prostředí řídicího centra (pracoviště pro výcvik dispečerů).

Pracoviště podílející se na projektu:

Univerzity: University of Kaiserslautern, House of Energy Markets and Finance (Felix Flatter, Christian Trossen, Wolfram Wellssow, Sara Mohammadi)
University of Duisburg-Essen (Aiko Schinke-Nendza, Gerald Blumberg, Abuzar Khalid, Christoph Weber, Hendrik Kramer)
University of Wuppertal (Björn Uhlemeyer, Michael Becker, James Garzon-Real, Tobias Müller, Markus Zdrallek)
University of Dresden (Peter Schegner, Sasan Rasti)

Průmysloví partneři: DUtrain GmbH
PSI Software AG (Daniel MAYORGA
GONZÁLEZ) Stadtwerke Völklingen Netz
GmbH SachsenNetze GmbH

Více informací lze nalézt na [oficiálních stránkách projektu ZellNetz2050](#), kde jsou i nejvýznamnější publikace shrnující výsledky projektu.

Projekt C/Sells (2017-2020)

[C/Sells](#), který demonstruje celulární přístup na nižších hierarchických úrovních na ukázkách praktických implementací. Přes odlišnosti projektů, obecná myšlenka projektů zůstává podobná. Oblast projektu C/sells zahrnovala spolkové země Bádensko-Württembersko, Bavorsko a Hesensko. Během projektového období byla provedena různá výzkumná, demonstrační a informační opatření ve 35 demonstračních buňkách a 9 participačních buňkách (tzv. C/sells cities). Patří mezi ně vývoj, výroba a implementace hardwaru, softwaru, hodnocení implementačních standardů a také analýza právních, organizačních a ekonomických rámcových podmínek. Další informace a dokumenty vydané v rámci projektu jsou uvedeny v [\[15\]](#).

Další projekty celulárních systémů v Německu jsou uvedeny na odkaze [Zellulares Energiesystem](#). V zásadě se jedná spíše o pilotní či demonstrační projekty, které slouží k prokázání koncepce energetických buněk. Jednotlivé projekty a jejich výstupy nebyly v rámci této rešerše detailně analyzovány.

Detailnější informace o některých z těchto projektů uvádí i dokument [\[13\]](#).

Poznámka:

Bundesnetzagentur v roce 2017 kritizovala koncept celulárních energetických systémů (CES). CES nejsou organizačním modelem pro celý trh s energií a zejména elektřinou v Německu a Evropě. Bundesnetzagentur považuje rozšiřování ES za primární a dlouhodobý prostředek k odstranění úzkých míst sítě. Malá a segregovaná struktura energetických buněk znamená, že pobídky pro rozšiřování sítě jsou omezeny nebo odstraněny. To povede k omezené kapacitě vazeb mezi energetickými buňkami. Dále kompenzace odchylek mezi výrobou a spotřebou v buňce nemusí být pokryta zdroji s nejlevnějšími náklady, ale především z nejbližších zdrojů, jejichž náklady mohou být vyšší. CES mohou vést k roztříštěným a nelikvidním trhům. Bundesnetzagentur agentura hodnotí CES jako „návrat do doby před liberalizací a unbundlingem“. Oba jsou (právními) principy evropských energetických trhů [\[16\]](#).

Pracoviště zabývající se konceptem celulárních sítí

NĚMECKO

- **University of Kaiserslautern**, House of Energy Markets and Finance (Felix Flatter, Christian Trossen, Wolfram Wellssow, Sara Mohammadi)
- **University of Duisburg-Essen** (Aiko Schinke-Nendza, Gerald Blumberg, Abuzar Khalid, Christoph Weber, Hendrik Kramer)
- **University of Wuppertal** (Björn Uhlemeyer, Michael Becker, James Garzon-Real, Tobias Müller, Markus Zdrallek)

Společné publikace zabývající se celulárními sítěmi [\[17\]](#), [\[18\]](#), [\[19\]](#).

- **University of Dresden** (Peter Schegner, Sasan Rasti)
- **Universität Bayreuth**, ZET Zentrum für Energietechnik

Tato univerzita spolupracovala na projektu "Smart energy region Wunsiedel" [\[20\]](#).

- **TU Dortmund University**, Institute of Energy Systems, Energy Efficiency and Energy Economics
- **University of Bremen**, Institute for Automation Technology, (Johanna Myrzik, Holm Hinners)

Společná publikace zabývající se spoluprací TSO a DSO v rámci celulárního konceptu [\[21\]](#).

- **South Westphalia University of Applied Sciences/Division Soest** (P. Wirasanti, E. Ortjohann, A. Schmelter)

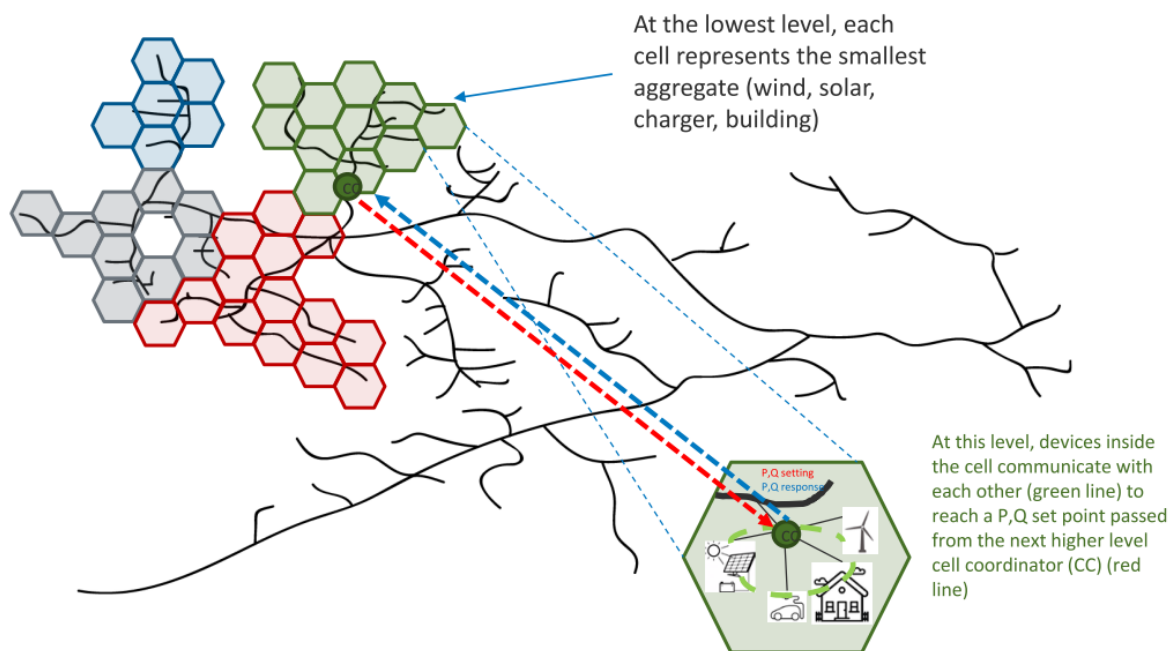
Publikace zabývající se víceúrovňovým klastrováním ES [\[22\]](#).

- **Hamburg University of Technology**

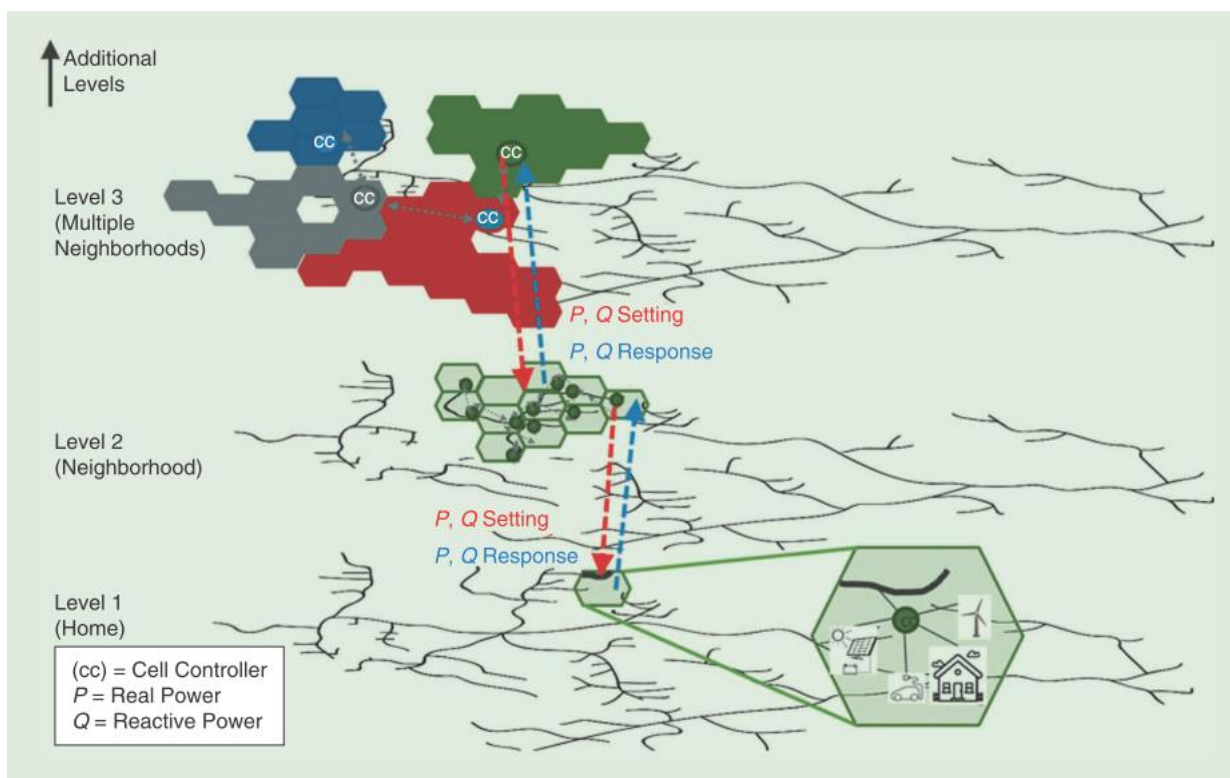
SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ (USA)

- **National Renewable Energy Laboratory, USA**

Konceptem sítí, které je možné rozdělit na subsystemy, se zabývají i v USA. Zde se jedná např. o vývoj **autonomních energetických systémů** (Autonomous Energy Systems - AES), vyvíjených National Renewable Energy Laboratory ([NREL](#)). AES je distribuovaná filozofie řízení, která sama řídí a optimalizuje všechna provozní rozhodnutí sítě v reálném čase. AES představují nový přístup k provozu energetických sítí, ve kterém je na všech úrovních dosaženo superrychlé optimalizace v reálném čase, přičemž každá využívá všech dostupných možností flexibility. Na každé úrovni je tedy výroba a spotřeba energie v každém okamžiku co nejvíce vyvážena a zbývající výměna energie je řešena další vyšší úrovní. To umožňuje místně autonomní provoz. Lokální optimalizace je v tomto přístupu dominantní a nemusí nutně vést ke globálnímu optimu. Koncept je popsán v [\[23\]](#).



Rozdělení sítě na buňky/subsystémy, zdroj: NREL



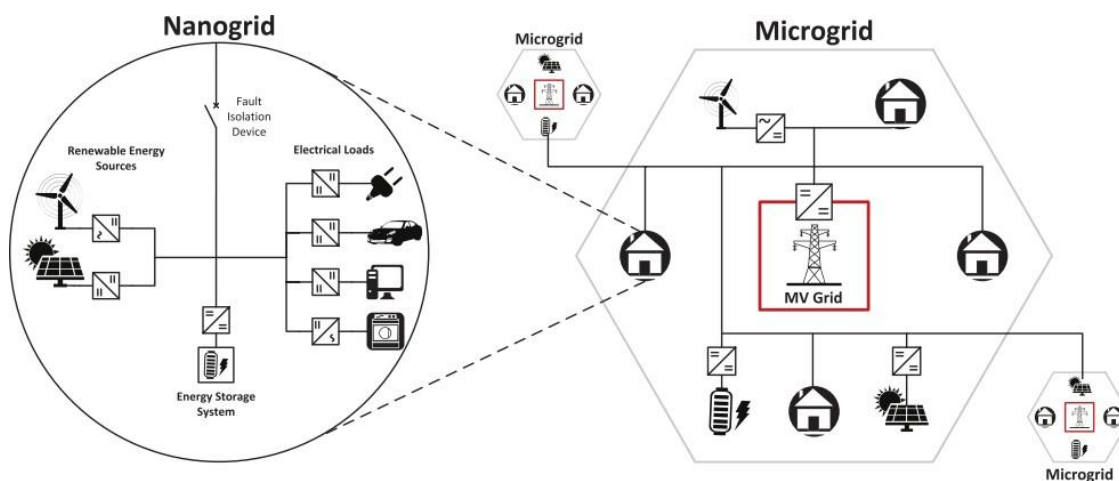
Komunikační architektura pro distribuovanou optimalizaci v reálném čase autonomních energetických sítí. [23]
Úroveň 1 by představovala dům nebo firmu, úroveň 2 čtvrtě a úroveň 3 více čtvrtí dohromady, všechny na jednom distribučním okruhu.

Nový přístup k vymezení buněk pro distribuční systémy s vysokou penetrací distribuovaných energetických zdrojů popisuje publikace [24]. Buňky jsou vymezeny tak, že každá buňka je schopna black startu po extrémní události a může pracovat nezávisle v různých scénářích extrémních událostí. Více o tomto přístupu je uvedeno v [25] nebo v [Seznam publikovaných prací na téma AES](#).

NIZOZEMSKO

▪ Delft University of Technology, Department of Electrical Sustainable Energy

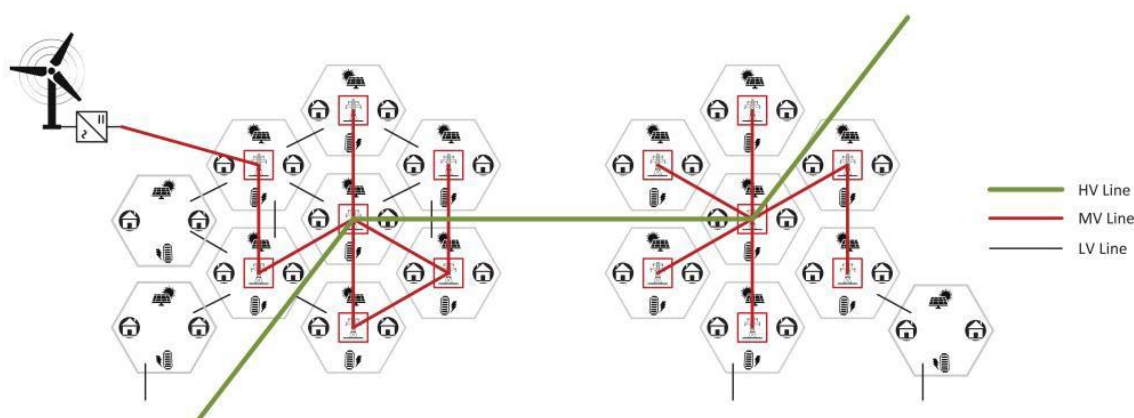
V článku [26] je představena koncepce univerzálního DC distribučního systému, schopného kompletně nahradit stávající AC distribuční systém. I zde je použita hierarchická celulární struktura sítě: nanosítě, mikrosítě, distribuční síť. Nanosítě, např. uvnitř budov, mohou být vlastněny a řízeny nezávislými subjekty. K DC distribuční síti budou připojeny přes smartmetr a ochranná zařízení nebo k AC síti pomocí AC/DC měniče. DC mikrosítě, obsahující několik nanosítí a větší distribuované zdroje, může být připojena k jiným DC mikrosítím na stejné napěťové hladině a/nebo k síti vyššího napětí. Mikrosítě mohou fungovat i zcela nezávisle.



Vpravo: DC mikrosítě propojující čtvrť s několika stejnosměrnými nanosítěmi uvnitř budov a některými většími distribuovanými energetickými zdroji. DC mikrosítě může být připojena k jiným DC mikrosítím na stejné napěťové úrovni a/nebo k nadřazené síti vn zobrazené uprostřed mikrosítě.

Vlevo je detailně zobrazena DC nanosítě budovy s různými energetickými zdroji. Zařízení pro izolaci poruch ji může odpojit od mikrosítě.

DC mikrosítě, které jsou vzájemně přímo propojeny (černé), tvoří síť. Navíc většinu těchto mikrosítí propojuje ještě stejnosměrná síť VN (červená). Do sítě VN mohou být připojeny další zdroje velkého výkonu. Zeleně je znázorněn napájecí systém VVN.



Vzájemné propojení DC mikrosítí, včetně hlavního napájecího systému

▪ Eindhoven University of Technology (TU/e)

TU/e se zabývá výzkumem budoucích energetických sítí a s tím spojených oblastí. Následující odkazy odkazují na webové stránky popisující oblasti výzkumu, výzkumné skupiny či

laboratoře.

[Future of energy systems](#) - [Intelligent of energy systems](#), [Power conversion](#)

[Electrical Energy Systems laboratory](#) - Smart Grid laboratory

[Modeling of dynamic networks](#)

[Process control of energy systems](#), [Cyber-physical systems](#)

- **TNO (<https://www.tno.nl>)**

TNO (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek) je nizozemská organizace pro aplikovaný vědecký výzkum. TNO patří mezi průkopníky v oblasti výzkumu a vývoje zejména v kontextu nizozemské energetické transformace a smart grid technologií.

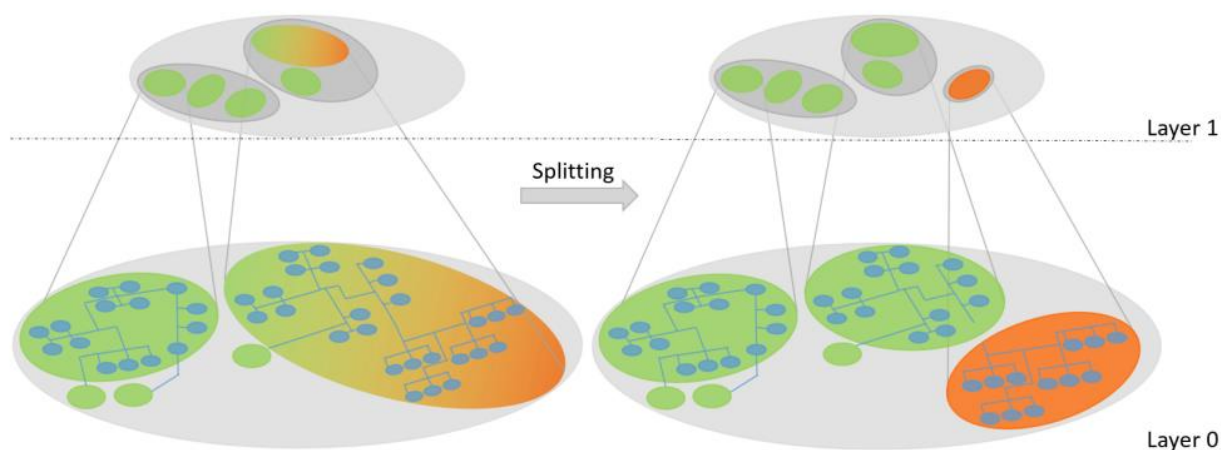
- **Flexiblepower Alliance Network (FAN)**

Tato organizace se zaměřuje na podporu flexibilního řízení spotřeby a výroby energie prostřednictvím decentralizovaných energetických systémů. FAN spolupracuje s dalšími partnery na vývoji technologií a standardů, které podporují nové koncepty energetických systémů.

3.2 Holonické (Holarchické) energetické systémy

Obdobně jako u konceptu Web-of-Cells, i tento koncept se vychází z rozdělení systému na dílčí subsystémy, zde tzv. holony. **Holony** jsou nezávislé jednotky, které mají určitý stupeň autonomie, ale zároveň jsou součástí většího celku a také podléhají kontrole z jedné nebo více vyšších úrovní. Holon může obsahovat jiné holony nebo být součástí jiných holonů. Holony, které jsou organizovány tímto způsobem, tvoří holarchii.

Nejedná se ale o pevně danou strukturu jako v případě WoC, ale díky vlastnostem holonů se může struktura systému dynamicky měnit a přizpůsobovat se novým situacím. Může docházet k dělení (separaci na menší holony), slučování (rekombinaci za účelem vytvoření větších holonů) a ke změně přidružení (reorganizaci hierarchických závislostí) holonů. Obrázek ukazuje holarchii, která používá operaci dělení k oddělení postižené části sítě.



Konceptní znázornění operace dělení ve dvourstvé holarchii. Zdroj [27]

Holonický systém lze považovat za vyvíjející se samoorganizující se disipativní strukturu, která se skládá z jiných holonů majících podobné možnosti. Holon je entita, která současně představuje celé řešení, ale lze jej považovat i za součást nadřazeného řešení. Vlastností těchto systémů je rekurzivita.

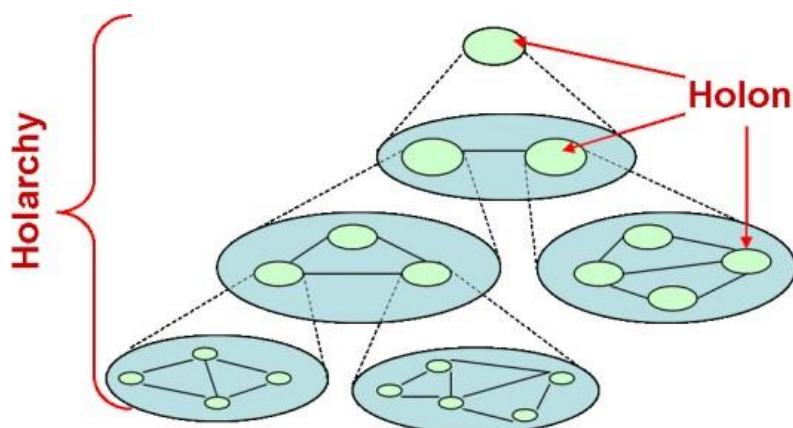
3.2.1 Holony a holarchie

Koncept holonů poprvé představil Koestler v roce 1967. Slovo holon je kombinací řeckého slova holos = celek a přípony on = část.

Holon představuje entitu, která je zároveň součástí větší entity a sama je celou entitou. Z toho vzniká rekurzivní systémová struktura, ve které jsou holony organizovány ve vrstvách. Holony mohou zahrnovat menší holony na nižších vrstvách a mohou být součástí větších holonů na vyšších vrstvách. Holony, které jsou organizovány tímto způsobem, tvoří holarchie.

Holarchie je systémový model založený na „holonech“.

Holony jsou nezávislé jednotky, které mají určitý stupeň autonomie, ale zároveň jsou součástí většího celku a také podléhají kontrole z jedné nebo více vyšších úrovní. Holon může obsahovat jiné holony nebo být součástí jiných holonů. Holon lze tedy chápat jako systém skládající se ze subsystémů a zároveň je součástí nějakého většího celku. Základními vlastnostmi holonů jsou: **autonomie, spolupráce, sebeorganizace, rekonfigurovatelnost, funkční dekompozice, rekurzivita.**

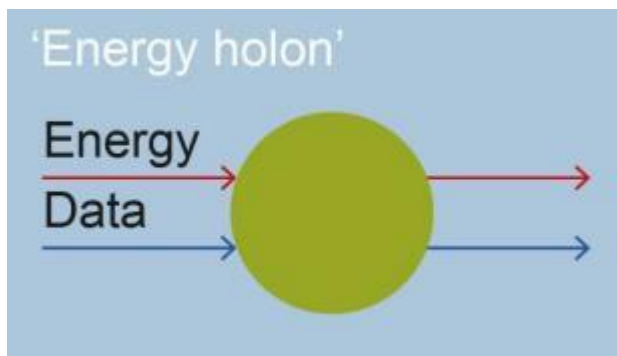


Holarchie – organizace holonů, zdroj TU Delf, [28]

Tyto jedinečné vlastnosti mohou být využity při řízení energetických sítí. Schopnost holonu jednat autonomně spojená s jeho schopností „udržovat se“, mu umožňuje zachovat si „svůj účel“, i když se problémy objeví ve vyšších vrstvách holarchie. Například selhání komunikace z vyšších vrstev holarchie může být kompenzováno tím, že jednotlivé holony v nižších vrstvách budou provozovány podle svých vnitřních cílů, např. udržování nouzového zásobování energií. Rekurzivní struktura holarchií pak umožňuje začlenění hierarchických a distribuovaných systémů [28].

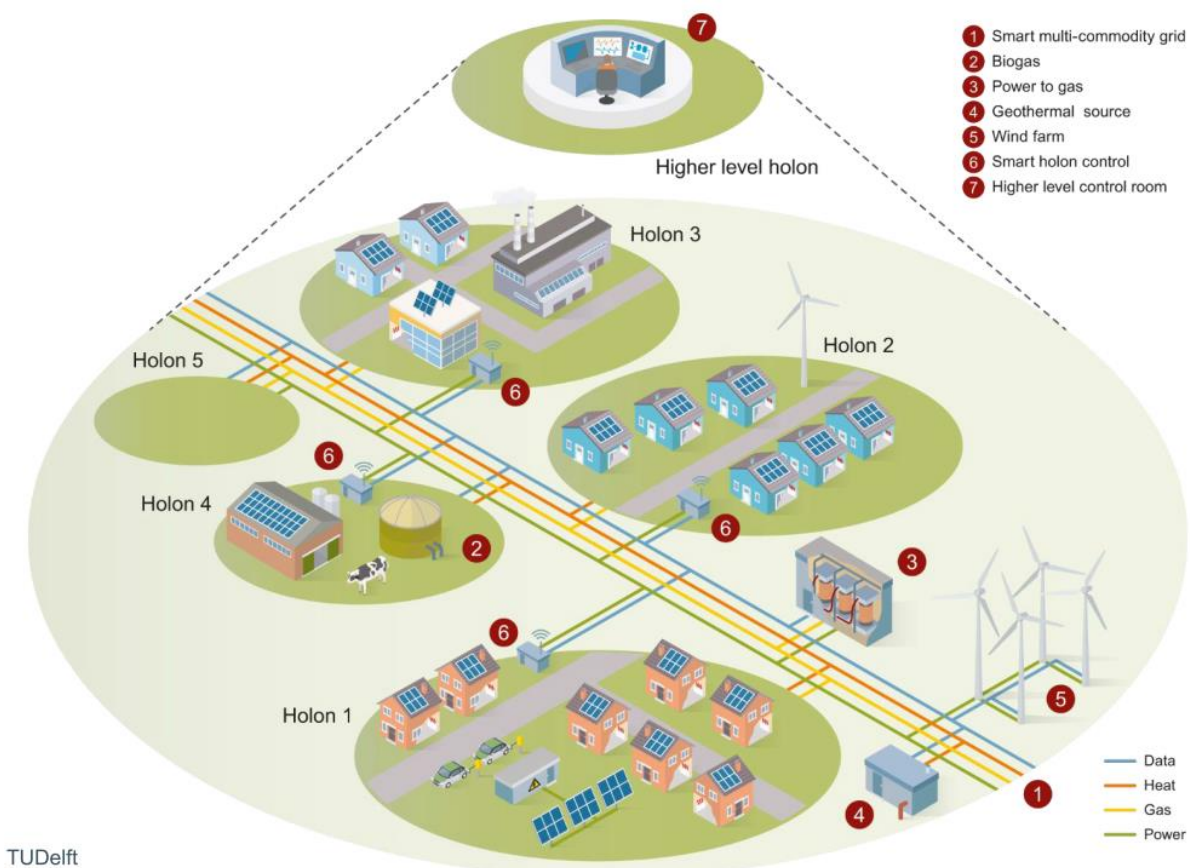
Energetické holony (oblasti/subsystémy) si s okolními holony vyměňují energii a data. Energetický holon funguje, pokud je to možné, zcela nezávisle. Někdy je nutná spolupráce, která může probíhat s holony na stejné úrovni či s nadřazeným holonem, jehož je daný holon součástí. To například může záviset na aktuální nabídce a poptávce po energii. V rámci holarchie již tok energie nemá pevně danou cestu. Data vyměňovaná mezi holony využívá inteligentní operační systém, který zajišťuje fungování holarchie v rámci zavedených dohod.

S tímto inteligentním řízením lze energetický systém přizpůsobit možnostem a potřebám, jako je dostupná flexibilita, potřeba výkonové rovnováhy nebo předcházení přetížení. Tato metoda může být aplikována v místním, regionálním i celonárodním měřítku.



Holonický systémový přístup se hodí k řízení energetických systémů, neboť mají hierarchickou strukturu, přičemž komponenty systému tvoří síť, které zase tvoří část větší sítě atd.

Ukázka holarchického energetického systému je na následujícím obrázku (zdroj: TU Delft).



Obrázek: Vizualizace fungování holarchického energetického systému, [3],[29] a [30]

- 1 Inteligentní multikomoditní síť (modrá čára: data, oranžová čára: teplo, žlutá čára: plyn, zelená čára: elektřina)
- 2 Bioplyn
- 3 Energie na plyn
- 4 Geotermální zdroj
- 5 Větrná farma
- 6 Inteligentní řízení holonů
- 7 Kogenerace

Holon 1 je „plně elektrická“ čtvrť s domy produkujícími energii, elektromobily a společnou baterií. Tento holon si může z velké části zajistit vlastní dodávku energie.

Holon 2 je typická městská čtvrť, která si může částečně uspokojit své potřeby, ale bude pravidelně využívat zásoby z jiných holonů.

Holon 3 je holon v průmyslovém prostředí, využívající zbytkové teplo a kogeneraci.

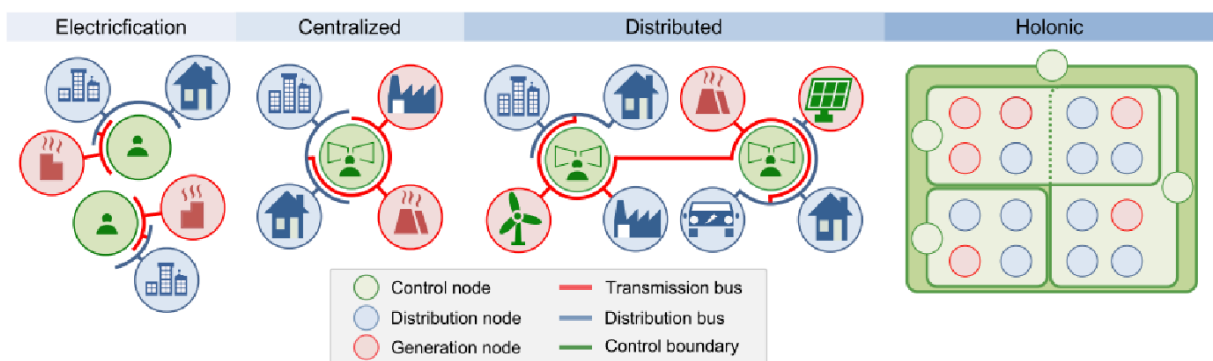
Holon 4 ukazuje příklad ve venkovské oblasti s bioplynem jako důležitým zdrojem energie v kombinaci se solární energií.

Všechny tyto holony jsou propojeny s „multikomoditní“ sítí elektřiny, plynu a tepla a dat, včetně zařízení, pomocí kterých lze uchovávat a přeměňovat různé nosiče energie.

Výhody holarchického uspořádání a řízení ES

- Hierarchická a integrovaná struktura, přičemž každá jednotka (holon) funguje jako část a celek v rámci většího systému.
- Komplexní přístup k řízení energetické sítě, celý systém je považován za jednotný celek.
- Optimalizace celého systému jako celku.
- Adaptabilní systém, hierarchická koordinace.
- Rekurzivita → architektura řídicího systému aplikovatelná na všechny úrovně holonů, stejné postupy a modely.
- Dynamická rekonfigurace topologie řízení.
- Holistický koncept trhu (Trh funguje v podstatě jako rámec vyrovnávacího mechanismu mezi jednotlivými buňkami, ne na úrovni soustavy jako takové, s tím také souvisí zmenšování obchodních celků).

Z hlediska řízení ES by holonické systémy měly představovat novou generaci řízení [2].



Description of the generations of energy system.

Generation	Description	Reasons For Emergence
2 – Centralized systems	Electricity is produced at large power stations and transmitted at high voltage to distant loads, with increasing renewable contribution in recent years	Economies of scale enabled the production of low cost energy from abundant natural resources. National grids also aided state regulation and improved quality of service
3 – Distributed systems	DERs begin to penetrate the energy landscape, causing integration challenges and opportunities, which are gradually overcome. DERs are sparsely populated so generally exist within isolated systems	Pressure towards sustainability & resilience, alongside advancing technologies, increased the attractiveness of DG, PEVs, MESS and DSM. Various international events and policies spurred investments and research towards their integration in the centralized grid
4 – Holonic systems	DERs densely penetrate the energy landscape to form a system of systems. ICT is used to dynamically reconfigure and interoperate proximal entities	Increasingly dense DER penetration alongside ICT advances and continuing pressures will mandate DER interoperation towards further sustainability, resilience and prosperity in energy systems

Evolve energetických systémů – 4 generace a jejich popis [2]

Výzkum holonických energetických systémů je na samém počátku svého vývoje. V literatuře se téma holonických systémů a holonického přístupu k řízení sítí objevovat na začátku dvacátých let 21. století. Existuje několik příkladů implementace [2], které dokazují jejich potenciál.

Oblasti vývoje holarchických energetických systémů [29] :

- Flexibilita, systémy přeměny a skladování energie a zařízení pro reakci na poptávku (různé výkony a energie, různé aplikace)
- Zvýšení výtěžnosti udržitelných zdrojů
- Digitalizace, chytrý hardware, systémy správy dat, kybernetická bezpečnost
- Rozvoj odpovídajících systémů řízení a kontroly, řídicí centra, vývoj řídicích algoritmů, využití umělé inteligence
- Nové obchodní modely, například založené na konceptech **transaktivní energie**, které jsou schopny zajistit efektivní fungování tohoto holarchického systému, např. [31].

Článek [2] uvádí tyto klíčové směry výzkumu pro zajištění vývoje holonických energetických systémů: i) sémantická interoperabilita energetických systémů, ii) bezpečné a spolehlivé multiagentní energetické služby, a iii) optimalizace energetického systému systémů (energy system of systems optimization).

Vývoj a použití holarchických systémů lze očekávat zejména na místní a regionální úrovni, kde na nižších napěťových hladinách bude soustředěna decentralizovaná výroba a případně i malí aktivní zákazníci. Díky hierarchické struktuře nadřazených a pořízených holonů je takto uspořádaný systém vhodný na radiálně provozované sítě (nn a vn) [32].

Holonický i celulární přístup jsou pouze strukturální popisy, které vyžadují další technická řešení pro algoritmy a komunikační, datové a výpočetní infrastruktury.

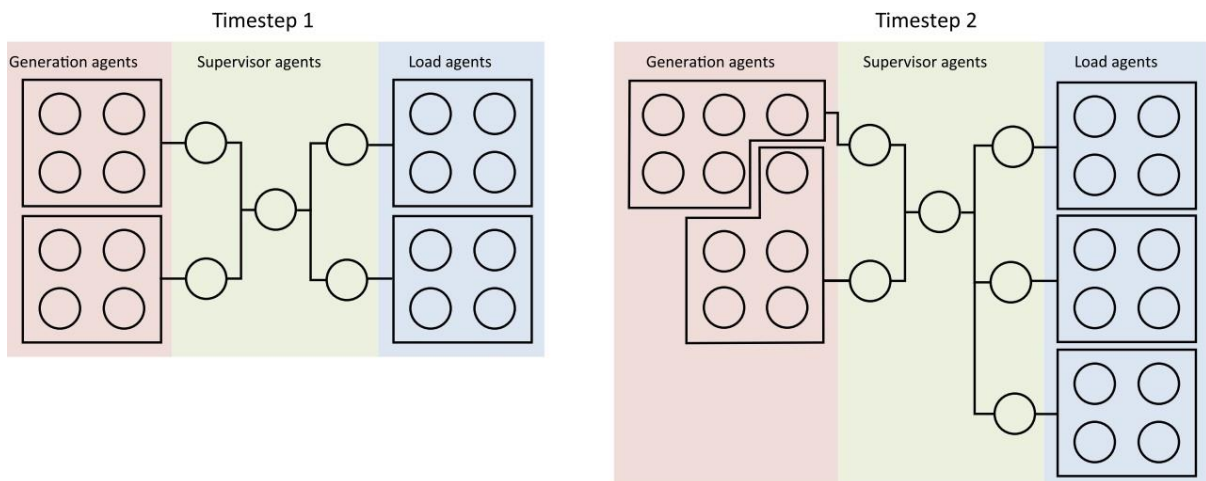
3.2.2 Holonický multiagentní systém

Organizace holonů (holon může být složen ze sub-holonů, tyto sub-holony interagují, aby vytvořily chování, které charakterizuje jejich super-holon) je podobná multiagentním systémům (MAS). [32] ale uvádí, že v případě holonické koncepce (nebo holarchie) se jedná system of systems, tudíž je koncepčně velmi odlišný od MAS.

Použitím holonického systému v rámci multiagentního systému vznikne holonic multiagentní systém (HMAS) [33].

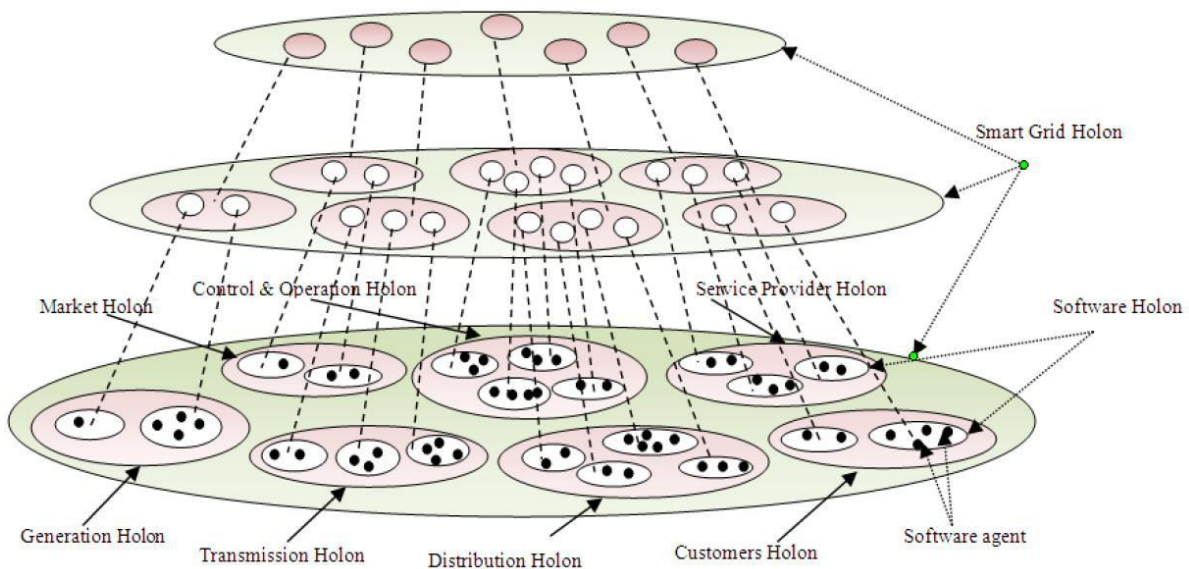
HMAS se liší od konvenčního MAS, protože rámec spolupráce, soutěže, dohledu a vztahů částek jsou dynamické a flexibilní, aby vyvážily potřeby holonů a subholonů [2].

V rámci HMAS je energetický systém řízen tak, že jeho jednotlivé komponenty jsou reprezentovány holonovými agenty (holonic-agents) a dynamicky se seskupují v hierarchii dozoru (supervision). To umožňuje flexibilitu a škálovatelnost v prostředí, kde se kombinace aktivních komponent rychle a významně mění, a zároveň je vyžadovaná jejich spolupráce (např. síť s vysokou penetrací DER). To je znázorněno na následujícím obrázku.



Příklad škálovatelné adaptability prostřednictvím holonických multiagentních systémů. [2]

Následující obrázek ukazuje využití HMAS v chytrých sítích [34]. Holon Smart Grid ilustruje provázanost fyzikálních a softwarových systémů. Smart Grid představuje holon, který se skládá z několika sub-holonů, tzv. doménových holonů (výroba, přenos, distribuce, řízení a provoz, trh, zákazníci...). V každém doménovém holonu je vytvořen softwarový holon, který se skládá z několika softwarových agentů stejného typu, nebo pouze z jednoho softwarového agenta. Softwaroví agenti jsou rozptýleni v různých oblastech domény, např. softwarový holon DMS (distribution management system) v distribučním holonu se sestává ze softwarových agentů DMS, kteří jsou distribuováni v distribuční doméně. Pro výměnu dat v chytré síti je tedy nutné využít robustní IT strukturu.



Holarchie pro IT strukturu chytré sítě [34]

Příklady využití HMAS pro řízení chytrých sítí, systému výroby a distribuce tepla nebo řízení jalového výkonu: [35], [36] a [37].

Článek [32] zkoumá holonické struktury z různých perspektiv, jako je řízení a automatizace, *Digital Twins*, stejně jako odpovídající ICT infrastruktura a požadavky na data.

3.2.3 Pracoviště zabývající se koncepcí holonických systémů

- **Delft University of Technology (Nizozemsko)**

Specializace: Holonic Power Systems a Smart Grids

Technická univerzita v Delftu (TU Delft) je jedním z předních světových center pro výzkum v oblasti inteligentních sítí a decentralizovaných energetických systémů. Výzkum zahrnuje holonické architektury, které podporují autonomii a dynamickou rekonfiguraci sítí, přičemž se prosumers (výrobci-spotřebitelé) podílejí na řízení energetických toků. TU Delft se zaměřuje na hierarchické struktury inteligentních sítí, kde jsou prosumers organizováni do systémů systémů (System of Systems) na různých úrovních agregace.

[Department of Electrical Sustainable Energy](#), výzkumná skupina [Intelligent Electrical Power Grids](#) (IEPG) ([Peter Palensky](#))

Webinar: The [Power Web Institute](#) in TU Delft, integrated and intelligent energy systems
<https://www.youtube.com/watch?v=BkUfHWhoH2I>

řešené projekty: čas 21:30 až 1:11:30

Vybrané publikace na téma holonické systémy: [\[28\]](#), [\[38\]](#)

- **Technical University of Darmstadt (Německo)**

Department of Computer Science, [Telecooperation Lab](#) (Max Mühlhäuser)

Článek [\[39\]](#) představuje **nástroj HOLEG**, open source časově diskretní simulační software pro zjednodušené energetické sítě založené na konceptu holonů. HOLEG byl využitý např. v tomto článku [\[27\]](#), [\[41\]](#).

- **Fortiss GmbH (Německo)**

Research Institute of the Free State of Bavaria for software-intensive systems

<https://www.fortiss.org/en/>

Fortiss je německý výzkumný institut, který se zaměřuje na informační a komunikační technologie (ICT). Jeho hlavním zaměřením je aplikovaný výzkum a vývoj softwarových a systémových řešení pro průmysl a veřejný sektor. Institut sídlí v Mnichově a úzce spolupracuje s Technickou univerzitou v Mnichově (TUM).

Publikace se zabývá holonickou architekturou pro řízení energie v mutli energy systémech v městských oblastech [\[42\]](#).

Další publikace týkající se Holonic Power Systems [\[43\]](#), [\[44\]](#), [\[45\]](#), [\[46\]](#), [\[47\]](#), [\[48\]](#) a [\[49\]](#).

3.3 Fraktální systémy

Fraktální systémy jsou založené na opakování stejného vzoru na různých úrovních. Setkáme se s nimi v přírodě, např. struktura brokolice (drobného růžičky brokolice odráží tvar celé stopky), každá část je zmenšenou kopií celého útvaru. **Fraktály** (název pochází z latiny, *fractus* = rozbitý a vymyslel ho matematik Benoit Mandelbrot v roce 1975) označují vzory, které vykazují **sebepodobnost** nebo **rekurzivnost** v různých měřících. Fraktální struktury jsou tedy charakterizovány sebepodobností, každá část může být považována za celý systém na své vlastní úrovni. Kromě toho jsou fraktální systémy typicky spojeny s odolností díky své sobě podobné struktuře a schopnosti chovat se nezávisle na každé úrovni granularity.

Fraktální architektura systému je tvořena sobě podobnými fraktálové objekty, které lze rozdělit na jiné fraktálové objekty mající stejnou organizační strukturu a cíle jako nadřazený fraktál. Sebepodobnost pomáhá fraktálům sledovat společné cíle, zatímco sebeorganizace umožňuje fraktálovým objektům uspořádat svou vnitřní strukturu podle svých individuálních cílů. Podobně jako u holonických systémů jsou opět klíčovými atributy autonomie, v tomto případě vyjádřená sebeorganizací, a spolupráce, vyjádřená sebepodobností [40].

Někteří autoři se domnívají, že neexistují žádné rozdíly mezi fraktálovými systémy a holonickými systémy. Toto tvrzení vychází ze dvou hlavních charakteristik obou systémů: sebepodobnosti a sebeorganizace. Fraktální holarchie jsou speciální formy vícevrstevných modulárních holarchií [44]. V této zprávě ale fraktální systémy uvádíme samostatně.

Budoucí energetické systémy budou organizovány podle fraktálových principů a budou se sestávat z rekurzivního seskupování inteligentních budov, mikrosít, chytrých měst, distribučních sítí atd. Využití se nabízí především v architektuře chytrých sítí, složených ze sobě podobných mikrosítí.

3.3.1 Pracoviště zabývající se fraktální architekturou energetických systémů

- **Projekt Fractal Grid, Francie (2016 – 2019)**

Alternativní koncept k WoC byl vyvíjen v rámci francouzského projektu [Fractal Grid](#). Cílem projektu bylo navrhnout novou architekturu určenou pro smart sítě, založenou na fraktálnosti, nebo navrhnout postupy pro rozšíření stávajících sítí na základě fraktálové koncepce. Projekt se zaměřil na vývoj nových metod pro řízení a optimalizaci elektrických sítí pomocí pokročilých matematických modelů a algoritmů. Jeho cílem bylo vytvořit flexibilnější, efektivnější a udržitelnější energetické sítě, které by lépe zvládaly integraci obnovitelných zdrojů energie. Prvotně se zaměřil na distribuční systémy pokrývající meziměstská (venkovská) nebo vnitroměstská území. Praktickým výsledkem je návrh překonfigurovat elektrickou síť Grenoble na fraktální síť, která by umožnila provoz území jako celku, tak i vznik klastrů (částí sítí). V klastrech je možná lokální výměna energie, například mezi uživateli ze stejné čtvrti, kteří mají jak fotovoltaické panely, tak akumulární zařízení (baterie elektromobilů).

Pracoviště podílející se na projektu:

MINES ParisTech, PSL-Research University, PERSEE, France

LMI - INSA Rouen Laboratoire de Mathématiques de l'INSA de Rouen

ThéMA - UFC Théoriser et Modéliser pour Aménager

G2Elab - UJF Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (Nicolas Retière – koordinátor projektu)

Dostupné publikace: [\[1\]](#), [\[50\]](#) a [\[51\]](#).

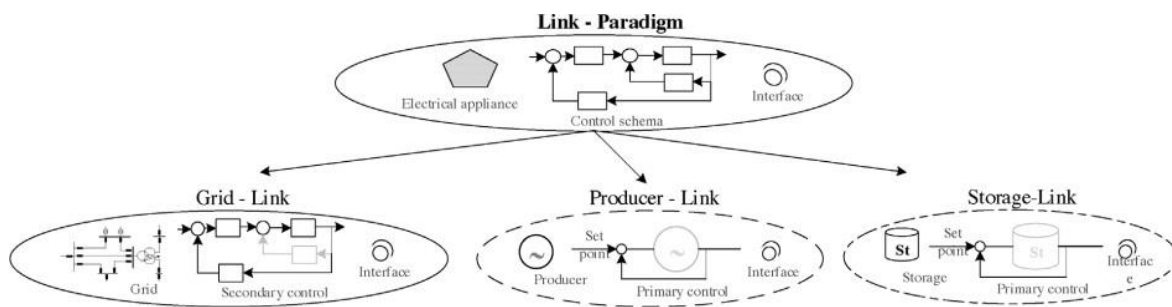
- TU Wien, Rakousko

[Institute for Energy Systems and Electrical Drives, Energy System of Systems](#) (Albana Ilo)

Toto pracoviště se využitím fraktálnosti ES intenzivně zabývá a na toto téma intenzivně publikuje a spolupracuje na projektech.

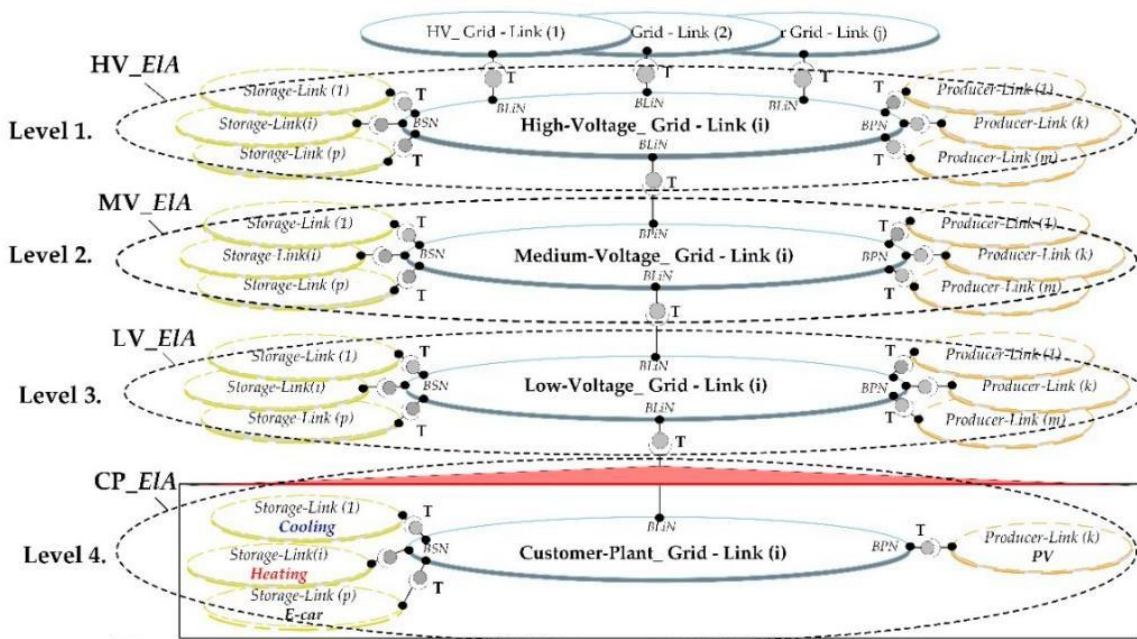
Projekt SmaGPa (2014 –2018)

Cílem projektu bylo nalezení architektonického paradigmatu chytrých sítí s jedinečnými a nezávislými prvky a návrh architektury chytrých sítí a odpovídající tržní struktury. Byla navržena holistická architekturu systému, založenou na tzv. LINKs, která reflektuje principy fraktálu. Celá elektrická síť a zákaznická zařízení jsou prezentovány pouze prostřednictvím jedné hlavní, standardizované součásti: Link. Link představuje množinu jednoho nebo více elektrických zařízení (část sítě, výrobní nebo akumulční zařízení), řídicí schéma a interface.



Příklady standardizované součásti LINK

Distribuovaná architektura snižuje na minimum počet vyměňovaných dat a umožňuje bezpečný, spolehlivý a udržitelný provoz v normálních i nouzových případech. Tato holistická architektura bere v úvahu celý energetický systém od velmi vysokého, vysokého a nízkého napětí, včetně zařízení na straně zákazníků (včetně energetických komunit).



Technická architektura

Na obrázku je znázorněné propojení částí: sítí, zákaznických zařízení, výrobních a akumulčních zařízení (T - technická rozhraní, M - tržní rozhraní).

Představení projektu a jeho výsledků je na webových stránkách

<https://www.powersys-link.com/>

Vybrané publikace představující LINK koncept: [52], [53], [54] a [55].

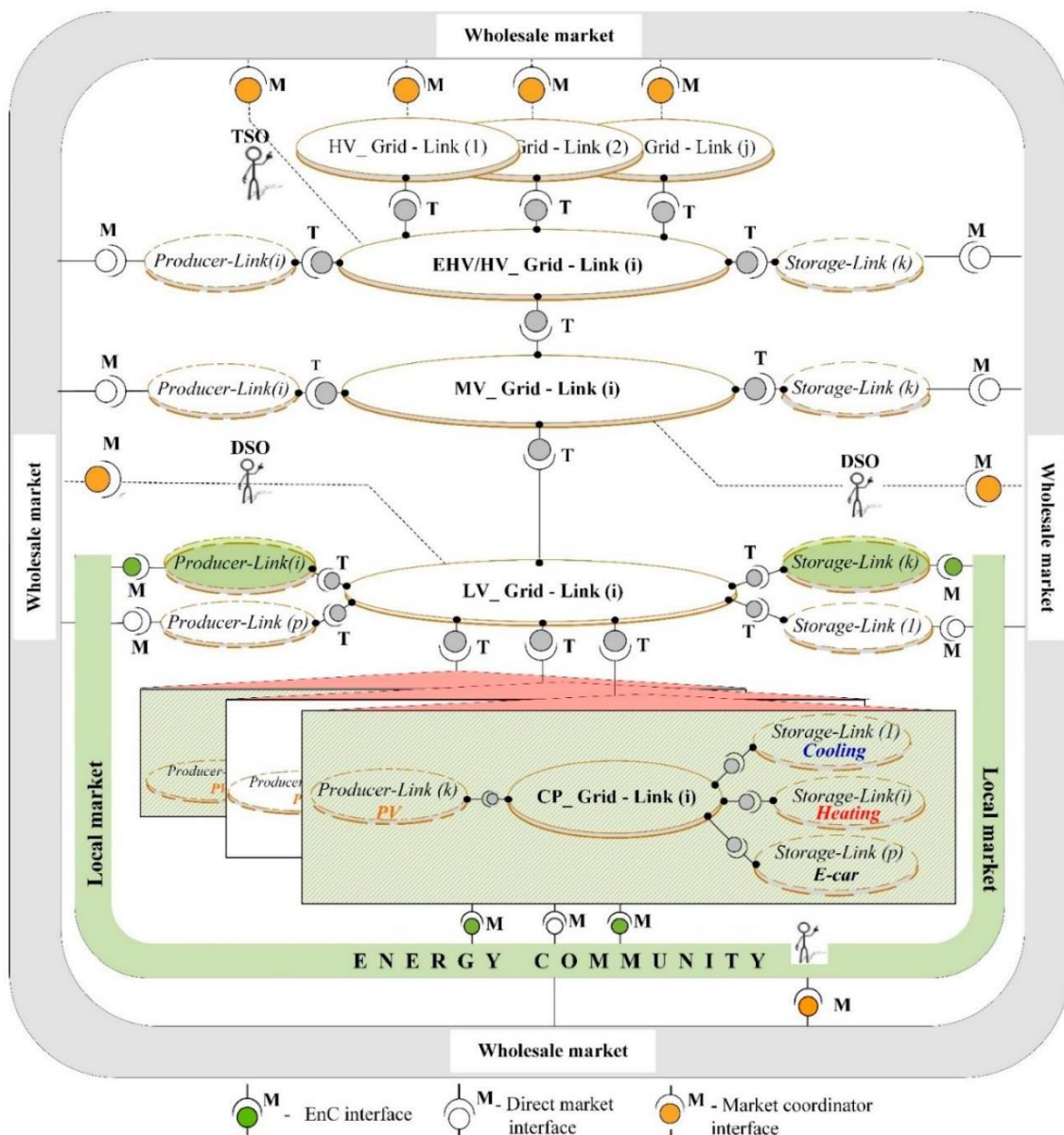
Použitelnost řešení LINK-Solution byla demonstrována během výzkumného projektu ZUQDE (Centralizované řízení napětí/var za přítomnosti distribuované generace), v Salzburgu, Rakousko. Část holistické architektury (Medium-Voltage_Grid-Link a Producer-Link) byla úspěšně implementována a ověřena v testovací oblasti Lungau (30 kV; délka přívodu ≈400 km; maximální zatížení ≈23 MW), automatické řízení napětí a jalového výkonu prostřednictvím sekundárního a primárního řízení. Provoz pokračuje i po skončení výzkumného projektu, umožnil 20% nárůst decentralizované výroby bez rozšiřování infrastruktury, snížení investičních nákladů na připojení distribuované výroby a snížení špičkového zatížení až o 6 %. Náklady na jeho implementaci byly nižší než náklady na posílení sítě [4].

Projekt INTERACT (2021 – 2023)

Projekt [INTERACT](#) (Integration of innovative technologies of Positive Energy Districts into a holistic architecture) je mezinárodní výzkumný a inovační projekt s průřezovou spoluprací mezi akademickou obcí, obcemi a podniky s účastníky z Rakouska (Sonnenplatz Großschönau GmbH - Applicant and Project Coordinator, University of Applied Sciences Technikum Wien a TU Wien, Institute of Energy Systems and Electrical Drives), České republiky (LEEF Technologies s.r.o.) a Švédska (Tornet Fastighetsutveckling AB). Celkovým cílem projektu je vyvinout road-mapu pro implementaci energetických společenství [60]. Na základě holistického přístupu jsou dodávána technologická a tržní řešení. I zde se uvažovala holistická architektura systému založená na LINKs, která umožňuje zabudování energetických komunit, čímž podporuje jejich implementaci ve velkém měřítku, viz následující obrázek.

Na obrázku je znázorněné propojení částí: sítí, zákaznických zařízení, výrobních a akumulčních zařízení (T - technická rozhraní, M - tržní rozhraní).

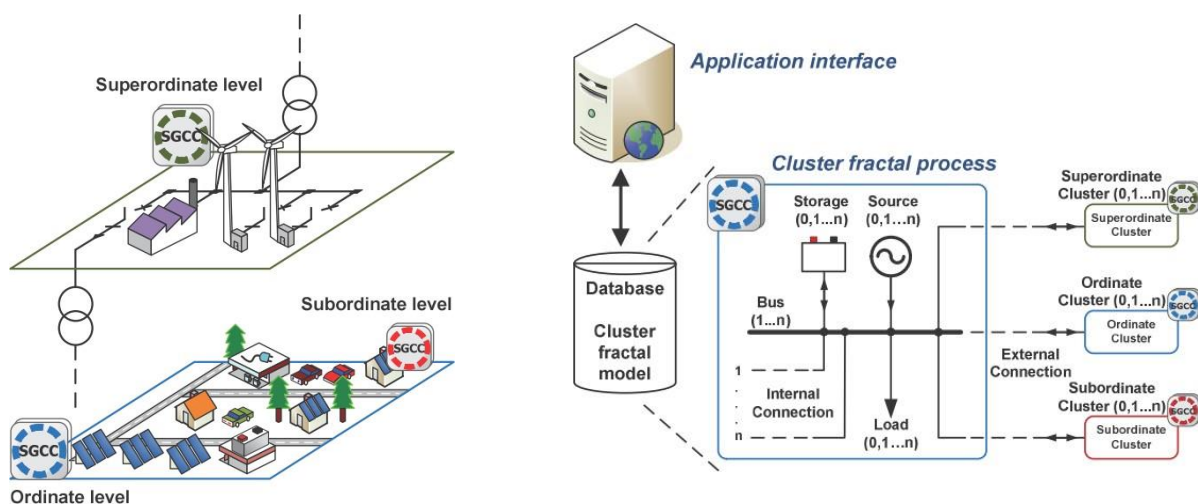
Veřejné výstupy projektu jsou na <https://www.ped-interact.eu/activities/>. Vybrané publikace na téma energetických komunit: [56] a [57].



Energetické komunity začleněné do LINK-Architecturey [56]

▪ **South Westphalia University of Applied Sciences/Division Soest, Německo**

Publikace kolektivu autorů z této univerzity na počátku druhého desetiletí tohoto století, představuje koncept klastrování - seskupování (clustering concept) založený na konvenční struktuře a způsobu řízení ES. ES je rozdělena na několik oblastí (cluster areas). Smart grid cluster controller (SGCC) řídí danou oblast podle zvolených pravidel, např. podle konvenčních řídicích strategií aplikovaných na vyšších napěťových hladinách (primární a sekundární řídicí funkce). Klastry jsou propojeny do hierarchického systému: nadřazená úroveň (vyšší hladina), stejná úroveň a podřazená úroveň (nižší hladina). Tuto strukturu lze rekurzivně aplikovat na vyšší či nižší úroveň. Sestavení klastrové sítě je realizováno pomocí fraktálního modelu. Rekurzivní proces snižuje složitost sestavení rozsáhlé sítě, protože bude používán stále stejný postup. Navržený klastrový fraktálový model umožňuje jednoduchým způsobem popsat topologii klastrové sítě.



Příklad vzájemně propojených klastrů a aplikace klastrového fraktálního modelu [58]

Další publikace této skupiny jsou v referencích tohoto článku [58].

Toto pracoviště se zabývá i koncepcí celulárních sítí [22].

- **Societatea de Inginerie Sisteme S.A. (SIS S.A.), Rumunsko**

Hlavním cílem oddělení výzkumu a inovací společnosti [SIS](#) je usnadnit zavádění nových digitálních technologií v různých oblastech, zejména zaměřených na průmyslové a automatizační systémy. Společnost má rozsáhlé zkušenosti s vývojem inovativních metod a nástrojů, účastnila se řady výzkumných projektů. V rámci [projektu Calculos](#) vznikla publikace týkající se fraktálního modelu pro chytré sítě [40] a stejného tématu se týkala i novější publikace [59].

Z dostupných informací není patrné, zda se toto pracoviště fraktálními smart sítěmi systematicky zabývá.

3.4 Energy Internet

Energy Internet (**Energetický internet**) je koncept, který propojuje principy internetu a energetických sítí s cílem vytvořit inteligentní, decentralizovaný a flexibilní elektrický systém pro výrobu, přenos, distribuci a spotřebu energie s řízením a optimalizací toku energie v reálném čase. Tento přístup spočívá zejména v integraci obnovitelných zdrojů elektrické energie, její distribuované výroby, pokročilých technologií digitalizace, akumulace a inteligentních měřicích systémů. Cílem je vytvořit energetický systém, ve kterém by energie proudila efektivně, což by zlepšilo flexibilitu její nabídky a poptávky, posílilo odolnost systému a umožnilo větší integraci obnovitelných zdrojů energie.

Zdroje a spotřebitelé energie jsou připojeni k síti, kde mohou volně nakupovat a prodávat energii pomocí inteligentních systémů řízení. Tento koncept vyžaduje pokročilé digitální technologie, jako jsou chytré elektroměry, blockchain pro řízení transakcí, a pokročilé algoritmy pro optimalizaci toků energie. Každý uzel v síti funguje podobně jako uzel na internetu, kde může být výrobcem i spotřebitelem energie.

Zatímco Energy Internet se zabývá globální sítí distribuovaných generátorů obnovitelné energie, zátěží, skladovacích zařízení a elektrických vozidel, malé sítě s podobnými charakteristikami jsou často uváděny jako **energetický intranet** a obecně je snaha uznat energetický internet jako síť energetických intranetů.

Koncept EI se začal diskutovat a vyvíjet koncem prvního desetiletí 21. století. Definice a pojetí EI se v literatuře poměrně významně liší, viz přehled v [\[61\]](#).

V energetickém internetu existují tři typy interaktivních agentů. To jsou: energetické články, uživatelské buňky a odbavovna (Clearing House nebo Clearance House - CH). Jako energetické články jsou definováni jednotliví spotřebitelé v domácnostech, drobní komerční/průmysloví spotřebitelé nebo skupina těchto subjektů. Typický energetický článek může vlastnit zařízení místní výroby, elektrické zátěže, zásobníky a elektromobily. Desítky stovek takových energetických článků jsou připojeny k energetickému internetu, aby obchodovaly s energií, prodávaly svojí přebytečnou energii za účelem dosažení zisku nebo kupovaly vlastní nedostatečnou energii. Fyzické připojení v Energy Internetu je provozováno a udržováno uživatelskou buňkou. Vzhledem k tomu, že je užitečný článek samostatným subjektem, poskytuje doplňkové služby pro udržení stability elektrizační soustavy. CH shromažďuje všechny informace týkající se poptávky, nabídky a prognózy a provádí tržní clearing algoritmus pro naplánování optimální objednávky. [\[62\]](#), [\[63\]](#) a [\[64\]](#).

Klíčové prvky Energy Internetu:

- **Decentralizovaná výroba energie (Decentralized Power Production):** Místo pouze centralizovaných elektráren s velkým jednotkovým výkonem se energie vyrábí ve vysoké míře také z menších zdrojů, jako jsou solární panely, větrné turbíny, malé vodní elektrárny či kogenerační jednotky. Tyto zdroje mohou být rozptýleny po celém území a připojeny do nejen do přenosové, ale i distribuční sítě, což zvyšuje odolnost a flexibilitu energetického systému.
- **Obnovitelné zdroje energie (Renewable Energy Sources - RES):** Energy Internet podporuje maximální integraci obnovitelných zdrojů. Díky digitalizaci a pokročilým řídicím systémům je možné optimalizovat využívání energie z těchto zdrojů a posílit jejich soudržnost, což vede ke globálně efektivnějšímu a zejména ekologičtějšímu provozu. To vede souběžně na nezbytnost uplatnění inovovaných akumulčních jednotek.
- **Inteligentní řízení spotřeby (Demand Side Response - DSR):** Spotřebitelé mohou aktivně řídit svou spotřebu energie na základě aktuálních pohybů cen nebo jiných popudů. Například v době, kdy je v síti přebytek energie z obnovitelných zdrojů, mohou domácnosti a firmy zvýšit svou spotřebu (např. nabíjením akumulátorů včetně elektromobilů nebo spuštěním velkých tepelných spotřebičů) [25]. Další úroveň je změna spotřebitele na současně potenciálního dodavatele (Prosumer) vyrábějícího ve výhodný moment pro něj nebo naopak kritický pro systém, například implementací principu vehicle-to-grid.
- **Internet věcí (Internet of Things - IoT) a inteligentní sítě (Smart Grids - SG):** IoT umožňují propojení různých zařízení v domácnostech i v průmyslu, která mohou komunikovat mezi sebou a s energetickou sítí obousměrně a v plně digitálním režimu.

To zahrnuje zejména inteligentní měřiče s pokročilými senzory a alternativními komunikačními technologiemi, které poskytují aktuální data o spotřebě energie a umožňují její optimalizaci téměř v reálném čase.

- **Blockchain a smart kontrakty:** Technologie blockchain je ideální nástroj k bezpečnému a transparentnímu zaznamenávání transakcí s energií, což umožňuje například i peer-to-peer obchodování s energií i napříč uživateli, nikoli jen vůči distributorovi [65], [66].
- Umělá inteligence (**Artificial Intelligence - AI**) a **Big Data** jsou technologie podporující automatizaci a optimalizaci na zcela nové úrovni. Zejména flexibilitou rychlých a přesností prediktivních analýz mohou mít značný pozitivní dopad na stabilitu sítě.
- **Kyberbezpečnost:** Vzhledem k tomu, že energetická síť je stále více propojena s internetem a exponenciálně rostoucím množstvím zařízení, je zajištění bezpečnosti dat a odolnosti vůči kybernetickým útokům klíčovým aspektem.

Výhody Energy Internetu:

- **Efektivita:** Lepší využití zdrojů energie díky inteligentnímu detailnímu řízení a optimalizaci, které budou systémově mandatorní z principu.
- **Udržitelnost:** Zvýšení možného potenciálu připojitelnosti a následného podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu.
- **Odolnost, stabilita a bezpečnost:** Decentralizovaná struktura sítě je méně zranitelná vůči výpadkům. Odolnost se navyšuje i s ohledem na ekonomické, obchodní, legislativní, politické a další netechnické konflikty nebo překážky, popřípadě pohromy.
- **Flexibilita a transparentnost:** Možnost rychlé reakce na změny v nabídce a poptávce po energii, resp. je tak činěno přirozenou, plynulou a nepřetržitou metodou.

Technologické, organizační a legislativní výzvy:

- **Propracování konceptu a vymezení se oproti tradičnímu internetu:**
 - Koncept zcela transparentní obousměrné komunikace a přenosu dat typický pro tradiční internet je třeba nahradit standardem respektujícím energetické ztráty a entropii přenosu plus ekonomické vícenáklady spojené s organizací. Pro energetické systémy je nutné uplatnit termodynamické fyzikální zákony s tím spojené. Obě zmíněné složky nelze stanovit paušálně, pravděpodobně budou muset být rozšiřujícím prvkem protokolu nad rámec balíčků integrujících energetické a ekonomické složky a budou složitým funkcionálem, který bude zapříčiňovat zaměnitelnost energetických balíčků v praxi špatně využitelnou bez další informační nadstavby pro uživatele. To jsou závažné odlišnosti filozofie a fyziky energetického internetu, i když se na první pohled zdají oproti tradičnímu internetu jen kvantitativní. Důvodem je, že určité změny entropie a další omezení existují sice i napříč tradičním internetem (spotřeba energie pro infrastrukturu, legislativní omezení atd.), jedná se však v podstatě o zanedbatelné položky bez přímé vazby na základ, kterým jsou informace.
 - V konceptu energetického internetu bude nutné přepracovat filozofii ekvivalence balíčků jako jeden ze základů protokolu TCP/IP dále v ohledu

nemožnosti provádět jejich klonování a kobercovou distribuci. Opět je třeba uplatnit zejména první termodynamický zákon. V tomto případě se jedná o značné, zřejmě nepřekonatelné, omezení podstatné přirozené funkční charakteristiky tradičního internetu, kterou bude muset energetický internet bohužel oželeť.

▪ **Technické a infrastrukturní výzvy:**

- Modernizace sítě: Stávající energetické sítě potřebují významné upgrady, aby podporovaly digitální infrastrukturu a flexibilitu toků energií potřebné pro Energetický internet.
- Interoperabilita: Různá zařízení a systémy musí být schopny komunikovat a spolupracovat, což vyžaduje detailní standardizaci v celém odvětví.

▪ **Kybernetická bezpečnost:**

- Zranitelnosti: Striktní digitální povaha Energetického internetu ho činí více zranitelným vůči kybernetickým útokům, které by mohly mít mnohem závažnější důsledky pro dodávky energie a bezpečnost.
- Ochrana soukromí dat: Zajištění soukromí uživatelských dat v silně propojeném prostředí je další prioritou.
- Nutná řešení zcela nového typu bude přinášet plošná integrace IoT, AI a Big Data.

▪ **Regulační a politické otázky:**

- Regulační rámce: Politické a regulační orgány musí vytvořit legislativní rámce, které budou podporovat inovace a volné tržní prostředí, ale zároveň zajistí bezpečnost a spolehlivost.
- Struktury trhu: Stávající energetické tržní struktury možná budou muset být dále reformovány, aby vyhovovaly decentralizované a dynamické povaze Energetického internetu.

▪ **Ekonomická životaschopnost:**

- Investiční náklady: Počáteční investice do infrastruktury, technologií a vzdělávání pro vznik systémové synergie aktérů různého typu a nové úrovně jsou značné.
- Návratnost investic: Dlouhodobé ekonomické výhody závisí na úsporách energie, zvýšení efektivity a úspěšné integraci obnovitelných zdrojů.

Existují laboratoře a výzkumné projekty, které se zabývají konceptem Energy Internetu a některé z nich již poskytují vizualizace tohoto konceptu. Tyto projekty se zaměřují především na simulace, modelování a experimentování s různými dílčími detaily aplikace konceptu Energy Internetu, zejména se soustřeďují na úzké propojení elektrických sítí s digitálními technologiemi, AI a tradičním informačním internetem [67], [68]. Souhrnné a současně detailní publikace se příliš nevyskytují, snad s výjimkou [69], ale i v tomto případě se jedná o dílo spíše rekapitulující dílčí technologie než koncipující metodiku jejich propojení.

Vizualizace a simulace mají svým charakterem a konceptem souvislost zejména se dvěma směry nástrojů pro inovace:

- **Simulační software a nástroje:** Některé laboratoře a výzkumné instituce vyvinuly specializovaný software pro simulaci a vizualizaci chytrých sítí a Energy Internetu. Tyto nástroje umožňují vizualizaci toků energie, interakce mezi různými zdroji a spotřebiteli

a analýzu stability sítě.

- **Digitální dvojče (Digital Twin):** V oblasti Energy Internetu se stále častěji využívá koncept digitálního dvojčete, což je virtuální model fyzického energetického systému. To umožňuje testování různých scénářů a optimalizací v simulovaném prostředí před jejich implementací v reálném světě.

3.4.1 Pracoviště zabývající Energy Internetem

Příklady pracovišť zaměřených na Energy Internet:

- **Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) – USA**

LBNL má výzkumné programy zaměřené na chytré sítě a integraci obnovitelných zdrojů do přenosových soustav. Jejich projekty zahrnují simulace a vizualizace fungování chytrých sítí a možností jejich propojení v rámci Energy Internetu. Pracují na technologiích, jako jsou pokročilé měřicí systémy a řízení spotřeby.

- **Tsinghua University – Čína**

Tsinghua University je jedním z předních akademických center zabývajících se konceptem Energy Internetu. Jejich výzkum zahrnuje teoretické modely a praktické aplikace, které demonstrují, jak by mohl Energy Internet fungovat v reálných podmínkách. Čína je obzvláště aktivní v oblasti vývoje chytrých sítí a propojení distribuovaných zdrojů energie, což je klíčovou součástí Energy Internetu.

- **National Renewable Energy Laboratory (NREL) – USA**

NREL se zabývá výzkumem integrace obnovitelných zdrojů energie do elektrických sítí a rozvojem chytrých sítí. Jejich projekty zahrnují pokročilé modelování a vizualizace, které ukazují, jak by mohly být obnovitelné zdroje integrovány do Energy Internetu. NREL nabízí různé nástroje a platformy pro vizualizaci těchto systémů.

- **European Institute of Innovation & Technology (EIT) InnoEnergy – EU**

EIT InnoEnergy podporuje projekty a startupy zaměřené na inovace v oblasti energetiky, včetně konceptu Energy Internetu. Některé jejich projekty zahrnují vývoj softwarových nástrojů a platform, které umožňují simulaci a vizualizaci decentralizovaných energetických systémů.

- **MIT Energy Initiative (MITEI) – USA**

MIT Energy Initiative pracuje na mnoha projektech, které se zabývají pokročilými energetickými systémy, včetně vývoje nových modelů pro propojení sítí a energií. Jejich výzkum často zahrnuje vizualizace a simulace, které demonstrují fungování Energy Internetu.

- **Stanford University – USA**

Stanford Precourt Institute for Energy: Tento institut se zaměřuje na inovativní energetické technologie, včetně těch, které jsou klíčové pro rozvoj Energetického internetu. Stanford také aktivně pracuje na aplikacích umělé inteligence a IoT v energetických systémech.

- **Imperial College London - Velká Británie**

Grantham Institute for Climate Change and the Environment: Imperial College London se věnuje výzkumu energetiky v kontextu klimatických změn. Grantham Institute se zabývá energetickými systémy budoucnosti, včetně integrace obnovitelných zdrojů a technologiemi chytrých sítí.

- **University of California, Berkeley - USA**

Center for Information Technology Research in the Interest of Society (CITRIS): CITRIS na UC Berkeley se zaměřuje na využití informačních technologií, včetně IoT a umělé inteligence, v energetických systémech. Výzkum zde zahrnuje také decentralizované energetické systémy a jejich řízení.

- **RWTH Aachen University - Německo**

Institute for Power Generation and Storage Systems: RWTH Aachen je přední technickou univerzitou v Německu, která se zaměřuje na pokročilé energetické technologie, včetně těch, které podporují koncept Energetického internetu. Výzkum zde zahrnuje také integraci obnovitelných zdrojů a chytré řízení energetických sítí.

- **ETH Zurich - Švýcarsko**

Energy Science Center (ESC): ETH Zurich je jednou z nejprestižnějších technických univerzit v Evropě. Její Energy Science Center se zabývá širokým spektrem témat, včetně energetických sítí, decentralizovaných energetických systémů a udržitelných energetických technologií.

- **National University of Singapore (NUS) - Singapur**

Energy Studies Institute (ESI): ESI na NUS se zaměřuje na politiku a technologie související s energetickou bezpečností a udržitelností. Výzkum zahrnuje také technologické inovace pro chytré sítě a decentralizovanou energetiku.

- **University of Tokyo - Japonsko**

Collaborative Research Center for Energy Engineering: Univerzita v Tokiu je jednou z předních asijských univerzit, která se zaměřuje na pokročilé technologie pro energetické systémy. Výzkum zahrnuje i energetickou infrastrukturu pro budoucí městské prostředí, což zahrnuje i koncepty Energetického internetu.

- **Technical University of Denmark (DTU) - Dánsko**

Center for Electric Power and Energy (CEE): DTU je známá svým výzkumem v oblasti energetických systémů, zvláště v kontextu integrace obnovitelných zdrojů a inteligentních energetických sítí.

- **Významné energetické společnosti ČR a jejich partneři (ČEPS, E.ON Energie, ČEZ, PREdistribuce)**

Většinová uskupení nejvýznamnějších energetických společností ČR pod záštitou projektových podpůrných programů zpracovávají dílčí technické problémy zejména s ohledem na legislativní, organizační a softwarovou stránku [\[70\]](#), [\[71\]](#).

Tabulka zahrnující vůdčí osobnosti pro jednotlivá pracoviště na univerzitách, které se zabývají výzkumem v oblasti Energetického internetu:

Univerzita	Pracoviště	Vůdčí osobnosti
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	MIT Energy Initiative (MITEI)	Prof. Robert Armstrong - Ředitel MITEI
Stanford University	Stanford Precourt Institute for Energy	Prof. Arun Majumdar - První ředitel Precourt Institute for Energy
Tsinghua University	Institute of Energy Internet Research	Prof. Wu Jianzhong - Vedoucí výzkumu v oblasti Energetického internetu
Imperial College London	Grantham Institute for Climate Change and the Environment	Prof. Joanna Haigh - Emeritní spoludirektorka Grantham Institute
University of California, Berkeley	Center for Information Technology Research in the Interest of Society (CITRIS)	Prof. Costas Spanos - Ředitel CITRIS
RWTH Aachen University	Institute for Power Generation and Storage Systems	Prof. Achim Kampker - Vedoucí katedry energetických systémů
ETH Zurich	Energy Science Center (ESC)	Prof. Gabriela Hug - Vedoucí výzkumu ESC
National University of Singapore (NUS)	Energy Studies Institute (ESI)	Prof. Lee Poh Seng - Ředitel Energy Studies Institute
University of Tokyo	Collaborative Research Center for Energy Engineering	Prof. Tetsuo Yai - Vedoucí Collaborative Research Center
Technical University of Denmark (DTU)	Center for Electric Power and Energy (CEE)	Prof. Jacob Østergaard - Vedoucí CEE

3.5 Použitá literatura a odkazy

- [1] KARINIOTAKIS, Georges, et al. Challenges, innovative architectures and control strategies for future networks: the web-of-cells, fractal grids and other concepts. In: CIRED 2017-24th International Conference on Electricity Distribution. 2017. p. 2149–2152.
- [2] HOWELL, Shaun, et al. Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 193-214.
- [3] SEREH, <https://sereh.eu/>. Our future energy system: towards a 'Holonic' system!?. Prezentace. 2020. Online. Dostupné z: <https://sereh.eu/documenten/>

- [4] ILO, A., et al. Holistic Architectures for Future Power Systems. ETIP SNET White Paper, 2019.
- [5] KUEHNBACH, Matthias; PISULA, Stefan; BEKK, Anke. Potentials and limitations of photovoltaic-based cellular energy systems in Southern Germany. Current and Future Challenges to Energy Security, 2018, 182.
- [6] MORCH, Andrei Z., et al. Future control architecture and emerging observability needs. In: 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). IEEE, 2015. p. 234-238. DOI: 10.1109/PowerEng.2015.7266325.
- [7] CABIATI, M.; TORNELLI, C.; MARTINI, L. The ELECTRA Web-of-Cells control architecture concept for the future power system operation. In: 2018 AEIT international annual conference. IEEE, 2018. p. 1-6. DOI: 10.23919/AEIT.2018.8577221.
- [8] MARTINI, Luciano, et al. Grid of the future and the need for a decentralised control architecture: the web-of-cells concept. CIREOpen Access Proceedings Journal, 2017, 2017.1: 1162-1166. DOI: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0484>
- [9] BOBINAITE, Viktorija, et al. Economically Efficient Design of market for System Services under the Web-of-cells Architecture. Energies, 2018, 11.4: 729. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040729>
- [10] STRASSER, Thomas, et al. Report on the evaluation and validation of the ELECTRA WoC control concept. 2018.
- [11] MACDOUGALL, Pamela, et al. Multi-goal optimization of competing aggregators using a web-of-cells approach. In: 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). IEEE, 2017. p. 1-6. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2017.8260335.
- [12] ELECTRA Consortium. An architecture for decentralized balancing and voltage control in the future power system. 2013. Dostupné z: https://eera.lgi-consulting.org/ecm/content/showcases/5488/files/electra_woc_summary_document.pdf
- [13] BENZ, Thomas. The cellular approach: the basis of successful, cross-regional energy transition. Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), 2015.
- [14] BAYER, Josef, et al. Zellulares Energiesystem-Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen. VDE-Technical Report, 2019.
- [15] SmartGrids BW, <https://smartgrids-bw.net/>. für intelligente Energie. Startseite - Projekte - C/sells – das Schaufenster für intelligente Energie. Online. Dostupné z: <https://smartgrids-bw.net/projekte/c-sells-das-schaufenster-fuer-intelligente-energie/>
- [16] BUNDESNETZAGENTUR, Ľ. Flexibilität im Stromversorgungssystem. Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität. 2017.
- [17] GÜNTHER, Linda, et al. Residential quarters as innovative energy cells. 2018.
- [18] UHLEMEYER, Björn, et al. Cellular approach as a principle in integrated energy system planning and operation. In: CIREOpen Access Proceedings Journal (CIREOpen Access Proceedings Journal). IET, 2020. p. 58-61. DOI: 10.1049/oap-cired.2021.0021

- [19] RASTI, Sasan Jacob, et al. Generic technology models to simulate flexible operation in multi-energy cellular energy systems. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1049/icp.2023.1138>
- [20] KLEINEIDAM, Gerhard; KRASSER, Marco; REISCHBÖCK, Markus. The cellular approach: smart energy region Wunsiedel. Testbed for smart grid, smart metering and smart home solutions. *Electrical Engineering*, 2016, 98.4: 335-340. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-016-0417-y>
- [21] MAYORGA GONZALEZ, Daniel; MYRZIK, Johanna; REHTANZ, Christian. The smart power cell concept: mastering TSO–DSO interactions for the secure and efficient operation of future power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14.13: 2407-2418. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0991>
- [22] WIRASANTI, P., et al. Clustering power systems strategy the future of distributed generation. In: *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. IEEE, 2012. p. 679-683. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264628
- [23] KROPOSKI, Benjamin, et al. Autonomous energy grids: Controlling the future grid with large amounts of distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2020, 18.6: 37-46. DOI: 10.1109/MPE.2020.3014540
- [24] KUMAR, Utkarsh; DING, Fei. A Novel Resilience-Oriented Cellular Grid Formation Approach for Distribution Systems with Behind-the-Meter Distributed Energy Resources. In: *2023 IEEE PES Grid Edge Technologies Conference & Exposition (Grid Edge)*. IEEE, 2023. p. 1-5. DOI: 10.1109/GridEdge54130.2023.10102719
- [25] The National Renewable Energy Laboratory, <https://www.nrel.gov/>. Autonomous Energy Systems. *Grid Modernization - Autonomous Energy Systems*. Online. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/grid/autonomous-energy.html>
- [26] MACKAY, Laurens, et al. Toward the universal DC distribution system. *Electric Power Components and Systems*, 2017, 45.10: 1032-1042. DOI: <https://doi.org/10.1080/15325008.2017.1318977>
- [27] EGERT, Rolf, et al. Holonic system model for resilient energy grid operation. *Energies*, 2021, 14.14: 4120. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144120>
- [28] NEGERI, Ebisa Olana. *Smart Power Grid: A Holonic Approach*. 2014. Dostupné z: <https://resolver.tudelft.nl/uuid:956cd759-ed0a-48c7-a311-0baa1d60f5df>
- [29] Energy.nl - Energietransitie, <https://energy.nl/>. Naar een holarchisch energiesysteem!?. 2020. Online. Dostupné z: <https://energy.nl/publications/holarchisch-energiesysteem/>
- [30] van BRACHT, Mart. Naar een holarchisch energiesysteem!?. 2020. Online. Dostupné z: https://topsectorenergie.nl/documents/310/TSE_SI_holarchie_202111.pdf
- [31] MOYO, Cyndi, et al. Towards a holonic-control inspired local market approach used in intelligent energy systems. In: *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE, 2016. p. 003930-003935. DOI: 10.1109/SMC.2016.7844848
- [32] REHTANZ, Christian, et al. Towards holonic power and energy systems—A novel ICT architecture as enabler for resilience. *International Journal of Electrical Power &*

- Energy Systems, 2024, 162: 110283. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4760349>
- [33] PAHWA, Anil, et al. Goal-based holonic multiagent system for operation of power distribution systems. *IEEE transactions on smart grid*, 2015, 6.5: 2510-2518. DOI: 10.1109/TSG.2015.2404334
- [34] MOGHADAM, Mahshid Helali; MOZAYANI, Nasser. Research Article A Novel Information Exchange Model in IT Infrastructure of Smart Grid. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, 6.23: 4399-4404. DOI: <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.6.3443>
- [35] IONITA, Silviu. Multi Agent Holonic Architecture: A Concept for Power Smart Grids. *University of Pitesti Scientific Bulletin Series: Electronics and Computer Science*, 2015, 15.2: 1-12.
- [36] VAŠEK, Lubomír; DOLINAY, Viliam; SYSALA, Tomáš. Heat production and distribution control system based on holonic concept. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 2014.
- [37] ANSARI, Javad; GHOLAMI, Amin; KAZEMI, Ahad. Multi-agent systems for reactive power control in smart grids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 83: 411-425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.04.010>
- [38] NEGERI, Ebisa; BAKEN, Nico; POPOV, Marjan. Holonic architecture of the smart grid. 2013. DOI: 10.4236/sgre.2013.42025
- [39] EGERT, Rolf, et al. HOLEG: A simulator for evaluating resilient energy networks based on the Holon analogy. In: *2017 IEEE/ACM 21st International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. IEEE, 2017. p. 1-8. DOI: 10.1109/DISTRA.2017.8167665
- [40] FLOREA, Gheorghe, et al. A fractal model for power smart grids. In: *2015 20th International Conference on Control Systems and Computer Science*. IEEE, 2015. p. 572-577. DOI: 10.1109/CSCS.2015.104
- [41] WALLIS, Alexander, et al. A framework for strategy selection of atomic entities in the holonic smart grid. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-Aware Technologies (ENERGY 2020)*, IARIA, Lisbon, Portugal. 2020. p. 11-16.
- [42] MAYER, Jan, et al. Holonic architectures for IoT-empowered energy management in districts. In: *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. IEEE, 2021. p. 189-194. DOI: 10.1109/WF-IoT51360.2021.9595252
- [43] GERBER, Christian; SIEKMANN, Jörg; VIERKE, Gero. *Holonic multi-agent systems*. 1999.
- [44] MELLA, Piero. *The holonic revolution. Holons, Holarchies and Holonic*, 2009. DOI: 10.13140/2.1.1954.5922
- [45] ABDEL-FATTAH, Mohamed F., et al. A review of the holonic architecture for the smart grids and the self-healing application. In: *2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. IEEE, 2020. p. 1-6. DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269182
- [46] FREY, Sylvain, et al. A holonic control architecture for a heterogeneous multi-objective smart micro-grid. In: *2013 IEEE 7th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*. IEEE, 2013. p. 21-30. DOI: 10.1109/SASO.2013.11

- [47] FERREIRA, Adriano, et al. Extension of holonic paradigm to smart grids. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48.3: 1099-1104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.230>
- [48] GHORBANI, Sajad; UNLAND, Rainer. A holonic multi-agent control system for networks of micro-grids. In: Multiagent System Technologies: 14th German Conference, MATES 2016, Klagenfurt, Österreich, September 27-30, 2016. Proceedings 14. Springer International Publishing, 2016. p. 231-238. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45889-2_17
- [49] TALEB, Ihab, et al. Holonic Energy Management Systems: Towards Flexible and Resilient Smart Grids. In: International Conference on Agents and Artificial Intelligence. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 95-112. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-55326-4_5
- [50] RETIERE, Nicolas, et al. Fractal Grid—towards the future smart grid. In: CIRED 2017-24th International Conference on Electricity Distribution. 2017. p. 1236.
- [51] SIDQI, Yousra. Fractal analysis and planning of future power grids. 2019. PhD Thesis. Université Grenoble Alpes.
- [52] ILO, Albana. “Link”—The smart grid paradigm for a secure decentralized operation architecture. Electric Power Systems Research, 2016, 131: 116-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.10.001>
- [53] ILO, Albana. Design of the smart grid architecture according to fractal principles and the basics of corresponding market structure. Energies, 2019, 12.21: 4153. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12214153>
- [54] ILO, Albana. Demand response process in context of the unified LINK-based architecture. In: Eco-design in Electrical Engineering: Eco-friendly Methodologies, Solutions and Example for Application to Electrical Engineering. Springer International Publishing, 2018. p. 75-83. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-58172-9_9
- [55] ILO, Albana; SCHULTIS, Daniel-Leon. A holistic solution for smart grids based on LINK-paradigm. Cham, Switzerland: Springer, 2022.
- [56] ILO, Albana, et al. Viable Fully Integrated Energy Community Based on the Holistic LINK Approach. Energies, 2023, 16.6: 2935. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062935>
- [57] ILO, Albana, et al. Energy communities' impact on grids: Energy community embedment increasing grid flexibility and flourishing electricity markets. 2024. DOI: 10.2833/299800
- [58] ORTJOHANN, Egon, et al. Cluster fractal model—A flexible network model for future power systems. In: 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). IEEE, 2013. p. 293-297. DOI: 10.1109/ICCEP.2013.6587004
- [59] MINDRA, Teodora. Fractal Smart Grids-A new challenge for power systems operation. In: 2023 24th International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS). IEEE, 2023. p. 301-306. DOI: 10.1109/CSCS59211.2023.00054
- [60] INTERACT, <https://www.ped-interact.eu/>. D.6.1. Roadmap for the implementation of the designed INTERACT Energy Community in general and for the specific local perspectives. 2023.
- [61] HUSSAIN, Hafiz Majid; NARAYANAN, Arun; NARDELLI, Pedro H. J. a YANG, Yongheng.

- What is Energy Internet? Concepts, Technologies, and Future Directions. Online. IEEE Access. 2020, roč. 8, s. 183127-183145. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029251>. [cit. 2024-10-21].
- [62] JOSEPH, Akhil a BALACHANDRA, Patil. Energy internet, the future electricity system: Overview, concept, model structure, and mechanism: Overview, concept, model structure, and mechanism. *Energies*. 2020, roč. 13, č. 16, s. 4242. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13164242>.
- [63] CAO, Yijia; LI, Qiang; TAN, Yi; LI, Yong; CHEN, Yuanyang et al. A comprehensive review of Energy Internet: basic concept, operation and planning methods, and research prospects: basic concept, operation and planning methods, and research prospects. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2018, roč. 6, č. 3, s. 399-411. ISSN 2196-5420. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0350-8>.
- [64] HUSSAIN, SM Suhail; NADEEM, Furqan; AFTAB, Mohd Asim; ALI, Ikbal a USTUN, Taha Selim. The emerging energy internet: Architecture, benefits, challenges, and future prospects: Architecture, benefits, challenges, and future prospects. *Electronics*. 2019, roč. 8, č. 9, s. 1037. ISSN 2079-9292.
- [65] STRIELKOWSKI, Wadim; STREIMIKIENE, Dalia; FOMINA, Alena a SEMENOVA, Elena. Internet of energy (IoE) and high-renewables electricity system market design. *Energies*. 2019, roč. 12, č. 24, s. 4790. ISSN 1996-1073.
- [66] BOWKER, David; BEREZOVSKY, Vladislav; VUKOBRATOVIĆ, Marko; JAIN, Santosh; MUKHERJEE, Subhendu et al. The applications of blockchain technologies to electricity markets. 2022.
- [67] XUE, Zhiwen; XU, Yanmei; HAN, Yinghui; GAO, Feng; JIANG, Wenkun et al. Energy internet: A novel green roadmap for meeting the global energy demand: A novel green roadmap for meeting the global energy demand. In: 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2021, s. 3855-3860. ISBN 1665434252.
- [68] BAMISILE, Olusola; OBIORA, Sandra C; HUANG, Qi; YIMEN, Nasser; MADIRIMOV, Temur et al. A state-of-art review on energy internet and internet of energy advancements. In: 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2020, s. 2775-2782. ISBN 172819606X.
- [69] KABALCI, Ersan a KABALCI, Yasin. From smart grid to internet of energy. Academic Press, 2019. ISBN 0128197110.
- [70] ČEPS, A. S. Projekt DFLEX ověřil využitelnost agregace flexibility. Online. ČEPS, A. S. Projekt DFLEX ověřil využitelnost agregace flexibility. 2023. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/tiskove-zpravy/novinka/projekt-dflex-overil-vyuzitelnost-agregace-flexibility>. [cit. 2024-10-22].
- [71] Projekt Eflex otestuje využívání flexibility baterií. Online. OEnergetice.cz. 2020. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/projekt-eflex-otestuje-vyuzivani-flexibility-baterii>. [cit. 2024-10-22].

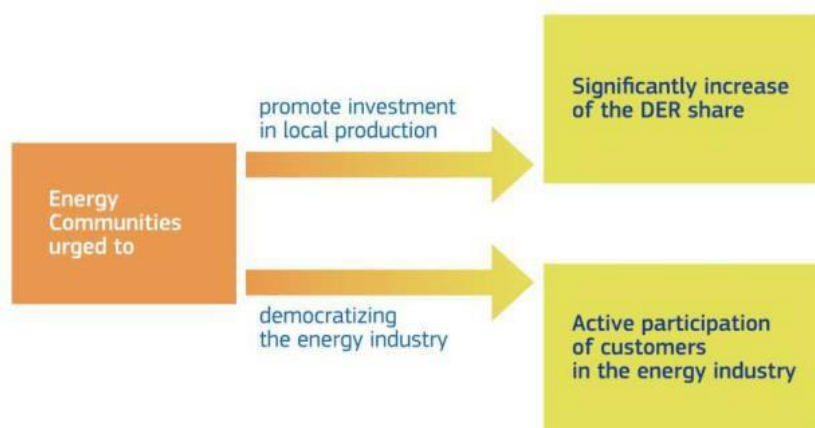
4 Společenské výzvy a jejich technické dopady na ES

Jak již bylo uvedeno výše, společensko politický tlak na dekarbonizaci energetického průmyslu, přináší změny do provozu energetických sítí, nové prvky, technologická a organizační řešení. Trend decentralizace dává příležitost prosumerům vstoupit na místní trh. Rozšiřující se digitalizace usnadňuje spravedlivý přístup na trh a zvyšuje jeho transparentnost. Začlenit velký počet malých prosumerů do poskytování flexibility je možné například pomocí jejich agregace. Poptávka po místní a cenově dostupné energii podnítila vznik komunitní energetiky.

V této části uvádíme některé z nových řešení, u nichž se domníváme, že budou mít v budoucnu významný vliv na koncepci a provoz ES.

4.1 Komunitní energetika

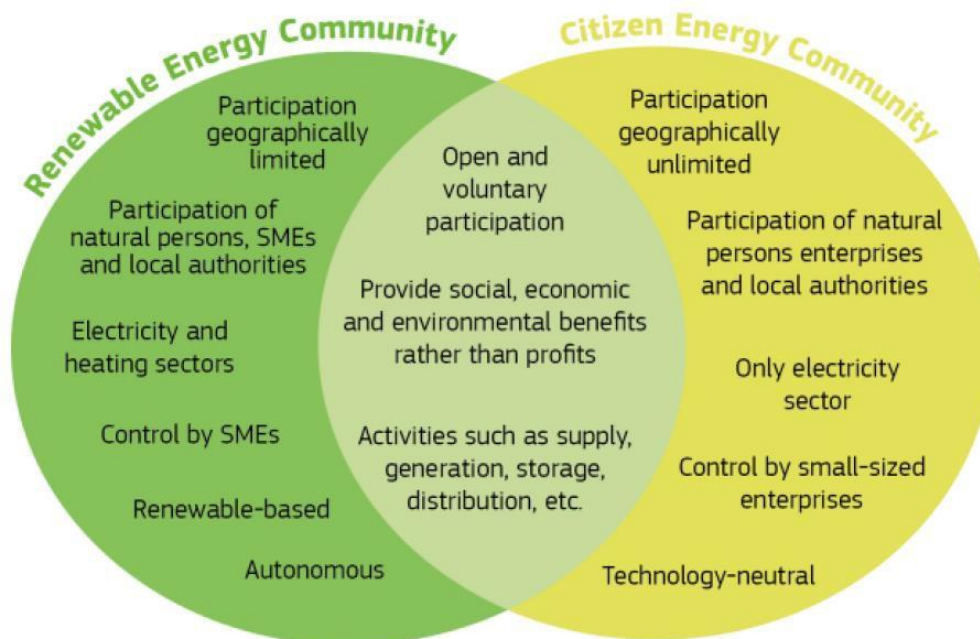
Účelem komunitní energetiky je podpora decentralizace a demokratizace (zvýšeného zapojení menších hráčů) energetiky, zvyšování zapojení obnovitelných zdrojů energie, podpora investic do lokální výroby, zvyšování energetické účinnosti a opatření proti energetické chudobě, a to zejména na úrovni domácností a malých a středních podniků.



Důvody pro zavedení koncepce Energetického společenství [29]

4.1.1 Základní informace o komunitní energetice

Možnost vzniku energetických společenství, které mají jeden z cílů sdílet elektřinu, popřípadě jinou formu energie, je v EU legislativně dáno směrnicí (EU) 2018/2001, o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů [1] a směrnicí (EU) 2019/944 o společných pravidlech pro vnitřní trh s elektřinou [2]. Článek 2 odst. 15 směrnice (EU) 2018/2001 zavádí koncept společně jednajících samospotřebitelů elektřiny z OZE a článek 2 odst. 16 stejné směrnice definuje společenství pro obnovitelné zdroje. Směrnice (EU) 2019/944 v článku 2 odst. 8 zavádí aktivního zákazníka a v odst. 11 občanské energetické společenství. Zároveň se těmito směrnici stanovuje možnost sílení elektřiny, tzn. vznik komunitní energetiky.



Podobnosti a rozdíly mezi společenstvím pro obnovitelné zdroje a občanským energetickým společenstvím [29]

Hlavním cílem sdílení elektřiny v místě její výroby nebo v jejím okolí je minimalizovat její distribuci a přenos na větší vzdálenosti a tím odlehčit vedení a jiné prvky ES. Čímž se sníží i ztráty při přenosu a distribuci elektřiny, tj. zefektivní se využití vyrobené elektrické energie, a v některých provozních stavech se sníží i požadavky na regulaci a řízení z pohledu nadřazené PS. Chytrým řízením komunitní energetiky lze zajistit, že vyrobená elektřina je okamžitě spotřebována nebo akumulována přímo v místě výroby.

Dalšími cíli komunitní energetiky s OZE má být dle [1] posílení postavení spotřebitelů a prosumers na trhu s elektrickou energií, možnost poskytovat v omezené míře i podpůrné služby pro řízení ES a v neposlední řadě snížení emisí CO₂.

Sdílet vyrobenou elektrickou energii může:

- **Aktivní zákazník**
 - Je kdokoliv, na koho je napsáno odběrné místo nebo výrobná.
 - Fyzické osoby, podnikatelé tak i libovolné právnické osoby (obce, spolky a další subjekty).
 - Mohou sdílet s kýmkoliv, na koho je napsáno odběrné místo nebo výrobná.
- **Energetické společenství (EnS)**
 - Je právnická osoba s formou spolku, družstva nebo jiná korporace.
 - Nesmí být zakládány výhradně za účelem zisku. Jejich cílem má být přínos pro komunitu a její členy.
 - Primárním zdrojem energie může být OZE nebo jiný druh primárního zdroje
 - Předmětem činnosti je výroba **elektřiny**, sdílení elektřiny, dodávka elektřiny nebo výkon jiných činností nebo poskytování jiných služeb souvisejících se zajišťováním energetických potřeb jejich členů.
- **Společenství pro obnovitelné zdroje energie (SOEZE)**
 - Obdoba jako energetické společenství jen s tím rozdílem, že primárním zdrojem energie je zde pouze OZE a může se sdílet jak elektřina, tak i jiná forma energie např. teplo.
 - Předmětem činnosti je výroba **elektřiny nebo jiných forem energie**

z obnovitelných zdrojů energie, dodávka elektřiny, sdílení elektřiny nebo výkon jiných činností nebo poskytování jiných služeb souvisejících se zajišťováním energetických potřeb jejích členů.

Existuje mnoho modelů **způsobu a organizace sdílení elektrické energie** [3], [4], ale obecně je lze rozdělit na dva základní:

- Virtuální sdílení v rámci celé ES
 - V současné době nejčastější model.
 - Elektřina se sdílí přes veřejné sítě.
 - Členové energetického společenství vlastní a provozují energetické zdroje a vyrobenou elektřinu si navzájem sdílejí.
 - Nespotřebovanou elektřinu jako přebytky prodávají do ES, o zisky se z prodeje se rozdělují (fyzický tok elektřiny nemusí být shodný s virtuálním tokem).
 - Členové energetického společenství mohou, ale nemusejí mít stejného dodavatele elektřiny.
- Fyzické sdílení prostřednictvím komunitních sítí
 - Méně časté, uvažuje se o využití především v rámci ostrovní sítě např. ostrovní mikrosítě nebo Smart Grids.
 - Elektřina se fyzicky sdílí přes sítě ve vlastnictví energetické komunity.

Všechny možné **činnosti komunitní energetiky** lze shrnout do následujících bodů [5]:

- Výroba a sílení jakékoliv formy energie z OZE
- Distribuce, správa a údržba vlastní sítě
- Chytré měření a analýza naměřených dat k zachování a zlepšení energetické bilance
- Hromadný nákup a kolektivní vyjednávání energetických produktů a služeb pro své členy
- Výměna energie mezi jednotlivci, tzn. peer-to-peer
- Optimalizace energetických profilů jednotlivých prosumers a celé komunity (regulace a řízení výroby a spotřeby energie)
- Agregace energie a využití flexibility zdrojů pro podpůrné služby k regulaci ES
- Akumulace energie ve sdíleném velkokapacitním úložišti
- Sdílená elektromobilita

Výběr zajímavých publikací na téma komunitní energetiky

Více informací o komunitní energetice a jejím možném budoucím vývoji lze nalézt v článku [5], který souhrnně zpracovává problematiku energetických společenství v Evropě, jejich charakteristiku, trendy, obchodní modely a právní rámec. Informace o možnostech, konceptech a matematických modelech sdílení elektřiny jsou dostupné např. v [6], [7], [8], [9] nebo [10]. Návrh pěti různých numerických metod dynamického alokačního klíče a jejich porovnání je např. uvedeno v [11]. Další přínosné informace jsou například i v těchto odborných publikacích:

- A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations [10]

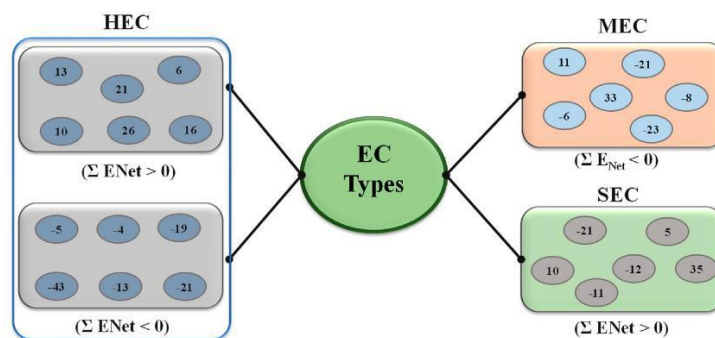
Toto review obsahuje základní přehled informací o současných konceptech komunitní energetiky a jejich dopad a vliv na budoucnost energetiky z energetických i ekonomických aspektů a z pohledu životního prostředí.

- Local Renewable Energy Communities: Classification and Sizing [13]

Článek [13] se zabývá návrhem nástroje pro řízení a optimalizaci provozu a shlukování společenství komunitní energetiky s OZE, zejména v oblasti výroby a řízení zátěže. Konkrétně navrhuje platformu schopnou seskupovat spotřebitele a prosumery podle jejich energetických a geografických charakteristik a vyhodnotit lokality vhodné pro instalaci OZE. Pro výpočtu jsou uvažovány tři algoritmy: K-means, prostorové shlukování aplikací se šumem založené na hustotě a spojovací algoritmy (single-link, complete-link, average-link a Wardsova metoda).

Dle [13] existuje několik možných variant energetických společenství využívajících OZE. Jejich cíl je stejný, tzn. sdílet energii z OZE. Liší se pouze organizací, právy a povinnostmi členů, principem sdílení a množstvím využití energie pro vlastní potřebu. Dle energetické bilance energie určené pro sdílení E_{Net} , tj. rozdílem mezi hodnotou vyrobené a spotřebované energie v komunitě, mohou být energetická společenství rozdělna na základní tři typy viz obrázek níže.

Pokud $E_{Net} < 0$, pak člen potřebuje požádat o energii od ostatních členů komunity nebo z DS. Naopak pokud $E_{Net} > 0$, pak má člen nadměrné množství energie, kterou lze sdílet.



Typy energetických společenství

Typy energetických společenství:

a) Homogenní (Homogenous Energy Communities - HEC)

Skupina členů, kteří mají pouze přebytek ($E_{Net} > 0$) nebo nedostatek energie ($E_{Net} < 0$).

b) Smíšená (Mixed Energy Communities - MEC)

Část skupiny členů má přebytek a část nedostatek energie, jejich spojením lze v komunitě sdílet přebytky elektřiny. Ideální sdílení je mezi členy, kteří jsou geograficky blízko sebe. Eliminace přetoků do DS.

c) Soběstačná (Self-sufficient Energy Communities - SEC)

Zvláštní případ v rámci skupiny MEC. Členové mohou plně vyrovnat poptávku po energii prostřednictvím svých výrobních jednotek, které se používají hlavně pro vlastní spotřebu. Komunita je částečně nezávislá na DS a lze ji provozovat i v ostrovním provozu.

- Renewable Energy Communities as Modes of Collective Prosumership: A Multi-Disciplinary Assessment Part II—Case Study [15]

Článek [15] obsahuje multikriteriální hodnocení komunitní energetiky s OZE v Německu. Konkrétně je zde hodnocení zaměřeno na organizační, technické, ekonomické a ekologické aspekty. Z hlediska organizačních aspektů kladně hodnotí plán vlastnictví spotřebitelských akcí aplikovaný na obnovitelné zdroje energie (RE-CSOP). Tento přístup umožňuje spotřebitelům (zejména těm, kteří nemají úspory nebo přístup ke kapitálovému úvěru) získat

vlastnický podíl OZE, a stát se tak „prosumery“. Technické (energetické) posouzení je založeno na energetické bilanci celé komunity, tj. jak na straně výroby, tak na straně spotřeby elektřiny. Pro energetické vyhodnocení komunitní energetiky jsou zde zavedeny dvě kritéria:

Podíl na soběstačnosti komunitní energetiky (Self-Sufficiency Share - SSS)

Podíl energetické spotřeby celé komunity, kterou lze pokrýt energií vyrobenou z OZE v komunitě.

$$SSS = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T E_{self-cons}(t, n) + E_{shared}^{rec \rightarrow b}(t, n)}{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T E_{load}(t, n)}$$

Podíl vlastní spotřeby elektřiny (Self-Consumption Share - SCS)

Množství celkové elektřiny vyrobené z OZE v komunitě, které je spotřebováno v samotném komunitě.

$$SCS = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T E_{self-cons}(t, n) + E_{shared}^{rec \rightarrow b}(t, n)}{\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T E_{pv}(t, n)}$$

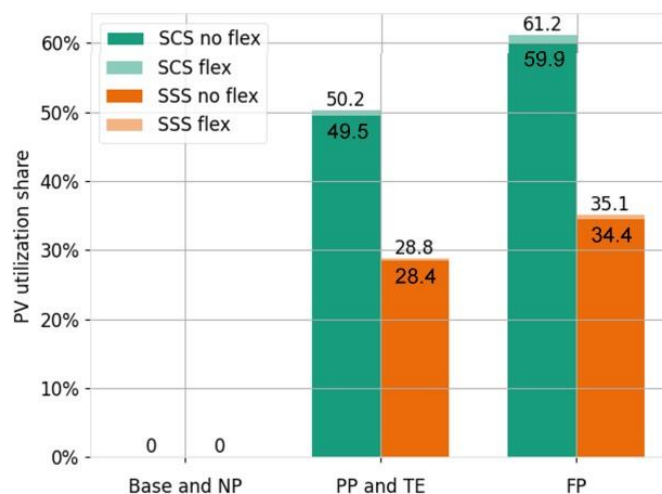
Kde N je počet budov v komunitě, přičemž každá budova má energetickou zátěž E_{load} a výroba elektřiny z FVE je E_{pv} v čase t . Množství elektřiny spotřebované v budově z vlastní FVE je $E_{self-cons}$ a množství elektřiny sdílené v rámci komunity je $E_{rec \rightarrow bshared}$.

V této studii bylo analyzováno několik konceptů komunitní energetiky, viz následující obrázek.

Activity Pursued	Use Case →	Base Case	No Prosumership		Partial Prosumership		Tenant Electricity Model		Full Prosumership	
	Scenario →	Base	NP	NP_flex	PP	PP_flex	TE	TE_flex	FP	FP_flex
Creation of REC										
PV Generation										
PV Feed-in										
Self-consumption										
Energy Sharing										
EV Flexibility										

Koncept „Base“ předpokládá žádné sdílení elektřiny ani žádnou výrobu elektřiny z OZE. Ve scénáři „No Prosumership (NP)“ se všechna vyrobená elektřina z OZE dodává do DS a spotřeba je pokryta pouze dodávanou elektřinou z DS. Při „Partial Prosumership (PP)“ je část vyrobené elektřiny z OZE spotřebována a zbytek je dodán do DS. Koncept „Tenant Electricity Model (TE)“ umožňuje sdílet elektřinu z obytného domu do jiného objektu ve stejné čtvrti, pokud se jedná o bytový objekt. Poslední „Full Prosumership“ zahrnuje všechny možné prostředky sdílení elektřiny. Tzn. elektřina z FVE je nejprve použita pro vlastní spotřebu v budově, poté je jakýkoli přebytek sdílen s komunitou, aby se zcela nebo částečně pokryly deficity vyskytující se v jiných budovách a zbytek dodáván do DS. Ve scénářích označení „flex“ znamená flexibilitu na straně spotřeby, v tomto případě řízení nabíjení elektromobilů pouze v době přebytku elektřiny z FVE.

Z výsledků uvedených níže v grafu vyplývá, že největší soběstačnost a efektivitu má komunitní energetiky s konceptem „Full Prosumerism“.



Srovnání konceptů prosumerů dle podílu využití FVE- podíl na vlastní spotřebě (SCS), podíl na soběstačnosti (SSS)

Ekologické hodnocení je založeno na výpočtu skleníkových plynů vznikající při výrobě elektrické energie. Emise skleníkových plynů jsou vyjádřeny v ekvivalentu oxidu uhličitého. Pro ekonomické hodnocení je zde zvolen výpočet celkových ročních nákladů za spotřebovanou elektrickou energii a NPV (Net Present Value).

4.1.2 Současný stav komunitní energetiky v EU

Dle studie [16] zpracované společností Frank Bold v roce 2023 se v členských státech EU využívají různé metody sdílení elektřiny, tj. aplikuje se odlišný alokační klíč. V této studii byla zaměřena na rešerši legislativy a současný stav komunitní energetiky v Bruselu (Belgii), Francii, Itálii, Polsku, Portugalsku, Rakousku a Řecku. V následující tabulce je vidět jak v roce 2023 komunitní energetika v těchto státech splňovala směrnice EU. Z uvedeného shrnutí vyplývá, že v EU je v rozvoji komunitní energetiky z hodnocených států nejpokročilejší Rakousko a Belgie.

	Belgie (Brusel)	Francie	Itálie	Polsko	Portugalsko	Rakousko	Řecko
Pravidla pro členství subjektů ve společenství	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗
Územní působnost společenství	○	✗	○	✗	✗	✓	✓
Technické zajištění sdílení a dostupnost dat	✓	○	✓	✓	○	✓	✗
Metody rozdělování sdílené elektřiny	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗
Finanční a daňová podpora komunitní energetiky	✓	○	○	○	○	✓	✗
Ochrana členů společenství	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓

Legenda:

✓ Země příkladně naplňuje požadavky práva EU, případně obsahuje drobné nedostatky či omezení.

✗ Nenaplňuje požadavky práva EU, buď úplně schází, nebo jejich plnění obsahuje zásadní nedostatky.

○ Povinnosti vycházející z práva EU naplňuje přibližně, případně obsahuje nedostatky.

Legislativně možný alokační klíč sdílení elektřiny v jednotlivých zemích [16]:

- Belgie – statický, dynamický, hybridní nebo jinou, vlastní metodu rozdělování elektřiny.
- Francie – statický nebo vlastní. Pokud není zvoleno, tak je automaticky zvolen dynamický.
- Itálie - specifický model sdílení elektřiny s využitím výkupních cen (feed-in tariff).
- Polsko - elektřina se nesdílí v reálném čase, využívá se metoda tzv. net metering. Vyrobenou elektrickou energii lze „uložit“ do ES a spotřebovat ji později, nejdéle do jednoho roku. Nyní probíhá revize legislativy.
- Portugalsko – statický, dynamický a hybridní. Zvláštností je možnost využít různých koeficientů, které alokaci elektřiny dále modifikují.
- Rakousko – statický a dynamický.
- Řecko - virtuální net metering, tj. elektřina se nespotebovává v reálném čase. Všechna vyrobená elektřina je dodávána do ES a při měsíčním vyúčtování je odečtena od odebraného množství elektřiny z ES.

Z analýzy rešerše bylo v závěru studie sepsáno několik doporučení pro začínající komunitní energetiku v ČR. Přehled všech komunitních energetik v EU by měl být dostupný na oficiální stránce EU, konkrétně [17]. Seznam komunitních energetik v EU je uveden i v [18].

Informace o stavu komunitní energetiky v ostatních státech v Evropě jsou dostupné např. v [1], [3], [5], [14], [19] nebo [30]. Současný stav komunitní energetiky ve Velké Británii, kde se rozvojem komunitní energetiky zabývá např. energetická společnost Great British Energy (GBE), je např. uveden v [24].

Detailnější rešerše současného stavu komunitní energetiky je zde dále zaměřena pouze na státy sousedící s ČR, tj. státy jejichž elektrizační soustavy jsou propojeny s PS ČEPS, a.s.

▪ **Rakousko**

Rakousko si v roce 2020 dalo za cíl, že v do roku 2030, chce pokrývat celou svou spotřebu pouze vyrobenou elektrickou energií z OZE. V roce 2023 OZE pokrývali spotřebu cca 68 %. Nejvíce z OZE to byly vodní elektrárny cca 73 %, VTE cca 14 % a FVE cca 5,5 %.

Od 1. 1. 2022, kdy vstoupila v platnost novela zákona o obnovitelných zdrojích energie, se v Rakousku může rozvíjet komunitní energetika. Nicméně již od roku 2017 bylo možné v omezené míře sdílet elektřinu z OZE mezi jednotlivými sousedy (připojenými domácnostmi) a být v komunitním společenství označovaném jako tzv. společně jednající skupina zákazníků.

V současné době je možné v Rakousku pro sdílení elektřiny zakládat celkem 4 typy energetických společenství (komunit) [20]:

- Společně jednající zákazník = komunity spotřebitelů/domácností v rámci jednoho bytového domu sdílející elektřinu ze sdílené FVE instalované na střeše domu.
- Lokální společenství pro OZE = společenství vlastníků výroben elektřiny z OZE a odběrných míst spotřeby, připojené na hladině NN nejlépe na stejném vývodu z rozvodny bez nutnosti transformace na vyšší napěťové hladiny.
- Regionální společenství pro obnovitelnou energii = to samé jako lokální společenství pro OZE, jen s tím rozdílem, že zdroje a odběrná místa jsou připojeny na hladině VN. Při sdílení elektřiny může docházet k transformaci jen z VN na NN.

- Občanské energetické společenství – forma sdružování aktivních zákazníků, která umožní participaci napříč různými distribučními územími.

Energetická společenství se registrují prostřednictvím internetového portálu www.ebUtilities.at provozovaného asociací Oesterreichs Energie a pak uzavírají smlouvu s příslušným provozovatelem distribuční sítě. Jeden člen komunity může připojit a sdílet elektřinu z více OZE od podzimu 2022. Od podzimu 2023 lze provozovat energetické společenství napříč různými provozovateli distribuční sítě. A jeden odběratel může být účastníkem několika energetických společenství až od roku 2024.

V současné době je v Rakousku něco málo více než 1 400 energetických komunit. Nejvíce se jedná o sdílení elektřiny v bytových domech. Informace o některých realizovaných energetických komunitách jsou dostupné na webovém portálu Rakouské koordinační kanceláře pro energetická společenství [21].

Odpovědnost za měření a správu dat o dodávce a spotřebě elektřiny v jednotlivých odběrných místech má provozovatel distribuční soustavy, který má ze zákona povinnost zajišťovat měření v 15minutových intervalech. Sdílení dat lze pomocí platformy EDA (Energiewirtschaftlicher Datenaustausch – Energetická datová burza).

Sdílení elektřiny v současné době lze pomocí statického nebo dynamického alokačního klíče.

Elektřina ve společenství vyrobená a členy společenství spotřebovaná je osvobozena od daně z elektřiny a poplatku za podporu OZE. Zároveň se na sdílenou elektřinu vztahuje sleva z distribučních poplatků. Např. pokud jsou výrobní i odběrné místo spotřeby připojeny na hladině NN je sleva 57 % z distribučního poplatku. Na rozdíl od ČR není v Rakousku v distribučním poplatku pro domácnosti zahrnuta ani složka odvozená od velikosti jističe.

Individuální sdílení elektřiny napříč zemí a územími různých provozovatelů distribučních soustav v Rakousku zatím umožněno není, ale lze jí uskutečnit na trhu s elektřinou pomocí agregátora např. společnost e-Friends. V Rakousku je jedním z významných projektů komunitní energetiky projekt Peer2Peer im Quartier ve vídeňském rezidenčním a administrativním centru Viertel Zwei. Detailnější informace o tomto projektu jsou uvedeny v jeho závěrečné zprávě z roku 2022, viz [22]. To, že se komunitní energetika v Rakousku více rozvíjí, dokládá i skutečnost, že např. společnost NEOOM v energetické komunitě KLUUB [23] umožňuje regionální sdílení elektřiny mezi Rakouskými a Německými regiony.

▪ Německo

V Německu se dle rozhodnutí vlády plánuje, že do roku 2030 bude cca 65 % spotřeby pokryto výrobou elektřiny z OZE. Současný zákon o obnovitelných zdrojích energie (EEG) se o sdílení energie přímo nezmiňuje. V komunitní energetice v Německu se v současné době stále předpokládá sdílení elektřiny bez využití veřejné distribuční sítě a převažuje komunitní energetika ve formě energetických družstev. Od roku 2017 je možné stejně jako v Rakousku sdílet elektřinu v bytových domech, tzv. Mieterstrom model (elektřina pro nájemníky). Provozovatel fotovoltaické elektrárny do 100 kWp může získat platbu za prodej přebytků elektřiny do sítě ve feed-in tarifu.

Občanská energetická společenství často využívají také možnosti spojit se do tzv. virtuálních elektráren a dohromady vytvářet agregační bloky. Od roku 2014, je pro výrobní s výkonem nižším než 10 kWp zavedeno osvobození od povinnosti platit distribuční poplatek za OZE z elektřiny, kterou si vyrobí a spotřebují. U zdrojů s instalovaným výkonem vyšším než 10 kWp se platí distribuční poplatek za OZE ve snížené výši 40 %.

▪ **Polsko**

Cíle Polska v oblasti obnovitelné energie jsou definovány v oficiálním strategickém dokumentu polské energetiky do roku 2040 (PEP2040). Do roku 2023 má Polsko za cíl zvýšit podíl OZE na hrubé konečné spotřebě energie na 47 %, což má být dosaženo především instalací FVE a VTE na moři. V legislativě se komunitní energetika v rámci společenství využívajících OZE objevila již v roce 2015. Od roku 2021 kdy byl zákon o OZE novelizován, tak byla definována i energetická společenství jako energetická spolupráce působící na území jednoho provozovatele distribuční sítě elektřiny nebo plynu. Polský regulační rámec umožňuje zakládat různé typy energetických společenství:

- Energetická kooperativa (EKO) = výroba elektřiny (max. výkon 10 MW a musí tvořit minimálně 70 % roční celkové spotřeby), výroba tepla (max. výkon 30 MW) a výroba bioplynu (do 40 mil. m³) pro vlastní spotřebu. Do společenství mohou být zapojeny maximálně tři sousedící venkovské nebo městske-venkovské obce, které spadají pod jednoho provozovatele distribuční soustavy.
- Energetický klastr = oproti EKO nejsou právnickou osobou, nemají omezení počtu členů, a kromě výroby a spotřeby elektřiny mohou s touto energií také obchodovat. Mohou být zřízeny v jednom kraji (okrese) nebo v pěti sousedních obcích, avšak v rámci území jednoho provozovatele distribuční sítě. Přeshraniční propojení není povoleno.
- Kolektivní prozumentí obnovitelné energie = společenství vlastníků bytů ve vícepodlažních bytových domech za účelem výroby energie pro vlastní spotřebu.

Činnost energetických společenství je územně omezena na jeden okres nebo tři až pěti sousedících obcí a pouze na území jednoho distributora. V současné době není komunitní energetika v Polsku zatím více rozšířena. V roce 2022 to bylo pouze cca 66 energetických klastrů a cca 5 energetických družstev. Chytrá měřidla jsou pro ES povinná a účtování probíhá po hodinových intervalech. Je vyvíjen centrální informační systém trhu s energií (tzv. CSIRE), který má usnadnit účinnou a transparentní výměnu digitálních informací. Možnost obchodovat s elektřinou je povoleno pouze energetickým klastrům. Kooperativa má právo bezplatně spotřebovat takové množství elektřiny odebrané z veřejné sítě, které odpovídá 60 % toho, co v průběhu zúčtovacího období naopak do sítě dodala. Energetické kooperativy nemusí platit poplatky za podporu OZE, daň z elektřiny, ani poplatek za kombinovanou výrobu elektřiny a tepla.

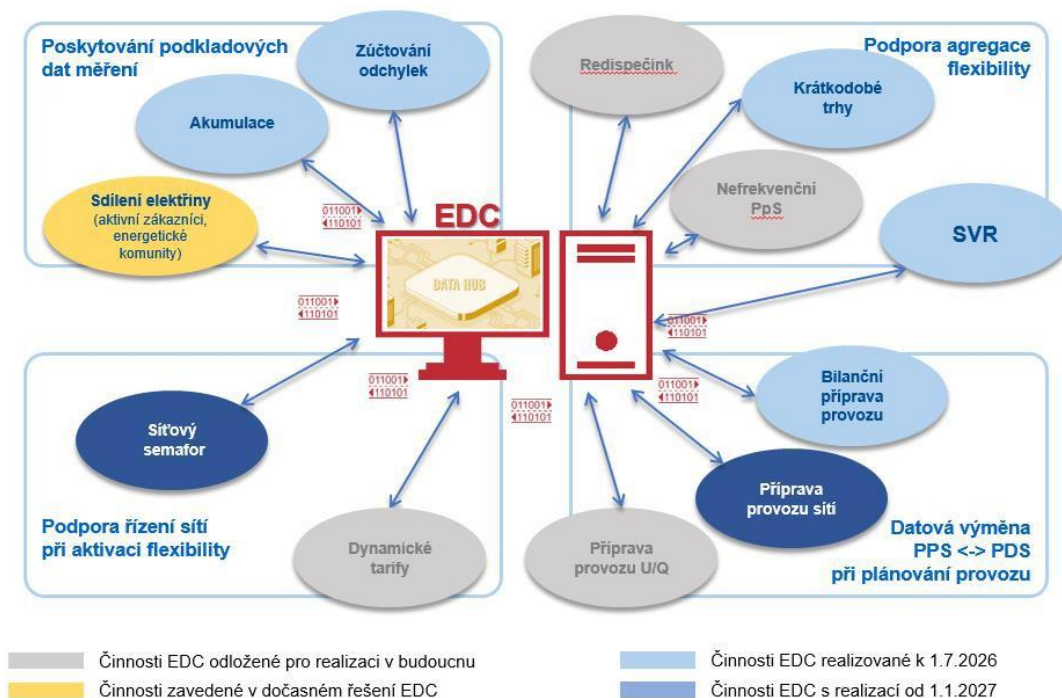
▪ **Slovensko**

Podle Národního energetického a klimatického plánu chce Slovensko do roku 2030 dosáhnout 19 % podílu OZE na konečné spotřebě energie a plánuje investice do FVE a VTE. Od roku 2022 platí novela energetického zákona č. 251/2012, která definuje energetická společenství (jakékoliv DECE) a energetickou komunitu (pouze OZE) obdobně jako je definováno v energetickém zákoně v ČR. Systém elektronických energetických datových center má být v provozu až od července 2024, takže rozvoj komunitní energetiky na Slovensku teprve začíná. Pro energetické společenství i energetickou komunitu je povinná registrace u Úřadu pro regulaci síťových odvětví (ÚRSO).

4.1.3 Současný stav komunitní energetiky v ČR

V ČR se komunitní energetikou zabývá především Unie komunitní energetiky (UKEN) [25]. Dle legislativy je v ČR možné zakládat energetická společenství za účelem sdílení elektřiny od 1.1. 2024, kdy vyšla v platnost novela energetického zákona č. 458/2000 Sb. tzv. LEX OZE II. Samotné sdílení elektřiny je legislativně umožněno až od 1. 7. 2024. Dle této legislativy mohou v současné době v ČR sdílet elektřinu, kterou si samy vyrobili, aktivní zákazníci, společenství či jeho členové. Podmínky sdílení jsou jednodušší než při běžné dodávce elektřiny. Pro sdílení elektřiny není zatím potřeba licence na obchod s elektřinou, a účastníci sdílení nenesou odpovědnost za odchylku. Sdílení elektřiny má totiž pouze doplňkový charakter ke standardní dodávce, kterou nadále zajišťuje dodavatel elektřiny. I proto nemusí sdílení na rozdíl od běžné dodávky probíhat nepřetržitě. Společenství dle novely může získat i licenci na obchod s elektřinou a prodávat ji na trhu, v zahraničí tak některá větší společenství fungují. Podrobný popis modelu pro sdílení elektřiny pro dočasné řešení od 07/2024 je prezentován v [31].

Základem pro sdílení elektřiny je založení spolku komunitní energetiky včetně jeho vize, cílů, energetických zdrojů (FVE, VTE atd.), lokality (území), stanov spolku a vymezení podmínek fungování. Během nebo po založení spolku je nutná jeho registrace na ERÚ do tzv. Rejstříku energetických společenství a dále je nezbytná registrace v obchodním rejstříku. Po těchto registracích je možné registrovat jednotlivé skupiny sdílení u **Elektroenergetického datového centra (EDC)** a lze začít sdílet elektřinu. Skupina sdílení je skupina osob, respektive skupina EAN. Společnost EDC vznikla podle energetického zákona s cílem umožnit efektivní transformaci tuzemské energetiky a je podmínkou pro rozvoj komunitní energetiky. Jejím cílem je zajišťovat sběr dat v energetice, jejich standardizaci a sdílení. V EDC se budou soustřeďovat veškeré informace o výrobě a spotřebě elektřiny na úrovni domácností i velkých firem, tocích elektřiny či jejího sdílení dodavateli energií, PDS, PPS a ERÚ, viz následující obrázek.



Základní činnosti EDC a jejich časové začlenění, zdroj: Elektroenergetické datové centrum, a.s.

Do 1. 7. 2026 lze sdílet elektrickou energii jako aktivní zákazník po celé ČR nebo jako energetické společenství maximálně v rámci tří sousedících obcí s rozšířenou působností

(ORP) nebo na území hl. m. Prahy. Současné době platí i další omezení, např. že v jedné skupině sdílení může teoreticky být neomezené množství výroben elektřiny (resp. max. 1 000), ale do jednoho odběrného místa lze sdílet elektřinu maximálně z pěti výroben. Hlavní rozdíly mezi aktivním zákazníkem a energetickým společenstvím jsou vidět na následujícím obrázku.



Rozdíly mezi aktivním zákazníkem a energetickým společenstvím, zdroj: Unie komunitní energetiky

Sdílení elektřiny ve společenství nemusí být vždy bezúplatné. Elektřina sdílená s jednotlivými členy společenství či aktivními zákazníky může být poskytována i za úplatu, například:

- může mít podobu pravidelně hrazeného členského příspěvku,
- vyplývat ze stanov společenství,
- být sjednána ve smlouvě (např. smlouvě o sdílení elektřiny).

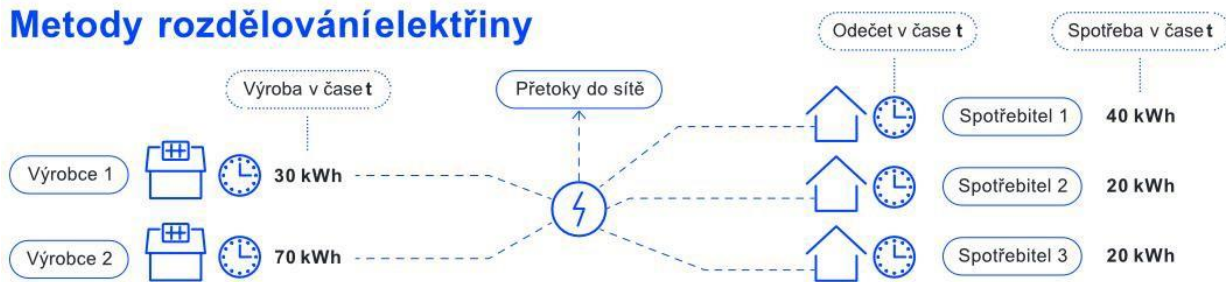
Sdílení elektřiny je pouze virtuální účetní operací, tj. lze pouze změřit celkové množství vyrobené elektřiny a poté členům společenství či aktivním zákazníkům o toto množství snížit účty za elektřinu. Při sdílení se využívá veřejná distribuční síť a za tuto službu se platí distribuční poplatky a další regulované platby (příspěvek na OZE apod.). Výjimkou je sdílení elektřiny v rámci bytového domu, kdy se veřejná síť nevyužívá, a proto distribuční poplatek není hrazen.

Zároveň je potřeba mít sjednaný dostatečný rezervovaný výkon, protože sdílet elektřinu lze pouze do výše rezervovaného výkonu (v režimu mikrozdroje bez přetoků naopak elektřinu sdílet v současné době nelze vůbec).

Sdílení elektřiny se díky tzv. průběhovému měření odehrává téměř v reálném čase (resp. v patnáctiminutových vyhodnocovacích intervalech) spolu s tím, jak sdílený zdroj vyrábí elektřinu a posílá ji do sítě. Aktivní zákazníci i členové energetického společenství mají nárok na bezplatnou instalaci průběhového měření od distributora do 3 měsíců od podání žádosti, výjimku tvoří pouze výroby s instalovaným výkonem nad 50 kW.

Metoda sdílení a vyúčtování sdílené elektřiny je dána alokačním klíčem. Do 1. 7. 2026 je možné využívat pouze statický model sdílení. Po 1. 7. 2026 se předpokládá možnost využití i dynamického a hybridního modelu sdílení. Základní rozdíl a charakteristické vlastnosti jednotlivých metod sdílení elektřiny jsou uvedeny na následujícím obrázku.

Metody rozdělování elektřiny



STATICKÁ METODA	DYNAMICKÁ METODA	HYBRIDNÍ METODA
<p>Množství elektřiny, které putuje členovi společnosti ze sdílené výroby záleží na pevně daném podílu (např. v %).</p>	<p>Elektřina vyrobená společností se přiřazuje jeho členům dle jejich aktuální spotřeby.</p>	<p>Kombinuje statickou a dynamickou metodu, elektřina se nejprve rozdělí dle pevného podílu a případný přebytek se rozdělí dle aktuální spotřeby členů společnosti dynamicky.</p>
<p>ALOKAČNÍ KLÍČ</p> <p>S1 20 % S2 20 % S3 60 %</p>	<p>ALOKAČNÍ KLÍČ</p> <p>S1 $40/80 = 50\%$ S2 $20/80 = 25\%$ S3 $20/80 = 25\%$</p>	<p>ALOKAČNÍ KLÍČ – 1. krok</p> <p>S1 20 % S2 20 % S3 60 %</p>
<p>PŘÍKLAD VYÚČTOVÁNÍ</p> <p>Alokace v t</p> <p>S1 $20\% * 80 \text{ kWh} = 16 \text{ kWh}$ S2 $20\% * 80 \text{ kWh} = 16 \text{ kWh}$ S3 $60\% * 80 \text{ kWh} = 48 \text{ kWh}$</p> <p>Odběr ze sítě</p> <p>S1 $40 - 16 = 24 \text{ kWh}$ S2 $20 - 16 = 4 \text{ kWh}$ S3 $0 \text{ kWh} (28 \text{ kWh}+)$</p> <p>Přetok celkem</p> <p>$20 + 28 = 48 \text{ kWh}$</p>	<p>PŘÍKLAD VYÚČTOVÁNÍ</p> <p>Alokace v t</p> <p>S1 $50\% * 80 \text{ kWh} = 40 \text{ kWh}$ S2 $25\% * 80 \text{ kWh} = 20 \text{ kWh}$ S3 $25\% * 80 \text{ kWh} = 20 \text{ kWh}$</p> <p>Odběr ze sítě</p> <p>S1 0 kWh S2 0 kWh S3 0 kWh</p> <p>Přetok celkem</p> <p>20 kWh</p>	<p>Alokace v t</p> <p>S1 $20\% * 80 \text{ kWh} = 16 \text{ kWh}$ S2 $20\% * 80 \text{ kWh} = 16 \text{ kWh}$ S3 $60\% * 80 \text{ kWh} = 48 \text{ kWh}$ (28 kWh přebytek)</p> <p>ALOKAČNÍ KLÍČ – 2. krok</p> <p>S1 $24/28 = 86\%$ S2 $4/28 = 14\%$ S3 0</p> <p>Alokace v t</p> <p>S1 $86\% * 28 = 24 \text{ kWh}$ S2 $14\% * 28 = 4 \text{ kWh}$ S3 0</p> <p>Odběr ze sítě</p> <p>S1, S2, S3 0 kWh</p> <p>Přetok celkem</p> <p>20 kWh</p>
<p>VÝHODY</p> <p>Lepší předvídatelnost předem dohodnutých podílů na sdílené elektřině.</p>	<p>VÝHODY</p> <p>Větší množství elektřiny je využito v rámci společnosti.</p>	<p>VÝHODY</p> <p>Spojuje všechny výhody statické i dynamické metody a zároveň eliminuje jejich nedostatky.</p>
<p>NEVÝHODY</p> <p>Není flexibilní a nevede k využití většiny elektřiny uvnitř společnosti. Pokud člen v daném intervalu sdílenou elektřinu nespotřebuje, je prodána jako přetok do sítě. To není ekonomicky příliš výhodné.</p>	<p>NEVÝHODY</p> <p>Může nepřiměřeně zvýhodnit jednotlivce s vysokou spotřebou oproti ostatním členům společnosti, kteří se snaží snižovat svou spotřebu.</p>	<p>NEVÝHODY</p> <p>Menší předvídatelnost než u prosté statické metody.</p>

Metody sdílení elektřiny, zdroj [16]

4.1.4 Technický dopad energetických komunit na ES

Rozsáhlé zavedení energetických komunit v ES bude mít přímé dopady na distribuční sítě. Případné změny výkonových toků a přetoky budou záviset na použité technologii decentralních zdrojů, velikosti instalovaného výkonu a místu připojení v síti a podmínkami provozu. Kromě distribučních sítí může ovlivnit zavedení energetických komunit i přenosové sítě [29].

Distribuční sítě

- Překročení povolených odchylek napětí → regulace jalového výkonu, upgrade infrastruktury
- Tepelné přetížení → dočasné omezení výroby decentralních zdrojů
- Vliv na kvalitu elektřiny - nesymetrie a harmonické
- Chránění sítí a detekce poruch → změna filozofie chránění s respektováním obousměrných výkonových toků, nové algoritmy
- Revize plánů obnovy po výpadcích napájení
- Dočasný soběstačný provoz částí sítí

Přenosové sítě

- Řízení výkonové rovnováhy
- Řízení odpojení zátěže (load shedding) při nízké frekvenci → více dynamické
- Regulace U a Q → management jalových výkonů
- Vliv na dynamiku soustavy → dynamické modely pro přesnější estimaci samoregulačního efektu soustavy
- Strategie obnovy napájení po výpadku
- Chránění sítí → nové systémy a algoritmy respektující nižší hodnoty zkratových proudů
- Změna současných tržních vzorců.

Energetické komunity přinášejí řadu technických příležitostí, zejména z pohledu operátorů distribučních (DSO) a přenosových soustav (TSO).

Z pohledu DSO:

- Lepší využití distribuční sítě: snižování špiček spotřeby, snížení zatížení transformátorů.
 - Flexibilita ve využití decentralních zdrojů.

Z pohledu TSO

- Podpora řízení výkonové rovnováhy: lepší koordinace mezi přenosovými a distribučními sítěmi, energetické komunity mohou nabídnout flexibilitu na straně výroby.
- Přesnější řízení zátěže: TSO mají možnost lépe předvídat zatížení a lépe řídit výkonové rezervy. Energetické komunity mohou nabídnout flexibilitu v řízení spotřeby.

4.2 Podpůrné služby na straně výroby a spotřeby elektřiny

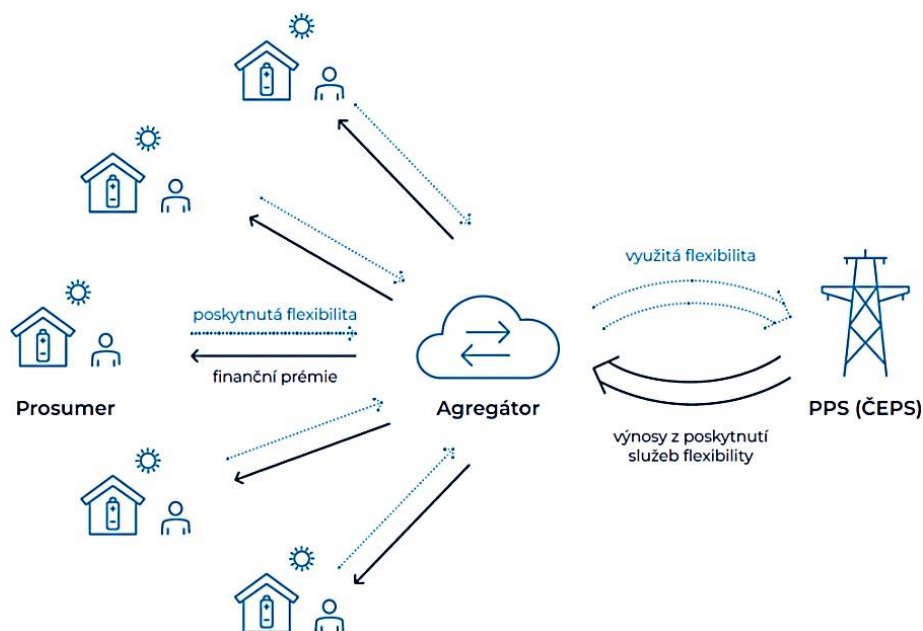
Pro udržení frekvenční a napěťové stability ES bude v budoucnu s rozvojem decentralizace a změnou energetického mixu zapotřebí udržovat výkonovou bilanci nejen na straně zdrojů, ale i na straně spotřeby. S tím souvisí i v nedávné době nově zavedené termíny (a s nimi související technologie a postupy) a jako je agregace a flexibilita. **Flexibilita** je rychlost a schopnost zdrojů (nebo spotřebičů) měnit svůj dodávaný (nebo odebíraný) výkon do (nebo z) ES oproti sjednaným (předpokládaným) diagramům dodávky (odběru), a to v reakci na požadavky z hlediska provozu a řízení ES nebo změny ceny elektřiny na trhu.

Flexibilitu lze uplatnit na / jako:

- energii na krátkodobém trhu s elektřinou
- krytí odchylek subjektů zúčtování
- podpůrnou službu k zajištění systémových služeb PS
- energii na vyrovnávacím trhu, popřípadě obdobných platformách

Prodej flexibility jako podpůrné služby na jakémkoliv trhu s elektřinou je umožněno pomocí tzv. **agregace flexibility**. Obecně je agregace funkce vykonávaná fyzickou nebo právnickou osobou, která kombinuje plánovaný odběr nebo vyrobenou elektrickou energii od více zákazníků do větší koordinované skupiny za účelem prodeje, nákupu nebo aukce na jakémkoli trhu s elektřinou. Přímý účastník trhu, který agreguje flexibilitu od jejích jednotlivých poskytovatelů za účelem prodeje, je tzv. agregátor.

Využívání všech dostupných zdrojů flexibility pro řízení ES ČR je základním předpokladem pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu ES. Proto s rozvojem decentralizace a změnou energetického mixu bude nezbytně nutné využívat i flexibilitu menších DECE a nových technologií v oblasti akumulace, elektromobility a zařízení na straně spotřeby.



Agregace flexibility, zdroj: Unie komunitní energetiky

Agregátor může být:

- **Integrovaný agregátor**
 - Má licenci na účast na velkoobchodním trhu s elektřinou
 - Je odpovědný za odchylku v odběrných místech, v nichž sám aktivuje flexibilitu
- **Nezávislý agregátor**
 - Nemá marketingovou licenci
 - Externí subjekt nezávislý na subjektu odpovědném za odběrné a předávací místo z hlediska odchylky, což je zpravidla dodavatel flexibility.

Služby, které může agregace flexibility dle [27] poskytovat jsou uvedeny v následující tabulce.

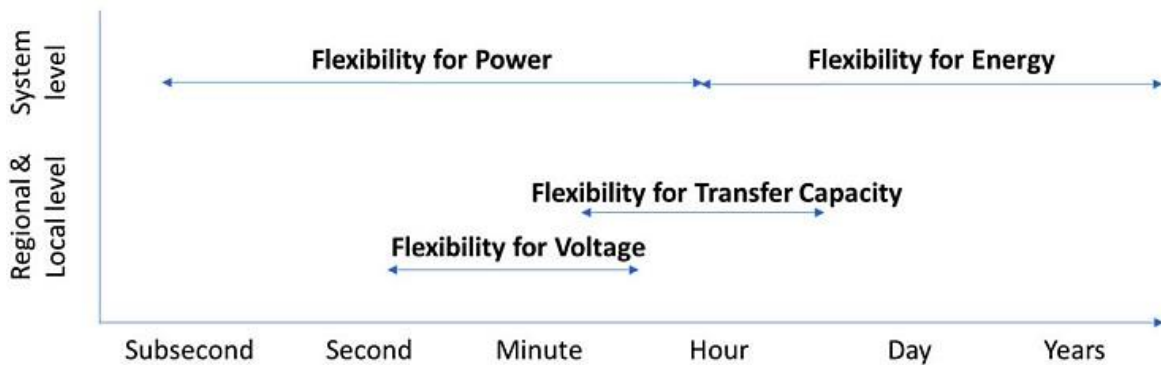
Regulovaný trh		Volný trh	
PS	DS	Spotřebitel	Obchodníci
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexibilita pro regulaci U a f ▪ Řízení přetížení ▪ Nižší investice do rozšiřování sítě ▪ Koordinace a řízení DECE ▪ Přechod do ostrovního provozu ▪ Podpora splnění kritéria N-1 ▪ Podpora kvality dodávané elektřiny 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sekundární a terciální regulace frekvence ▪ Kompenzace primární regulace jiných zdrojů ▪ Koordinace a řízení DECE ▪ Koordinace výměny informací ▪ Smart Grids a virtuální elektrárny ▪ Řízení přetížení a kapacity sítě ▪ Regulace napětí ▪ Přechod do ostrovního provozu ▪ Podpora splnění kritéria N-1 ▪ Podpora kvality dodávané elektřiny 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Účast na organizovaných trzích ▪ Snížení nákladů na vyúčtování energie (řízení spotřeby, atd.) ▪ Přechod do ostrovního provozu 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Účast na denních a vnitrodenních trzích ▪ Optimalizace odchylek na velkoobchodním trhu ▪ Optimalizace výroby

Dle [28] lze flexibilitu rozlišovat podle účelu jejího využití na:

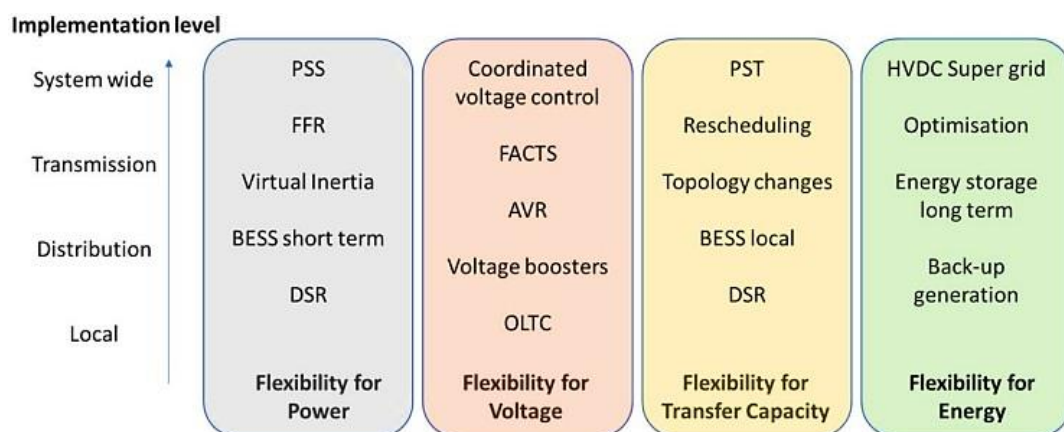
- **Flexibility for Power**
 - Využití: pro zajištění krátkodobé výkonové rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektřiny (systémový požadavek na udržení stability frekvence).
 - Důvod aplikace: zvýšené množství přerušovaného napájení vlivem kolísání výroby z FVE a VTE v závislosti na počasí
 - Doba aktivace: Zlomky sekund až hodiny
- **Flexibility for Energy**
 - Využití: pro zajištění střednědobé až dlouhodobé výkonové rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektřiny (systémový požadavek pro předpokládané scénáře spotřeby).
 - Důvod aplikace: snížení množství využívání fosilních paliv

- Doba aktivace: Hodiny až několik let
- **Flexibility for Transfer Capacity**
 - Využití: krátkodobá až střednědobá schopnost přenášet elektřinu mezi výrobou a spotřebou, tj. výroba v místě spotřeby. Snížení přetížení sítí, snížení ztrát při přenosu a efektivnější využití energie.
 - Důvod aplikace: zvýšená spotřeba ve špičkách dle DDZ a naopak zvýšená špičková výroba z FVE přes poledne
 - Doba aktivace: Minuty až několik hodin
- **Flexibility for Voltage**
 - Využití: krátkodobá schopnost udržet napětí v předem definovaných mezích
 - Důvod aplikace: zvýšený dodávaný výkon z DECE do DS, obousměrné toky výkonu z (do) DS.
 - Doba aktivace: Sekundy až desítky minut

Porovnání doby aktivace a možnosti aplikace jednotlivých kategorií flexibility jsou zobrazeny na následujících obrázcích.



Porovnání doby aktivace pro různé typy flexibility [28]

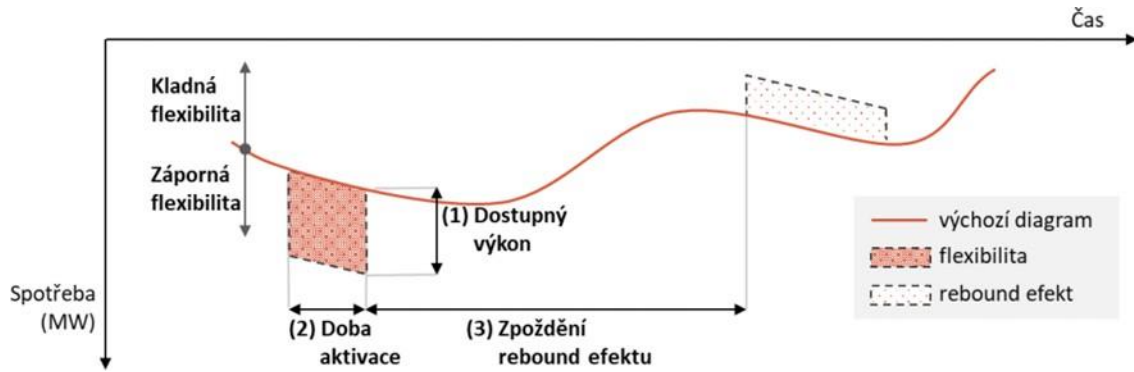


PSS: Power System Stabiliser; FFR: Fast Frequency Response; BESS: Battery Energy Storage System; DSR: Demand Side Response; FACTS: Flexible AC Transmission System; AVR: Automatic Voltage Regulator; OLTC: On-Load Tap-Changer; PST: Phase-Shifting Transformer

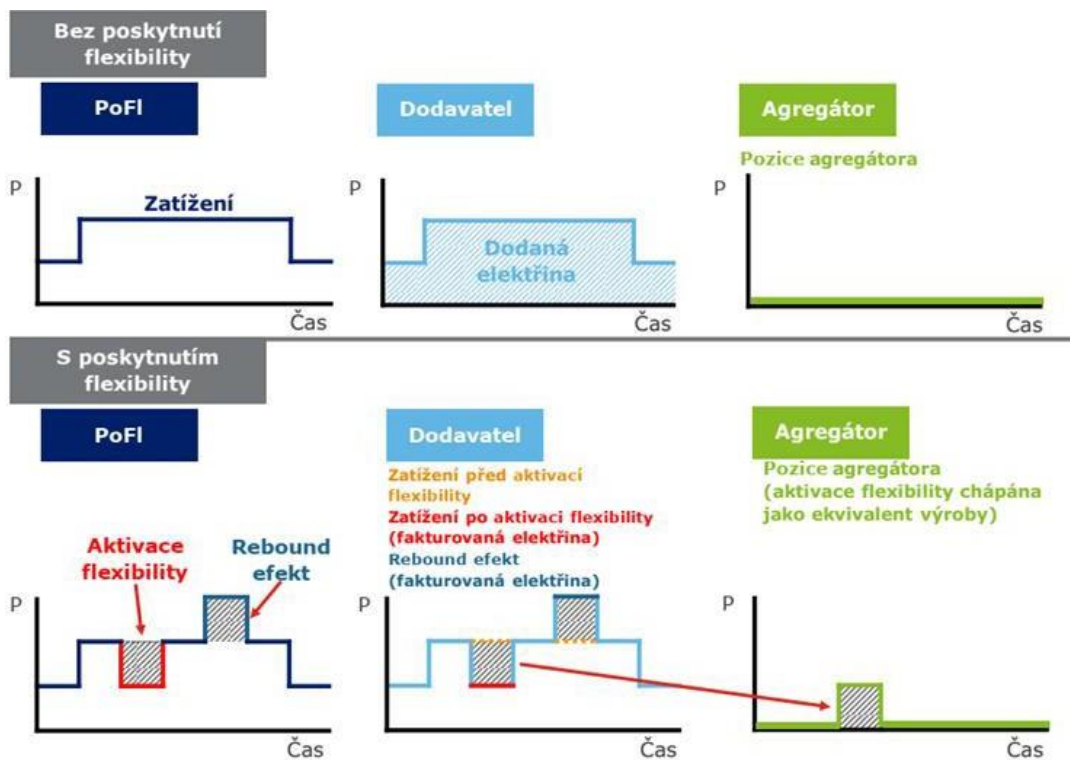
Prostředky pro poskytování různých typů flexibility [28]

Flexibilitu charakterizují tři vzájemně podmíněné parametry, viz následující obrázek [32]:

- dostupný výkon (kW, MW) maximální možná změna výkonu (od výchozího diagramu spotřeby) v určitém okamžiku, kterou lze aktivovat. Má kladnou a zápornou složku,
- doba aktivace (min, h) čas, po který dochází ke změně výchozího diagramu spotřeby,
- zpoždění rebound efektu (h) minimální doba od ukončení aktivace flexibility do vzniku rebound efektu.



Vliv aktivace flexibility a rebound efektu na PoFI (poskytovatele flexibility), dodavatele a agregátora je na následujícím obrázku.



Rozsáhlý dokument CIGRE Advanced Consumer Side Energy Resource Management Systems, 2024 [33] uvádí rozsáhlý přehled různých typů decentralních zdrojů (DER) a jejich potenciál pro energetickou flexibilitu. Nabízí kvalitativní hodnocení pro technické odborníky a umožňuje porozumět možnostem a omezením různých DER. Dokument formou přehledových tabulek hodnotí realizovatelnost poskytování podpůrných služeb různými typy DER a nastiňuje požadavky na měřicí zařízení a funkcionality softwaru. Dále se dokument zabývá informačními a telekomunikačními technologiemi pro řízení DER.

4.2.1 Flexibilita decentralizovaných zdrojů

V současném energetickém mixu převažují zdroje s dostatečnou flexibilitou, tj. schopností měnit dodávaný výkon do ES dle požadavků na udržení frekvenční a napěťové stability. Pokud v budoucnu již nebudou v provozu elektrárny spalující fosilní paliva, a naopak bude převládat výroba z OZE, tak hrozí snížení schopnosti flexibility ES na straně zdrojů. V Národním akčním plánu pro chytré sítě, jsou definována opatření provozovatelů distribučních soustav pro eliminaci snížení flexibility na straně zdrojů, viz [34]. Bez realizace opatření v DS by zvýšení decentralizace vedlo ke zhoršení kvality a spolehlivosti dodávek elektrické energie. Z čehož vyplývají základní požadavky k udržení stability ES z hlediska flexibility:

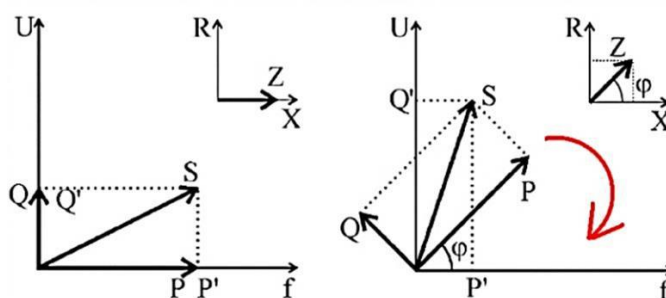
- Zvýšené požadavky na řízení ES s nutností zavedení kompletního dispečerského řízení až na nejnižší napěťovou hladinu.
- Zvýšení nároků na flexibilitu sítě a zvýšení rezervního výkonu v soustavě (lze zajistit pomocí akumulace a flexibility na straně zdrojů a spotřeby).
- Využití DECE pro poskytování podpůrných služeb.

V ES se nevyskytují pouze zdroje se synchronními generátory, ale například i větrné elektrárny s asynchronními generátory či fotovoltaické elektrárny připojené do sítě přes střídače. Znalost P-Q diagramů zdrojů elektrické energie je velmi důležitá, neboť jsou jím definovány regulační rozsahy a výkonová čísla zdrojů. Výkonová čísla udávají citlivost regulačních obvodů zdrojů, tzn. odezvu generátorů na vzniklou odchylku v bilanční rovnici. Tím jsou známy statické napěťové a frekvenční charakteristiky zdrojů. V praxi se tyto charakteristiky u velkých zdrojů i zatížení zjišťují měřeními. U bloků elektráren se charakteristiky zjišťují především během certifikace podpůrných služeb. U narůstajícího počtu malých decentralizovaných zdrojů se střídači se tyto charakteristiky, dají dopočítat díky znalosti P-Q diagramů.

Regulaci výkonu decentralizovaných zdrojů na nn lze teoreticky provést pomocí tzv. virtuální metody. Vývoj virtuálních metod je cca od roku 2000 a nejvíce řešené a vyvíjené metody jsou:

- Metoda virtuálního činného a jalového výkonu – nejjednodušší a nejvíce analyzována a vylepšována – laboratorně odzkoušena
- Metoda virtuální frekvence a napětí
- Metoda virtuální impedance

Všechny tyto metody vychází z teoretického předpokladu, že v ostrovních mikrosítích či Smart Grids lze udržovat napěťovou a frekvenční stabilitu obdobným způsobem jako je to činěno v rámci PS. Například metoda virtuálního činného a jalového výkonu je založena na geometrickém otočení kartézské souřadnicové soustavy, tak aby výsledná poloha osy činného a jalového výkonu odpovídala jejich umístění v sítích na hladině VVN ($X \gg R$), tj. osa napětí je rovnoběžná s osou jalového výkonu a osa frekvence je rovnoběžná s osou činného výkonu, viz následující obrázek.



Využitím transformační matice T dojde k rovinné rotaci složek zdánlivého výkonu S o potřebný úhel φ tak, aby výsledná poloha virtuálních výkonů odpovídala jejich umístění v případě, kdy $X \gg R$. Poté osa virtuálního činného výkonu je rovnoběžná s osou frekvence a osa virtuálního jalového výkonu je rovnoběžná s osou napětí a k regulaci frekvence a napětí DECE lze využít upravené frekvenční a napěťové statické charakteristiky [34]:

$$f - f_n = -k_{pp} \cdot (P' - P'_n) = -k_{pp} \frac{X}{Z} (P - P_n) + k_{pp} \frac{R}{Z} (Q - Q_n)$$

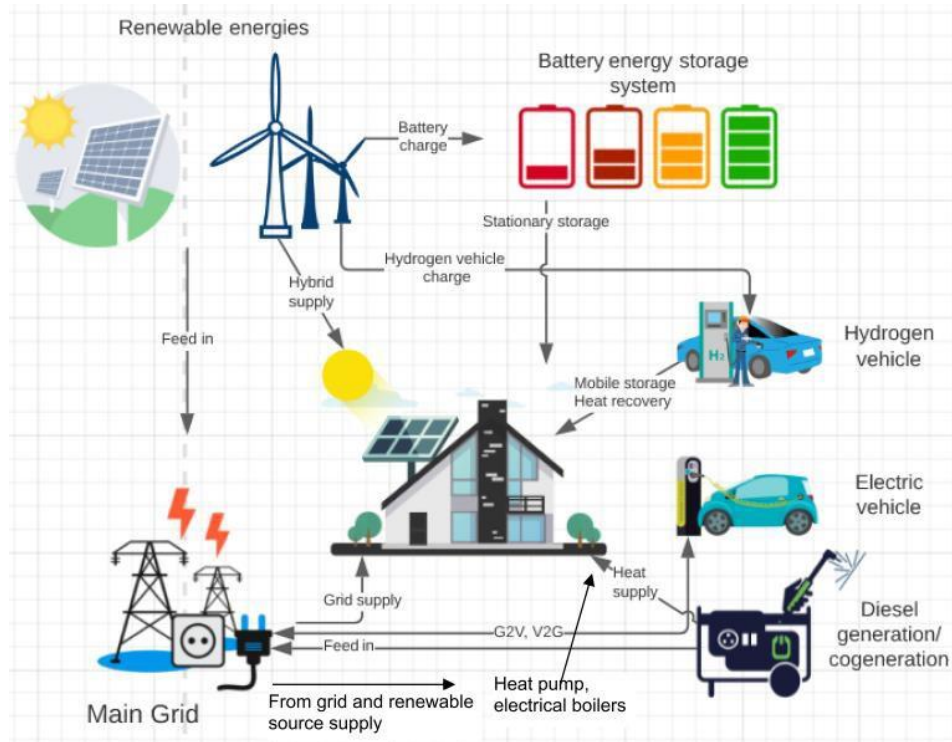
$$U - U_n = -k_{qp} \cdot (Q' - Q'_n) = -k_{qp} \frac{X}{Z} (Q - Q_n) - k_{qp} \frac{R}{Z} (P - P_n)$$

Aby FVE a VTE měly dostatečnou flexibilitu a mohly poskytovat podpůrné služby, tak musí mít vždy akumulční zařízení, které je nezbytnou podmínkou pro udržení frekvenční a napěťové stability v ES. Pokud by byl požadavek pouze na omezování výkonu z FVE a VTE do ES, tak by akumulace u těchto zdrojů nebyla bezprostředně nutná. Avšak s plánovaným rozvojem decentralizace energetiky a sítí typu Smart Grid, které mohou přecházet i do ostrovního režimu, se zvýší i požadavek regulaci výkonu z DECE. Tzn. pro možnost plynulého poskytování kladné i záporné flexibility bude nezbytné FVE a VTE provozovat v kombinaci s akumulčním zařízením, např. jako virtuální elektrárny. Díky akumulaci se nejen zvýší flexibilita těchto zdrojů, ale rovněž se zvýší i jejich výkonový rozsah pro poskytování podpůrných služeb. Pokud bude FVE nebo VTE provozována v kombinaci s akumulčním zařízením jako jeden zdroj, tak bude umožněno díky akumulaci zvyšovat množství dodávaného výkonu do ES. Zároveň při požadavku na omezení výkonu z těchto zdrojů do DS, bude možné současně v omezené míře ještě i odebírat výkon z ES a akumulovat ho, čímž se ještě více zvýší i rozsah jejich flexibility a zajištění frekvenční a napěťové stability nejen v ostrovních sítích.

4.2.2 Aktivní řízení spotřeby

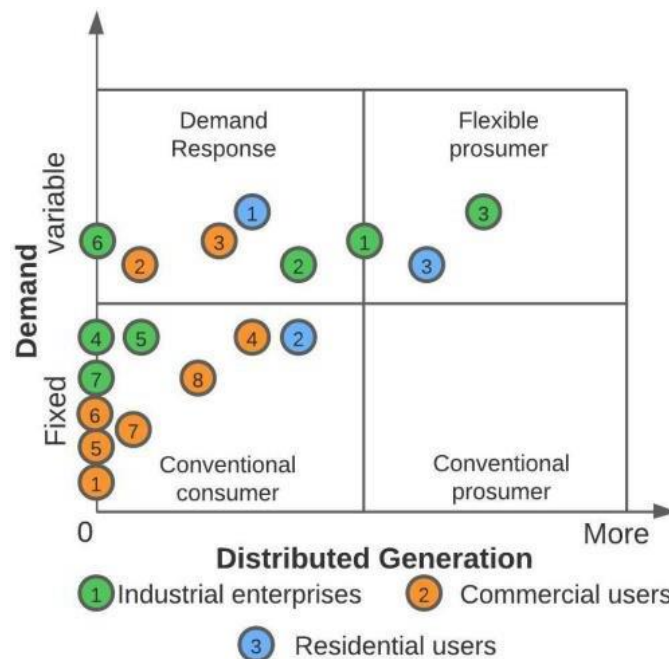
Spotřebitele (konečné zákazníky) lze již nyní i v budoucnu rozdělit z hlediska možnosti poskytovat flexibilitu na tyto skupiny [33]:

- **Pasivní (konvenční) spotřebitelé** - pouze odebírají energii bez jakéhokoliv omezení nebo regulace; nemají vlastní generaci nebo je příliš malá na to, aby ji bylo možné využít na trzích flexibility. Zároveň neexistuje možnost flexibilní změny spotřeby z důvodu nízké úrovně automatizace a (nebo) omezení spojených s technologickým procesem nebo nedostatečné motivace vlastníků.
- **Aktivní spotřebitelé** - mohou měnit svůj profil spotřeby a jsou schopni se podílet na poskytování služeb typu Demand Side Response. Poskytují podpůrné služby z hlediska odložení a regulace jejich spotřeby.
- **Konvenční prosumeři** - mají vlastní výrobu, která umožňuje dodávku energie do sítě. Takové spotřebitele lze agregovat do virtuálních elektráren.
- **Aktivní (flexibilní) prosumeři** - umožňují regulovat dodávaný výkon z jejich vlastních zdrojů do DS a zároveň poskytují i podpůrné služby na straně spotřeby.



Příklad aktivního prosumera [33]

Následující obrázek ukazuje zařazení skupin zákazníků do výše uvedených kategorií spotřebitelů.



Klasifikace spotřebitelů podle dostupnosti zdrojů flexibility (řízená zátěž, výroba) [33]

Skupiny spotřebitelů

1) Průmyslové podniky

- Průmyslové podniky: výroba a přeprava nerostů; zpracování nerostů; strojírenství a výroba nástrojů; chemické a hutní podniky, energetické strojírenství (1).
- Zemědělské podniky: skleníky, komplexy hospodářských zvířat a lesnictví, zavlažovací systémy (2).
- Průmyslové parky (3).
- Chladírny (4).

- Elektrifikace jeřábů a pozemního zásobování lodí v přístavech (5).
- Vytápění, chlazení a rozvody vody (6)
- Logistický a dopravní sektor (7).

2) Komerční zákazníci

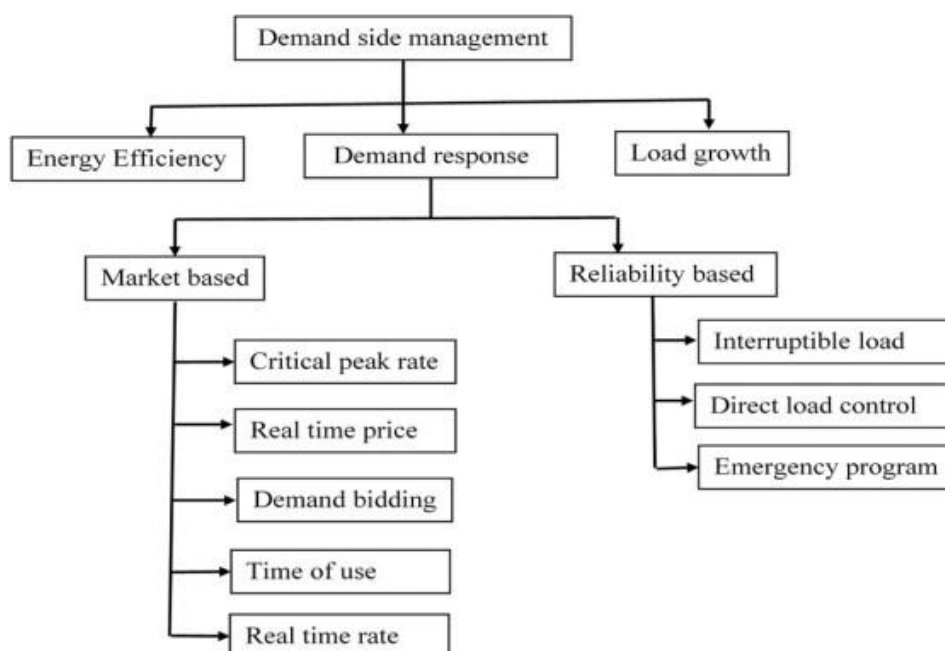
- Řídicí centra pro letiště, železniční dopravu, systémy plynovodů a ropovodů, řídicí systémy městské dopravy (1).
- Střediska zpracování dat (2).
- Nákupní, sportovní a zábavní centra, divadla, obchody (3).
- Vládní budovy, banky (4).
- Nemocnice a nemocniční komplexy (5).
- Podniky kritické infrastruktury: jednotky hasičů, ambulance, policie (6).
- Zvláštní státní instituce: vězeňství, vojenské a policejní jednotky (7).
- Kampusy (8).

3) Rezidenční
zákazníci

- Vícepodlažní budovy se složitým souborem různých spotřebitelů (1).
- Bytové domy, kancelářské budovy (2).
- Soukromé domácnosti (3).

Technické požadavky na zajištění flexibility a různých podpůrných služeb a požadavky na informační technologie uvádí [33].

Demand Side Management (DSM) je strategie využívaná energetickými společnostmi k aktivnímu ovlivňování a řízení vzorců spotřeby elektřiny koncových zákazníků. Primárním cílem DSM je optimalizovat využití zdrojů elektřiny, zvýšit spolehlivost sítě a minimalizovat celkové náklady na energii. Tento přístup zahrnuje implementaci různých technik, jako je stanovení ceny za dobu používání, programy odezvy na poptávku a iniciativy v oblasti energetické účinnosti, které povzbudí spotřebitele, aby přesunuli spotřebu elektřiny na hodiny mimo špičku nebo snížili spotřebu během období vysoké spotřeby. Aktivním zapojením spotřebitelů do řízení jejich odběru pomáhá DSM nejen při vyrovnávání zatížení sítě, ale také snižuje potřebu dodatečné kapacity pro výrobu elektřiny. Strategie používané v DSM a jejich dělení uvádí následující obrázek.

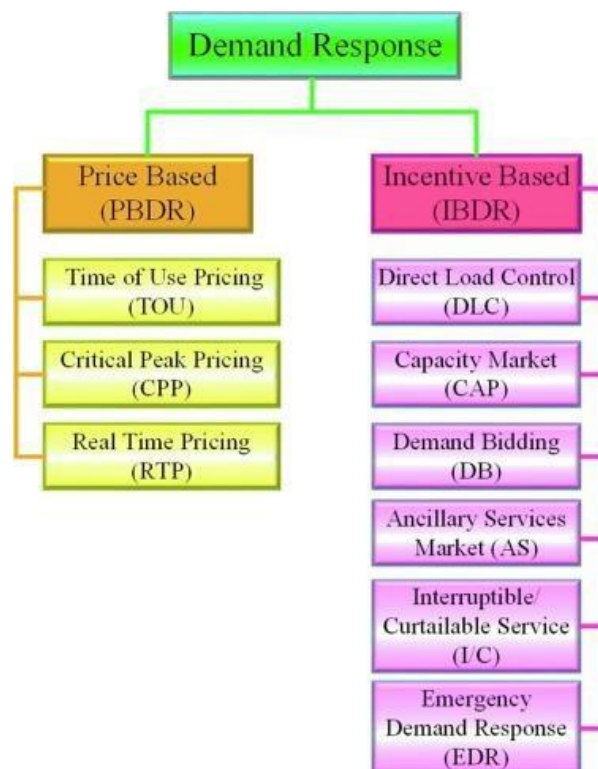


Strategie používané v DSM a jejich dělení, zdroj [35]

Demand response DR (odezva strany spotřeby) lze definovat jako „změny spotřeby elektřiny spotřebiteli oproti běžným vzorcům spotřeby ve vztahu ke změnám cen elektřiny v průběhu času nebo finančním pobídkám nabízeným spotřebitelům ke snížení spotřeby elektřiny v době vysokých velkoobchodních tržních cen nebo když je ohrožena spolehlivost systému“. Podle této definice lze DR rozdělit na dvě skupiny:

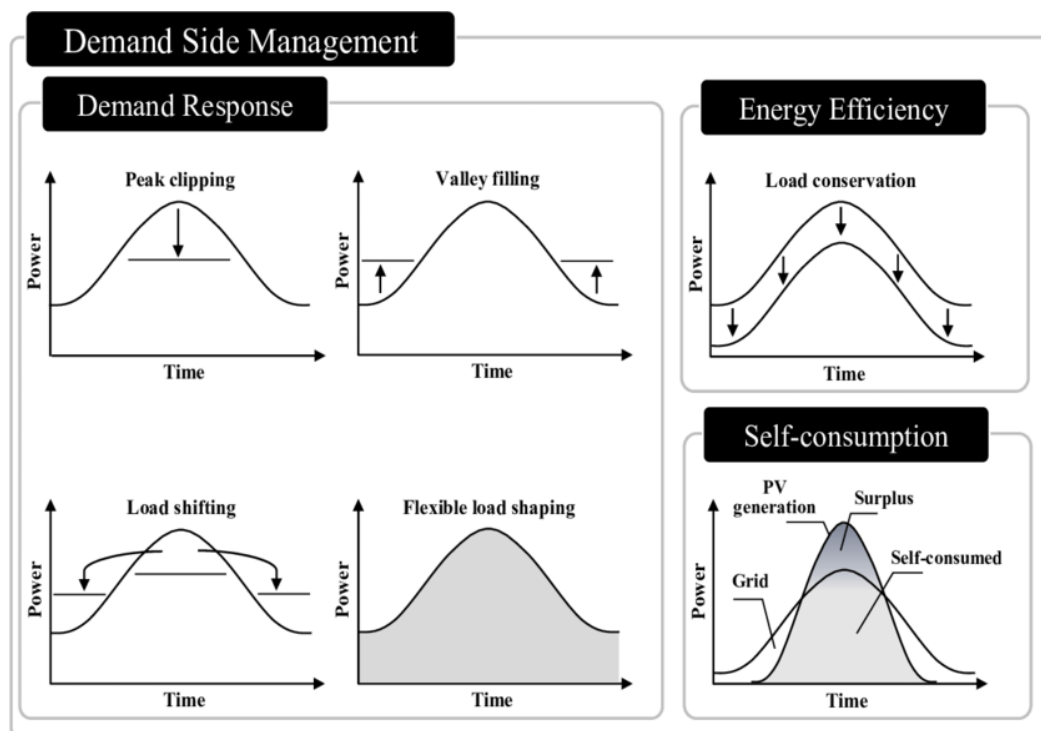
- odezva spotřeby založená na ceně - využití dynamických cen
- odezva spotřeby založená na pobídkách – odběry naplánovány podobně jako výrobní jednotky, sjednané dohody přizpůsobení se požadavkům dispečinku

Článek [35] představuje a analyzuje základní kontrolní strategie DR, dále popisuje současné potíže a potenciální budoucí vývoje řídicích mechanismů.



Rozdělení metod Demand Response [35]

Ovlivnění odběru je možné zajistit různými způsoby: ořezáváním odběrových špiček (Peak shaving, Peak clipping), odběrem v době propadu spotřeby (Valley filling), přesouváním odběru (load shifting), odhozením zátěže (Load shading), flexibilním přizpůsobením odběru (průběhu zatížení).



4.2.3 Současný a budoucí stav podpůrných služeb v DS v ČR

Zapojení subjektů nabízejících agregovanou flexibilitu do řízení elektrizační soustavy je krokem k decentralizaci energetiky, který ČEPS umožnila úpravou Kodexu PS v části II s platností od 1. ledna 2021.

Dle KODEXU PS část II. platného od 1. 1. 2024 jsou podpůrné služby (PpS) prostředky pro zajištění systémových služeb (SyS). Podpůrné služby jsou SVR (udržení výkonové bilance v síti, tj. frekvence na 50 Hz na základě změny výkonu straně zdrojů nebo spotřeby) nebo Nefrekvenční služby - používané k zajištění kvality napětí a provozu PS. V případě kolize dispečerských pokynů ČEPS a PDS mají před dispečerskými pokyny týkajícími se poskytování podpůrné služby využívané ČEPS přednost dispečerské pokyny technického dispečinku PDS týkající se řešení a předcházení stavů nouze a dále dispečerské pokyny týkající se omezení, změny nebo přerušování dodávky v souladu s § 25 Energetického zákona.

Agregátoři flexibility v ČR jsou uvedeni například na <https://www.akubat-asociace.cz/saf/>. Jedná se o Sdružení agregátorů a poskytovatelů flexibility (SAF).

Praktické využití potenciálu flexibility v ČR s cílem poskytovat podpůrné služby řešilo dle [34] již několik projektů: Dflex, Eflex, SecureFlex, NSVR a One Net. Cílem **projektu Dflex** bylo ověření využitelnosti agregace flexibility s využitím řízení strany spotřeby pro potřeby regulace elektrizační soustavy. **Projekt Eflex** se zabýval využíváním volné kapacity velkých bateriových systémů pro podpůrné služby. V **projektu SecureFlex** bylo řešeno bezpečné využití výkonové flexibility pro řízení soustavy a obchodní účely. Další **projekt One Net** byl zaměřen na vytvoření takového prostředí, ve kterém budou moci provozovatelé distribučních sítí poptávat systémové služby, využívající nefrekvenční flexibilitu. Poptávat budou moci i přeshraničně. Posledním zmíněným projektem je **projekt** firmy ČEPS a.s. **NSVR** se zaměřením na problematiku kodexu přenosové soustavy a služeb pro výkonovou rovnováhu. Dalším zajímavým **projektem** je **FLEXDER** jehož ambicí je odhad řádové velikosti potenciálu flexibility ve vzdálenější budoucnosti a kvantifikace vlastností flexibility [36].

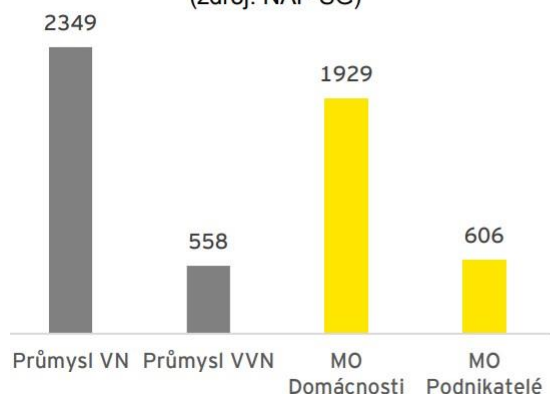
Potenciál flexibility v ČR analyzuje také studie z roku 2019 „Analýza provozu elektrizační soustavy ČR v podmínkách nového trhu s elektřinou“ vypracovaná společností Ernst & Young s.r.o. [37].

Možné využití flexibility účastníky trhu (* v podmínkách ČR pro PPS málo pravděpodobné využití) [37]

PPS	PDS	Prosumer / off-grid
Podpůrné služby výkonové rovnováhy (FCR, aFRR, mFRR, RR)	U/Q – regulace napětí a jalového výkonu	U/f – regulace frekvence a napětí
Nefrekvenční služby (ostrovní provoz, start ze tmy)	Ostatní nefrekvenční služby (ostrovní provoz, start ze tmy)	Integrace výroby OZE
Odložení investic (do posílení kapacity sítě)*	Odložení investic (do posílení kapacity sítě)	Záložní energie
Řízení přetížení a redispečink	Řízení přetížení, flexibility a OZE	Cenová arbitráž – <i>time-shifting, peak-shaving</i>

Pro uplatnění flexibility v PpS bude vyžadována certifikace flexibility a garance dodávky flexibility.

Potenciál výkonu kladné 15minutové flexibility na straně spotřeby 2030 (MW) (zdroj: NAP SG)



Reálná využitelnost záporné flexibility zdrojů (MW) (zdroj: NAP SG)



Potenciál flexibility v ČR [37]

▪ Potenciál kladné flexibility

Potenciál reálné kladné flexibility

	2018	2020	2030	2040
Zdroje v síti VVN >10MW vyjma FVE a VTE	890	850	770	690
Zdroje v síti VN >10MW vyjma FVE a VTE	160	155	140	130
Kogenerační jednotky	50	60	110	170
Malé vodní elektrárny	5	5	10	20
Bioplynové stanice	---	---	---	---
Biomasové zdroje	---	---	---	---
VTE	---	---	---	---
FVE na úrovni VN	---	---	---	---
FVE na úrovni NN	---	---	---	---
Mikrokogenerace	---	---	10	20
Souhrn	1 105	1 070	1 040	1 030

Převážná část kladné flexibility (cca 80 %) je v současnosti k dispozici na velkých zdrojích a

například její využití pro PpS proto nevyžaduje agregaci. Budoucí využití reálného potenciálu flexibility menších zdrojů by bylo podmíněno nasazením agregace. U podporovaných zdrojů (OZE) nelze předpokládat zájem o poskytování záporné flexibility v důsledku ekonomické neefektivity.

- **Potenciál záporné flexibility**

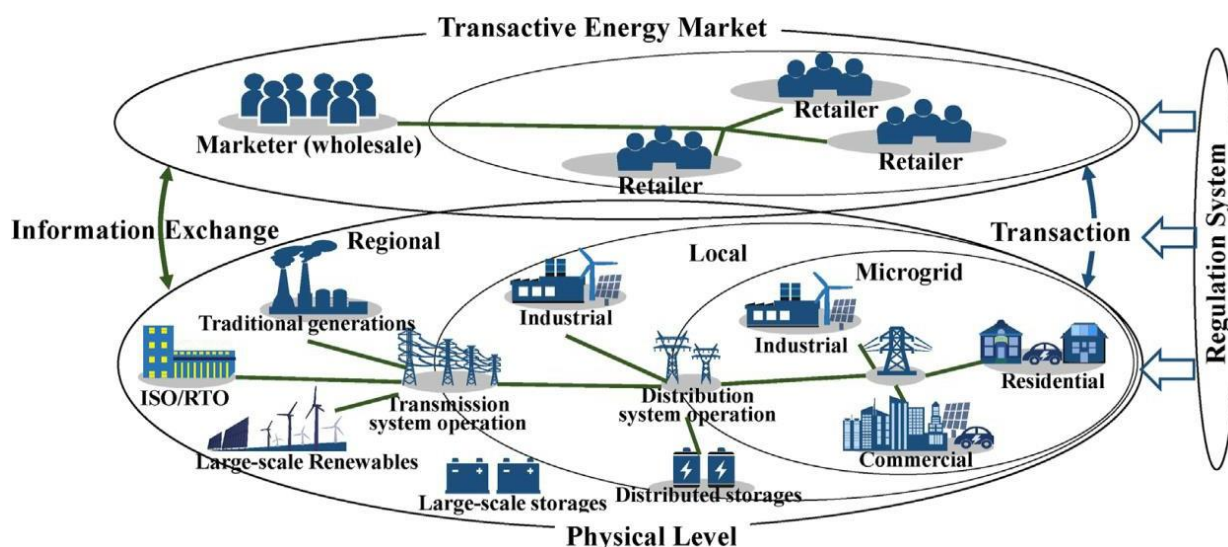
	2018	2020	2030	2040
Zdroje v síti VVN >10MW vyjma FVE a VTE	520	500	490	450
Zdroje v síti VN >10MW vyjma FVE a VTE	70	55	40	35
Kogenerační jednotky	25	30	60	80
Malé vodní elektrárny	35	35	70	100
Bioplynové stanice	---	---	190	200
Biomasové zdroje	---	---	50	70
VTE	---	---	40	60
FVE na úrovni VN	---	---	75	110
FVE na úrovni NN	---	---	30	70
Mikrokogenerace	---	---	5	10
<i>Souhrn</i>	<i>650</i>	<i>620</i>	<i>1 050</i>	<i>1 185</i>

Rovněž převážná část záporné flexibility (cca 70 %) je v současnosti k dispozici na velkých zdrojích a například její využití pro PpS proto nevyžaduje agregaci. Budoucí využití flexibility menších zdrojů by rovněž bylo podmíněno nasazením agregace.

- U kogeneračních jednotek - dostupnost záporné flexibility zejména v zimním období.
- Bioplynové a biomasové zdroje - vyrovnaný provozní režim v průběhu celého roku.
- Využití záporné flexibility FVE - v letním období
- Využití záporné flexibility VTE - spíše v zimním období.

4.3 Transaktivní energetické systémy

Transaktivní energii (Transactive Energy - TE) lze definovat jako „systém ekonomických a kontrolních mechanismů, který umožňuje dynamickou rovnováhu nabídky a poptávky napříč celou elektrickou infrastrukturou s využitím hodnoty jako klíčového provozního parametru“.



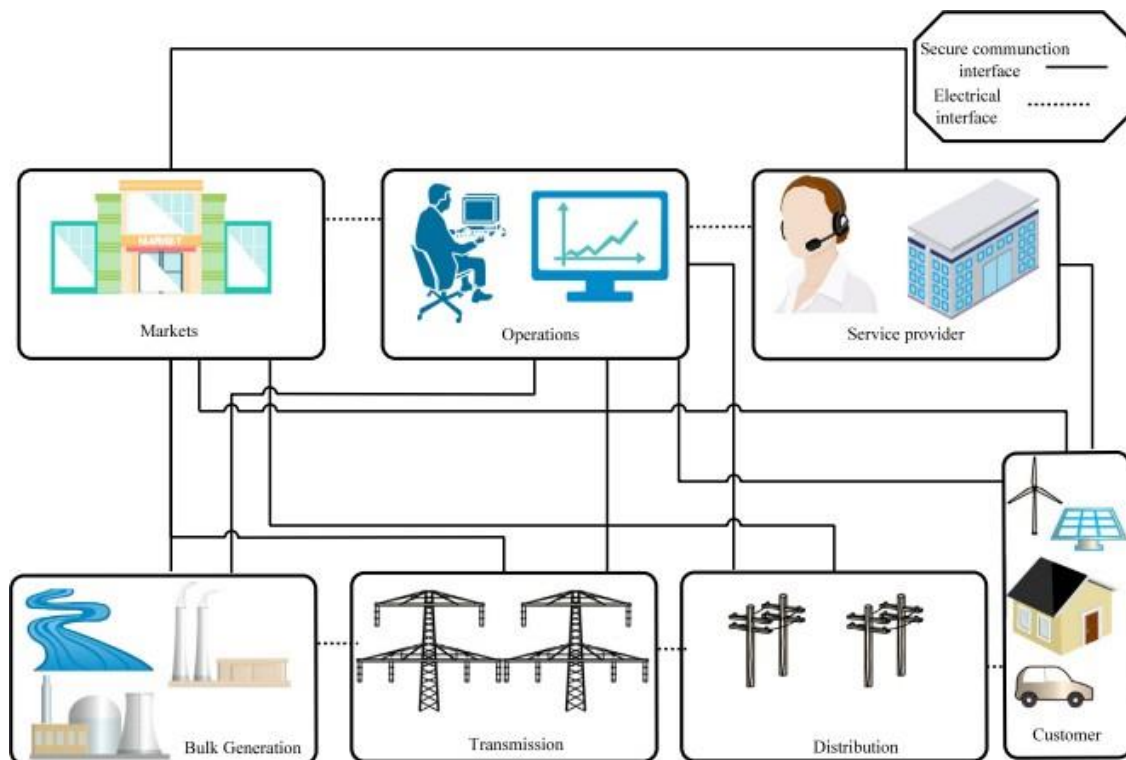
Konfigurace transaktivního energetického systému [38]

Transaktivní energetické systémy (TES) představují nový přístup k řízení výroby a spotřeby energie. Tento koncept je založen na decentralizovaném modelu, který umožňuje jednotlivým entitám (výrobci i spotřebitelům) vzájemně komunikovat a obchodovat s energií.

Jako klíčový provozní parametr využívá **cenu** elektrické energie. TE systémy tak lze charakterizovat jako typ tržně orientovaného řízení. Cena pro každého účastníka tak musí být unikátní a bude mimo jiné respektovat následující složky:

- Míra rovnováhy momentální nabídky a poptávky
- Omezení přenosových a distribučních kapacit
- Přenosové a distribuční ztráty k místu dodávky
- Sekundární environmentální náklady, náklady na provoz soustavy a další...

Na následujícím obrázku lze vidět koncepční schéma TE systému. Navržená decentralizovaná struktura obsahuje různé vrstvy, které navzájem komunikují za cílem dosažení výkonové rovnováhy. Schéma také ukazuje, jakým způsobem se na trhu uplatňují různí účastníci, včetně jednotlivých spotřebitelů a výrobců.



Obrázek: Koncepční schéma TE systému [39]

Hlavními rámci, které podporují fungování TE trhů, jsou:

- **Internet věcí (IoT):** Rozhraní, které umožňuje připojení všech koncových zařízení pro další ukládání, zpracování a zobrazování dat.
- **Blockchain:** Rozhraní, které zajišťuje bezpečné a transparentní transakce mezi účastníky trhu, eliminující potřebu centrální autority. Více v dokumentech [40], [41] a [42].

Klíčové prvky nutné pro funkci TE v rámci IoT jsou:

- **Senzory:** Elektronická zařízení, která snímají elektrická, optická nebo digitální data

z fyzikálních stavů, nebo událostí. Tato výstupní data se pak využívají při rozhodování „inteligentních“ zařízení.

- **Výzvy:** výkonové škálování, bezpečnost, velikost, interoperabilita, cena
- **Sítě:** Sítě poskytující fyzickou cestu pro přenos signálů shromážděných senzory. Taková cesta může být kabelová nebo bezdrátová, jako je Wi-Fi, Bluetooth, mobilní sítě, Wi-max Li-Fi atd.
 - **Výzvy:** bezpečnost, odezva, energetická spotřeba
- **Cloudy:** Velké množství dat ze senzorů vyžaduje úložiště, kde mohou být dočasně nebo trvale uložena, než dojde k jejich skutečnému zpracování. *IoT cloud* je pak v tomto ohledu integrovaná, vysoce výkonná databázová síť navržená pro práci s biliony zařízení připojených k vysokorychlostnímu úložišti dat.
- **Výzvy:** bezpečnost, real-time přístupnost, velká kapacita dat, decentralizace
- **Analytika:** Výběr sekcí ze shromážděných dat, které lze použít pro podrobnou analýzu a další činnosti. *Efficient IoT* je inteligentní analytický systém v reálném čase, který pomáhá detekovat anomálie ve shromážděných datech, a tak rychle reagovat, aby nedocházelo k nečekaným událostem.
 - **Výzvy:** třídění požadovaných informací z velkého množství dat, rychlost a přesnost
- **Standardy:** Pravidla a regulace pro jakoukoli aktivitu v sítích IoT. Síťové protokoly, např. Li-Fi, Wi-Fi, Bluetooth. Komunikační protokoly, např. HTTP. Pravidla agregace dat, např. pro transformaci, načítání, extrakci atd.
 - **Výzvy:** standardizace nestrukturovaných dat, soukromí a bezpečnost
- **Uživatelský interface:** Platforma, která uživatelům umožňuje sledovat stav jejich zařízení. Např. jednoduché ovladače s dotykovou obrazovkou pro složité úkoly.
 - **Výzvy:** interaktivita, nízká spotřeba, uživatelská přívětivost

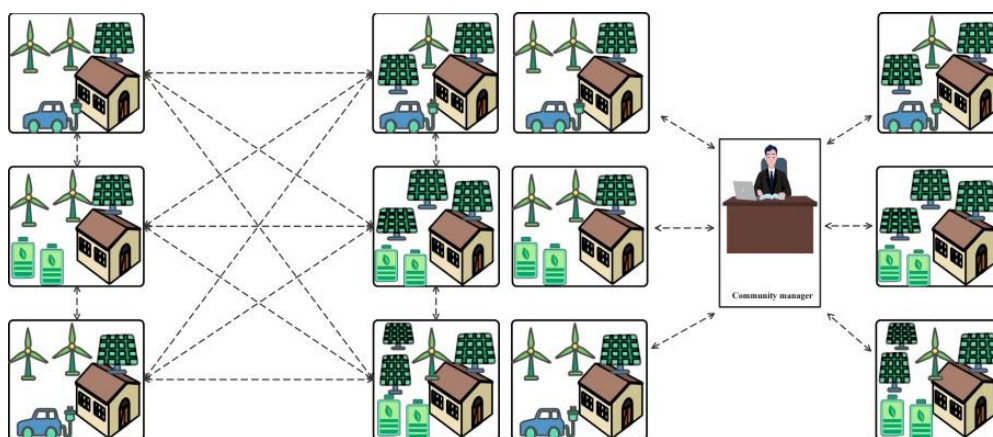
Výhody a výzvy při využití Blockchainu:

- **Výhody:**
 - **Decentralizace** – data uložena v síti uzlů na tisících zařízeních, což zvyšuje odolnost proti technickým selháním a útokům, kdy každý uzel může replikovat/uložit kopii celé databáze.
 - **Stabilita** – je komplikované zpětně měnit potvrzené bloky.
 - **Důvěryhodnost** – není třeba prostředníků, jelikož decentralizované uzly ověřují transakce prostřednictvím konsenzuálního mechanismu
 - **Heterogenita** – použití není omezené na jednu konkrétní doménu, díky flexibilitě a adaptabilitě lze použít téměř kdekoli
 - **Transparentnost** – jednotlivé transakce jsou považovány za transparentní, protože jsou všechny uloženy a lze je tak v případě potřeby sledovat.
 - **Škálovatelnost** – umožňují připojení většího počtu uživatelů, avšak může to mít vliv na jejich výkonnost
 - **Bezpečnost** – transakce mohou být sledovány až ke svému vzniku, což stěžuje případné narušení dat.

- **Výzvy:**
 - **Škálovatelnost** – tradiční sítě pro zpracování transakcí jsou schopny zpracovat tisíce transakcí za sekundu, zatímco v blockchainu je doba zpracování transakcí velmi pomalá, například bitcoinový blockchain dokáže zpracovat 3 až 7 transakcí za sekundu, zatímco v Ethereum se zvyšuje až na 20 transakcí za sekundu.
 - **Interoperabilita** – díky rozsáhlému používání technologie, byly vyvinuty různé sítě blockchainu. Většina těchto blockchainů funguje samostatně a neinteraguje s jinými sítěmi typu peer-to-peer. Probíhají různé projekty s cílem zajistit interoperabilitu mezi různými sítěmi blockchainu [43] a [44].
 - **Útoky** – algoritmus typu proof of work (PoW) může být kyberneticky napaden, pokud to potvrdí 51 % uzlů.
 - **Omezený počet vývojářů** – díky relativní novosti technologie není momentálně dostupné rozsáhlé množství odborníků.
 - **Úprava dat** – jakmile jsou data přidána do blockchainu, nelze je měnit. Jakákoliv lidská chyba tak nebude tolerována.
 - **Úložiště** – podobně jako u IoT, masivní integrace blockchainu vyžaduje efektivní a optimalizované techniky pro ukládání velkého množství dat.
 - **Energetická náročnost** – algoritmus typu PoW, kterým se ověřují transakce, vyžaduje řešení složitých matematických úloh, což vyžaduje velký výpočetní výkon a tím roste spotřebovaná množství energie.

Typy uspořádání energetických trhů v rámci TE systémů:

- **P2P trh:** Tento model umožňuje přímou interakci mezi výrobcí a spotřebiteli energie. Účastníci mohou obchodovat energií bez prostředníka.
- **Komunitní P2P trh:** Zde jsou účastníci organizováni v komunitách, kde každá komunita spravuje a koordinuje obchodování s energií.
- **Hybridní P2P trh:** Kombinace přímé a komunitní interakce, která využívá jak P2P, tak centrálně řízené prvky.



Obrázek: Grafické znázornění P2P struktury energetického trhu (vlevo) a komunitní P2P struktury energetického trhu (vpravo) [39]

Pilotní projekty

TE systémy jsou již testovány v různých pilotních projektech po celém světě. Tyto projekty ukazují potenciál TE systémů při snižování nákladů na energii, zvyšování efektivity a podporování udržitelnosti. Za samostatnou zmínku stojí projekt "Piclo," [[Piclo peer-to-peer energy trading platform - Mission Innovation \(mission-innovation.net\)](#)] který byl spuštěn ve Velké Británii v roce 2015, umožnil jednotlivcům a komunitám vybaveným fotovoltaickými (PV) panely a bateriemi obchodovat s energií se svými sousedy. Cílem projektu bylo poskytovat služby pro vyvažování poptávky a nabídky místnímu distribučnímu operátorovi. Další pilotní projekty jsou uvedeny v následující přehledové tabulce. Informace o projektech lze dohledat v review článku [39].

Tab. : Přehledové porovnání pilotních projektů TE

Název projektu	Země	Rok zahájení	Cíl	Úroveň zaměření	Použití blockchainu
Piclo	UK	2015	Nezávislý trh pro obchodování s energií a službami výkonové rovnováhy	Národní	Ne
Vandebron	Nizozemsko	2014	P2P platforma pro obchodování s elektřinou a zemním plynem	Národní	Ne
PeerEnergy Cloud	Německo	2012	Efektivní energetický management a obchodování s využitím cloudu	Microgrid	Ne
Smart Watts	Severní Amerika	2012	Optimalizace dodávek energie pomocí ICT	Místní/regionální	Ne
Yeloha	USA	2012	Sdílení energie generované z fotovoltaických panelů	Regionální	Ne
Sonnen Community	Německo	2010	Obchodování s akumulací elektrické energie	Národní	Ne
LichtBlick's Swarm Energy	Německo	2010	Obchodování s uloženou obnovitelnou energií a plynem	Národní	Ne
Community First Village	USA	2015	Darování energie chudým	Komunitní úroveň	Ne
Transactive Grid	USA	2015	Obchodování s energií mezi uživateli místo exportu do sítě	Microgrid	Ano
Electron	UK	2016	Inovativní, transparentní a bezpečná platforma pro obchodování s energií	Regionální	Ano
P2P smart Test	Nizozemsko	2015	P2P obchodování s energií s flexibilním řízením spotřeby	Regionální	Ne
Empower	USA	2017	Efektivní a cenově výhodné obchodování s energií	Microgrid	Ne
NRGcoin	Evropa	2013	Nahrazení tradičních dohod o podpoře obnovitelných zdrojů blockchainem založeným na smart kontraktech	Regionální trh	Ano
Enerchain	Evropa	2017	Obchodování s elektřinou a plynem založené na blockchainu	Regionální trh	Ano
Energy Collective	USA	2010	Výstavba, provoz a údržba zelených energetických zařízení v komunitě	Komunitní úroveň	Ne

Výzvy při vlastní implementaci: Jedná se zejména o technicko/legislativní řešení klíčových otázek, aby bylo možné plně využít potenciál TE systémů, obzvláště potřebu stanovení cen energie, které odrážejí skutečné náklady na výrobu, přenos a distribuci. Dále se jedná také o nutnost restrukturalizace regulace maloobchodních trhů s elektrickou energií tak, aby podporovala rámec TE systémů, a zároveň zohlednila chování spotřebitelů a dostupnost

energetických dat.

Pozn.: v rámci aktuální liberalizace krátkodobých trhů s elektrickou energií v EU už dochází k jejich většímu zpřístupňování, jakož i implementaci některých charakteristických mechanismů TE systémů (např. implementace omezení přenosových kapacit a ztrát do koncové ceny elektrické energie, viz algoritmus EUPHEMIA [\[45\]](#)).

Pracoviště a organizace ve světě, které se zabývají TES

- Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), USA:

PNNL je jedním z lídrů v oblasti výzkumu transaktivních energetických systémů. Laboratoř se zaměřuje na vytváření technologií, které podporují flexibilitu v řízení poptávky a nabídky elektrické energie, čímž umožňují vyšší integraci obnovitelných zdrojů do sítě. PNNL vyvíjí technologie jako Transactive Coordination and Control (TCC), které umožňují budovám a zařízením přímo obchodovat s energií podle aktuálních potřeb a cenových signálů. Tyto technologie se testují v reálných podmínkách a přispívají ke zvýšení efektivity a odolnosti energetických systémů (PNNL).

- National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA:

NREL se věnuje výzkumu integrace obnovitelných zdrojů energie a jejich roli v transaktivních energetických systémech. Pracují na vývoji technologií, které podporují dynamické řízení sítě a optimalizaci spotřeby energie.

- Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), USA:

LBNL se zabývá modelováním a simulací transaktivních energetických trhů a jejich dopadu na distribuční sítě. Rovněž provádí výzkum zaměřený na chování spotřebitelů v rámci těchto systémů. LBNL se zaměřuje na vývoj algoritmů a technologií, které umožňují tržně řízené řízení energie v budovách a domácnostech. Jejich výzkum zahrnuje optimalizaci spotřeby energie prostřednictvím tržních signálů a spolupracuje s dalšími vládními agenturami na demonstracích těchto technologií v reálných podmínkách (PNNL).

- University of Colorado Boulder, USA

Univerzita v Boulderu pracuje na aplikacích transaktivních energetických systémů ve spolupráci s průmyslovými partnery a testuje technologie, které umožňují flexibilní řízení energetických zdrojů na lokální úrovni pomocí tržních mechanismů. Tento výzkum je klíčový pro vytváření budoucích chytrých měst a distribuovaných energetických sítí.

V Evropě existuje několik významných pracovišť a institucí, které se zabývají vývojem a výzkumem transaktivních energetických systémů. Tyto systémy umožňují flexibilní řízení a optimalizaci výroby, spotřeby a obchodování s energií v reálném čase, což je klíčové pro integraci obnovitelných zdrojů a zlepšení energetické efektivity. Zde jsou některé z předních evropských pracovišť:

- Technical University of Denmark (DTU), Dánsko

DTU je klíčovým hráčem v oblasti výzkumu energetických systémů a smart grids. Zabývá se vývojem technologií a metodik pro transaktivní energetické systémy, včetně řízení a optimalizace distribuovaných energetických zdrojů.

- Imperial College London, Velká Británie

Imperial College má silné výzkumné týmy v oblasti energetických systémů a inteligentních sítí,

které pracují na transaktivních energetických systémech a inovativních obchodních modelech pro energetiku.

- University of Strathclyde, Velká Británie

Tato univerzita má vedoucí postavení v oblasti výzkumu smart grids a transaktivních energetických systémů ve spolupráci s průmyslem a dalšími akademickými institucemi.

Další informace o Transactive Energy a TES je možné dohledat v těchto publikacích: základní koncept, konfigurace a mechanismy [38], pilotní projekty [39], role TE v budoucím energetickém průmyslu [46], různé přístupy k integraci decentralních zdrojů (home energy management systems, virtuální elektrárny, distributed optimal power flow a peer-to-peer energy trading) v kontextu vznikajícího konceptu transaktivní energie (TE) [47], transaktivní energie v nizozemském kontextu [48].

4.4 Použitá literatura a odkazy

- [1] Směrnice (EU) 2018/2001, o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&qid=1721463836002>.
- [2] Směrnice (EU) 2019/944, o společných pravidlech pro vnitřní trh s elektřinou, dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944&qid=1721464530456>.
- [3] ENERGY COMMUNITIES REPOSITORY, ENERGY SHARING FOR ENERGY COMMUNITIES A REFERENCE GUIDE. Evropská komise, 2024, dostupné z: https://energy-communities-repository.ec.europa.eu/document/download/511ce125-deef-4f8f-ac0c-fe3d0c50012e_en?filename=ECR_GuidanceDocument_EnergySharing.pdf.
- [4] ENTEC - Energy Transition Expertise Centre. Multi-supplier models and decentralized energy systems: Energy sharing approaches. European Union, 2023, dostupné z: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3968b2ee-f2d2-11ed-a05c-01aa75ed71a1/language-en?WT_mc_id=Searchresult&WT_ria_c=37085&WT_ria_f=3608&WT_ria_ev=search&WT_URL=https%3A//energy.ec.europa.eu/.
- [5] Iraide López, Nerea Goitia-Zabaleta, Aitor Milo, Julen Gómez-Cornejo, Itxaso Aranzabal, Haizea Gaztañaga, Elvira Fernandez. European energy communities: Characteristics, trends, business models and legal framework, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 197, 2024, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114403>.
- [6] Francesco Demetrio Minuto, Andrea Lanzini. Energy-sharing mechanisms for energy community members under different asset ownership schemes and user demand profiles, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 168, 2022, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112859>.
- [7] Vladimir Z. Gjorgievski, Bodan Velkovski, Francesco Demetrio Minuto, Snezana Cundeva, Natasa Markovska. Energy sharing in European renewable energy communities: Impact of regulated charges, Energy, Volume 281, 2023, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128333>.
- [8] A. Bonfiglio, S. Bruno, M. Martino, M. Minetti, R. Procopio and A. Velini, "Renewable Energy Communities Virtual Islanding: A Novel Service for Smart Distribution Networks," 2024

- IEEE/IAS 60th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), Las Vegas, NV, USA, 2024, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICPS60943.2024.10563712.
- [9] Sami Saeed Binyamin, Sami Abdullah Ben Slama, Bassam Zafar. Artificial intelligence-powered energy community management for developing renewable energy systems in smart homes. *Energy Strategy Reviews*, Volume 51, 2024, ISSN 2211-467X, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101288>.
- [10] Ahmed S, Ali A, Ciocia A, D'Angola A. Technological Elements behind the Renewable Energy Community: Current Status, Existing Gap, Necessity, and Future Perspective—Overview. *Energies*. 2024; 17(13):3100. <https://doi.org/10.3390/en17133100>.
- [11] Federico Gianaroli, Mattia Ricci, Paolo Sdringola, Maria Alessandra Ancona, Lisa Branchini, Francesco Melino. Development of dynamic sharing keys: Algorithms supporting management of renewable energy community and collective self consumption, *Energy and Buildings*, Volume 311, 2024, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114158>.
- [12] Ahmed S, Ali A, D'Angola A. A Review of Renewable Energy Communities: Concepts, Scope, Progress, Challenges, and Recommendations. *Sustainability*. 2024; 16(5):1749. <https://doi.org/10.3390/su16051749>.
- [13] Canizes B, Costa J, Bairrão D, Vale Z. Local Renewable Energy Communities: Classification and Sizing. *Energies*. 2023; 16(5):2389. <https://doi.org/10.3390/en16052389>.
- [14] Paolo Esposito, Elisa Marrasso, Chiara Martone, Giovanna Pallotta, Carlo Roselli, Maurizio Sasso, Massimiliano Tufo. A roadmap for the implementation of a renewable energy community. *Heliyon*, Volume 10, Issue 7, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28269>.
- [15] Chaudhry S, Surmann A, Kühnbach M, Pierie F. Renewable Energy Communities as Modes of Collective Prosumership: A Multi-Disciplinary Assessment Part II—Case Study. *Energies*. 2022; 15(23):8936. <https://doi.org/10.3390/en15238936>.
- [16] Václav Prais, Eliška Beranová, Jan Bakule, Anna Michalčáková. Právní úprava komunitní energetiky v Evropské unii. Sedm doporučení pro ČR, Frank Bold, 2023, dostupné z: https://frankbold.org/sites/default/files/publikace/pravni_uprava_komunitni_energetiky_v_eu_sedm_doporuceni_pro_cr.pdf.
- [17] Energy communities map demo, dostupné z: https://energy-communities-repository.ec.europa.eu/energy-communities-map-demo_en?prefLang=cs.
- [18] ENERGY COMMUNITIES REPOSITORY, A ROADMAP TO DEVELOPING A POLICY AND LEGAL FRAMEWORK THAT ENABLES THE DEVELOPMENT OF ENERGY COMMUNITIES, 2024 https://energy-communities-repository.ec.europa.eu/document/download/c6990021-e30c-4b29-9dd9-147989a1869b_en?filename=ECR_Roadmap_EnergyCommunities_LegalFrameworks.pdf.
- [19] Caramizaru, A.; Uihlein, A. Energy Communities: An Overview of Energy and Social Innovation; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2020; Volume 30083. https://catedracomunidadesenergeticas.unizar.es/wp-content/uploads/2022/06/energy_communities_report_final.pdf.
- [20] Martin Ander, Tatiana Mindeková, Ivan Touška. OUTLOOK komunitní energetiky v Evropě, Svaz moderní energetiky, 2023, dostupné z: <https://www.modernienergetika.cz/wp->

- content/uploads/2023/06/Outlook-komunitni-energetiky-v-Evrope_final_online.pdf.
- [21] Webový portál Rakouské koordinační kanceláře pro energetická společenství, dostupný z: <https://energiegemeinschaften.gv.at>.
- [22] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Peer2Peer im Quartier (P2PQ) - závěrečná zpráva projektu, 2022, dostupné z: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/schriftenreihe-2022-26-p2pq.pdf.
- [23] neoom KLUUB, Sdílení elektřiny se svými sousedy (Rakousko – Německo). Dostupé z: <https://neoom.com/energy-sharing-energieteilung-in-deutschland-voranmeldung>.
- [24] Plug-in Public Power: The Case for Community Energy Democracy. Common-Wealth, 2024, dostupné z: <https://www.common-wealth.org/publications/plug-in-public-power-the-case-for-community-energy-democracy#ch-4>.
- [25] Unie komunitní energetiky (UKEN), Návod na komunitní energetiku pro energetická společenství i aktivní zákazníci, 2024, dostupné z: <https://www.uken.cz/jak-zacit-sdilet-elektřinu>.
- [26] ERÚ. ENERGETICKÉ SPOLEČENSTVÍ - ŽÁDOST O REGISTRACI, dostupné z: <https://eru.gov.cz/energeticke-spolecenstvi-zadost-o-registraci>.
- [27] Universal Smart Energy Framework (USEF). FLEXIBILITY VALUE CHAIN, 2015, https://www.usef.energy/app/uploads/2016/12/USEF_PositionPaper_FlexValueChain-vs1.pdf.
- [28] Emil Hillberg (RISE). Power Transmission & Distribution Systems Flexibility needs in the future power systém, ISGAN Annex 6 Power T&D Systems, 2019, dostupné z: https://www.iea-isgan.org/wp-content/uploads/2019/03/ISGAN_DiscussionPaper_Flexibility_Needs_In_Future_Power_Systems_2019.pdf.
- [29] ILO, Albana, et al. Energy communities' impact on grids: Energy community embedment increasing grid flexibility and flourishing electricity markets. 2024.
- [30] ANDER, Martin; MINDEKOVÁ, Tatiana a TOUŠKA, Ivan. OUTLOOK komunitní energetiky v Evropě. 2023. Online. Dostupné z: https://www.modernienergetika.cz/wp-content/uploads/2023/06/Outlook-komunitni-energetiky-v-Evrope_final_online.pdf
- [31] ŠEFRÁNEK, Jan; ČERNÝ, Alexandr. Komunitní energetika, sdílení elektřiny a EDC: role a úkoly ERÚ. 17.4. 2024. Prezentace. Online. Dostupné z: https://www.csres.cz/files/cz/aktuality/tiskove-zpravy/co-je-energeticke-datove-centrum/202404_kulatystuledc_fin.pptx
- [32] LEEF Technologies, Feramat Cybernetics, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. Projekce potenciálu flexibility z decentralních zdrojů na NN a VN – časové a geografické rozložení (textová část). Ministerstvo průmyslu a obchodu. [Online] 19. Květen 2021. [Citace: 3. Březen 2023.] https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/resene-dokoncene-projekty-a-jejich-vystupy/projekty-podporene-v-ramci-2-verejne-souteze-programu-theta/2021/8/Vystup-3_Projekce-flexibility-z-decentralnich-zdroju_casove-a-geograficke-ro.
- [33] Advanced Consumer Side Energy Resource Management Systems - Reference: 929 - 2024.

- URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/929-advanced-consumer-side-energy-resource-management-systems.html>
- [34] Kolektiv autorů. Závěrečná zpráva I. etapy projektu ZL6 NAP SG. Ministerstvo průmyslu a obchodu. [Online] 30. Duben 2021. [Citace: 5. Březen 2023.] <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2021/5/Zaverecna-zprava-1-etapy-ZL6-MPO.pdf>.
- [35] NEBEY, Abraham Hizkiel. Recent advancement in demand side energy management system for optimal energy utilization. Energy Reports, 2024, 11: 5422-5435.
- [36] CMÍRAL, Martin, a další. FLEXDER - Presentace pro 1. workshop. Ministerstvo průmyslu a obchodu. [Online] 15. Květen 2020. [Citace: 3. Březen 2023.] https://www.mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/vyzkum-a-vyvoj-v-energetice/workshopy/2021/7/Blok-2--prezentace-3---Projekt-FLEXDER-TK02010078_.pdf
- [37] Svaz průmyslu a dopravy České republiky, <https://www.spcr.cz/>. Analýza provozu elektrizační soustavy v podmínkách nového trhu s elektřinou. SP ČR - Aktivity - Z hospodářské politiky. 2019. Online. Dostupné z: <https://www.spcr.cz/aktivity/z-hospodarske-politiky/13312-analyza-provozu-elektrizacni-soustavy-v-podminkach-noveho-trhu-s-elektřinou>.
- [38] ZHOU, Hai, et al. Transactive energy system: Concept, configuration, and mechanism. Frontiers in Energy Research, 2023, 10: 1057106. DOI: 10.3389/fenrg.2022.1057106
- [39] HUANG, Qi, et al. A review of transactive energy systems: Concept and implementation. Energy Reports, 2021, 7: 7804-7824. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.037>
- [40] The Applications of Blockchain Technologies to Energy Markets - Reference: C5-10628_2022 - 2022. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/c5-10628-2022-the-applications-of-blockchain-technologies-to-energy-markets.html>
- [41] The role of blockchain technologies in power markets - Reference: 824 - 2020. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/824-the-role-of-blockchain-technologies-in-power-markets.html>
- [42] Trading Electricity with Blockchain Systems - Reference: 893 - 2023. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/893-trading-electricity-with-blockchain-systems.html>
- [43] KIM, Christine. A Blockchain to Connect All Blockchains, Cosmos Is Officially Live. 2019. Online. Dostupné z: <https://www.coindesk.com/markets/2019/03/13/a-blockchain-to-connect-all-blockchains-cosmos-is-officially-live/>
- [44] BUCHKO, Steven. What Is Ark? | A Guide to the All-in-One Blockchain Ecosystem. 2018. Online. Dostupné z: <https://coincentral.com/what-is-ark/>
- [45] NEMO COMMITTEE, et al. EUPHEMIA public description: Single price coupling algorithm. URL: <https://www.nordpoolgroup.com/globalassets/download-center/single-day-ahead-coupling/euphemia-public-description.pdf>
- [46] GUPTA, Neeraj, et al. The role of transactive energy in the future energy industry: a critical review. Energies, 2022, 15.21: 8047. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218047>
- [47] GUERRERO, Jaysson, et al. Towards a transactive energy system for integration of

distributed energy resources: Home energy management, distributed optimal power flow, and peer-to-peer energy trading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 110000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110000>

- [48] KOK, JK Koen, et al. Transactive energy in the dutch context. 2022. https://research.tue.nl/files/305313823/2022-TUe_TNO-Transactive_Energy-Survey_Report.pdf

5 Budoucí koncepce a provoz ES ČR

5.1 Dopady vysokého podílu OZE na provoz a rozvoj PS a DS

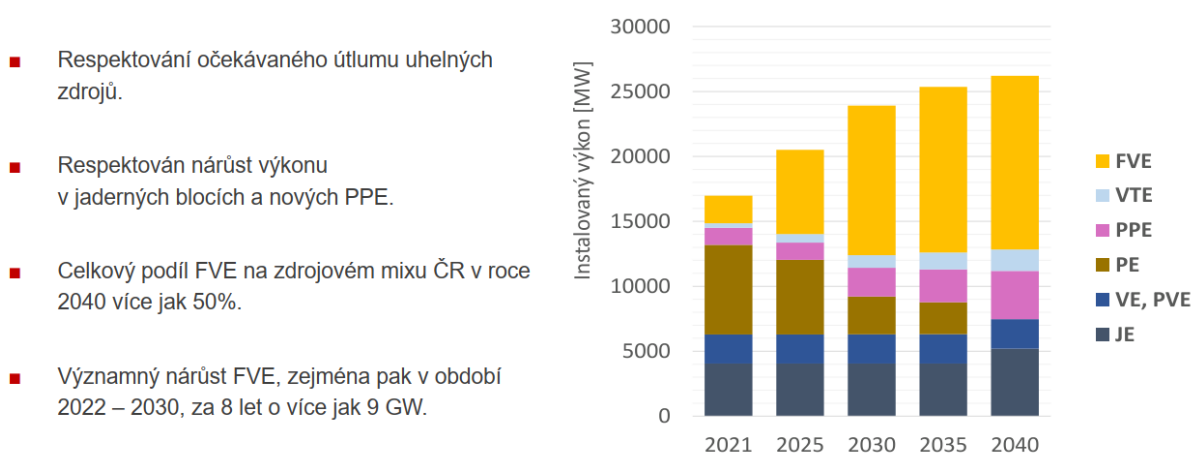
Tlak na ochranu klimatu, v extrémním případě na uhlíkovou neutralitu, povede obdobně jako v jiných členských zemích EU k významnému podílu OZE na energetickém mixu. V současné době v ČR stále hrají důležitou roli uhelné elektrárny se zhruba 40% podílem na výrobě elektřiny. Podle návrhu aktualizace Státní energetické koncepce ČR z roku 2024 (ke schválení vládou do konce roku 2024 nedošlo) se v roce 2040 očekává nulový podíl uhelných elektráren na výrobě elektřiny, snížení podílu plynu, naopak zvýšení podílu uhlíkově neutrálních zdrojů (OZE a JE), viz Tabulku 1.

Tabulka 1 – Předpokládaný vývoj energetického mixu (hrubá výroba elektřiny), zdroj: MPO

Druh energie	2030	2040	2050
Uhlí a uhelné deriváty	10 %	0 %	0 %
Zemní plyn	7 %	1-5 %	0 %
Jaderná energetika	45%	47-65%	36-50%
Obnovitelné zdroje	37 %	33-47 %	43-56 %
Ostatní	1 %	1-2 %	7-8 %

Pozn.: Údaje převzaty ze zprávy MPO ze dne 7.2.2024, <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/aktualizace-statni-energeticke-koncepce-sek--279668/>

Očekávaný rozvoj zdrojové základny do roku 2040 je uveden na následujícím obrázku. Předpokládá se, že dojde k výraznému nárůstu instalovaného výkonu FVE, na celkovém instalovaném výkonu se bude podílet více než 50 %. To koresponduje i s údaji v aktuálním dokumentu MAF CZ 2023 [1], kde se očekává v roce 2040 podíl OZE na instalovaném výkonu 54 % (14,6 GW), resp. 59 % (17,7 GW) podle zvoleného scénáře.



Očekávaný rozvoj zdrojové základny v ČR do roku 2040 [2]

Na straně zdrojů je plánován prakticky čtyřnásobek stávajícího výkonu intermitentních zdrojů (fotovoltaické a větrné elektrárny) ze stávajících cca 4 GW na 13,9 až 17,2 GW v roce 2040 [1], připojovaných především do distribučních sítí. Majoritní podíl budou mít FVE, s rozvojem VTE se počítá v podstatně menším měřítku.

Podle Národního akčního plánu Smart Grid (NAP SG) z roku 2016 se předpokládá rozvoj FVE především na hladině nn, podle aktualizovaného NAP SG 2019 se nově předpokládá rozvoj FVE spíše na hladině vn (zhruba polovina instalovaného výkonu FVE v roce 2040). Podle analýzy provedené v roce 2023 se předpokládá rozvoj FVE především na napěťových hladinách 110 kV a vn [2]. Předpokládané rozdělení instalovaného výkonu FVE do napěťových hladin v roce 2040 uvádí následující tabulka.

Předpokládané rozdělení instalovaného výkonu FVE do napěťových hladin v roce 2040 [2]

	Instalovaný výkon FVE, 2040		
Celkem v DS	nn	vn	110 kV
13 372 MW	1049 MW	5091 MW	7232 MW

Poměrně velké instalované výkony OZE do sítí 110 kV a vn povedou ke zvýšení toků na jednotlivých hladinách i k přetokům mezi nimi a k potřebě navýšení kapacit distribučních sítí, zejména vn a 110 kV (posilování vedení nad rámec přirozené obnovy, výstavba nových vedení a transformoven a navýšení transformačních kapacit). Daný vývoj bude mít vliv nejen na DS, ale i na PS, která bude muset efektivně reagovat na aktuální výrobu z intermitentních zdrojů. Předpokládá se omezená kapacita transformační vazby PS/DS v exponovaných uzlech.

Dopady integrace OZE na provoz a rozvoj PS a DS pro jednotlivé napěťové hladiny [2]

Sítě	Limitující faktory	Dopady
nn	napěťové poměry	Nutnosti posilování vedení nn nad rámec přirozené obnovy
vn	napěťové poměry, přenosová schopnost prvků	Významné přetoky činného výkonu do sítí 110 kV, nutná rekonstrukce části stávajících vedení, výstavba nových vedení a navýšení transformační kapacity
110 kV	přenosová schopnost prvků	Nutné posílení transformační kapacity, výstavba nových uzlů 110kV/vn, nutnost posílení a výstavba nových vedení
PS	přenosová schopnost prvků	Nutné posílení jednotek případů vazeb PS/DS, nutnost posílení vybraných vedení

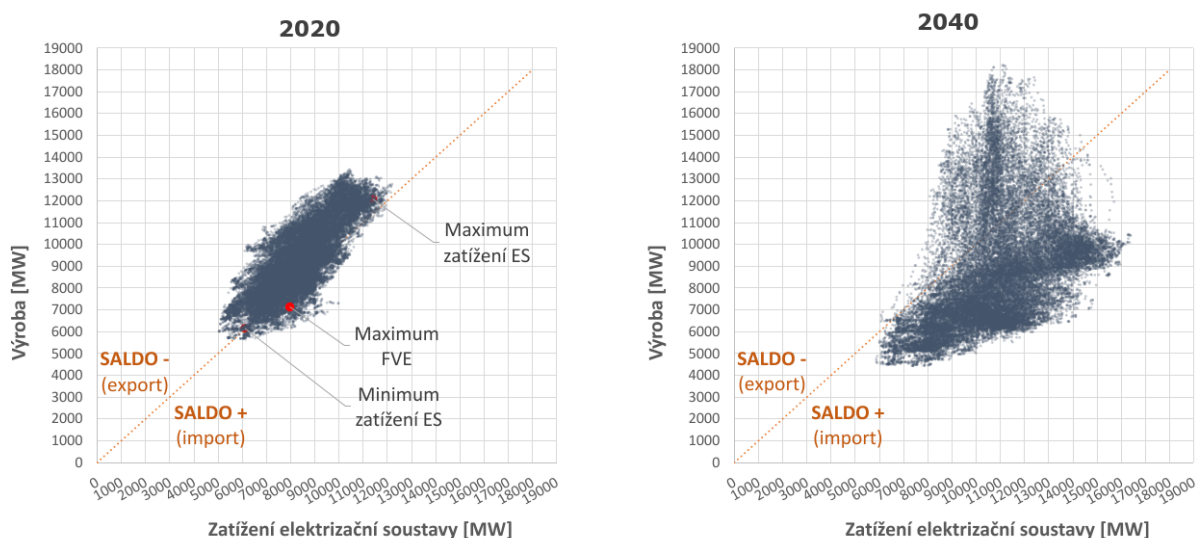
Z map připojitelnosti nových zdrojů, které provozovatelé distribučních sítí zveřejňují na svých webech [3] je zřejmé, že kapacita sítí se blíží k svým limitům, v některých oblastech je dokonce vyčerpána a nové zdroje není možné za současného stavu připojit. V současné době provozovatelé DS sítí připojují v některých oblastech nové zdroje v tzv. režimu negarantovaného výkonu. Provoz výroby v režimu negarantovaného výkonu umožní provozovateli DS omezit výstupní výkon výroby (bez kompenzace a náhrady za omezení) v případech, kdy bude hrozit přetížení distribuční sítě.

Investice na navýšování kapacity přenosových a distribučních sítí nad již plánovaný rozvoj a obnovu DS a PS mohou dosáhnout do roku 2035 až nižší stovky mld. Kč [4]. Snaha o co nejvyšší využití investovaných prostředků povede k podpoře vyšší míry elektrifikace (e-mobilita, veřejná doprava, průmysl, rezidenční vytápění). V roce 2040 je uvažováno s nárůstem spotřeby ze stávajících cca 60 TWh na úroveň cca 81,2 TWh pro konzervativní scénář (z toho tuzemská netto spotřeba 62,9 TWh, e-mobilita 6,6 TWh a tepelná čerpadla 5,5 TWh) až 92 TWh pro progresivní scénář (TNS 70,4 TWh, EM 7,8 TWh a TČ 6,4 TWh) [1].

Navyšování kapacity přenosových a distribučních sítí pro splnění klimatických cílů EU nebude záviset jen na posilování a zahušťování sítě, ale výrazně také na zvýšení její automatizace, zajištění většího množství měření v síti a dále na investice do řídicích systémů a systémů zpracování dat. Integrace OZE povede k významně vyšším požadavkům na dispečerské řízení, vzájemnou komunikaci, výměnu dat a využívání služeb od výrobců a zákazníků. Do roku 2035 se předpokládají investice do digitální infrastruktury zhruba 100 mld. Kč Kč [4]. V současné době se rozjíždí provoz Elektroenergetického datového centra [5]. Digitalizace a implementace nových technologií se týká DS i PS.

V oblasti přenosových sítí se dá očekávat rozvoj technologií řízení výkonových toků (např. phase shift transformers – PST, STATCOM), rozvoj nových technologií (např. HVDC), pokročilého dispečerského řízení (sofistikované predikční modely na bázi AI a optimalizace a automatizace provozu) a automatiky omezování výroby u zdrojů.

Změny zdrojového mixu doprovázeného nárůstem spotřeby (a částečně změnou jejího charakteru – větší dynamika změn zatížení) povedou ke změně ES ČR, od exportní k importní. V průběhu roku se vyskytnou časové úseky, kdy nebudeme schopni pokrýt spotřebu vlastní výrobou, viz následující obrázek.



Dopad změn energetického mixu na bilanci ES ČR [2]

To povede k zvýšení výkonových toků na hraničních linkách a v souvislosti s nařízením o transevropské energetické síti TEN-E [6], s cílem propojit přeshraniční energetickou infrastrukturu EU s ohledem na dosažení klimatické neutrality do roku 2050 a zabezpečení dodávek, i k posílení či možné výstavbě nových hraničních koridorů [7].

Budoucí skladba zdrojů (úbytek velkých systémových elektráren ve prospěch decentralních zdrojů) přináší riziko nedostatku výkonu pro regulaci ES. Vysoká penetrace decentralní výroby bude mít za následek zvýšené nároky na flexibilitu sítě a potřebu rezervního výkonu/regulačních kapacit. Pro udržení frekvenční a napěťové stability ES bude v budoucnu zapotřebí udržovat výkonovou bilanci nejen na straně zdrojů (systémové i decentralizované), ale i na straně spotřeby (např. akumulace, systémy Demand Side Response, využití elektromobilů pro akumulaci). Integrace obnovitelných zdrojů v očekávané výši si vyžádá významný nárůst potřeby podpůrných služeb (PpS), ale i PpS-N (nefrekvenčních), popř. i přeshraniční sdílení PpS.

Decentrální zdroje budou zapojeny do poskytování podpůrných služeb pro provozovatele DS i PS, např. poskytováním flexibility. Služby dnes poskytované velkými zdroji připojenými do PS budou poskytovány agregovaně z DS, např. agregace flexibility. Možnost poskytovat podpůrné služby v omezené míře mohou mít i aktivní odběratelé a prosumeři. Využívání všech dostupných zdrojů flexibility pro řízení ES ČR bude základním předpokladem pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu ES. Řízení toků výkonů bude potřeba provádět na všech napěťových hladinách.

Novým trendem bude příprava pro rozvoj nových subjektů na trhu s elektřinou – prosumers, rozvoj komunitních energetik a budování smart grids. Komunitní energetiky a prosumeři budou zcela novými subjekty v provozování distribučních sítí, což podpoří lokální výrobu a spotřebu a sníží nároky na přenosové sítě. Zavedení komunitní energetiky si vyžádá značné investice jak do informačních systémů na úrovni distribučních společností, tak vývoj nových softwarových systémů pro řízení, provoz a jeho optimalizaci.

Zásadní modernizace bude probíhat také v distribučních sítích na úrovni nízkého a vysokého napětí v oblastech automatizace a optimalizace provozu sítí (smart grids) či segmentace sítí (mikrogridy). Trendem je masivní nárůst využití výkonových elektronických technologií (VET) jak na straně výroby (např. FVE), spotřeby (např. nabíjecí stanice elektromobilů), tak provozu a řízení sítí. VET budou hrát významnější roli i v oblasti energy managementu elektrizačních sítí (distribučních sítí, elektrizačních sítí průmyslových areálů apod.) a řízení parametrů/vlastností sítí s využitím technologií FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

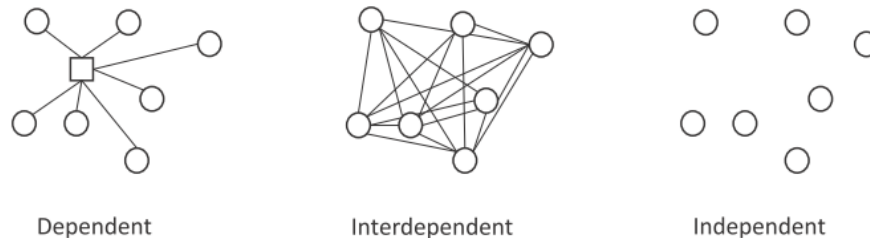


Současné trendy v elektroenergetickém sektoru, Zdroj: Vnouček - Integrace zdrojů do ES ČR, Think Tank – INTEGRACE OZE DO ES ČR, 2021

5.2 Představa o budoucí koncepci uspořádání a řízení ES ČR

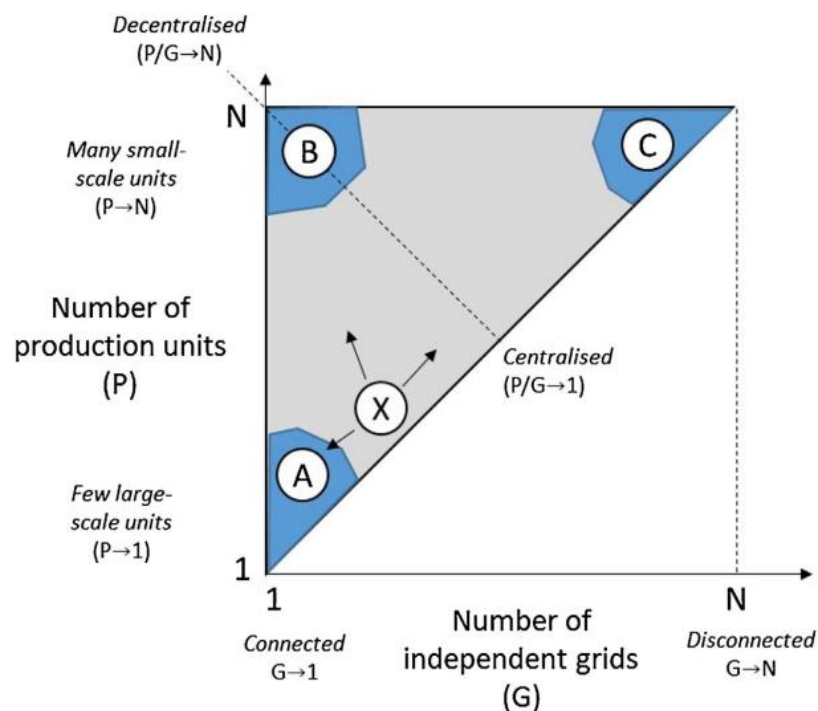
5.2.1 Východiska

Nová podoba budoucích sítí, vyvolaná snahou o zvýšenou integraci OZE a maximální využití jejich potenciálu, je intenzivně řešeným tématem. V zásadě lze v odborné literatuře a diskusích vysledovat tři alternativní vize architektury budoucí ES: Super-grid (rozsáhlá globální síť), Smart-grid (regionální sítě) a Off-grid (soběstační izolovaní prosumeri) [8].



Různé systémové organizace odběratelů a výrobců reprezentující tři vize architektury budoucí ES Super-grid, Smart-grid a Off-grid [8]

V idealizované formě, lze tyto koncepce zobrazit ve dvoudimenzionální oblasti (design space) reprezentované počtem výrobních jednotek (P) a počtem sítí (G) po celém světě, kde tyto idealizované systémy leží ve třech různých rozích oblasti, viz následující obrázek. Počítá se, že počet výrobních jednotek nepřesáhne počet odběrných jednotek N (šedá část oblasti).



Design space alternativních vizí budoucí ES (současný systém (X) se může vyvíjet směrem k Super-grid (A), Smart-grid (B) nebo Off-grid (C) systému) [8]

Supergrid (A) reprezentuje jedinou centralizovanou výrobní jednotku ($P = 1$) v jedné globální síti ($G = 1$). Všichni odběratelé jsou na této jediné výrobní jednotce závislí. Extrémní verze Smart-grid konfigurace (B) také má maximální globální provázanost ($G = 1$), ale počet výrobních jednotek se rovná počtu odběrných jednotek ($P = N$), tj. každý odběratel je zároveň výrobcem (prosumerem) a všichni jsou na sobě závislí. Extrémní scénář Off-grid (C)

představuje mnoho izolovaných jednotek ($G = P = N$), každý odběratel je nezávislý. V těchto extrémních formách představují scénáře Super-grid a Off-grid centrálně řízené sítě, hierarchicky organizované sítě s jednou výrobní jednotkou v síti ($P/G = 1$). Naopak, extrémní koncepce Smart-grid představuje „ideální trh“ s extrémně decentralizovanou výrobou ($P/G = N$), s žádnou hierarchií a centrálním řízením.

Koncepcí Off-grid se zabývá např. americký výzkumný institut NREL, který vyvíjí autonomní energetické systémy (Autonomous Energy Systems – AES). Tento koncept najde uplatnění v regionech s nízkou hustotou obydlení, s velkými vzdálenostmi mezi rezidenčními sídly. V hustě osídlené Evropě postrádá celoplošné uplatnění tohoto konceptu smysl a představoval by spíše krok zpět až k počátkům samotné elektrifikace.

Koncepce Super-grid se v minulosti již diskutovala ve vizích celoevropské sítě propojené se severní Afrikou, kde by se využívala energie slunce k výrobě elektrické energie. V souvislosti s geopolitickou situací v Evropě, severní Africe a na Blízkém východě, se jeví tato myšlenka jako utopická.

Vývoj se zatím spíše soustředí na koncepci ES vycházející z koncepce Smart-grid. Tomu odpovídá i výrazně vyšší publikační aktivity na toto téma v porovnání s vizemi Super-grid a Off-grid [8]. Touto cestou se ubírá i Evropa, kde v minulosti vznikly pilotní projekty mikrosítí [9].

Mikrosítě se ukazují jako vhodné řešení pro integraci OZE a dalších distribuovaných zdrojů. Umožňují a usnadňují integraci a řízení distribuovaných zdrojů, energetických úložišť (ESS) a lokální spotřeby, čímž lze významně snížit ztráty v síti. Vývoj se zatím soustřeďuje především na nižší hladiny napětí (blíže ke koncovému uživateli a decentralizovaným zdrojům menších výkonů, nicméně existují i koncepty zahrnující vyšší napěťové hladiny). Vzájemná spolupráce mikrosítí vyúsťuje k zcela nové koncepci/architektuře ES s cílem rozdělit energetický systém do oddělených vzájemně spolupracujících částí s různou mírou autonomie (viz kapitolu 3).

5.2.2 Naše vize budoucí koncepce a provozu ES

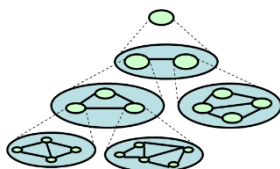
Naše vize o budoucí koncepci ES se bude týkat pouze uspořádání ES, nebude doprovázena návrhem strategie řízení, strukturou trhu či nových obchodních modelů, to je otázkou široké odborné diskuze.

Naše vize budoucí koncepce ES vychází s těchto základních myšlenek a předpokladů:

- Vysoký podíl OZE (> 50 %) na energetickém mixu, zejména intermitentních zdrojů.
- Optimální využití portfolia a potenciálu místních zdrojů.
- Dosažení co nejvyrovnanější energetické bilance na místní úrovni → omezení výkonových toků napříč soustavou → menší nároky na případné rozšiřování a posilování sítí.
- Efektivní využití flexibility na straně výroby i spotřeby.
- Decentralizované řízení → rozdělení ES na spolupracující subsystémy s určitou mírou autonomie.
- Vyšší odolnost soustavy (resilience) díky decentralizaci a místní autonomii, porucha jen v dílčím subsystému.
- Unifikované rozhraní mezi subsystémy.

- Fyzická struktura ES s hierarchickými vrstvami (napěťovými hladinami) zůstane v budoucnosti nezměněna. Je výhodná pro postupné zavádění nových prvků do stávající sítě (bottom-up approach).

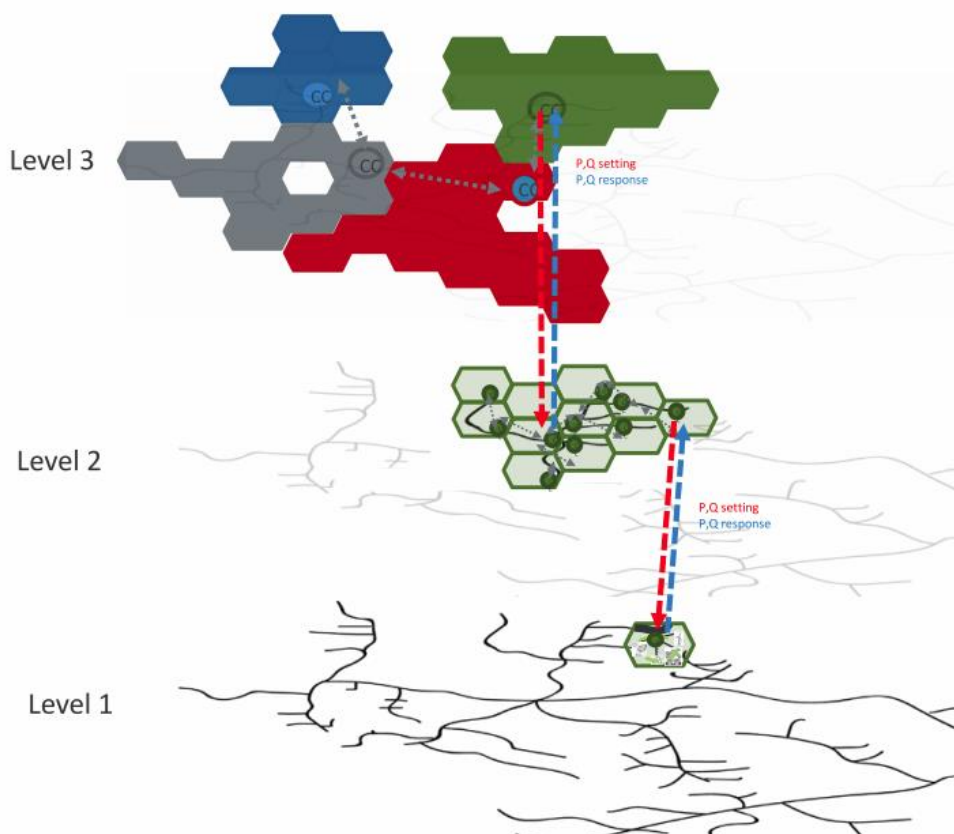
Budoucí koncepce/architektura ES bude vycházet z výše uvedené koncepce architektury ES "Smart-grid" [8]. Jejím představitelem je koncept Web-of-Cells (viz kapitolu 3.1), kdy je systém rozdělen na dílčí hierarchicky uspořádané energetické buňky/sybsystémy (EC), tj. buňka může být složena z dalších buněk nižší úrovně. Jedná se o do sebe vnořené mikro, nano, pikosítě.



Názorné zobrazení do sebe vnořených energetických buněk

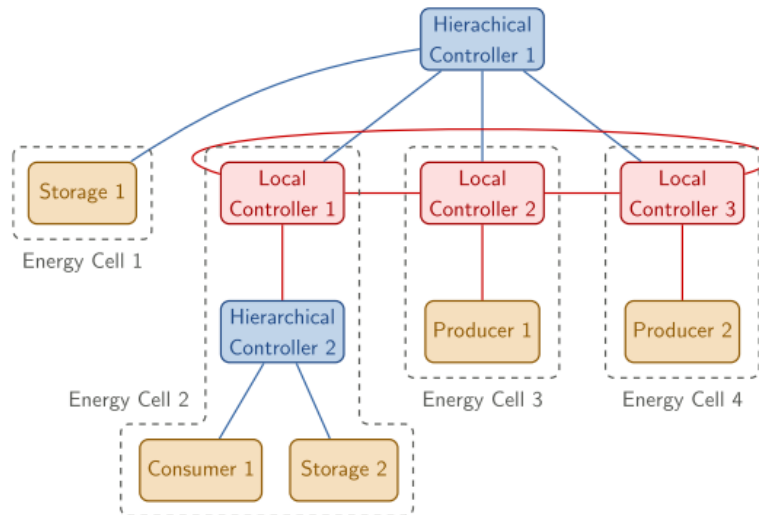
EC budou mít určitou míru autonomie a budou se řídit autonomními pravidly. Pravidla vzájemné interakce zajišťují jejich spolupráci s ostatními jednotkami v rámci celého systému. EC budou mít sdílenou odpovědnost za řízení celého systému. EC tedy musí být propojeny fyzicky pro zajištění výkonových přenosů, ale i virtuálně pro výměnu dat.

Energetické buňky budou mít pevně danou strukturu, budou zahrnovat určitou celistvou oblast nebo logický celek soustavy, např. uživatel sítě, mikrosítě (obytná či komerční budova, městská čtvrť, průmyslový areál či průmyslové zóny, rezidenční zóny) až po celé síťové oblasti (sítě nn napájená z DTS vn/nn, oblast napájená vývodem vn, uzlová oblast vn či vvn, lokální distribuční soustava apod.).



Ukázka hierarchické struktury energetických buněk [10]

Provoz energetické buňky bude řídit lokální energetické řídicí centrum (ECC - energy control center), jehož úkolem bude monitorovat, řídit a regulovat technologie, toky energie a informací uvnitř buňky, případně výměnu informací a energií s vnějším okolím, tj. energetickými buňkami na stejné či vyšší úrovni.



Vizualizace příkladu hierarchického celulárního energetického systému včetně vazeb mezi energetickými buňkami EC [11]

Energetické buňky budou řešit místní úkoly lokálně. V případě, že tento úkol není buňka vlastní prostředky schopna vykonat, pak nastává interakce se sousedními buňkami nebo nadřazenou buňkou. Úkolem EC nemusí být prvotně zajištění výkonové rovnováhy, ale mohou to být i jiné úkoly zacílené lokálně nebo ve prospěch celé ES. Provoz a použitý způsob/algoritmus řízení bude záviset na úkolech EC a cílech ES. Může to být např.:

- Vyrovnaná výkonová bilance v EC
- Poskytování flexibility různého rozsahu a dynamiky
- Ekonomické cíle – co nejlevnější provoz EC nebo celého systému, co nejnižší cena elektřiny (nevyužívat za každou cenu blízké drahé zdroje, ale levné vzdálené)
- Optimalizace provozu celé sítě
- Zajištění maximální odolnosti sítě (resilence)
-

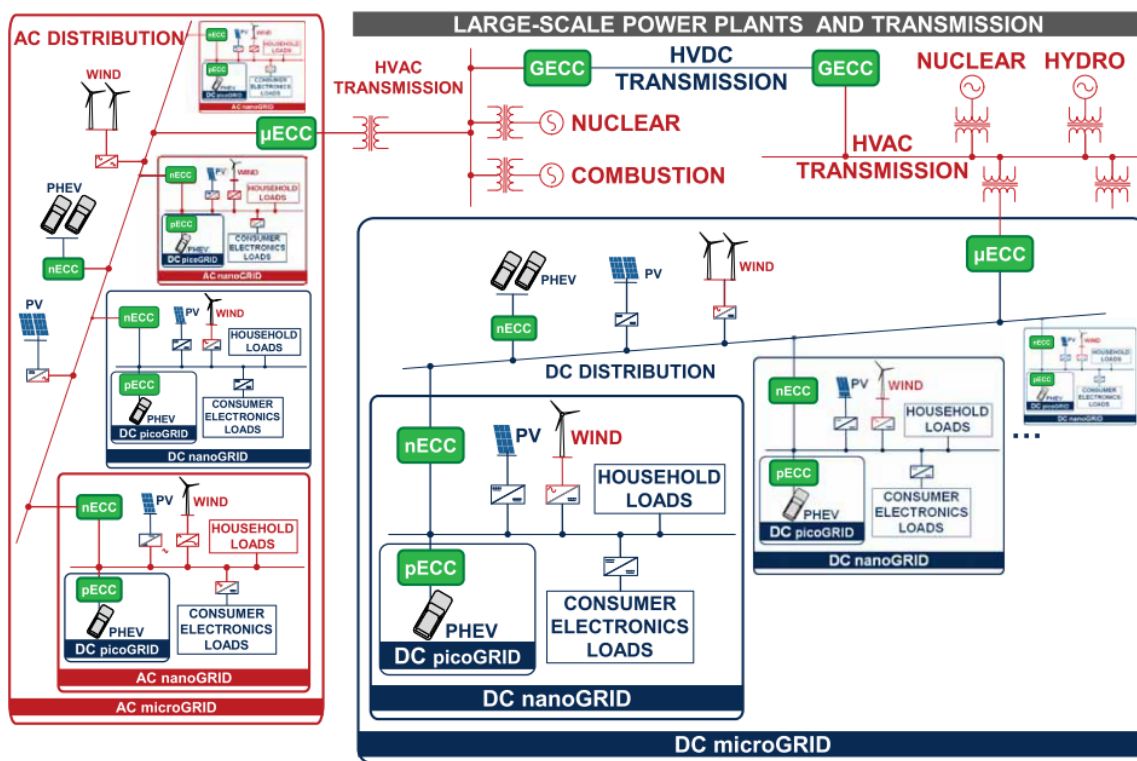
EC budou částečně autonomní, ale mohou být „požádány“ vykonávat i další úkoly pro bezpečný a optimální provoz celého systému nadřazeným řídicím centrem. Na vyšší úrovni budou řešeny úkoly vyžadující větší přehled o celém systému.

Pro dosažení maximální flexibility by měla EC obsahovat výrobu, akumulaci, spotřebu (pasivní, případně i aktivní odběratele). Není bezpodmínečně nutné, aby byla soběstačná a schopná ostrovního provozu, i když je to jistě výhodou. Dosažení soběstačnosti by mohlo v některých případech vést ke zbytečně velkým instalovaným kapacitám ve výrobě a akumulaci, a tedy velkým investicím. Může být nakonec výhodnější sdílení kapacit mezi energetickými buňkami.

Vazby mezi energetickými buňkami mohou být vertikální (to odpovídá hierarchickému uspořádání ES), ale i horizontální. Zajištění vertikálních vazeb nemusí představovat žádný problém, neboť se vychází ze stávající topologie sítě. U horizontálních vazeb na stejné úrovni to již problém může být na vyšších napěťových hladinách, např. při propojení vývodů vn či uzlových oblastí vn či vvn doposud provozovaných samostatně, kdy může dojít k relativně

velkým tokům vyrovnávacích výkonů, což může vést až k proudovému přetížení některých úseků propojených vývodů a ohrožení bezpečného spínání úsekovými spínači vn [12]. Tento problém je sice technicky řešitelný, ale vyžaduje instalaci speciálních zařízení, tzv. Soft Open Points [13][14].

Domníváme se, že vazby mezi energetickými buňkami, fyzické i komunikační, by měly být řešeny unifikovaným rozhraním. Integrace mikrosítí do nadřazené sítě totiž velmi často vyžaduje sofistikovaný interface. Hlavní komponentou pro segmentaci sítí a energy management mikrosítí budou představovat tzv. energy routery. E-routery umožňují plně regulovat průtok činného a jalového výkonu, poskytují plný decoupling částí sítě, čímž umožňují realizaci ac i dc mikrosítí [15] a slouží jako integrační rozhraní pro stejnosměrné zdroje (typicky FVE) či spotřebiče energie (např. nabíjecí stanice, systémy akumulace elektrické energie). E-routery mohou být realizovány bez galvanického oddělení [16][17] nebo s oddělovacím transformátorem [18][19]. E-routery fungují v síti jako inteligentní uzly a jsou předpokládanou základní komponentou nejen koncepce tzv. Energy internetu (viz kapitolu 3.4), ale i celulární či holonické architektury (viz kapitoly 3,1 a 3.2). E-routery tedy představují energetická řídicí centra (ECC) na různých úrovních ES.

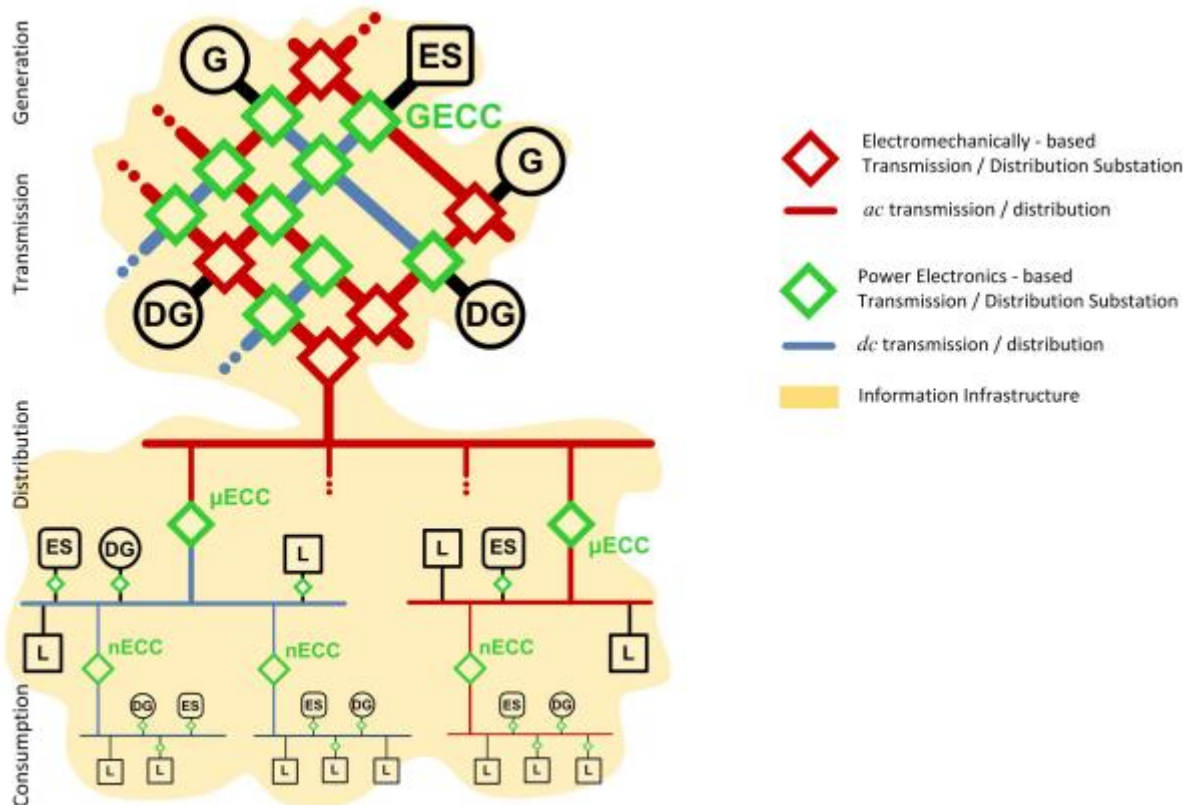


Představa segmentované ES, jednotlivé segmenty/energetické buňky jsou připojeny přes energetická řídicí centra ECC, která fyzicky představují elektrické stanice na bázi výkonové elektroniky, zdroj [19]

Využití e-routerů společně s dalšími zařízeními na bázi výkonové elektroniky (VET) nabízí další výhody a konceptu propojených mikrosítí/subsystémů dává přidanou hodnotu v možnosti propojení mikrosítí s rozdílnou vnitřní architekturou. Takto je možné zajistit spolupráci dc sítí a ac sítí (o různé velikosti napětí, resp. s různým počtem fází či frekvencí). Síť dc naleznou uplatnění např. v rezidenčních či komerčních budovách a pomocí e-routerů mohou být tyto dc nanosítě jednoduše včleněny do ac sítí. V dc nanosítích se k napájení využívají elektronické výkonové měniče, které jsou regulovatelné a mohou poskytovat aktivní omezení proudu, čímž

se snižuje potřeba elektromechanických ochranných zařízení [15]. Pomocí VET je možné připojovat do stávajících sítí výrobní a akumulační jednotky či zátěže s rozdílným dynamickým chováním. Měníče zajistí dynamický decoupling těchto zařízení či segmentů sítě.

Výsledný systém je hybridním mixem ac a dc architektur zahrnujících ..., piko-, nano-, mikro-, ..., megasítě, které jsou hierarchicky propojeny a vytváří novou strukturu ES (viz následující obrázek).



Koncepce ES, strukturované jako hierarchická síť dynamicky oddělených, elektronicky propojených dílčích subsystémů [15]

Řídicí centra ECC, která propojují různé dílčí subsítě, nebudou pouze obousměrnými výkonovými měniči energie, ale skutečnými e-routery, které zajišťují agregaci zátěže a zdrojů, sběr dat, povelování a mají dostatečnou autoritu, aby umožnily hierarchické distribuované řízení celé ES. Každé ECC je schopno komunikovat se všemi součástmi dané subsítě a také s nadřazeným ECC, aby bylo možné plně využít a optimalizovat provoz konkrétního subsystému a následně ovlivnit provoz celé ES. ECC může v závislosti na povaze poruchy v nadřazeném systému provést úmyslný či neúmyslný přechod do ostrovního provozu.

Prezentovaný nový koncept je kompatibilní se stávající koncepcí ES a mohl by být zaváděn postupně. Nové chytré budovy, datová centra, komerční a průmyslové oblasti by mohly být včleněny jako ac nebo dc nano- či mikrosítě.

Výhody

- Většina spotřebičů využívá ke svému napájení elektronické měniče
- OZE a akumulační zařízení jsou připojované do sítě přes výkonové měniče, více než polovina budoucí výroby elektřiny bude dodávána prostřednictvím výkonové elektroniky

- Nová koncepce je schopna rychlé odezvy na rychlé změny intermitentních zdrojů (stávající elektromechanické pohony, ovládací prvky a ochranná zařízení mají pomalé odezvy)
- Nová koncepce umožní rozdělit systém do hierarchické sítě asynchronních střídavých nebo stejnosměrných subsítí. Tato architektura umožňuje nezávislý (ostrovní) provoz dílčích sítí na všech úrovních a velmi rychlou plynulou regulaci toku výkonu ve všech směrech.
- E-routery umožní zvyšování/snižování napětí, omezování proudu, ochranu proti poruchám a pokročilou infrastrukturu měření.
- Stejnosměrný přenos je mnohem vhodnější pro použití kabelů, to by se mohlo ukázat jako klíčové v hustě osídlených oblastech (městské sítě)
- Hlavní výhodou je budování sítě směrem zdola nahoru (bottom-up approach)

Nevýhody

- Drahá dc infrastruktura, zařízení jsou stále vyvíjena
- Nedostupnost výkonových a vysokonapěťových elektronických měničů výkonu s přijatelnou cenou, spolehlivostí a životností.
- Dosud není standardizace, nebo se teprve tvoří.
- Dále je zde otázka bezpečnosti. Rozdělením na subsystémy vzroste odolnost celé soustavy (vypadne jen část ES), ale složité systémy řízení s využitím IT infrastruktury a složitými vazbami se mohou stát zranitelnými (kybernetická bezpečnost).

Změna koncepce ES nebude revolučním aktem, ale bude to evoluční proces směrem od nižších hladin napětí a nižších výkonů k vyšším. Rozvoj nové koncepce se dá očekávat především v městských a průmyslových oblastech, postupným budováním mikro či nano sítí a jejich postupným (hierarchickým) propojováním. Řada nově vzniklých mikrosítí bude založená na dc architektuře, postupně z čistě ac systému vznikne hybridní ac-dc systém.

5.3 Technologie pro budoucí ES

Nová koncepce budoucí ES, ať už bude jakákoli, bude vyžadovat technologie, které umožňují nebo jsou nutné pro její realizaci. Přehled hlavních technických prvků tří vizí budoucí podoby ES: Super-grid, Smart-grid a Off-grid [8] uvádí následující tabulka.

Koncepce Super-grid

Budoucí ES vycházející z vize Super-grid je založena na zdrojích velkých výkonů, až několika GW, např. on-shore nebo off-shore větrné farmy, fotovoltaické elektrárny, v celosvětovém měřítku pak i solární tepelné elektrárny v oblasti rovníku, v kombinaci s rozsáhlými instalacemi využívajícími energie z přílivu a vln, biomasy a geotermální energie, pokud jsou samozřejmě dostupné. Některé požadované technické prvky jsou již součástí současných ES. Zvláště zajímavá je technologie HVDC umožňující přenos na velmi dlouhé vzdálenosti na pevnině a dně oceánů. K průlomům v technologii HVDC došlo se zavedením měničů VSC (voltage source converter), které umožňují dosáhnout o 50 % vyšší úroveň napětí, a vypínačů HVDC, které jsou zásadní pro spolehlivý provoz propojené infrastruktury HVDC. Koncept Super-grid může snížit potřebu akumulace energie, neboť přebytek energie na jednom místě lze přenést na jiná místa.

Hlavní socio-technické prvky tří idealizovaných vizí podoby budoucí ES [8]

	Super-grid	Smart-grid	Off-grid
Key technical components	Large-scale RE technology parks or plants HVDC cables Voltage source converters Large-scale storage	Small-scale RE technology Flexible AC transmission systems ICT, smart metering, smart sensors Small-scale storage Electric vehicles	Small-scale RE technology Small-scale storage Microgrids
Main actors	National governments & international organizations Transmission System Operators	Regional & national governments Distribution System Operators	Prosumers Private device developers and maintenance providers
Supporting institutions	Large, often state-owned vertically integrated utility companies Incumbent power system companies Collaboration and harmonization between governmental, regional, international projects Multilateral agreements Tenders Vision statements, roadmaps	Incumbent firms and new entrants from other sectors (ICT, automotive sector) Prosumers Collaboration along the new supply chain Standardization Feed-in-tariffs Expectations translated into demonstration projects	Mistrust in the existing electricity market actors Norms related to independence, self-sufficiency or direct contribution to climate neutrality Innovative practices for financing (microfinance, pay-as-you-go)

Koncepce Smart-grid

Pro tuto koncepci je charakteristické, že velikost výrobních jednotek a napěťová hladina, do níž jsou připojeny, se snižuje a elektřina je dodávána na kratší vzdálenosti. Technologie síťových prvků a pro výrobu elektřiny z OZE jsou doplněné technologiemi rozhraní zajišťující komunikaci, měření a skladování energie. Mnohé z těchto technologií jsou již považovány za vyspělé jak ve vývoji, tak v praktickém využití, zatímco jiné vyžadují další vývoj. Technické prvky konceptu Smart-grid jsou uvedeny v následující tabulce.

Výběr technických prvků pro koncepci Smart-grid [8]

Technology area	Technical components
Grid infrastructure ICT integration	Flexible AC transmission systems FACTS Communication equipment Routers, relays, switches, gateway, computers (servers) Customer information system Enterprise resource planning software
Advanced metering infrastructure (AMI)	Smart meters In-home displays Servers, relays Meter data management systems
Variable and distributed generation integration	Geographic information and management systems Communication and control technology for generation and storage technology
Distribution grid management	Remotely controlled distributed generation and storage Transformer sensors, wire and cable sensors Automated re-closers, switches and capacitors Distribution, outage and workforce management systems Geographic information systems
Customer-side systems	Vehicle-to-grid storage and balancing systems Smart appliances, routers, building automation systems Thermal accumulators, smart thermostat Energy management systems and dashboards Energy applications for smart phone and tablets Blockchain electricity transaction platforms

Klíčovou technologií je FACTS (flexibilní AC přenosový systém, která umožňuje přerozdělení výkonových toků v reálném čase, např. v době špičky výroby FVE. ICT obecně umožňují řízení

výkonu v reálném čase a obousměrnou výměnu informací mezi zúčastněnými stranami. Obousměrný tok informací mezi spotřebiteli a místními energetickými společnostmi umožňují technologie Advanced Metering Infrastructure (AMI). Pro řízení v budoucí chytré síti jsou důležité bateriové technologie a technologie pro řízení distribuční sítě a řízení na straně zákazníka. Elektromobily mohou být využity flexibilní vyrovnavání místní výkonové bilance prostřednictvím konceptu vehicle-to-grid (V2G).

Jedna z odnoží vize Smart-grid je Energy Internet (popsáno v kapitole 3.4), kde by kdokoli a kdykoli mohl nahrávat a stahovat balíčky elektrické energie, také známý jako Peer-to-Peer obchodování s elektřinou. Technologie Blockchain, aplikovaná například ve finančním sektoru prostřednictvím kryptoměn, jako je bitcoin, je stále více propagována jako budoucí řešení pro Peer-to-Peer obchodování. Blockchain nabízí alternativu k současným systémům dodávky elektřiny. Blockchain je databáze, která automaticky zaznamenává a sleduje jednotlivé akce v rámci systému a výsledky ukládá do zabezpečené online složky dostupné komukoli kdekoli. V budoucím systému založeném na prosumerech by taková technologie mohla umožnit rychlejší a decentralizovanější transakční systém (více v kapitole 4.3).

Koncepce Off-grid

Off-grid systémy nejsou napojeny na rozsáhlou infrastrukturu inženýrských sítí. Místo toho se sestávají ze samostatných systémů výroby a distribuce energie, které dodávají elektřinu místním komunitám prostřednictvím mini nebo mikrosítí. Klíčovými technologiemi jsou OZE malých výkonů (FVE, větrné nebo malé vodní elektrárny) spojené s akumulací. Off-grid systémy lze využít pro zásobování komunit bez přístupu k veřejné distribuční síti, v městských oblastech jako záloha nebo alternativa nespolehlivých sítí, k napájení spotřebičů, jejichž napojení na DS by bylo velmi nákladné, nebo k zajištění energeticky nezávislých domácností.

5.4 Použitá literatura a odkazy

- [1] MAF CZ 2023, Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040, ČEPS, říjen 2024
- [2] Kysnar, F., Jícha, T. - Integrace OZE do ES ČR, NAP SG ZL22, 2023, https://mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2023/6/2_ZL22_Integrace-OZE-do-ES.pdf
- [3] Brettschneider Z., Jeřábková T., Hejpetrová A., Křesálek P., - Mapa volné distribuční kapacity pro připojování výroben, Konference ČK CIRED 2024
- [4] Hejhal M., Berka J., Kolacia T. - Tranzice energetiky: Ekonomické dopady modernizace soustav, Konference ČK CIRED 2024
- [5] Miškovský D., Pistora M.; Roučková K. - Přínosy EDC pro dispečerské řízení, Konference ČK CIRED 2024
- [6] Propojení energetické infrastruktury v EU [Online]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/infographics/ten-e-energy-infrastructure/>
- [7] e-HIGHWAY 2050, Modular Development Plan of the Pan-European Transmission System 2050, D 4.4 Modular development plan from 2020 to 2050, pp. 54-55, D 4.3 Data

- sets of scenarios and intermediate grid architectures for 2040, chapter 2.7, 2015
Dostupné z: <https://docs.entsoe.eu/baltic-conf/bites/www.e-highway2050.eu/e-highway2050/>
- [8] Hojčková K., Sandén B., Ahlborg H. - Three electricity futures: Monitoring the emergence of alternative system architectures, *Futures* 98 (2018) 72–89
- [9] Iraide López, Nerea Goitia-Zabaleta, Aitor Milo, Julen Gómez-Cornejo, Itxaso Aranzabal, Haizea Gaztañaga, Elvira Fernandez. European energy communities: Characteristics, trends, business models and legal framework, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 197, 2024, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114403>.
- [10] Kroposki, B. et al. Autonomous energy grids: Controlling the future grid with large amounts of distributed energy resources. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2020, 18.6: 37-46. DOI: 10.1109/MPE.2020.3014540
- [11] Dengler, G., Bazan, P., & German, R. (2022). Simulation of a Cellular Energy System including hierarchies and neighborhoods. *Energy Informatics*, 5(Suppl 4), 51.
- [12] Jiříčka J. Chromý J., Štěpka V., Tesařová M., Vykuka R. - Využití synchronního měření fázorů k eliminaci negativních dopadů na odběratele při spínání různých sítí 22 kV, konference ČK Cired 2015
- [13] Fuad, K. S., Hafezi, H., Kauhaniemi, K., & Laaksonen, H. (2020). Soft open point in distribution networks. *IEEE Access*, 8, 210550-210565.
- [14] JIANG, Xun, et al. An overview of soft open points in electricity distribution networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13.3: 1899-1910.
- [15] D. Boroyevich, I. Cvetkovic, R. Burgos and D. Dong, "Intergrid: A Future Electronic Energy Network?," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 127-138, Sept. 2013, doi: 10.1109/JESTPE.2013.2276937.
- [16] F. Chen, R. Burgos and D. Boroyevich, "A Bidirectional High-Efficiency Transformerless Converter With Common-Mode Decoupling for the Interconnection of AC and DC Grids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 2, pp. 1317-1333, Feb. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2830818.
- [17] D. Dong, I. Cvetkovic, D. Boroyevich, W. Zhang, R. Wang and P. Mattavelli, "Grid-Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems—Part One: High-Density Two-Stage Topology," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 1655-1666, April 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2212462.
- [18] S. Yang et al., "Shipboard PEBB Cooling Strategies," 2019 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Washington, DC, USA, 2019, pp. 24-31, doi: 10.1109/ESTS.2019.8847810.
- [19] D. Boroyevich, "CPES Research: SSPS—Building Blocks for the Future Electronic Power Grid", Virginia Tech, [online] Available: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/09/f36/%5B7%5D%20VT%20-%20Dushan%20Boroyevich.pdf>.

6 Manažerské shrnutí

V kontextu klimatických cílů Evropské unie, které mimo jiné směřují k dosažení uhlíkové neutrality v oblasti energetiky do roku 2050, bude v příštích dekádách docházet k dynamické transformaci energetiky. Hlavní hybnou silou této transformace bude kombinace dekarbonizace, decentralizace, digitalizace a narůstající elektrifikace, které přinášejí zásadní technické a společenské výzvy a v konečném důsledku budou mít vliv na vývoj elektrizační soustavy.

Dopady vysokého podílu OZE na provoz ES

Dekarbonizace povede k útlumu zdrojů využívajících fosilní paliva a výraznému nárůstu podílu obnovitelných zdrojů energie v energetickém mixu, zejména fotovoltaických a větrných elektráren s intermitentním charakterem výroby. Predikce podílu OZE na energetickém mixu v Evropě se liší podle uvažovaných předpokladů/scénářů vývoje. Dá se předpokládat, že v roce 2050 se podíl OZE může zvýšit na 50 až 80 % v závislosti na uvažovaném scénáři vývoje (viz kapitolu 2.1).

Obdobný trend lze očekávat i v ČR, zde bude podíl OZE na energetickém mixu záviset i na rozvoji jaderné energetiky. Odhaduje se, že v roce 2040 v ČR stoupne podíl OZE na cca 55 %. Předpokládá se především rozvoj FVE na napěťových hladinách 110 kV a vn, což si vyžádá navyšování kapacity distribučních, ale i přenosových sítí nad rámec jejich plánovaného rozvoje a přirozené obnovy. Další investice půjdou na zvýšení automatizace sítí, zajištění většího množství měření a dále pak do řídicích systémů a systémů zpracování dat. Integrace OZE povede k významně vyšším požadavkům na dispečerské řízení, vzájemnou komunikaci, výměnu dat a využívání služeb od výrobců a zákazníků.

Budoucí skladba zdrojů (úbytek velkých systémových elektráren ve prospěch decentrálních zdrojů) přináší riziko nedostatku výkonu pro regulaci ES. Vysoká penetrace decentrální výroby bude mít za následek zvýšené nároky na flexibilitu sítě a potřebu regulačních kapacit. Pro udržení frekvenční a napěťové stability ES bude v budoucnu zapotřebí udržovat výkonovou bilanci nejen na straně zdrojů (systémové i decentralizované), ale i na straně spotřeby. Integrace obnovitelných zdrojů v očekávané výši si vyžádá významný nárůst potřeby podpůrných služeb (PpS), frekvenčních i nefrekvenčních. Služby dnes poskytované velkými zdroji připojenými do PS budou poskytovány decentrálními zdroji (agregovaně z DS, např. agregace flexibility), případně i aktivními odběrateli a prosumery. Řízení toků výkonů bude potřeba provádět na všech napěťových hladinách.

Zásadní očekávané změny v elektrizačních soustavách se shrnout takto:

- Přesun výroby z relativně malého počtu velkých (synchronních) výrobních jednotek se snadno predikovatelnou a regulovatelnou výrobou na mnoho menších (nesynchronních) jednotek
- Kombinace velkých systémových zdrojů a velkého množství malých distribuovaných zdrojů
- Značný podíl intermitentních zdrojů (s kolísavou výrobou), zejména v distribučních sítích
- Síť se mohou častěji dostávat blíže ke svým provozním limitům
- Výroba se nebude řídit pouze spotřebou, ale bude využívána kombinace řízení výroby a řízení spotřeby

- Aktivní odběratelé, flexibilita odběratelů a akumulace, odběratelé se stávají i producenty (prosumery) a poskytovateli flexibility
- Aktivace nových hráčů na trhu (např. agregátoři, přímý přístup na trh)
- Spotřeba elektrické energie se výrazně zvýší (e-mobilita, veřejná doprava, průmysl a rezidenční vytápění) zejména na nižších napěťových hladinách
- Využití více forem energie, využití technologií Power-to-X a X-to-Power
- Polygenerace - výroba více než jedné užitečné formy energie ve výrobní jednotce (elektřina, teplo, chlad, vodík)
- Multi-energy systems, energetické huby (energy hubs) – provázané rozvodné soustavy pro různé formy energie (elektřina, plyn, vytápění ...)

Postupný úbytek velkých systémových elektráren ve prospěch decentrálních, často intermitentních, zdrojů přináší nové problémy v ES, jako je snížená setrvačnost soustavy, nižší zkratové proudy, obtížnější dosažení výkonové rovnováhy, rostoucí nároky na stabilitu a řízení napěťových poměrů. Vysoká penetrace decentrální výroby bude mít za následek zvýšené nároky na flexibilitu na straně výroby i spotřeby. Pro udržení frekvenční a napěťové stability ES bude v budoucnu zapotřebí udržovat výkonovou bilanci nejen na straně zdrojů (systémové i decentralizované), ale i na straně spotřeby. Řízení toků výkonů bude potřeba provádět na všech napěťových hladinách. Integrace obnovitelných zdrojů v očekávané výši si vyžádá významný nárůst potřeby podpůrných služeb (PpS).

Digitalizace a rozvoj informačních a komunikačních technologií budou hrát zásadní roli při optimalizaci provozu ES a umožní přístup nových subjektů na trh. Otevře prostor pro nové obchodní modely, jako je např. agregace flexibility, peer-to-peer obchodování a komunitní energetika, které umožní spotřebitelům aktivně se zapojit do obchodování s elektrickou energií a poskytovat podpůrné služby.

Velký počet zúčastněných jednotek a mnoho vzájemných vazeb zákonitě vede na složité energetické systémy, které jsou obtížně modelovatelné, a tím pádem jejich řízení začíná být značně komplikované.

Nové koncepce uspořádání a řízení ES

Výše uvedené očekávané změny v ES vedou k myšlenkám přehodnotit stávající koncepci/architekturu elektrizačních soustav. Nová podoba budoucích ES je intenzivně řešeným tématem. V zásadě lze v odborné literatuře a diskuzích vysledovat tři alternativní směry budoucí podoby ES: globální síť (tzv. Super-grid), autonomní energetické systémy (Off-grid) a regionální propojené sítě (Smart-grid).

Vývoj se zatím spíše soustředí na koncepci ES vycházející z koncepce Smart-grid, umožňující snazší a flexibilnější řízení složitých ES. Základní myšlenkou je řešit lokální problémy lokálně (princip energetické subsidiarity) pomocí **segmentace stávající ES**. Příkladem takové segmentace je koncepce Web-of-Cells. Soustava je rozdělena na samostatné, ale vzájemně spolupracující části s určitou mírou soběstačnosti a autonomie, tzv. energetické buňky (EC). Velikosti energetických buněk (EC) se mohou pohybovat od jednotlivých budov nebo zařízení až po celé (síťové) oblasti. Buňky jsou propojeny fyzicky i virtuálně, vyměňují si mezi sebou toky energie a data. Mohou být i hierarchicky uspořádány. Buňky se řídí svými pravidly, ale

mají sdílenou odpovědnost za řízení celého energetického systému. Pravidla vzájemné interakce zajišťují jejich spolupráci s ostatními jednotkami v rámci celého systému. Každá buňka je schopna monitorovat a řídit lokální výkonovou rovnováhu. Pokud se objeví odchylky, buňka se snaží tyto problémy vyřešit sama bez nutnosti zásahu z vyšší úrovně řízení. Není-li toho schopna, pak teprve nastává interakce se sousední nebo nadřazenou buňkou. Úkolem EC nemusí být prvotně zajištění výkonové rovnováhy, ale mohou to být i jiné úkoly zacílené lokálně i ve prospěch celé ES. Stejně principy a pravidla spolupráce buněk lze aplikovat na každé úrovni granularity.

Výhody segmentace ES

- Optimální využití portfolia a potenciálu místních zdrojů.
- Co nejvyrovnanější energetická bilance na místní úrovni → omezení výkonových toků napříč soustavou → menší nároky na případné rozšiřování a posilování sítí.
- Efektivní využití flexibility a provázanost energetických sítí (technologicky, ekonomicky, organizačně).
- Decentralizované řízení → snížení složitosti řízení celého systému → rozdělení na podružné jednotky.
- Vyšší odolnost soustavy (resilience) díky decentralizaci a místní autonomii, porucha nepostihne velký celek.
- Možná rekurzivita → architektura řídicího systému aplikovatelná na všechny úrovně EC, stejné postupy a modely.

Decentralizace elektrizačních soustav přinese zásadní změnu paradigmatu v řízení a uspořádání elektrizačních soustav. Změny v koncepci ES nebudou revolučním aktem, ale bude to evoluční proces, na který se musí provozovatelé sítí připravit.

Obecně přijatá vize budoucí architektury ES zabrání živelnému vývoji uspořádání ES, které by v dalších letech mohlo přinášet provozní problémy.

Naše vize budoucí koncepce ES

Představujeme vizi budoucí architektury ES založené na využití výkonových elektronických technologií.

Naše vize budoucí koncepce ES vychází s těchto základních myšlenek a předpokladů:

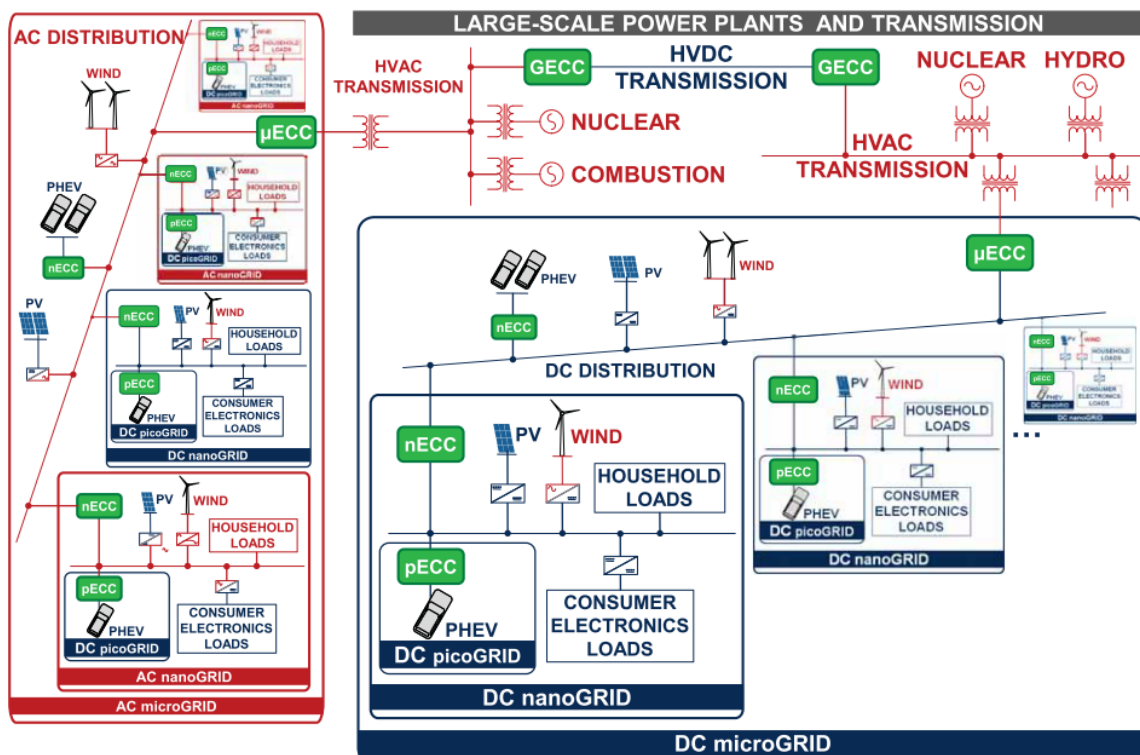
- Vysoký podíl OZE (> 50 %) na energetickém mixu, zejména intermitentních zdrojů.
- Optimální využití portfolia a potenciálu místních zdrojů.
- Dosažení co nejvyrovnanější energetické bilance na místní úrovni → omezení výkonových toků napříč soustavou → menší nároky na případné rozšiřování a posilování sítí.
- Efektivní využití flexibility na straně výroby i spotřeby.
- Decentralizované řízení → rozdělení ES na spolupracující subsystémy s určitou mírou autonomie.
- Vyšší odolnost soustavy (resilience) díky decentralizaci a místní autonomii, porucha jen v dílčím subsystému.
- Unifikované rozhraní mezi subsystémy.

- Fyzická struktura ES s hierarchickými vrstvami (napětovými hladinami) zůstane v budoucnosti nezměněna. Je výhodná pro postupné zavádění nových prvků do stávající sítě (bottom-up approach).

Budoucí koncepce/architektura ES bude vycházet z konceptu Web-of-Cells (viz kapitolu 3.1), kdy je systém rozdělen na dílčí hierarchicky uspořádané energetické buňky/sybsystémy (EC), tj. buňka může být složena z dalších buněk nižší úrovně. Jedná se o do sebe vnořené mikro, nano, pikosítě.

EC budou mít určitou míru autonomie a budou se řídit autonomními pravidly. Pravidla vzájemné interakce zajišťují jejich spolupráci s ostatními jednotkami v rámci celého systému. EC budou mít sdílenou odpovědnost za řízení celého systému. EC tedy musí být propojeny fyzicky pro zajištění výkonových přenosů, ale i virtuálně pro výměnu dat. Energetické buňky budou mít pevně danou strukturu, budou zahrnovat určitou celistvou oblast nebo logický celek soustavy, např. uživatel sítě, mikrosítě či síťová oblast. EC budou částečně autonomní, ale mohou být „požádány“ vykonávat i další úkoly pro bezpečný a optimální provoz celého systému nadřazeným řídicím centrem. Na vyšší úrovni budou řešeny úkoly vyžadující větší přehled o celém systému.

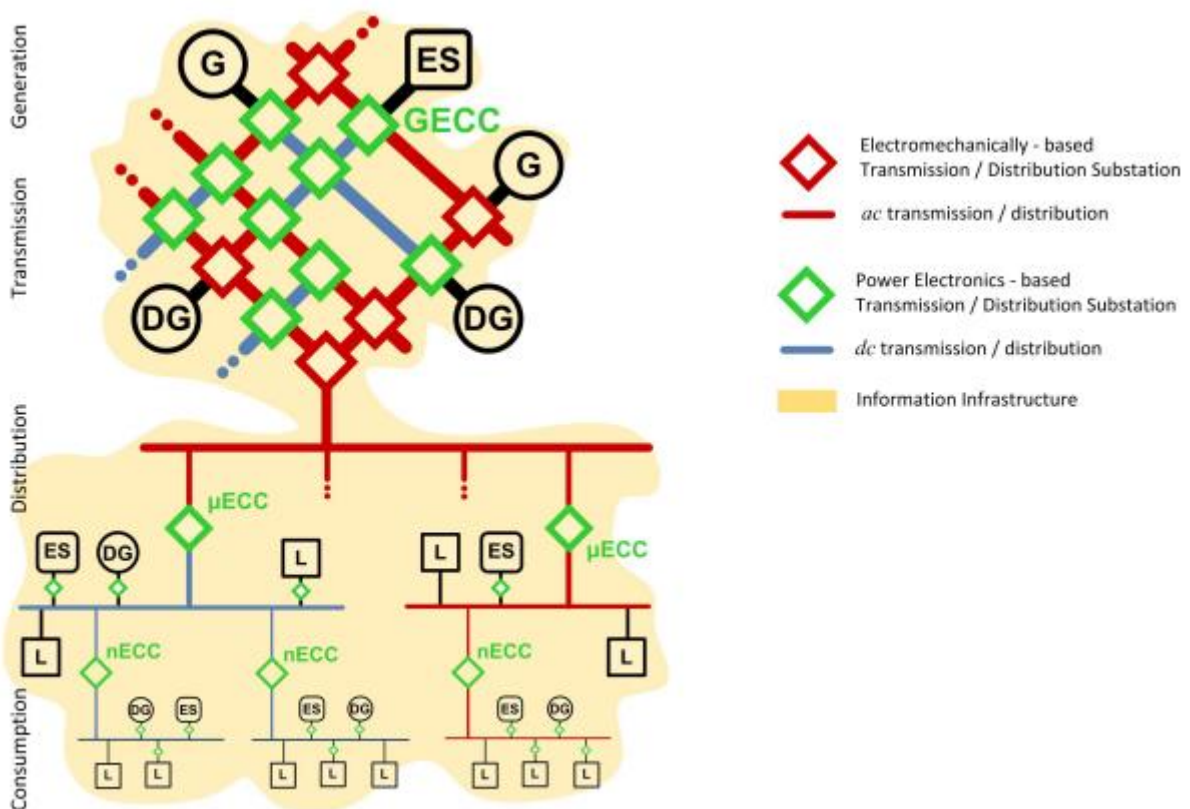
Domníváme se, že vazby mezi energetickými buňkami, fyzické i komunikační, by měly být řešeny unifikovaným rozhraním. Integrace mikrosítí do nadřazené sítě totiž velmi často vyžaduje sofistikovaný interface. Hlavní komponentou pro segmentaci sítí a energy management mikrosítí budou představovat tzv. energy routery. E-routery umožňují plně regulovat průtok činného a jalového výkonu, poskytují plný decoupling částí sítě, čímž umožňují realizaci ac i dc mikrosítí. E-routery tedy představují energetická řídicí centra (ECC) na různých úrovních ES.



Představa segmentované ES, jednotlivé segmenty/energetické buňky jsou připojeny přes energetická řídicí centra ECC, která fyzicky představují elektrické stanice na bázi výkonové elektroniky, zdroj [19]

Využití e-routerů společně s dalšími zařízeními na bázi výkonové elektroniky (VET) nabízí další výhody a konceptu propojených mikrosít/subsystémů dává přidanou hodnotu v možnosti propojení mikrosít s rozdílnou vnitřní architekturou. Takto je možné zajistit spolupráci dc sítí a ac sítí (o různé velikosti napětí, resp. s různým počtem fází či frekvencí). Sítě dc naleznou uplatnění např. v rezidenčních či komerčních budovách a pomocí e-routerů mohou být tyto dc nanosítě jednoduše včleněny do ac sítí. V dc nanosítích se k napájení využívají elektronické výkonové měniče, které jsou regulovatelné a mohou poskytovat aktivní omezení proudu, čímž se snižuje potřeba elektromechanických ochranných zařízení. Pomocí VET je možné připojovat do stávajících sítí výrobní a akumulční jednotky či zátěže s rozdílným dynamickým chováním. Měniče zajistí dynamický decoupling těchto zařízení či segmentů sítě.

Výsledný systém je hybridním mixem ac a dc architektur, které jsou hierarchicky propojeny a vytváří novou strukturu ES.



Koncepce ES, strukturované jako hierarchická síť dynamicky oddělených, elektronicky propojených dílčích subsystémů [15]

Řídící centra ECC, která propojují různé dílčí subsítě, zajišťují agregaci zátěže a zdrojů, sběr dat, povelování a mají dostatečnou autoritu, aby umožnily hierarchické distribuované řízení celé sítě. Každé ECC je schopno komunikovat se všemi součástmi dané subsítě a také s nadřazeným ECC, aby bylo možné plně využít a optimalizovat provoz konkrétního subsystému a následně ovlivnit provoz celé ES.

Prezentovaný nový koncept je kompatibilní se stávající koncepcí ES a mohl by být zaváděn postupně. Nové chytré budovy, datová centra, komerční a průmyslové oblasti by mohly být včleněny jako ac nebo dc nano- či mikrosítě.

Výhody

- Většina spotřebičů využívá ke svému napájení elektronické měniče
- OZE a akumulční zařízení jsou připojované do sítě přes výkonové měniče, více než polovina budoucí výroby elektřiny bude dodávána prostřednictvím výkonové elektroniky
- Nová koncepce je schopna rychlé odezvy na rychlé změny intermitentních zdrojů (stávající elektromechanické pohony, ovládací prvky a ochranná zařízení mají pomalé odezvy)
- Nová koncepce umožní rozdělit systém do hierarchické sítě asynchronních střídavých nebo stejnosměrných subsítí. Tato architektura umožňuje nezávislý (ostrovní) provoz dílčích sítí na všech úrovních a velmi rychlou plynulou regulaci toku výkonu ve všech směrech.
- E-routery umožní zvyšování/snižování napětí, omezování proudu, ochranu proti poruchám a pokročilou infrastrukturu měření.
- Stejnosměrný přenos je mnohem vhodnější pro použití kabelů, to by se mohlo ukázat jako klíčové v hustě osídlených oblastech (městské sítě)
- Hlavní výhodou je budování sítě směrem zdola nahoru (bottom-up approach)

Nevýhody

- Drahá dc infrastruktura, zařízení jsou stále vyvíjena
- Nedostupnost výkonových a vysokonapěťových elektronických měničů výkonu s přijatelnou cenou, spolehlivostí a životností.
- Dosud není standardizace, nebo se teprve tvoří.
- Dále je zde otázka bezpečnosti. Rozdělením na subsystémy vzroste odolnost celé soustavy (vypadne jen část ES), ale složité systémy řízení s využitím IT infrastruktury a složitými vazbami se mohou stát zranitelnými (kybernetická bezpečnost).

Změna koncepce ES nebude revolučním aktem, ale bude to evoluční proces směrem od nižších hladin napětí a nižších výkonů k vyšším. Presentovaný nový koncept je kompatibilní se stávající koncepcí ES a mohl by být zaváděn postupně. Řada nově vzniklých mikrosítí bude založená na dc architektuře, postupně z čistě ac systému vznikne hybridní ac-dc systém.

Shrnutí provedených prací

Byla provedena analytická část zahrnující:

- Vývoj výroby a spotřeby v Evropě, případně ČR do r. 2050 – k této zprávě bude přiložena průvodní zpráva s detaily.
- Rešerše nových koncepcí budoucích ES – zaměřeno především na koncepty spočívající v segmentaci sítí: koncept Web-of-Cell, holonické a fraktální systémy, Energy Internet. Koncept WoC byl stručně představen v tomto shrnutí.
- Zmapovány pracoviště, výzkumné týmy a osobnosti hrající klíčovou roli v oblasti budoucího vývoje ES.
- Popsány nové prvky, technologická a organizační řešení začleňovaná do provozu energetických sítí a stav jejich.
 - Komunitní energetika – aktuální stav v EU a ČR
 - Podpůrné služby na straně výroby a spotřeby
 - Transaktivní energetické systémy (Transactive energy)

Slovník pojmů z oblasti budoucích energetických systémů

- **Systém systémů – System of Systems (SoS)**

Systém je skupina vzájemně se ovlivňujících, vzájemně propojených a vzájemně závislých složek, které tvoří komplexní a jednotný celek. Tyto nezávislé a případně distribuované systémy sdružují své zdroje dohromady a vytvářejí nový a složitější systém.

Systém systémů (SoS) je soubor více nezávislých systémů, které tvoří součást většího, složitějšího systému. Jednotlivé systémy v SoS spolupracují, aby poskytovaly funkce a výkon, které by žádný z nezávislých systémů nebo základních systémů nemohl sám o sobě dosáhnout (synergetický efekt).

- **Segmentace ES**

Rozdělení elektrizační soustavy do oddělených oblastí s různou úrovní autonomie.

- **Koncepce Web of Cells (WoC), celulární energetické systémy – Cellular/Cell Power/Energy Systems**

Nová forma organizace stávající ES na principu energetické subsidiarity, tj. přenesení rozhodování na co nejnižší úroveň, umožňující lokální optimalizaci výkonové rovnováhy a řízení spotřeby. ES je rozdělena na samostatné, ale spolupracující subsystémy, tzv. buňky (cells) s určitou mírou soběstačnosti a autonomie (řídí se autonomními pravidly). Subsystémy mohou být hierarchicky uspořádány, tj. subsystém obsahuje další subsystémy nižší úrovně atd. Pravidla vzájemné interakce zajišťují jejich spolupráci s ostatními jednotkami v rámci celého systému. Buňky/subsystémy mají sdílenou odpovědnost za řízení celého energetického systému. Subsystémy různé velikosti jsou propojeny fyzicky i virtuálně, vyměňují si mezi sebou toky energie a data.

- **Energetická buňka – Energy cell (EC)**

Energetická buňka je skupina vzájemně propojených zátěží, distribuovaných energetických zdrojů a akumulčních jednotek v přesně definovaných elektrických hranicích části sítě, odpovídajících vymezené geografické oblasti. Představuje určitou celistvou geografickou oblast nebo logický celek soustavy. Energetické buňky mohou být různé velikosti (prosumer, mikrosít, lokální zásobovací oblast) a mohou být hierarchicky uspořádány, s více úrovněmi vnořených EC. EC může obsahovat infrastrukturu nejen pro distribuci elektřiny, ale i jiných forem/nosičů energie (teplo, zemní plyn, vodík), tj. multi-energy system.

EC jsou fyzicky propojeny se sousedními či nadřazenými EC pro výměnu toků energií a virtuálně pro výměnu informací s okolím. EC jsou interně řízeny, snaží se řešit místní úkoly lokálně, interagují s okolím a předávají energii a informace. Buňky/subsystémy mají sdílenou odpovědnost za řízení celého energetického systému.

- **Holonické energetické systémy – Holonic/Holarchy Power/Energy Systems**

Obdobně jako u konceptu Web-of-Cells, i tento koncept se vychází z rozdělení systému na dílčí subsystémy, tzv. holony. Holony jsou nezávislé jednotky, které mají určitý stupeň autonomie, ale zároveň jsou součástí většího celku a také podléhají kontrole z jedné nebo více vyšších úrovní. Holon může obsahovat jiné holony nebo být součástí jiných holonů. Holony, které jsou organizovány tímto způsobem, tvoří holarchii. Nemusí se ale jednat o pevně danou strukturu

jako v případě WoC, ale díky vlastnostem holonů se může struktura systému dynamicky měnit a přizpůsobovat se novým situacím.

- **Fraktální systémy – Fractal systems**

Zvláštní skupinou holonických systémů jsou fraktální systémy, kdy jednotlivé části (zde tzv. fraktály) vykazují sebepodobnost nebo rekurzivnost na různých úrovních granularity. Fraktální architektura systému je tvořena sobě podobnými fraktálovými objekty, které lze rozdělit na jiné fraktálové objekty mající stejnou organizační strukturu a cíle jako nadřazený fraktál. Sebepodobnost pomáhá fraktálům sledovat společné cíle, zatímco sebeorganizace umožňuje fraktálovým objektům uspořádat svou vnitřní strukturu podle svých individuálních cílů.

- **Holistický přístup**

Holistický přístup znamená komplexní pohled na problémy a situace, který zohledňuje vzájemné vztahy a interakce mezi různými částmi systému.

- **Holistická architektura energetického systému**

Holistická architektura energetického systému je architektura, ve které jsou všechny relevantní součásti energetického systému (elektrické sítě, výrobní a akumulční zařízení, zákaznická zařízení a trh s elektřinou) sloučeny do jediné struktury. Holistická architektura sjednocuje veškeré interakce v rámci samotného energetického systému, mezi provozovateli sítě, výroby a akumulace, spotřebiteli a prosumery a trhem, čímž vytváří možnost je harmonizovat a profitovat ze synergického využití chytrých technologií.

Z tohoto pohledu lze řadit mezi holistické architektury nejen holistické systémy jako takové, ale i koncepci WoC či jiné koncepce.

- **Multi-Agent Systems (MAS)**

Jsou zajímavým přístupem pro realizaci funkcí distribuované automatizace a řízení v komponentách inteligentního energetického systému. MAS se skládá z distribuovaných jednotek nazývaných „agenti“, přičemž každý agent řídí své vlastní činnosti. Rozhodovací proces je obvykle založen na místních znalostech (tj. stavových informacích) a informacích (tj. zprávách) přijatých od jiných agentů. Tato technologie nabízí pohodlný způsob, jak se vyrovnat s dynamikou uvnitř velkých komplexních systémů, díky čemuž je řízení systému decentralizované. Agentem je myšlena entita, jež monitoruje své okolí pomocí senzorů a ovlivňuje jej pomocí aktuátorů. Inteligentní agenti reprezentují kybernetická zařízení, která zachycují data vysílaná ze senzorů a informují aktuátory o požadované akci.

- **Kyber-fyzikální systémy – Cyber-physical systems**

Kyber-fyzikální systémy jsou systémy složené z fyzických systémů (hardware), softwarových systémů a potenciálně dalších typů systémů (např. lidských systémů). Ty jsou úzce integrovány a propojeny tak, aby poskytovaly určité globální chování.

- **Energy Internet**

Jedná se o **koncepci** budoucích energetických sítí inspirovanou internetovou sítí, kde nejsou pevně definované hierarchie, ale uplatňuje se síťový přístup s „rovnými“ uzly. Tento koncept propojuje principy internetu a energetických sítí s cílem vytvořit inteligentní, decentralizovaný a flexibilní elektrický systém s řízením a optimalizací toku energie v reálném čase. Zdroje a spotřebitelé energie jsou připojeni k síti, kde mohou volně nakupovat a prodávat energii

pomocí inteligentních systémů řízení. Tento koncept vyžaduje pokročilé digitální technologie, jako jsou chytré elektroměry, blockchain pro řízení transakcí, a pokročilé algoritmy pro optimalizaci toků energie. Každý uzel v síti funguje podobně jako uzel na internetu, kde může být výrobcem i spotřebitelem energie.

- **Blockchain-Based Energy Grids/Systems**

Energetické systémy využívající technologii blockchainu. Blockchain je rozhraní, které zajišťuje bezpečné a transparentní transakce mezi účastníky trhu (peer-to-peer), eliminující potřebu centrální autority.

- **Transaktivní energie – Transactive Energy (TE)**

Transaktivní energii lze definovat jako systém ekonomických a kontrolních mechanismů, který umožňuje dynamickou rovnováhu nabídky a poptávky napříč celou elektrickou infrastrukturou s využitím hodnoty/ceny jako klíčového provozního parametru. TE systémy tak lze charakterizovat jako typ tržně orientovaného řízení. Tento koncept je založen na decentralizovaném modelu, který umožňuje jednotlivým entitám (výrobcům i spotřebitelům) vzájemně komunikovat a obchodovat s energií.

- **Sector coupling**

Jedná se o vzájemnou integraci rozdílných energetických odvětví, obvykle teplárenství, plynárenství, elektřiny a dopravy. Ve sdruženém systému jsou tyto sektory propojeny způsobem, který jim umožňuje vzájemnou výměnu energie. Hlavním cílem je efektivnější a vzájemně propojené využívání zdrojů. Sector coupling je o propojení energetického sektoru s průmyslem, dopravou a stavebnictvím a jejich společné optimalizaci.

- **Multienenergetické systémy – Multi energy systems (MES)**

Multienenergetické systémy integrují různé energetické systémy, jako je elektřina, zemní plyn a síť dálkového vytápění a chlazení. MES mohou zahrnovat i dopravní systémy, systémy zásobování vodou, bezpečnostní sítě atd. MES představují příležitost ke zvýšení technické, ekonomické a environmentální výkonnosti oproti klasickým energetickým systémům, jejichž sektory jsou řešeny odděleně nebo nezávisle.

- **Intergrid**

Hybridní kombinace střídavých a stejnosměrných architektur obsahujících ..., piko-, nano-, mikro-, ..., megasítě, které jsou dynamicky odděleny a hierarchicky propojeny, aby vytvořily novou strukturu elektrické sítě: intergrid. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2013.2276937>

- **Interoperabilita – Interoperability**

Interoperabilita je schopnost produktu nebo systému spolupracovat s jinými produkty nebo systémy za účelem sdílení zdrojů.

- **Pozorovatelnost soustavy (observability).**

Pozorovatelnost se týká schopnosti odvodit vnitřní stavy systému na základě jeho vnějších výstupů v průběhu času. Energetický systém je pozorovatelný, pokud lze velikost a úhel uzlových napětí jednoznačně určit/odhadnout pomocí dostupných měření. V energetických systémech je tento koncept zásadní pro monitorování a řízení dynamiky systému, neboť to operátorům umožňuje pochopit chování systému na základě měřitelných dat.

- **Flexibilita**

Rychlost a schopnost zdrojů (nebo spotřebičů) měnit svůj dodávaný (nebo odebíraný) výkon do (nebo z) ES oproti sjednaným (předpokládaným) diagramům dodávky (odběru), a to v reakci na požadavky z hlediska provozu a řízení ES nebo změny ceny elektřiny na trhu.

- **Agregace**

funkce vykonávaná fyzickou nebo právnickou osobou, která kombinuje plánovaný odběr nebo vyrobenou elektrickou energii od více zákazníků do větší koordinované skupiny za účelem prodeje, nákupu nebo aukce na jakémkoli trhu s elektřinou. Příímý účastník trhu, který agreguje flexibilitu od jejich jednotlivých poskytovatelů za účelem prodeje, je tzv. agregátor.

- **Řízená mikrosítě – Microgrid**

Mikrosítě jsou nezávisle řízené distribuční sítě schopné provozu v ostrovním režimu. Regulace probíhá pouze na straně zdrojů, i když síť obsahuje i zátěž a další prvky. Mikrosítě může být připojena k DS nebo provozována v ostrovním režimu. Regulace zdrojů je možná většinou pouze při připojení akumulčního zařízení. Zdroje jsou v geografické oblasti dané mikrosítě. Mikrosítě může obsahovat vnořené mikrosítě, pak o nich hovoříme jako o nanosítích či pikosítích.

- **Chytré sítě – Smart Grids**

Jako řízená mikrosítě, hlavní rozdíl je, že regulace probíhá na straně zdrojů i spotřeby.

Chytrá síť je definována jako integrace energetických, komunikačních a informačních technologií pro vylepšenou infrastrukturu distribuce elektrické energie.

- **Virtuální elektrárny – Virtual Power Plants (VPP)**

Virtuální elektrárny jsou virtuální entity, zajišťující virtuální propojení zdrojů z rozsáhlejších geografických oblastí, za účelem zlepšení jejich provozních charakteristik prostřednictvím agregace. Regulace více zdrojů jako jednoho jediného zdroje. Mohou zahrnovat i systémy pro akumulaci.

- **Energy router, E-router**

Energetický router je zařízení, které řídí a optimalizuje tok energie v energetické síti. Pomáhá udržovat stabilitu energetické sítě tím, že vyrovnává výkyvy v dodávce a spotřebě energie. Komunikuje s dalšími zařízeními v energetickém systému.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny			