

## Vliv energetické transformace a digitalizace na podpůrné služby

**Pracoviště:** KEE  
**Číslo dokumentu:** 22190-011-2025  
**Typ zprávy:** Výzkumná zpráva  
**Řešitelé:** Petr Pánek, Ing. et Ing. Martin Vinš  
**Vedoucí projektu:** Ing. et Ing. Martin Vinš  
**Počet stran:** 41  
**Datum vydání:** 31. 8. 2025  
**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:**  
Ing. et Ing. Martin Vinš  
tel. 377 634 195  
mvins@fel.zcu.cz

**Tato zpráva vznikla s podporou projektu TAČR NCK TN 02000025 NCE II.**

## **Anotace**

Energetická transformace, která je charakterizovaná rostoucím podílem intermitentních obnovitelných zdrojů energie a postupným útlumem konvenčních zdrojů v energetickém mixu, zásadně mění způsob fungování elektrizačních soustav a tím i poskytování podpůrných služeb. Zejména v evropském prostředí pak jako jeden z důsledků této transformace vzniká tlak na přechod k decentralizovanější architektuře elektrizačních soustav, což vychází právě z decentralizované povahy integrace obnovitelných zdrojů energie. Dalším důsledkem transformace energetického sektoru je zvýšená potřeba digitalizace elektrizačních soustav. Digitalizace umožňuje koordinovat stále komplexnější a dynamičtější prostředí za pomoci pokročilých technologií pro monitoring, komunikaci a řízení. Tyto změny v elektrizačních soustavách však přinášejí i nové výzvy, zejména v oblasti zajištění bezpečnosti a spolehlivosti elektrizačních soustav. Tato výzkumná zpráva se pak zabývá rešerší aktuálních trendů na vliv energetické transformace a digitalizace v oblasti podpůrných služeb, a to jak z pohledu výkonové elektroniky, tak operátorů přenosových a distribučních soustav. Jako jeden z klíčových nástrojů při řešení vznikajících výzev, spatřuje tato zpráva grid forming funkce střídačů. Proto dále analyzuje hlavní přínosy a omezení této technologie, její místo v kontextu energetické transformace a technické i legislativní aspekty spojené s její integrací do podpůrných služeb.

## **Klíčová slova**

Podpůrné služby, síťové kodexy, elektrizační soustava, grid forming funkce, střídač, obnovitelné zdroje energie

## **Název zprávy v anglickém jazyce / Report title**

The impact of energy transformation and digitalization on ancillary services

## Abstract

The energy transition, characterized by the growing share of intermittent renewable energy sources and the gradual phase-out of conventional sources in the energy mix, is fundamentally changing the operation of power systems and, consequently, the provision of ancillary services. In the European context in particular, one of the outcomes of this transition is the pressure to move towards a more decentralized power system architecture, which directly reflects the decentralized nature of renewable energy sources integration. Another consequence of the transformation of the energy sector is the increasing need for digitalization of power systems. Digitalization enables coordination of an increasingly complex and dynamic environment through advanced technologies for monitoring, communication, and control. However, these changes in power systems also bring new challenges, especially in ensuring system security and reliability. This research report reviews current trends regarding the impact of the energy transition and digitalization on ancillary services, both from the perspective of power electronics and of transmission and distribution system operators. One of the key tools for addressing emerging challenges is seen in the grid-forming capabilities of inverters. Therefore, the report further analyzes the main benefits and limitations of this technology, its role in the context of the energy transition, as well as the technical and regulatory aspects associated with its integration into ancillary services.

## Keywords

Ancillary Services, Grid Codes, Power System, Grid Forming Capabilities, Inverter, Renewable Energy Sources

## Seznam symbolů a zkratek

ACER	Agency for the Cooperation of Energy Regulators
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve
AMS	Adaptive Mode Switching
BESS	Battery Energy Storage System
DER	Distributed Energy Sources
DUT	Device Under Test
EMT	Electromagnetic Transient
ES	Elektrizační Soustava
FCR	Frequency Containment Reserve
FFR	Fast Frequency Response
FRR	Frequency Restoration Reserves
GBGF-I	Great Britain Grid Forming Inverter
GBGF-IS	Great Britain Grid Forming Synchronous
GFDI	Grid Feeding Inverters
GFLI	Grid Following Inverters
GFMI	Grid Forming Inverters
GSI	Grid Supporting Inverters
HVDC	High Voltage Direct Current
HVRT	High-voltage ride through
LVRT	Low-voltage ride through
mFRR	manual Frequency Restoration Reserve
MinGFM	Minimalized Grid Forming
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NC RfG	Network Codes on Requirements for Generators
NESO	National Energy System Operator
OZE	Obnovitelné Zdroje Energie
PDS	Provozovatel Distribuční Soustavy
PpS	Podpůrné Služby
PPS	Provozovatel Přenosové Soustavy
PSS	Power System Stabilizers
PVSG	Photovoltaic Virtual Synchronous Generator
RoCoF	Rate of Change of Frequency
SC	Synchronous Compensator
SCL	Short Circuit Level
SCR	Short Circuit Ratio
SG	Synchronní Generátor
SPC	Synchronous Power Control
SRN	Spolková Republika Německo
SVR	Služby Výkonové Rovnováhy
TRL	Technology Readiness Level
UK	United Kingdom
VSG	Virtual Synchronous Generator
VSynC	Virtual Synchronous Control

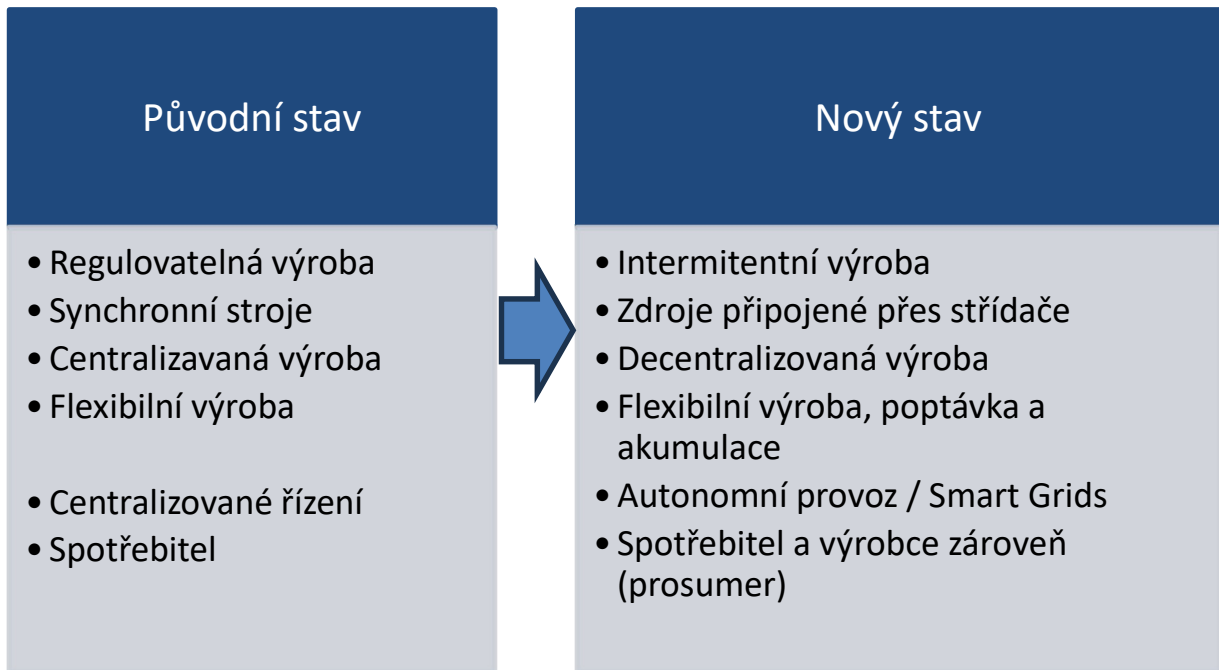
# Obsah

ÚVOD .....	7
<b>1 VÝZVY SPOJENÉ S TRANSFORMACÍ ES .....</b>	<b>9</b>
1.1 NEGATIVNÍ VLIV NA STABILITU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....	9
1.1.1 <i>Vliv na úhlovou stabilitu</i> .....	9
1.1.2 <i>Vliv na napěťovou stabilitu</i> .....	10
1.1.3 <i>Vliv na frekvenční stabilitu</i> .....	10
1.2 POKLES SETRVAČNOSTI SOUSTAVY .....	10
1.3 SNIŽOVÁNÍ SCHOPNOSTI DODÁVKY ZKRATOVÉHO PROUDU .....	11
1.4 POTENCIÁLNÍ PROBLÉMY PŘI STARTECH ZE TMY A OSTROVNÍM PROVOZU .....	11
1.5 PŘIBÝVAJÍCÍ VZÁJEMNÉ SYSTÉMOVÉ INTERAKCE .....	11
1.6 POTŘEBA ZVÝŠENÍ KYBERNETICKÉ BEZPEČNOSTI .....	12
<b>2 POHLED Z HLEDISKA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY .....</b>	<b>13</b>
2.1 ZAŘÍZENÍ GFLI .....	14
2.2 ZAŘÍZENÍ GFMI .....	15
2.3 POROVNÁNÍ GFLI A GFMI .....	15
2.3.1 <i>Schopnosti interakce se sítí</i> .....	15
2.3.1.1 <i>Při ostrovním provozu</i> .....	15
2.3.2 <i>Porovnání z hlediska reakčních možností</i> .....	16
2.3.3 <i>Schopnost startu ze tmy u zařízení GFMI</i> .....	16
2.3.4 <i>Porovnání z hlediska TRL</i> .....	17
2.4 POTENCIÁLNÍ PŘEKÁŽKY PŘI INTEGRACI GFMI .....	17
2.4.1 <i>Energetická uložení a potřeba předimenzování</i> .....	17
2.4.2 <i>Analýza stability</i> .....	17
2.4.2.1 <i>Small-signal stability</i> .....	17
2.4.2.2 <i>Transient stability</i> .....	17
2.4.3 <i>Přechod mezi ostrovním a síťovým režimem</i> .....	18
2.4.4 <i>Ochrana proti nadproudům</i> .....	18
2.4.5 <i>Zotavení GFMI po poruše</i> .....	18
2.5 VHODNÉ APLIKACE ZAŘÍZENÍ GFMI .....	18
2.5.1 <i>Nasazení GFMI v měkkých sítích</i> .....	18
2.5.2 <i>Nasazení v kombinaci s OZE</i> .....	18
2.5.2.1 <i>Nasazení s větrnými turbínami</i> .....	18
2.5.2.2 <i>Nasazení GFMI u fotovoltaických elektráren</i> .....	18
<b>3 POHLED Z HLEDISKA PPS/PDS .....</b>	<b>20</b>
3.1 AKTUÁLNÍ PŘÍSTUPY K IMPLEMENTACI GRID FORMING FUNKCÍ .....	20
3.1.1 <i>Spojené království – UK</i> .....	20
3.1.1.1 <i>Výběrová řízení Stability Pathfinder a Long-term 2029 Tender</i> .....	21
3.1.1.2 <i>Projekt MinGFM</i> .....	22
3.1.1.3 <i>GB grid forming Best Practise Guide</i> .....	22
3.1.2 <i>Fingrid – Finland Specific Study Requirements for Grid Energy Storage System</i> .....	22
3.1.3 <i>NC RfG, ACER a Evropská komise</i> .....	23
3.1.4 <i>ENTSO-E</i> .....	24
3.2 OBECNÉ POŽADAVKY NA GRID FORMING FUNKCE DLE ENTSO-E .....	24
3.2.1 <i>Charakter napěťového zdroje v rámci mezních hodnot</i> .....	24
3.2.2 <i>Syntetická setrvačnost v rámci mezních hodnot</i> .....	25
3.2.3 <i>Při dosažení proudových limitů</i> .....	25
3.2.4 <i>Doporučená metodika testování ENTSO-E</i> .....	25
3.2.4.1 <i>Navrhovaná testovací soustava</i> .....	25
3.2.4.2 <i>Simulovatelné události</i> .....	26
3.2.5 <i>Shrnutí</i> .....	26
3.3 <i>PODPŮRNÉ SLUŽBY</i> .....	27
3.4 <i>STÁVAJÍCÍ STAV PPS</i> .....	27
3.4.1 <i>Služby výkonové rovnováhy – SVR</i> .....	28

3.4.1.1	Rezervy pro udržení frekvence – FCR .....	28
3.4.1.2	Rezervy pro obnovu frekvence – FRR .....	28
3.4.2	<i>Ostatní podpůrné služby</i> .....	28
3.4.2.1	Regulace U/Q .....	28
3.4.2.2	Schopnost ostrovního provozu .....	28
3.4.2.3	Start ze tmy / obnova sítě .....	29
3.5	TRENDY POSLEDNÍCH LET V OBLASTI PPS .....	29
3.5.1	<i>Koordinace PPS a PDS – decentralizace flexibility</i> .....	29
3.5.2	<i>Agregace</i> .....	29
3.5.2.1	Praktická implementace agregace v SRN .....	30
3.5.3	<i>Reformování stávajících PpS</i> .....	30
3.5.3.1	Zjednodušování produktů .....	30
3.5.3.2	Snižování minimální velikosti nabídky .....	31
3.5.3.3	Zkracování reakčních časů .....	31
3.6	NOVÝ STAV PPS .....	31
3.6.1.1	Příklad UK .....	32
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>33</b>

## Úvod

Integrace obnovitelných zdrojů energie (OZE) s intermitentní výrobou, jako jsou větrné a fotovoltaické elektrárny do energetických systémů, vede k nutným změnám v hardwaru elektrizačních soustav (ES) a ve způsobu řízení elektrizačních soustav. S navyšujícím se podílem OZE v energetickém mixu, které jsou k ES dominantně připojeny přes střídač, tak dochází k postupné transformaci ES. Zejména v Evropě pak jako jeden z důsledků této transformace vzniká tlak na přechod k decentralizovanější architektuře ES, což vychází právě z decentralizované povahy integrace OZE. Struktura energetické transformace elektrizačních soustav je schematicky znázorněna na Obr. 0.1.



Obr. 0.1 Schematicky znázorněná transformace elektrizačních soustav [1]

V distribučních soustavách se pak díky integraci intermitentních OZE (decentralizaci výroby) v mnoha případech z běžných spotřebitelů stávají tzv. prosumeři (spotřebitelé i výrobci zároveň) což mimo jiné stírá rozdíly mezi zažitými energetickými toky z míst výroby k místům spotřeby. Nároky na řízení a monitoring distribuovaných zdrojů (nejčastěji právě OZE) v distribučních soustavách jsou stále vyšší kvůli jejich obecně menším výkonům a vysokému počtu.

Dalším důsledkem transformace energetického sektoru je proto zvýšená potřeba digitalizace elektrizačních soustav. Právě digitalizace umožňuje koordinovat stále komplexnější a dynamičtější prostředí elektrizačních soustav [1]. Moderní výkonová elektronika může být vybavena digitálními komunikačními rozhraními, která umožňují dálkový monitoring, regulaci a dálkovou údržbu softwaru (např. instalace aktualizací softwaru) [2] jednotlivých výrobních jednotek (pojmem výrobní jednotka je myšlen jakýkoliv zdroj elektrické energie, bez ohledu na primární zdroj energie, který je připojen k elektrizační soustavě).

Zachování spolehlivosti a bezpečnosti provozu elektrizační soustavy je i v době probíhající energetické transformace naprosto klíčové. Přechod k decentralizované a digitalizované architektuře s vysokým podílem obnovitelných zdrojů energie přináší nové provozní a

technické výzvy, které mohou ohrozit spolehlivost a bezpečnost provozu elektrizačních soustav. Intermitentní charakter výroby větrných a fotovoltaických elektráren, nižší setrvačnost systému či omezená schopnost dodávky zkratových proudů mohou vést ke zvýšené citlivosti soustav na poruchy a náhlé změny rovnováhy mezi výrobou a spotřebou.

Pro další podporu energetické transformace je proto nezbytné, aby se OZE podílely na poskytování podpůrných služeb (PpS). Provozovatelé přenosových soustav (PPS) využívají podpůrné služby k udržení frekvence napětí, velikosti napětí a pro zajištění běžného provozu soustavy a jejího krizového řízení.

Historicky byly podpůrné služby poskytovány pouze konvenčními velkými zdroji se synchronními generátory jako jsou například uhelné nebo vodní elektrárny. S pokračující dekarbonizací energetiky ovšem dochází k odstavování některých z těchto zdrojů a zákonitě tak dochází k ubývání výrobních jednotek poskytujících podpůrné služby [3].

V krajním případě, by nedostatek výrobních jednotek poskytujících PpS mohl mít za následek neschopnost udržet bezpečnost a stabilitu soustavy. Tato skutečnost by mohla mít za následek extrémnější události v elektrizační soustavě (např. lokální nebo rozsáhlé blackouty, ale také velké frekvenční odchylky [4] nebo vyšší náklady na vyvažování [5]).

## 1 Výzvy spojené s transformací ES

Transformace elektrizačních soustav pak v kontextu úvodu této zprávy přináší zejména následující výzvy: snižování stability elektrizační soustavy, pokles setrvačnosti soustavy, snižování velikosti zkratového výkonu, problémy při stratech ze tmy a ostrovním provozu, přibývající vzájemné systémové interakce a potřebu zajištění kybernetické bezpečnosti. Jako reakce na některé z těchto výzev pak mohou být implementovány grid forming funkce střídačů, o kterých pojednává kapitola 2

Pro pochopení všech skutečností, o kterých pojednává následující kapitola 1.1, je nutné zmínit následující: V současnosti dominantně instalované OZE jsou k ES připojeny přes střídač a fungují pak v zásadě jako zdroje proudu, pro svou funkci tak vyžadují externí zdroj napětí, který poskytuje referenční frekvenci. Navíc v mnoha případech, OZE nejsou doplněny dostatečně velkým energetickým úložištěm, aby napodobovaly chování setrvačnosti synchronních strojů. Nadproudové možnosti (vyšší než jmenovité) výkonové elektroniky používané při integraci OZE jsou také velmi nízké, zvláště při srovnání se synchronní generátory (SG). Proto jsou také OZE považovány za zdroje nesynchronní výroby.

### 1.1 Negativní vliv na stabilitu elektrizační soustavy

Transformace ES přináší nové typy výzev souvisejících se zachováním stability elektrizační soustavy v důsledku odlišného dynamického chování OZE ve srovnání s konvenčními synchronními generátory **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** To se týká zejména možných nežádoucích interakcí mezi ovládacími prvky OZE, snížení celkové setrvačnosti systému a omezení příspěvků OZE ke zkratovým proudům během poruch.

Stabilitu soustavy pak lze definovat jako „schopnost soustavy udržet svůj rovnovážný stav během normálního provozu i po přechodových dějích způsobených vnějšími vlivy, dispečerským řízením i poruchovými událostmi“ [7]. Elektrizační soustavu se tak z jejího rovnovážného stavu snaží vyvést zejména:

- Změny v zatížení soustavy (náhlé nebo postupné)
- Změny ve velikosti výroby
- Změny topologie ES (náhlé výpadky zařízení nebo vedení)
- Poruchy vnějšího charakteru (zkraty, přepětí)

Stabilitu elektrizační soustavy je dále možné rozdělit do tří hlavních podkategorií (popsaných v následujících kapitolách), z nichž každou bude rostoucí integrace OZE negativně ovlivňovat.

#### 1.1.1 Vliv na úhlovou stabilitu

Úhlovou stabilitu lze definovat jako schopnost výrobních jednotek, připojených do ES, zůstat v synchronismu, i pokud jsou vystaveny poruchám [8]. Úhlová stabilita synchronních strojů pak závisí na schopnosti udržet/obnovit rovnováhu mezi elektromagnetickým točivým momentem a mechanickým točivým momentem každého synchronního stroje v soustavě. Nestabilita se pak projevuje ve formě zvyšujících se úhlových výkyvů některých SG, což může vést až ke ztrátě jejich synchronismu.

Jelikož jsou postupně konvenční SG nahrazovány obnovitelnými zdroji energie, snižuje se celková setrvačnost soustavy (bude diskutováno v samostatné kapitole 1.2). Snížená setrvačnost soustavy má pak zpětně negativní vliv na úhlovou stabilitu zbývajících SG v soustavě **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Úhlovou stabilitu můžeme dále dělit na:

- „Small-signal“ stability – schopnost ES udržet synchronizaci při malých poruchách (závisí na počátečním provozním stavu ES při vzniku poruchy).
- „Transient“ stability – schopnost ES udržet synchronizaci při závažnějších poruchách (závisí jak na počátečním provozním stavu ES při poruše, tak na závažnosti poruchy).

### **1.1.2 Vliv na napěťovou stabilitu**

Napěťová stabilita je schopnost elektrizační soustavy (ES) udržet napětí ve všech uzlech v přijatelném rozmezí i po výskytu poruchy [8]. Je úzce spojena s rovnováhou mezi dodávkou a spotřebou jalového výkonu, zejména v kritických uzlových oblastech. Nedostatek jalového výkonu po závažnější poruše může způsobit pokles napětí, zvýšení proudového zatížení a další zhoršování napěťových poměrů, což může vést až k napěťovému kolapsu soustavy [7].

Vzhledem k tomu, že větrné a fotovoltaické elektrárny jsou často umístěny na odlehlých místech, bývá impedance vedení vysoká. Takové části soustavy se označují jako „měkké/měkkí“. Regulace napětí ve společném pilotním uzlu prostřednictvím konvenčních řešení se tak v měkkých sítích (popřípadě jejich částech) stává náročnou.

Pokud zároveň dojde ke ztrátě synchronismu nebo k výrazným rozdílům v zátěžných úhlech mezi skupinami výrobních jednotek, mohou vznikat oscilace napětí v jejich propojených uzlech. V případě, že tyto skupiny generátorů nejsou odděleny vytvořením jednoho či více elektrických ostrovů, hrozí jejich odpojení od soustavy, což celý proces destabilizace ještě urychluje. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

### **1.1.3 Vliv na frekvenční stabilitu**

Frekvenční stabilita je schopnost ES (zdrojů i zátěže) reagovat na přebytek či nedostatek činného výkonu v soustavě, který je potřeba pro udržení nominální frekvence napětí [8]. K udržení frekvenční stability v ES přispívá setrvačnost soustavy, služby výkonové rovnováhy (SVR) a dispečerské řízení [9]. S rostoucím podílem OZE, které neemulují setrvačnost SG a mají intermitentní charakter výroby, však elektrizační soustavy čelí rostoucím výzvám ohledně stabilizace frekvence napětí [1]. Snížení setrvačnosti soustavy totiž vede k výraznějším výkyvům elektrických parametrů soustavy při narušení rovnovážného stavu ať už ze strany výroby, spotřeby, nebo poruchou, což se umocňuje zejména v regionech s vysokým podílem OZE [10].

## **1.2 Pokles setrvačnosti soustavy**

Setrvačnost ES je důležitou součástí její schopnosti udržet svou stabilitu [9]. Konvenční synchronní generátory historicky zajišťovaly dostatečnou setrvačnost soustavy a nabízely adekvátní dynamiku ke stabilizaci frekvence napětí (kapitola 1.1.3) při výkonové nerovnováze mezi výrobou a spotřebou. OZE pak mají výrazně nižší, nebo žádnou vlastní setrvačnost, pakliže není vytvořena uměle jako tzv. syntetická setrvačnost.

Syntetická setrvačnost je způsob řízení OZE (musí mít integrovaná akumulární zařízení), díky kterému se jeví odezva OZE na frekvenční změny navenek shodně, jako odezva synchronních strojů.

### **1.3 Snižování schopnosti dodávky zkratového proudu**

Během poruch v elektrizační soustavě (zkratu, velkého poklesu napětí) je žádoucí, aby výrobní jednotky injektovaly vysoké zkratové proudy do ES, aby bylo možné snadno lokalizovat místo poruchy [11] a aby se následně po odstranění poruchy, napětí v daném pilotním uzlu vrátilo na nominální hodnotu [12]. Na rozdíl od synchronních strojů, mají OZE podstatně horší schopnost dodat vysoký zkratový proud (co do násobku jmenovitého proudu). SG je schopen při poruše dodat zhruba desetinásobek jmenovitého proudu, zatímco střídač u OZE je obvykle schopen dodat pouze zhruba (maximálně) jedenapůlnásobek jmenovitého proudu, což je zapříčiněno proudovými omezeními polovodičových prvků. Pokud by pak byl zkratový proud příliš nízký, nemusely by např. síťové ochrany adekvátně zareagovat na poruchu v ES, a tak ponechat ES v nebezpečném, nestabilním stavu.

### **1.4 Potenciální problémy při startech ze tmy a ostrovním provozu**

V současnosti nejčastěji instalované OZE technicky neumožňují realizaci podpůrné služby startu ze tmy [13]. Mají také výrazně omezenou schopnost podpořit celkovou obnovu normálního chodu elektrizační soustavy při vzájemné resynchronizaci vzniklých ostrovů, protože k správnému provozu vyžadují napěťovou referenční frekvenci soustavy (ta v případě black-outu není k dispozici, nebo při jiných poruchových stavech dochází k jejím značným fluktuacím).

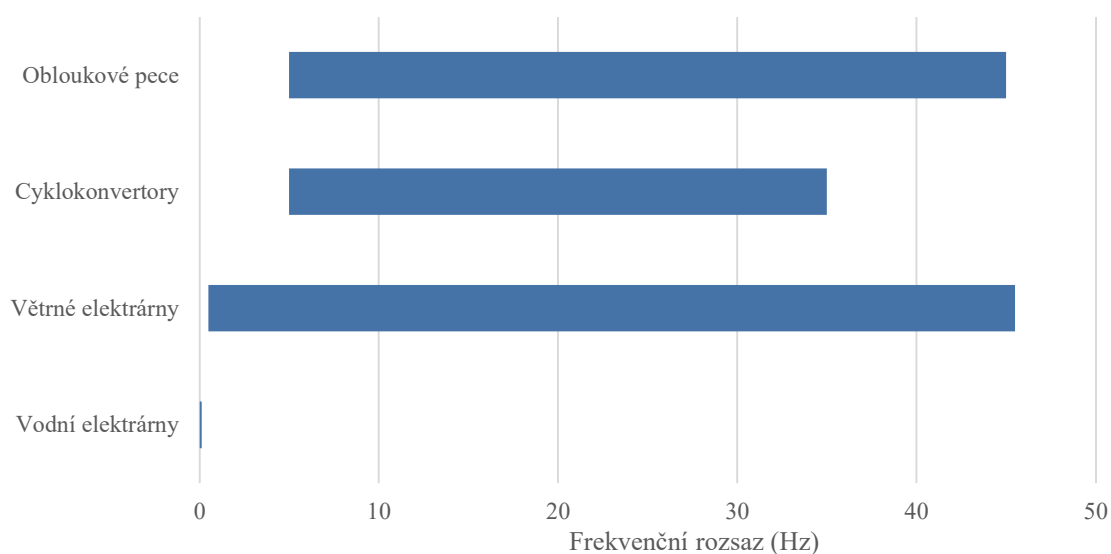
Jelikož se o zajišťování podpůrné služby startu ze tmy se v Evropském prostředí nejčastěji starají vodní elektrárny (popřípadě plynové elektrárny), nemusí být v budoucnu nutně nedostatek výrobních jednotek umožňující realizaci této podpůrné služby, ale pravděpodobněji bude problematické jejich rozložení v ES nebo nedostatečný dodávaný výkon [14].

### **1.5 Přibývající vzájemné systémové interakce**

O nepříznivých interakcích mezi konvenčními elektrárnami se ví již několik desetiletí. Tyto interakce zahrnují např. jevy jako subharmonické rezonance [15], nebo subharmonické torzní interakce [16]. Zmíněné interakce pak bývají spojeny s konkrétními provozními podmínkami, které lze potenciálně identifikovat a zmírnit již ve fázi návrhu projektu [13].

Měření rušivých frekvenčních složek se v moderních elektrizačních soustavách provádí především za účelem posuzování kvality elektrické energie. V posledních letech se totiž výskyt rušivých frekvenčních složek v ES stále zvyšuje, mimo jiné v důsledku rostoucího počtu spínaných výkonových měničů (střídačů, usměrňovačů), které se vyskytují jak na straně výroby (OZE), tak na straně spotřeby.

Samotná měření rušivých frekvenčních složek jsou cílena na vybrané jevy, mezi které patří např. subharmonické výkonové oscilace (subharmonické frekvenční pásmo – pod 50 Hz). Ta jsou způsobena jak OZE (větrné elektrárny, vodní elektrárny, fotovoltaické elektrárny), tak zátěžemi jako jsou obloukové pece, nebo cyklokonvertory (přímé měniče frekvence) [17]. Typické frekvenční rozsahy subharmonických výkonových oscilací dle různých příčin jsou znázorněny v Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Typické frekvenční rozsahy subharmonických výkonových oscilací dle různých příčin [17].

Interakce mezi řídicími systémy více OZE jsou pak ještě principiálně složitější na identifikaci, protože frekvence, při kterých se projevují, se mohou výrazně lišit a zahrnovat jak subharmonická, meziharmonická (nad 50 Hz) tak vyšší harmonická (násobky 50 Hz) pásma. Zmíněné interakce nemusí být dále nutně vyvolány konkrétními provozními scénáři ani poruchami, ale mohou nastat i při standardních provozních podmínkách.

### **1.6 Potřeba zvýšení kybernetické bezpečnosti**

Kybernetická bezpečnost je jednou z hlavních výzev v současném procesu digitalizace elektrizačních soustav. Vyšší počet OZE a jejich decentralizace v elektrizační soustavě vytváří nutnost rozsáhlé datové správy a tím potenciálně větší prostor pro kybernetické útoky. Je-li umožněno dálkové řízení OZE, je tak zároveň zásadní, aby byla přenášená data adekvátně zabezpečena.

Provozovatelé přenosových a distribučních soustav shromažďují velké množství dat a WAMS (Wide Area Monitoring System) měření od všech připojených míst. Pakliže by tato data nebyla patřičně chráněna, mohlo by dojít k jejich manipulaci, což by mohlo mít potenciálně dramatické následky v ES.

Požadavky na kybernetickou bezpečnost jsou tak jako důsledek tohoto stavu v současnosti zakotveny v mnoha síťových kodexech jednotlivých států a ENTSO-E, které začlenilo kybernetickou bezpečnost mezi své síťové kodexy (Network Codes) v roce 2024 [18].

## 2 Pohled z hlediska výkonové elektroniky

Primární cíl dodávat činný a jalový výkon do sítě je společný pro všechny střídače připojené k OZE. V závislosti na interakci se sítí, implementaci regulátoru (řízení) a reakci na změny v síti je však lze principiálně rozdělit do dvou hlavních skupin – grid following a grid forming, jak je znázorněno na Obr. 2.1. Více detailů o obou skupinách je uvedeno v následujících podkapitolách, včetně jejich dalšího (podrobnějšího) členění.

Jak již bylo zmíněno, tradiční střídačové systémy používané ve většině energetických aplikací (OZE) připojených k elektrizační soustavě fungují v zásadě jako zdroje proudu, a proto ke správné funkci potřebují externí zdroj napětí, který jim poskytuje referenční frekvenci [13]. Takové střídače lze přesto nastavit, aby poskytovaly určitou míru podpory udržení velikosti napětí a frekvence napětí ve stanovených mezích. Nemohou však fungovat jako samostatné výrobní jednotky a obecně se pak označují jako Grid-Following Inverters (GFLI). Zmíněné funkce podpory sítě pak musí být explicitně naprogramovány do ovládacích prvků.

GFLI jsou schopny velmi rychle reagovat na řídicí signály nebo změny napětí a frekvence (během několika milisekund). Jejich reakce však nikdy nemůže být principiálně okamžitá (jako u synchronních strojů). Samy o sobě tak nestabilizují síť během přechodových dějů vyvolaných např. změnami zátěže nebo zkraty. Protože nedokáží fungovat bez externího referenčního napětí, nemohou samy o sobě synchronní zdroje nahradit. Podpůrné síťové funkce pak slouží jen jako doplněk během standardního provozu.

Při rostoucím podílu zdrojů připojených přes střídač, k němuž v současnosti dochází se stále rostoucí integrací OZE, je tak zapotřebí vyvíjet i jiné metody řízení střídačů. Střídače navržené pro provoz bez externího napěťového referenčního signálu se tak obecně nazývají Grid-Forming Inverters (GFMI) [13]. Takové střídače jsou schopné okamžitě reagovat na změny síťových parametrů, a mohou tím přirozeně přispívat ke stabilizaci soustavy.

Hlavní důvody, proč takové střídače dosud nejsou široce nasazeny, jsou:

- V minulosti se nikdy neobjevila vysoká penetrace obnovitelných zdrojů v energetickém mixu, a proto nebylo sofistikovanější chování střídačů potřeba.
- Dostatečný podíl zdrojů s grid forming funkcemi potřebných k zajištění stabilního provozu při vysoké penetraci obnovitelných zdrojů zatím není zcela specifikovaný.
- Okamžitá odezva výrobních jednotek vybavených grid forming funkcemi na určité typy poruch, zákonitě vyžaduje integrované energetické uložení, což je činní více nákladnými.
- Schopnost okamžité odezvy výrobní jednotky vybavené grid forming funkcemi, na určité typy poruch, vyžaduje alespoň mírné předdimenzování, aby bylo možné absorbovat rychlé špičky zatížení, což opět zvyšuje cenu.
- Dovedávna neexistovaly žádné standardy pro to, co vlastně grid forming funkce jsou, nebo co se od nich očekává. To se již v posledních letech změnilo, nelze ovšem očekávat instantní reakci.

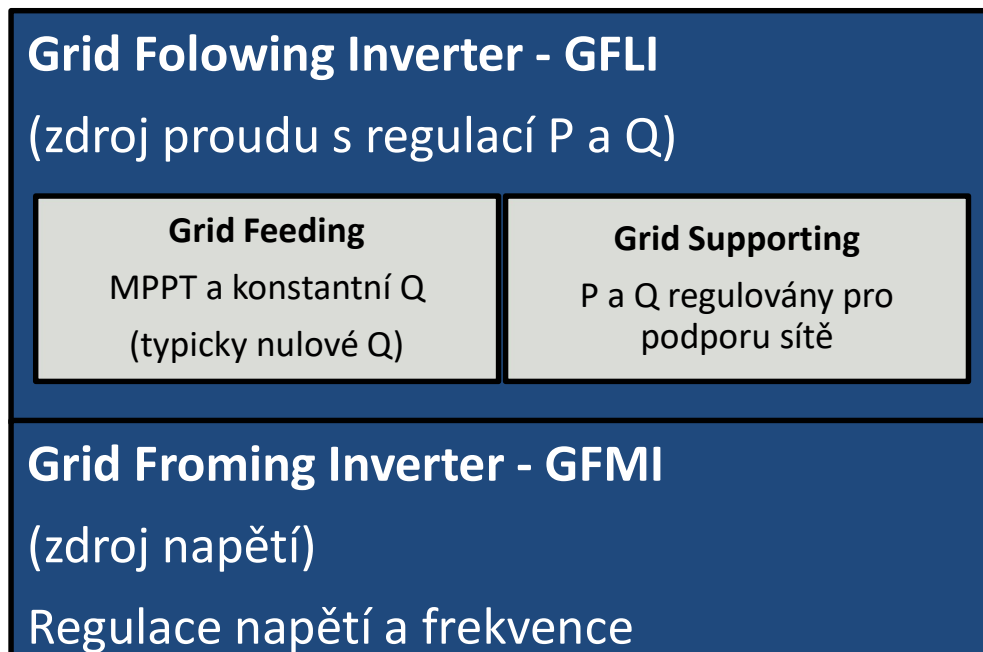
Následuje bližší technický popis zařízení GFLI a GFMI a jejich vzájemné porovnání.

## 2.1 Zařízení GFLI

Tyto typy střídačů jsou tedy obecně navrženy tak, aby sledovaly napětí sítě a injektovaly proud. Nejběžnější technikou používanou k synchronizaci se síťovým napětím je pak použití fázového závěsu. Tento konkrétní typ „grid following“ chování se podobá chování proudového zdroje.

Zařízení GFLI lze dále dělit, podle toho, zda se účastní poskytování PpS nebo ne, viz opět Obr. 2.1. GFLI, které jsou primárně navrženy na injektování činného výkonu do sítě (s využitím technologie sledování maximálního bodu výkonu – Maximum Power Point Tracking, MPPT) a jejich jalový výkon je proto minimální nebo se blíží nule, jsou tak známé jako GFDI (Grid Feeding Inverters).

Regulace velikosti a frekvence napětí se však s rostoucím počtem GFDI stala problematickou. Provozovatelé přenosových soustav proto zavedli přísné požadavky, zejména na větší OZE (typicky nad 5 MW), na podporu sítě dodávkou jalového výkonu a změnou dodávek činného výkonu v reakci na aktuální stav v síti **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů., Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Když se síťové napětí sníží, střídač OZE by měl dodávat kladný jalový výkon při předem definované nastavení statiky. Podobně pak, když se napětí zvýší, měl by střídač OZE dodávat záporný jalový výkon. Střídače OZE, které se účastní podpůrných služeb ES, jsou známé jako střídače podporující síť (Grid Supporting Inverters – GSI) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [14]. Důležité je poznamenat, že v současné době se od tohoto dělení upouští. Aktuální probíhající transformace celého energetického sektoru (ES, síťových kodexů, podpůrných služeb) totiž efektivně stírá rozdíly mezi GFDI a GSI.



Obr. 2.1 Dělení a základní charakteristiky GFLI a GFMI [14]

## **2.2 Zařízení GFMI**

Jak bylo naznačeno výše, koncepce „grid forming“ střídačů pochází z potřeby reagovat na nové výzvy, vzniklé v rámci energetické transformace. V tomto kontextu je tedy potřeba, aby GFMI emulovaly klíčové vlastnosti synchronních strojů (např.: schopnost dodávat konstantní/požadovaný výkon do sítě, setrvačnostní odezva, nebo příspěvky do zkratového proudu). Jako součást GFMI mohou být tedy integrována také energetická úložiště a řídicí algoritmy, které mimo jiné mohou umožnit provoz jakožto virtuálního synchronního generátoru [21], [22]. Přestože byly GFMI původně vyvinuty pro použití v ostrovních mikrosíťích, koncept lze přizpůsobit i pro aplikace ve velkých energetických soustavách, zejména při integraci OZE.

V následujících kapitolách je provedeno porovnání technologie GFLI a GFMI a přínosy technologie GFMI jsou zasazeny do kontextu výzev, zmíněných v kapitole 1.

## **2.3 Porovnání GFLI a GFMI**

### **2.3.1 Schopnosti interakce se sítí**

Zásadní rozdíl v interakci se sítí u GFMI oproti GFLI pochází ze způsobu, jakým je řízena dodávka činného a jalového výkonu do sítě. Jak bylo uvedeno výše, primárním cílem GFLI je dodávat činný výkon do sítě a podpora sítě je až sekundárním cílem. Naproti tomu u GFMI je primárním cílem regulace velikosti napětí a frekvence napětí sítě. Na rozdíl od GFLI, GFMI nesleduje napětí v pilotním uzlu, ale spíše pomáhá utvářet toto napětí pro regulaci svého výstupního výkonu. GFMI tak lze v tomto ohledu přirovnat k napěťovému zdroji. To je klíčová vlastnost, pakliže mají GFMI přispívat k napěťové stabilitě soustavy a schopnosti ostrovního provozu.

#### **2.3.1.1 Při ostrovním provozu**

Ve velkých elektrizačních soustavách, kde jsou velikost a frekvence napětí udržovány synchronními stroji, mohou střídače OZE fungovat jako „grid following“. V ostrovním režimu (bez dostatečné regulační kapacity synchronních strojů) musí ovšem jeden, nebo několik z nich fungovat jako regulátor(y) velikosti napětí a/nebo frekvence napětí (tedy fungovat bez potřeby napěťové reference soustavy) pro zajištění stabilního ostrovního provozu sítě. Touto možností GFMI principiálně disponují, a proto mohou být odpovědí na vzniklé výzvy uvedené v kapitole 1.4.

### 2.3.2 Porovnání z hlediska reakčních možností

V ustáleném provozním stavu, v závislosti na topologii řízení, nastavených hodnotách výkonu a podmínkách sítě, mohou jak GFLI, tak GFMI dodávat činný a jalový výkon do sítě. Jeden z hlavních rozdílů ve výkonu mezi GFLI a GFMI však spočívá v reakci každého z těchto střídačů na poruchu v měkké síti. Dodávka činného a jalového výkonu během přechodového děje může být principiálně implementována v GFLI i GFMI [13].

V případě GFLI je přechodový děj vyhodnocen pomocí měření napětí a proudů, které následuje adekvátní reakce pro zajištění podpory sítě. Odezva činného nebo jalového výkonu GFLI je tedy spojena s určitou formou zpoždění měření a řízení. V kontextu posílení stability tak mohou GFLI přispívat k obecné frekvenční stabilitě, ale neemulují setrvačnostní odezvu synchronních strojů.

Naproti tomu GFMI poskytují okamžitou odezvu výkonu, protože jejich vnitřní napěťový fázor je na začátku přechodového děje stabilní a výkon se automaticky přizpůsobuje podle rozdílu úhlů mezi střídačem a sítí. GFMI tak emulují setrvačnostní odezvu synchronních strojů a přispívají tak k celkové setrvačnosti soustavy. Příspěvkem k setrvačnosti soustavy zároveň zákonitě přispívají k frekvenční a úhlové stabilitě (viz. kapitola 1.1.1).

Např. v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** nebo **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je diskutována interakce GFMI se synchronními stroji a vliv GFMI na frekvenční stabilitu. S aplikací různých grid forming řídicích technik je zdůrazňován právě pozitivní dopad GFMI na frekvenční stabilitu. Také jsou analyzována omezení rychle působících ovládacích prvků GFMI při interakci s pomalou dynamikou synchronních strojů.

Dalším podstatným rozdílem ve výkonových možnostech mezi GFMI a GFLI je také chování při nízké úhlové stabilitě v měkkých sítích. Díky tomu, že GFLI spoléhají na měření síťového napětí a úhlu, aby zůstaly synchronizovány se sítí, může být jejich úhlová stabilita značně snížena při náhlých změnách měřených napětí. Tento problém je u GFMI s možností samosynchronizace značně omezen.

### 2.3.3 Schopnost startu ze tmy u zařízení GFMI

Jednou z unikátních výhod GFMI (oproti GFLI) je principiální schopnost poskytování PpS startu ze tmy v případě výpadků napájení v širším okolí pomocí obnovitelných zdrojů energie a/nebo bateriového energetického úložiště. V kontextu kapitoly 1.4, tak mohou být GFMI odpovědí na potenciální výzvy související s rozložením výrobních jednotek, poskytujících podpůrnou službu startu ze tmy v ES. V **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** jsou pak zkoumány různé řídicí strategie GFMI implementované ve větrných elektrárnách připojených k HVDC spojovacímu přenosovému vedení na pevninu, do ES. Porovnání dvou metod startů ze tmy, tj. metod tvrdého a měkkého startu je provedeno v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, ukazuje na rychlejší najetí na výkon s méně významnými přechodnými jevy při měkkém startu. V **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je navrženo přímé řízení napětí založené na řízení GFMI větrné turbíny se schopností startu ze tmy. Všechny tyto zmíněné zdroje zkoumají proveditelnost funkce startu ze tmy za pomoci GFMI a ukazují tak na aplikační potenciál GFMI v kontextu poskytování této PpS.

### **2.3.4 Porovnání z hlediska TRL**

Dle oficiální klasifikace TRL (Technology Readiness Level), tedy úrovně technologické připravenosti, popisované v evropských směrnicích [28] dosahují zařízení (technologie) GFMI nejvyšší možné úrovně a to TRL 9. Tato úroveň označuje technologii za plně ověřenou, reálně provozovanou v relevantním prostředí (v Evropském prostředí) a komerčně dostupnou.

Zařízení (technologie) GFMI nejsou v porovnání s GFMI tak hojně nasazovány. V Evropském prostředí lze proto spekulovat maximálně o úrovni TRL 8 (Německo). Tato úroveň označuje technologii za provozovanou v relevantním prostředí (Evropském prostředí), ovšem v menším měřítku.

## **2.4 Potenciální překážky při integraci GFMI**

V této kapitole jsou popsány potenciální komplikace spojené s nasazováním technologií GFMI.

### **2.4.1 Energetická uložení a potřeba předimenzování**

Jak již bylo zmíněno, GFMI by měly emulovat důležité vlastnosti synchronních generátorů jako je schopnost dodávat stabilní výkon, setrvačností odezvu nebo přispívat k dodávkám zkratového proudu, pakliže mají být adekvátně reagovat na vzniklé výzvy popsané v kapitole 1.

K zajištění požadovaných stabilních výkonů je třeba integrace nějaké formy energetických uložení [29], což souvisí s potlačením vlivu změny ve větrném nebo fotovoltaickém příkonu. Podobně pak setrvačností odezva vyžaduje energetické uložení, alespoň po dobu emulace této odezvy. Integrace energetického uložení pak zákonitě zvyšuje cenu instalace.

Emulace chování synchronních generátorů při přispívání k dodávkám zkratového proudu (viz kapitola 1.3) je v GFMI náročná, a to díky proudovým omezením ve spínacích elektronických prvcích. Z toho důvodu je třeba GFMI do nějaké míry výkonově předimenzovat, což je činí opět dražšími.

### **2.4.2 Analýza stability**

Analýza stability GFMI je důležitou oblastí, která v posledních letech vzbuzuje stále vyšší pozornost. Mezi nejdůležitější části analýzy stability patří analýza úhlové stability při malých narušeních (Small-signal stability) a analýza přechodové stability (Transient stability) [9].

#### **2.4.2.1 Small-signal stability**

V [30] jsou prezentovány základní poznatky pro pochopení problematiky úhlové stability při malých narušeních [9] u systémů s nízkou setrvačností s GFMI i GFMI a jejich interakce s různými součástmi energetických systémů v různých časových měřítcích. Článek ukazuje, že hlavním rozdílem mezi konvenčními soustavami a soustavami s nízkou setrvačností jsou oddělená časová měřítka mezi příslušnými regulátory synchronních generátorů a OZE, což vede k nestabilitě při jejich vysoké penetraci.

#### **2.4.2.2 Transient stability**

Stabilita frekvence sítě s masivní integrací GFMI, až 100 %, je popisována pomocí EMT (electromagnetic transient) simulací v [31]. Při zvýšené úrovni penetrace GFMI může docházet k interakcím s výkonovými stabilizátory (Power System Stabilizers – PSS) a pro udržení stability systému je tak nutné přeladění PSS. Dalším důsledkem vysoké penetrace GFMI je, že se dynamika sítě drasticky mění, což má dopad na RoCoF (Rate of Change of Frequency). To by znamenalo přehodnocení ochranných zařízení a schémat odlehčení zátěže.

### **2.4.3 Přechod mezi ostrovním a síťovým režimem**

V souvislosti s kapitolou 2.3.1.1 mohou vznikat výzvy, spojené s bezproblémovým přechodem mezi síťovými (GFLI) a ostrovními (GFMI) provozními režimy střídačů. Hlavními výzvami při zajištění tohoto bezproblémového přechodu je odpovídající reakce na kolísání frekvence a odchylky napětí a proudů [14].

### **2.4.4 Ochrana proti nadproudům**

Vysoký nadproud, vzniklý v souvislosti s emulací chování SG při přispívání k dodávkám zkratového proudu, může vést k poškození součástí v důsledku krátké tepelné časové konstanty polovodiče [32]. Proto je pro ochranu GFMI před nadproudy nezbytný mechanismus omezení proudu. Návrhy metod možných způsobů omezení proudů nalezneme například v [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40]. Obecně lze tyto metody rozdělit do dvou hlavních skupin: „proudově řízené“ a „napětově řízené“ omezovače.

### **2.4.5 Zotavení GFMI po poruše**

Zotavení GFMI po poruchách v rozsáhlejších sítích závisí na mnoha aspektech, včetně řídicí struktury a nadproudové ochrany GFMI. Analýza v [41] ukazuje, že přítomnost setrvačnosti v regulační smyčce  $P-\omega$  může přispívat k nestabilitě systému po přechodném poklesu napětí. Na základě předpokladu v [41] je např. v [42] provedena analýza zotavení z poruch inerciálního GFMI a zároveň navržena metoda adaptivního přepínání režimu (AMS – Adaptive Mode Switching) k dosažení pozitivní zpětné vazby v řízení činného výkonu.

## **2.5 Vhodné aplikace zařízení GFMI**

V této kapitole jsou popsány potenciálně nejvhodnější aplikace GFMI technologií.

### **2.5.1 Nasazení GFMI v měkkých sítích**

Principiálně mohou GFMI poskytovat setrvačnost, schopnost startu ze tmy, frekvenční podporu (frekvenční regulaci) a napětovou podporu (napětovou regulaci) v měkkých sítích s nízkou setrvačností [13], [43]. Např. v [44] je navržena metoda pro návrh GFMI na bázi VSG – Virtual Synchronous Generator [45] pro měkké indukční a odporové sítě.

### **2.5.2 Nasazení v kombinaci s OZE**

#### **2.5.2.1 Nasazení s větrnými turbínami**

Pro různé typy větrných turbín bylo navrženo mnoho řízení VSG [46]. Virtuální synchronní řízení (VSynC – Virtual Synchronous Control) pro větrné turbíny s dvojitě napájeným indukčním generátorem je představeno např. v [47]. Pro řízení činného výkonu používá konvenční VSG založený na rovnici kývání. Větrná energie je u této metody uvažována jako proměnný parametr sestávající se ze dvou konstantních a variačních částí, což se liší od většiny ostatních zdrojů, které považují větrnou energii za konstantní parametr. Např. v [48] jsou také navržena řízení GFMI na bázi VSynC pro větrnou turbínu s dvojitě napájeným indukčním generátorem. Pro větrné turbíny jsou potom uvažovány tři provozní oblasti: oblast MPPT, oblast maximální rychlosti a oblast jmenovitého výkonu. Navíc je uvažováno řízení sklonu lopatek a na základě konceptu pohybové rovnice je odvozena analýza setrvačné charakteristiky.

#### **2.5.2.2 Nasazení GFMI u fotovoltaických elektráren**

Např. v [49] je navržen „fotovoltaický virtuální synchronní generátor“ (PVSG – Photovoltaic Virtual Synchronous Generator). V tomto článku je navrženo SPC (Synchronous Power Control)

řízení GFMI pro střídač na bázi superkondenzátoru. GFMI pracuje paralelně se sítí, napojenou na FV elektrárnu. Celý systém se tak chová jako PVSG, který poskytuje síti setrvačnost. Je třeba zmínit, že tato metoda je náročnější na software i hardware ve srovnání s konvenčními FV systémy. Vyžaduje také výpočet dimenzování potřebného superkondenzátoru. V neposlední řadě je třeba GFMI fyzicky implementovat v blízkosti GFLI, aby bylo zajištěno, že systém funguje správně, s ohledem na poměr impedance mezi střídači a pilotním uzlem [49]. Další PVSG řízení jsou potom popsána např. v [50] a [51].

### 3 Pohled z hlediska PPS/PDS

Výzvy spojené s transformací energetického sektoru se nejvíce týkají provozovatelů přenosových (popřípadě i distribučních) soustav – PPS. Právě PPS jsou odpovědní, za zajištění dodávky elektrické energie a za zajištění bezpečnosti a provozuschopnosti elektrizačních soustav. Pakliže chtějí PPS v reakci na vzniklé výzvy, implementovat grid forming funkce střídačů, je nutné je zohlednit v regulačním (legislativním) prostředí a začlenit je do síťových kodexů.

Těžiště implementace grid forming funkcí se pak s největší pravděpodobností bude nacházet v integraci těchto funkcí do oblasti podpůrných služeb. Tomu nasvědčují např. doporučení evropského sdružení provozovatelů přenosových soustav ENTSO-E (kapitola 3.2) nebo přístup Spojeného království (kapitola 3.1).

Předpokládat tak lze vznik a širší používání pojmu „grid forming PpS“ (tedy podpůrné služby, pro jejichž poskytování je nutná schopnost realizace grid forming funkcí). Pro budoucí široké využívání grid forming funkcí tímto způsobem je proto vhodné vytvořit tržní prostředí pro poptávání grid forming PpS, podobné tržnímu prostředí, které je aktuálně realizováno u ostatních harmonizovaných služeb výkonové rovnováhy. Toto budoucí směřování se dá mimo jiné opět předpokládat na základě přístupu ENTSO-E a přístupu Spojeného království, kde je (dle provozovatele Britské přenosové soustavy NESO) vznik trhu s grid forming PpS jednoznačným budoucím krokem (dále podrobně diskutováno v kapitole 3.1.1.1).

#### 3.1 Aktuální přístupy k implementaci grid forming funkcí

##### 3.1.1 Spojené království – UK

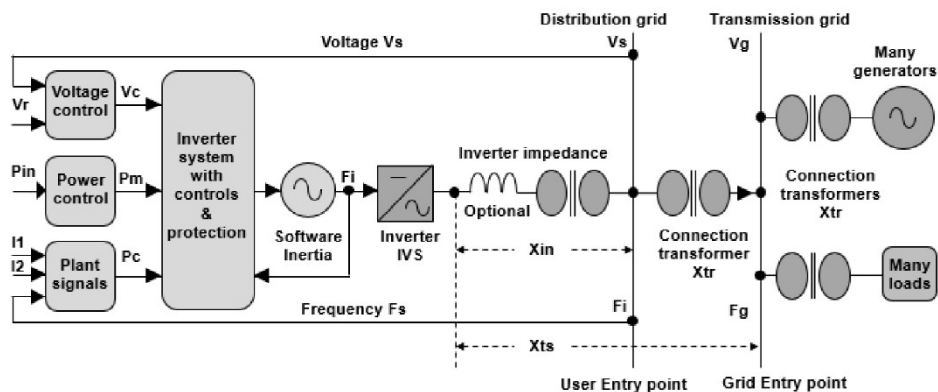
Britský National Energy System Operator (NESO) učinil první kroky směrem k implementaci grid forming funkcí, když v roce 2020 zveřejnil první návrhy rozšíření síťového kodexu [52], které později vešly v platnost. Rozšíření bylo aplikováno s cílem řešit problémy stability elektrizační soustavy související s rostoucím podílem OZE.

Síťový kodex UK [53] již definuje pojem „grid forming plant“. Aby mohla být výrobní jednotka klasifikována jako grid forming plant musí mít schopnost realizovat grid forming funkce (v síťovém kodexu NESO nazýváno jako „grid forming capability“). Zároveň je důležité zmínit, že specifikace je formulována tak, aby jak konvenční synchronní generátory, tak OZE mohly být klasifikovány jako grid forming plant. Provedeno je proto dělení na grid forming plant synchronního typu (GB Grid Forming Synchronous – GBGF-S) a na grid forming plant nesynchronního typu (GB Grid Forming Inverter – GBGF-I).

Síťový kodex dále stanovuje následující minimální technické, konstrukční a provozní požadavky, které musí výrobní jednotka splnit, aby byla klasifikována jako grid forming plant:

- Respektování RoCoF 2 Hz/s po dobu 500 ms (schopnost emulace setrvačnosti SG)
- Rychlá dodávka zkratového proudu (1 – 1,5 násobek jmenovité amplitudy při nulovém napětí) s rychlou odezvou (začátek 5 ms a maximální hodnota do 30 ms)
- Provoz na minimální úrovni zkratového proudu (viz předchozí bod) s nulovými MVA v místě připojení k soustavě
- Reakce činného výkonu na změny frekvence napětí v soustavě v pásmu  $\pm 5$  Hz – zabránění problémům s rezonancí sítě
- Poskytnout tlumící faktor (míru tlumení oscilací frekvence napětí a výkonu) od 0,2 do 5

Dále udává povinnosti majitelům výrobních jednotek se schopností realizace grid forming funkcí (majitelům grid forming plants). Udává tak např. povinnost doložit informace o typu grid forming plant (např. bateriové uložení, SG, ...), maximálním instalovaném výkonu nebo o umístění grid forming plant [53]. Každý majitel grid forming plant je také povinen poskytnout vysoce kvalitní blokový diagram jeho grid forming plant. Viz Obr 3.1.



Obr. 3.1 Příklad blokového diagramu vyžadovaného NESO [53]

Schopnost realizace grid forming funkcí stanovuje kodex jako dobrovolnou. Je ovšem nutné poznamenat, že právě schopnost realizace grid forming funkcí je nezbytnou, pro účastnění se současných výběrových řízení jako jsou Stability Pathfinder nebo Long-Term 2029 Tender, o kterých pojednává následující kapitola 3.1.1.1, nebo později vysoce pravděpodobně realizovaného trhu s grid forming podpůrnými službami.

### 3.1.1.1 Výběrová řízení Stability Pathfinder a Long-term 2029 Tender

Dalším budoucím cílem NESO je umožnit vytvoření trhu s „grid forming podpůrnými službami“. Zatímco se trh pro grid forming funkce teprve rozvíjí, NESO již v současné době potřebuje využívat některé stabilizační služby v určitých lokalitách. V současné době jsou tak tyto služby zadávány prostřednictvím řady výběrových řízení jako jsou Stability Pathfinder [54] nebo Long-term 2029 Tender [55].

V případě výběrových řízení Stability Pathfinder byla iniciativa rozdělena do několika fází. V první fázi byla řízení otevřena pouze pro grid forming plants synchronního typu. V druhé fázi již dostali prostor grid forming plants nesynchronního typu a v dubnu 2022 bylo vybráno pět projektů s bateriovými uložení a schopností realizace grid forming funkcí. Tyto projekty byly / budou uvedeny do provozu mezi březnem 2024 a dubnem 2026.

U Long-term 2029 tender se jedná opět o výběrové řízení s primárním cílem zajistit stabilitu Britské elektrizační soustavy a zároveň zohlednit grid forming funkce. NESO poptává technická řešení, která by byla schopna poskytovat jednu nebo více z podpůrných služeb (nově vzniklých v rámci Long-Term 2029 iniciativy), uvedených níže.

- **Stability services**
  - Inertia capability (syntetická setrvačnost)
  - Short circuit level (podpora dodávky zkratového proudu)
- **Reactive power services**
  - Dynamic reactive power (dynamická dodávka / odběr jalového výkonu)
  - Static reactive power (statická dodávka/ odběr jalového výkonu)
- **Restoration services**
  - Primary Restoration Service (start ze tmy)

- Top-up Restoration Service (podílení se na obnově systému)

Pro poskytování každé z výše zmíněných PpS uvádí NESO technické požadavky, které uchazeči naleznou v průvodní dokumentaci výběrových řízení [56], [57], [58]. Stojí také za zmínku, že o poskytování PpS spadajících do kategorie „Stability services“ a „Restoration services“ se mohou ucházet pouze technická řešení, disponující schopností realizace grid forming funkcí. Podpůrné služby kategorie „Reactive power services“ jsou zpřístupněny pro všechny výrobní jednotky (tedy bez nutnosti klasifikace jako grid forming plant).

Motivací pro provozovatele výrobních jednotek (uchazeče) pak mohou být jednoznačně finanční odměny spojené s poskytováním zmíněných služeb. Ty jsou jak v případě Stability PathFinder, tak Long-Term 2029 Tender vypláceny **tarifně** (platba za připravenost).

Výběrová řízení Stability Pathfinder, Long-term 2029 Tender a další jim podobné, jsou dosavadním řešením pro širší zadávání zakázek na grid forming funkce. NESO v současné době **připravuje trh pro grid forming funkce**, který umožní zadávat tyto funkce jako podpůrné služby prostřednictvím tržních mechanismů [59]. Zmíněné podpůrné služby (Inertia Capability, Dynamic Reactive power, ...) tak s největší pravděpodobností přejdou na trh s grid forming PpS po jeho zavedení.

#### **3.1.1.2 Projekt MinGFM**

NESO v roce 2023 zahájilo projekt MinGFM (Minimalized Grid Forming) v němž věnuje klíčovou pozornost větrné energii na moři. Podle [60] pokroky ve výzkumu naznačují, že s vhodnou strategií řízení by větrné turbíny mohly poskytovat podpůrné služby typu podpory setrvačnosti elektrizační soustavy i bez dodatečného energetického uložště. Simulační výsledky tak naznačují, že projekt MinGFM může poskytovat podporu setrvačnosti pouze využitím kinetické energie z větrných turbín. Důležité je ovšem poznamenat, že tato podpora je bez dodatečné akumulace elektrické energie značně omezená.

Budoucí zavedení stabilizačních služeb v rámci MinGFM, které tak budou záviset na aktualizacích softwaru spíše než na instalaci dalšího hardwaru (tedy energetických uložště), by mohlo zlepšit zisky vlastníků stávajících větrných elektráren. NESO si od výsledků tohoto projektu slibuje, že pomohou formovat nové technické a/nebo obchodní politiky a strategie pro vytvoření portfolia podpůrných služeb využívající grid forming funkce [61].

#### **3.1.1.3 GB grid forming Best Practise Guide**

NESO také v dubnu 2023 zveřejnil příručku osvědčených postupů (GBGF Best Practice Guide) [60]. Příručka byla vydána po začlenění požadavků na grid forming funkce do britského síťového kodexu. NESO se v tomto dokumentu snaží sdílet své osvědčené postupy pro zavádění a rozvoj grid forming funkcí. Dále se také v dokumentu, z pohledu NESO, předkládají tři klíčové otázky, které budou formovat prostředí pro další vývoj grid forming funkcí:

- Jaký podíl výrobních jednotek umožňujících realizaci grid forming funkcí bude v soustavě potřebný k zajištění provozuschopnosti?
- Měla by být schopnost realizace grid forming funkcí povinná?
- Jak je možné posuzovat problémy vzájemného působení mezi GFMI, GFLI a SG?

#### **3.1.2 Fingrid – Finland Specific Study Requirements for Grid Energy Storage System**

Ve Finsku probíhá, a nadále se plánuje připojování velkého počtu bateriových energetických uložště k přenosové soustavě. Potřeba grid forming funkcí již byla identifikována v oblastech měkkých sítí, kde není možné připojit více GFLI bez dalšího posílení sítě. Dokument [62]

popisuje funkční požadavky, požadavky na modelování, simulační a terénní zkoušky pro bateriová energetická uložení s grid forming funkcemi. Společnost Fingrid dokončila a zaslala požadavky svým zákazníkům v červnu 2023. Požadavky byly také zveřejněny na webových stránkách společnosti Fingrid v srpnu 2023. V současné době se vyžadují grid forming funkce od bateriových energetických uložení, které jsou nově připojovány v oblastech s již vysokým podílem obnovitelných zdrojů [59].

### **3.1.3 NC RfG, ACER a Evropská komise**

Síťový kodex pro požadavky na připojení výrobních jednotek k elektrizační soustavě [63] (NC RfG – Network Code on Requirements for Generators) byl již v roce 2016 zařazen mezi Evropské síťové kodexy s cílem harmonizovat minimální technické požadavky pro připojení všech výrobních jednotek do elektrizačních soustav v rámci EU. Tento aktuálně platný kodex již v současné době vznáší technické požadavky na výrobní jednotky nesynchronního typu (výrobní jednotky připojené za pomoci měničů) ovšem nedefinuje konkrétní grid forming chování.

Prakticky tak tento kodex předepisuje, že i nesynchronní výrobní jednotky musí plnit konkrétní požadavky (např. na chování při poruchách nebo schopnost dodávky jalového výkonu), přičemž příslušný PPS může v rámci povolených rozsahů stanovit parametry vhodné pro svou přenosovou soustavu. Absence přesného vymezení grid forming chování v současném kodexu ovšem vyvolala potřebu jeho aktualizace.

V prosinci 2023 proto předložila agentura ACER (Agency for the Cooperation of Energy Regulators) Evropské komisi doporučení [64] ke změně síťového kodexu pro požadavky na připojení výrobních jednotek k elektrizační soustavě (NC RfG 2.0). Tento návrh vychází z podnětů a zpětné vazby různých zúčastněných stran (PPS) shromážděných během konzultačního procesu. Konkrétně pak mimo jiné obsahuje definici výrobní jednotky disponující schopností realizace grid forming funkcí a mnohé (neúplný výčet) požadavky na grid forming funkce, jako jsou:

- Požadavky na zajištění regulace frekvence napětí u výrobních jednotek s energetickým uložením – „Výrobní jednotka s energetickým uložením, disponující schopností realizace grid forming funkcí musí bez ohledu na to, zda během události s nadměrnou frekvencí spotřebovává nebo dodává činný výkon, zvýšit úroveň spotřebovaného činného výkonu v rozsahu, který je technicky proveditelný“ [65].
- Požadavky na zajištění napěťové regulace – „Po vzniku poruchy v soustavě v oblasti velikosti napětí, frekvence napětí nebo fázového úhlu napětí, se na výrobní jednotku disponující schopností realizace grid forming funkcí vztahují následující ustanovení v rámci proudových limitů a inherentní schopnosti akumulace energie“ [65].
  - 1) Příslušný provozovatel přenosové (nebo distribuční) soustavy předem definuje dynamický výkon v oblasti regulace napětí, a stanoví jeho časové parametry.
  - 2) Pakliže je z pohledu provozovatele přenosové (nebo distribuční) soustavy nutné omezit proud, může příslušný provozovatel soustavy specifikovat dodatečné požadavky týkající se příspěvku činného a jalového výkonu v místě připojení výrobní jednotky.

Po změně v kodexu, která se očekává ve čtvrtém kvartálu roku 2025, bude dle [66] vydán prováděcí pokyn, který dále usnadní implementaci grid forming funkcí.

### **3.1.4 ENTSO-E**

ENTSO-E jakožto sdružení 40 provozovatelů přenosových soustav, reprezentující celkem 36 států již v minulosti diskutovalo potřebu zavedení grid forming funkcí v evropských elektrizačních soustavách [67].

Myšlenku rozvíjí dále v dokumentu [66] z roku 2024. Jedná se o první průběžnou technickou zprávu v souvislosti se schopností výrobních jednotek (v dokumentu zvaných jako „power park modules“) poskytovat grid forming funkce. Tato zpráva navrhuje první nezávazný technický popis grid forming funkcí (na základě NC RfG 2.0) a poskytuje základ pro další diskusi mezi evropskými provozovateli přenosových soustav.

## **3.2 Obecné požadavky na grid forming funkce dle ENTSO-E**

Tyto doporučené požadavky mají zásadní význam pro sjednocení dosud poměrně roztržštěných definic grid forming funkcí, které jednotliví evropští provozovatelé přenosových soustav, nebo jiné instituce, formulují ve svých síťových kodexech či iniciativách. Bez společného rámce by se nové výrobní jednotky s grid forming funkcemi musely přizpůsobovat různým technickým kritériím v každé zemi, což by komplikovalo přeshraniční integraci OZE s grid forming funkcemi i vývoj standardizovaných zařízení.

Zdrojem informací této kapitoly je dokument [66] z roku 2024 a dokument [67] z roku 2021. Tyto dokumenty představují nejnovější konsenzus evropských provozovatelů přenosových soustav ohledně grid forming funkcí. Dokument [66] doporučuje vznášet následující obecné požadavky na chování výrobních jednotek se schopností realizace grid forming funkcí.

### **3.2.1 Charakter napěťového zdroje v rámci mezních hodnot**

- V rámci proudových omezení se musí být výrobní jednotka schopna chovat jako zdroj napětí (Theveninův zdroj) a to jak při normálních provozních podmínkách, tak při nestandardních provozních podmínkách, charakterizovaných napěťovými a frekvenčními výkyvy. Theveninův zdroj je charakterizován svou vnitřní amplitudou a frekvencí napětí, fázovým úhlem napětí a vnitřní impedancí.
- Při vzniku poruchy v soustavě, a za předpokladu, že nejsou překročeny proudové limity výrobní jednotky, musí být okamžité střídavé napětí výrobní jednotky, schopné neměnit svou amplitudu a fázový úhel, zatímco v připojovacím bodě dochází ke změnám velikosti napětí nebo ke změnám fázového úhlu napětí. Proud tekoucí mezi výrobní jednotkou a soustavou by měl téct přirozeně v souladu s impedancemi výrobní jednotky a měniče a v souladu s rozdílem napětí mezi výrobní jednotkou a místem připojení.
- Při vzniku poruchy v soustavě, která bude mít za následek změnu velikosti napětí nebo frekvence napětí, platí v rámci schopností výrobní jednotky následující:
  - Provozovatel přenosové soustavy stanoví časové parametry dynamické stability napětí.
  - Je-li nutné omezení proudu, může provozovatel přenosové soustavy stanovit dodatečné požadavky týkající se podílu činného a jalového výkonu v místě připojení.
  - Výrobní jednotka musí být schopna stabilního provozu při i dosažení proudových limitů a to nepřetržitě. Při odeznění omezení se musí výrobní jednotka navrátit do původního provozu. I při dosažení proudového limitu, musí být zachováno grid forming chování.

### **3.2.2 Syntetická setrvačnost v rámci mezních hodnot**

V kontextu podpory setrvačnosti elektrizační soustavy by měly výrobní jednotky splňovat následující požadavky.

- PPS je oprávněn stanovit, povinnost výrobních jednotek poskytovat syntetickou setrvačnost během rychlých odchylek frekvence
- PPS stanoví velikost příspěvku k podpoře setrvačnosti soustavy. Výrobní jednotka musí být schopna přispívat k setrvačnosti soustavy jak při kladných, tak při záporných odchylkách od jmenovité frekvence
- Funkční princip regulačních systémů instalovaných k zajištění syntetické setrvačnosti a související parametry stanoví příslušný PPS

### **3.2.3 Při dosažení proudových limitů**

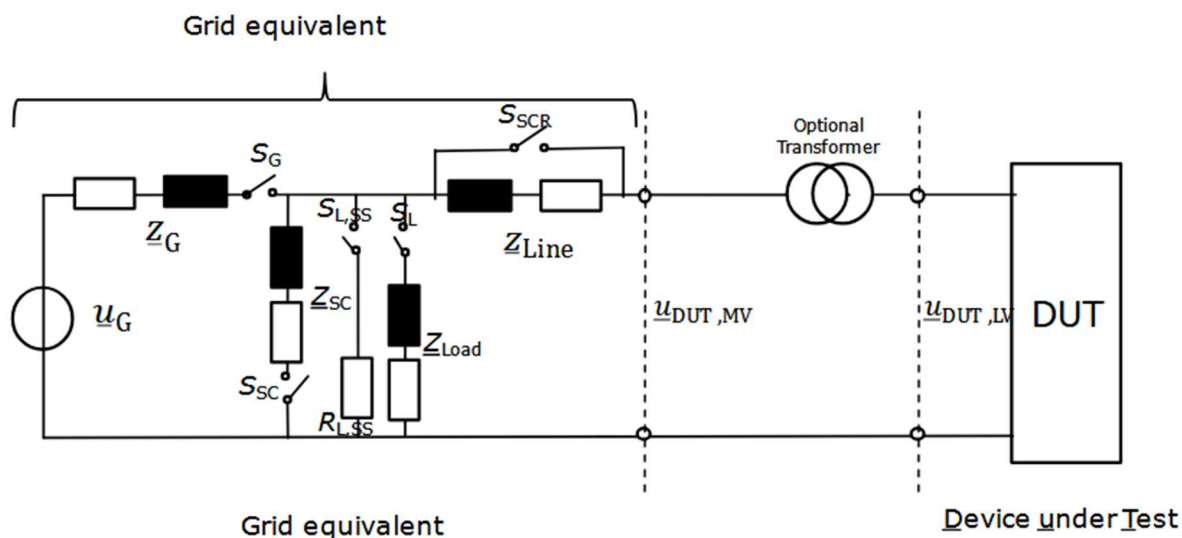
V případě, že je nutné omezit proud, může příslušný PPS stanovit dodatečné požadavky týkající se podílu činného a jalového výkonu v místě připojení. I v případě dosažení proudových limitů je však nutné zachovat chování napěťového zdroje (zvýšení podílu činného proudu při poklesu úhlu napětí a zvýšení jalového proudu při poklesu velikosti napětí a naopak).

### **3.2.4 Doporučená metodika testování ENTSO-E**

#### **3.2.4.1 Navrhovaná testovací soustava**

Doporučené náhradní schéma pro testování je znázorněno na Obr. 3.2. Výrobní jednotka je v tomto případě reprezentována blokem DUT (Device Under Test).  $u_G$  je pak regulovatelný zdroj napětí s proměnnou amplitudou a frekvencí napětí. Různé spínače umožňují modifikace topologie fiktivní sítě. Konkrétně:

- $S_{SCR}$  umožňuje změnu sériové impedance sítě
- $S_{L,SS}$  a  $S_L$  simulují skokovou změnu zatížení v místě připojení výrobní jednotky
- Sepnutí  $S_{SC}$  simuluje zkrat v místě připojení výrobní jednotky
- Rozepnutí  $S_G$  simuluje ostrovní provoz



Obr. 3.2 Doporučená testovací soustava [66]

### 3.2.4.2 Simulovatelné události

Tato testovací soustava má možnost simulovat následující události:

- 1) Skoková změna fázového úhlu napětí změnou  $u_G$
- 2) Malý symetrický (třífázový) skok velikosti napětí úpravou  $u_G$
- 3) Skokovou změnu velikosti možného dodávaného zkratového proudu přepínáním spínače  $S_{SCR}$
- 4) Ztráta posledního zdroje synchronní výroby rozepnutím  $S_G$ , zatímco je  $S_L$  sepnut
- 5) RoCoF s rostoucí frekvencí až do 51 Hz vyvolané modifikací  $u_G$
- 6) Velký symetrický (třífázový) skok velikosti napětí úpravou  $u_G$  nebo uzavřením  $S_{L,SS}$
- 7) Skoková změna fázového úhlu napětí a pokles frekvence napětí až na 47,5 Hz s maximálním RoCoF
- 8) Skoková změna fázového úhlu napětí a nárůst frekvence napětí až na 52,5 Hz s maximálním RoCoF

Při simulaci událostí 1) – 5) se nepředpokládá dosažení proudových limitů. Popisovaná testovací soustava má za cíl emulovat důsledky poruch v síti za pomoci spínání spínačů nebo změnou napětí  $u_G$ .

### 3.2.5 Shrnutí

Implementování grid forming funkcí je dle ENTSO-E nezbytným krokem k zajištění budoucí provozuschopnosti a bezpečnosti evropských elektrizačních soustav. Sdružení ENTSO-E jednoznačně akceptuje potřebu grid forming funkcí a těžiště implementace grid forming funkcí spatřuje **v integraci těchto funkcí do oblasti podpůrných služeb jednotlivých států.**

Základní požadavky na grid forming funkce **ovšem musí být definovány v síťových kodexech** CNC (Connection Network Codes) v celoevropském měřítku, aby bylo možné harmonizovat dostupná řešení [67]. CNC jsou regulační platformou na evropské úrovni, která definuje nezbytné technické schopnosti výrobních jednotek, distribučních soustav a HVDC linek, jak při standardních, tak při nestandardních provozních podmínkách. Soubor schopností grid forming funkcí musí být popsán v CNC (omezeno na proudové a výkonové hodnoty výrobních jednotek) [67], s cílem sladit požadavky napříč jednotlivými evropskými státy. Tento přístup

umožní výrobcům návrh harmonizovaných řešení, které budou vyhovovat potřebám a požadavkům v celé Evropě.

Dobrym příkladem tohoto přístupu jsou požadavky na primární regulaci frekvence napětí. Ačkoli se primární rezerva FCR (o které blíže pojednává kapitola 3.4.1.1) zajišťuje prostřednictvím tržních mechanismů (v národních měřících) a předběžná kvalifikace je přenesena na jednotlivé provozovatele přenosových soustav, základní požadavky na výrobce jsou zakotveny v příslušných CNC, které jsou harmonizovány napříč Evropou. Tyto požadavky zaručují dostupnost funkcí souvisejících s primární regulací frekvence, i při selhání tržních mechanismů, čímž se zajišťuje vyšší úroveň bezpečnosti systému, zejména při velkých poruchách. Stejný přístup lze použít i pro grid forming funkce.

### **3.3 Podpůrné služby**

Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, pro další podporu energetické transformace je nezbytné, aby se OZE podílely na poskytování podpůrných služeb. V prostředí elektroenergetiky se v posledních letech uplatňují dva přístupy k vyšší integraci OZE do oblasti podpůrných služeb. Prvním je již diskutovaný vývoj a zavádění grid forming funkcí a s tím související vytváření nových typů podpůrných služeb speciálně pro výrobní jednotky disponující schopností realizace grid forming funkcí (viz. kapitola 3.1). Druhým přístupem je zpřístupnit poskytování podpůrných služeb pro již instalované OZE (tedy OZE, které nejčastěji nedisponují schopností realizace grid forming funkcí). O snahách v tomto směru pojednává kapitola 3.5.

Tyto dva zmíněné přístupy se navzájem nevylučují, a naopak se v současném evropském prostředí často kombinují. Zatímco dlouhodobým cílem je širší rozšíření grid forming technologií, krátkodobě je pro zajištění dostatečné nabídky PpS nezbytné zapojit i zdroje, které tyto funkce zatím nemají.

V následující části je proveden popis stávajícího stavu podpůrných služeb a následně uvedeny trendy při implementaci OZE bez schopnosti realizace grid forming funkcí do oblasti PpS.

### **3.4 Stávající stav PpS**

Podpůrné služby jsou (PpS) nabízeny / poskytovány na základě bilaterálních dohod nebo tzv. tržně, za pomoci trhů s podpůrnými službami provozovatelům přenosových soustav. Sktruktury trhů s podpůrnými službami se mezi jednotlivými státy liší. Podle současných struktur trhů (jednotlivých států) mohou být podpůrné služby, dále jen PpS, nabízeny konvenčními SG (synchronní generátor), obnovitelnými zdroji energie nebo agregátory, provozovatelům přenosových soustav. PPS využívají podpůrné služby k udržení frekvence napětí, velikosti napětí a pro zajištění běžného provozu soustavy a jejího krizového řízení. Samotné dělení podpůrných služeb se liší v závislosti na konkrétních (obvykle národních) síťových kodexech, které je detailně specifikují. Mezi specifikacemi podpůrných služeb se ovšem nachází nemalé množství podobností. Příkladem síťového kodexu, který definuje a rozděluje PpS může být například kodex přenosové soustavy ČR [68]. Ten dělí PpS na:

- Služby výkonové rovnováhy – FCR, aFRR, mFRR
- Ostatní podpůrné služby – regulace U/Q, schopnost ostrovního provozu, schopnost startu ze tmy

### **3.4.1 Služby výkonové rovnováhy – SVR**

Tyto služby slouží k zajištění stability frekvence napětí v elektrizačních soustavách. V případě, že je v elektrizační soustavě přebytek nebo nedostatek elektrické energie, provozovatel přenosové soustavy (v českém případě společnost ČEPS, a.s.) aktivuje služby, aby se přebytek či nedostatek v síti eliminoval. Provozovatelé přenosových soustav musí zajistit dostatečně velký kontraktovaný výkon SVR. Hlavní PpS (SVR) nabízené pro regulaci frekvence napětí jsou [68], [69], [70], [71]:

#### **3.4.1.1 Rezervy pro udržení frekvence – FCR**

FCR – Frequency Containment Reserves také (historicky) nazývané jako „primární regulace frekvence“. Jedná se o zálohy pro automatickou regulaci frekvence s dobou aktivace do 30 s.

#### **3.4.1.2 Rezervy pro obnovu frekvence – FRR**

FRR – Frequency Restoration Reserves také (historicky) nazývané jako „sekundární regulace frekvence“, popř. „minutové zálohy“. FRR lze dále rozdělit na:

- **aFRR – automatic Frequency Restoration Reserves** – jedná se o automatickou službu, aktivovanou do 7,5 minut. Služba zajišťuje další vyrovnání výkonu, aby frekvence co nejrychleji dosáhla své nominální hodnoty.
- **mFRR – manual Frequency Restoration Reserves** – jedná se o manuální službu, aktivovanou do 12,5 minut. Služba slouží k trvalejší stabilizaci elektrizační soustavy po vyřešení akutního výkyvu.

Tyto tři tržní produkty jsou technicky harmonizovány napříč přenosovými soustavami v EU na základě nařízení komise (EU) 2017/1485.

### **3.4.2 Ostatní podpůrné služby**

Ostatní podpůrné, někdy také nazývané jako „nefrekvenční“ zastávají důležitou funkci při zajištění bezpečnosti a provozuschopnosti elektrizačních soustav. Na rozdíl od SVR nejsou v Evropském prostředí harmonizovány a každý stát (eventuelně každý PPS) si tyto služby definuje ve svých síťových kodexech. Technická specifika nebo konkrétní názvy produktů se tak mohou napříč kontinentální Evropou lišit, ovšem záměr zůstává stejný. Ostatní podpůrné služby tak můžeme rozdělit na následující typy:

#### **3.4.2.1 Regulace U/Q**

Provozovatelé přenosových soustav mají povinnost regulovat velikost napětí v elektrizačních soustavách. Konkrétní povinnosti PPS týkající se limitů napětí pro vysoké a velmi vysoké hladiny napětí jsou definovány v síťových kodexech nebo mezinárodních normách [72], [73]. K dosažení požadované velikosti napětí je nutné, aby byl jalový výkon dodáván nebo odebírán na konkrétních místech, tzv. pilotních uzlech elektrizační soustavy prostřednictvím regulovatelných zařízení jako jsou synchronní kompenzátory, nebo klasické přebuzené synchronní generátory. Zároveň musí být tyto akce prováděny v pilotních uzlech, které se nacházejí nejbližší místu odchylky napětí.

#### **3.4.2.2 Schopnost ostrovního provozu**

Jedná se o schopnost konkrétní výrobní jednotky pracovat do vydělené části elektrizační soustavy, tedy tzv. ostrova. Schopnost ostrovního provozu konkrétní výrobní jednotky je nezbytná pro předcházení a řešení stavů nouze, jelikož se ostrovní provoz vyznačuje značnými změnami systémových veličin – frekvence napětí a velikosti napětí. Výrobní jednotka přechází do regulačního režimu ostrovního provozu při poklesu nebo nárůstu frekvence pod, nebo nad

předem určenou hodnotu. Např. v České republice se jedná o hodnoty 49,8 Hz a 50,2 Hz. Zatížení je proměnného charakteru a tím vyvolané změny frekvence napětí a velikosti napětí musí být výrobní jednotka schopna řešit autonomně (na rozdíl od standardního provozu v rámci elektrizační soustavy, kdy jsou změny velikosti napětí a frekvence napětí řešeny prostřednictvím podpůrných služeb).

### **3.4.2.3 Start ze tmy / obnova sítě**

Start ze tmy je PpS poskytovaná různými výrobními jednotkami, které jsou schopny dodat energii do elektrizační soustavy po úplném nebo částečném přerušení provozu elektrizační soustavy (odstávce / black-outu) [73]. Výrobní jednotky umožňující start ze tmy pak také slouží k najíždění dalších zdrojů. Kromě toho by takto použité výrobní jednotky měly být schopny dodávat a odebírat jalový výkon, aby bylo možné regulovat velikost napětí.

Vzhledem k tomu, že většina elektráren není schopna obnovit provoz bez dodatečného externího napájení, je schopnost některých výrobních jednotek provádět start ze tmy naprosto nezbytná. Mezi hlavní typy výrobních jednotek, které start ze tmy zajišťují patří vodní elektrárny nebo plynové elektrárny, připojené do přenosové soustavy.

## **3.5 Trendy posledních let v oblasti PpS**

Jak již bylo naznačeno výše, aby nedošlo k ohrožení elektrizačních soustav, je vhodné OZE efektivně zahrnout do oblasti podpůrných služeb. Provozovatelé přenosových soustav si tuto skutečnost uvědomují a podnikají kroky tímto směrem. V následující části jsou uvedeny aktuální trendy při implementaci OZE do oblasti podpůrných služeb.

### **3.5.1 Koordinace PPS a PDS – decentralizace flexibility**

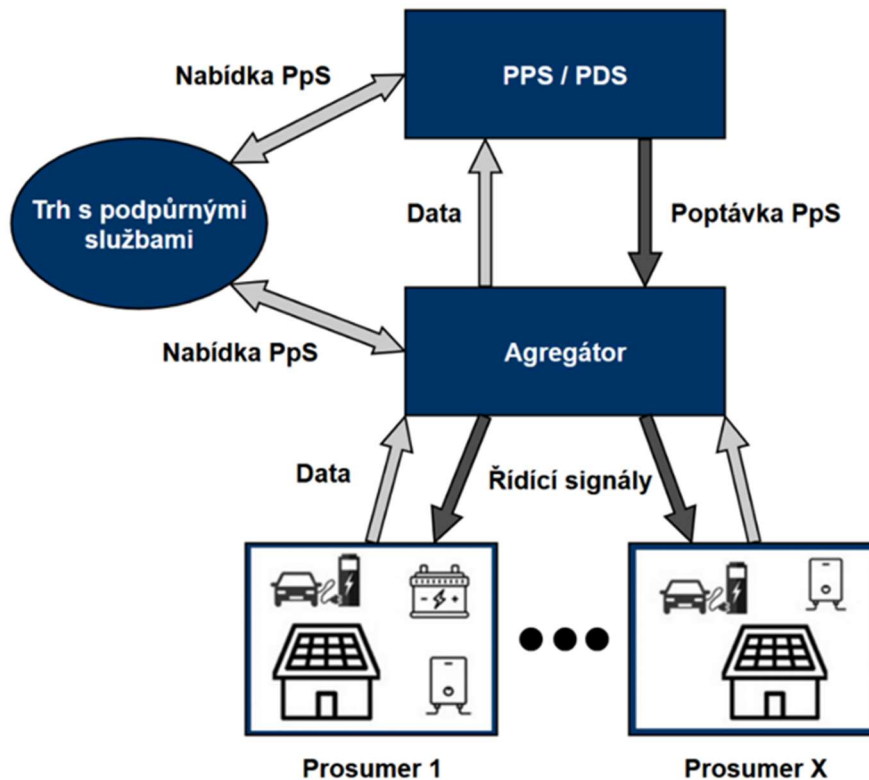
Jak již bylo zmíněno, s rostoucím podílem OZE v energetickém mixu a decentralizací výroby v elektrizační soustavě se tradiční jednosměrný tok energie – od centrálních výrobců přes přenosovou soustavu ke konečným spotřebitelům – mění v dynamičtější a komplexnější obousměrné toky. Tyto změny vyžadují spolupráci mezi PPS a PDS (Provozovatelé Distribučních Soustav) při optimalizaci provozu a zajištění bezpečnosti elektrizační soustavy [74]. Potenciálně tedy i v oblasti zajišťování podpůrných služeb.

Např. v [75] se diskutuje zavádění lokálních trhů s flexibilitou a je provedeno porovnání několika pilotních projektů. Modely fungování lokálních trhů s flexibilitou se blíží modelům trhů s podpůrnými službami určenými pro PPS. Rozdílem je ovšem přímá účast PDS, jako kupujícího [76]. Aby se předešlo riziku protichůdného jednání PPS a PDS, je nezbytná úzká koordinace a jasné vymezení odpovědností mezi PPS a PDS, aby byly dodrženy omezení přenosové a distribuční soustavy [77].

### **3.5.2 Agregace**

Zdroje v distribuční soustavě jsou distribuované a dosahují menších výkonů ve srovnání s typickými zdroji připojenými k přenosové soustavě, ale mohou být také potenciálními poskytovateli PpS. Spotřebitelé, výrobci a jejich OZE se dají agregovat do větších celků a lze tak vytvořit např. virtuální elektrárnu (VPP – Virtual Power Plant), nebo energetickou komunitu [78]. Agregátor je pak třetí stranou, která koordinuje více spotřebitelů a menších výrobců a funguje jako prostředník mezi nimi a PPS (popřípadě PDS) [79]. Agregace tak mění tradiční centralizovaný model výroby energie a umožňuje klasickým spotřebitelům stát se spotřebiteli a výrobcí zároveň (tzv. prosumery). Prosumeři se tak mohou stát poskytovateli PpS decentralizovaným způsobem. V současnosti mohou agregátoři poskytovat podpůrné

služby pro PPS, pakliže splňují technické požadavky stanovené síťovými kodexy. Principiální schéma zapojení agregátorů do chodu elektrizační soustavy je na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Principiální schéma konceptu s agregátorem [80]

### 3.5.2.1 Praktická implementace agregace v SRN

Příkladem tohoto přístupu je například Německo. Aby bylo možné překonat technické problémy vyplývající z rozšíření OZE, od roku 2018 mohou agregátoři v Německu poskytovat SVR pro elektrizační soustavu [80]. K roku 2025 jsou v Německu všechny SVR otevřeny pro jakékoliv distribuované OZE, pakliže splňují technické požadavky stanovené národním síťovým kodexem. SVR se zadávají prostřednictvím denních výběrových řízení s 4hodinovými bloky a minimální velikost nabídky je 1 MW. U mFRR a aFRR se navíc platí jak dostupný výkon (€/MW), tak dodaná energie (€/MWh).

### 3.5.3 Reformování stávajících PpS

Vlivem transformace energetického sektoru jsou přezkoumávány technické požadavky na stávající PpS, aby byly odstraněny technicko-ekonomické překážky pro menší OZE (např. malé fotovoltaické elektrárny) a agregátory (hlavně pak spotřebitele a výrobce v jejich portfoliu). Ve výsledku dostávají tak jako tak větší prostor OZE. Odstranění stávajících regulačních překážek je rovněž zásadní z pohledu provozovatelů přenosových soustav, aby mohli využít flexibilitu OZE pro poskytování podpůrných služeb (např. SVR) a dosáhnout tak pozitivních účinků na elektrizační soustavu [81].

#### 3.5.3.1 Zjednodušování produktů

Jak naznačuje zdroj [82], zainteresované strany (poskytovatelé PpS) zdůrazňují, že nepřeborné množství produktů není atraktivní pro nové účastníky na trhu s PpS. Proto může snížení počtu produktů spojených s danou službou zlepšit likviditu trhu [83]. V každém případě je ovšem

k udržení transparentnosti trhu a omezení bilaterálních dohod potřeba určitý počet produktů [84].

### **3.5.3.2 Snižování minimální velikosti nabídky**

Obecně platí, že pro daný produkt přijímají PPS pouze nabídky, které překračují určitou minimální hodnotu. Tato minimální hodnota se může značně lišit v závislosti na konkrétním produktu (od několika stovek kW až po desítky MW [85]). Snížením minimální velikosti nabídky se zvyšuje počet účastníků na trhu a zejména umožňuje účast agregátorů s menšími portfolii [86]. Menší nabídky ovšem předznamenávají více transakcí, které musí PPS spravovat, což sebou nese větší náklady a zvyšuje složitost provozu. PPS se tak snaží dosáhnout kompromisu velikosti nabídky, který přinese největší celkový přínos.

### **3.5.3.3 Zkracování reakčních časů**

Obecně lze říci, že v kontextu rostoucího podílu OZE v energetickém mixu zvyšuje zkracování reakčních časů jistotu dodávek a napomáhá větší integraci OZE do oblasti podpůrných služeb. Cílení na OZE s bateriovými uložišti je v tomto ohledu zřejmé. Právě bateriová uložiště totiž disponují vysokou rychlostí dodávky maximálního výkonu. V tomto směru tak vznikají nové podpůrné služby s kratšími reakčními časy.

## **3.6 Nový stav PpS**

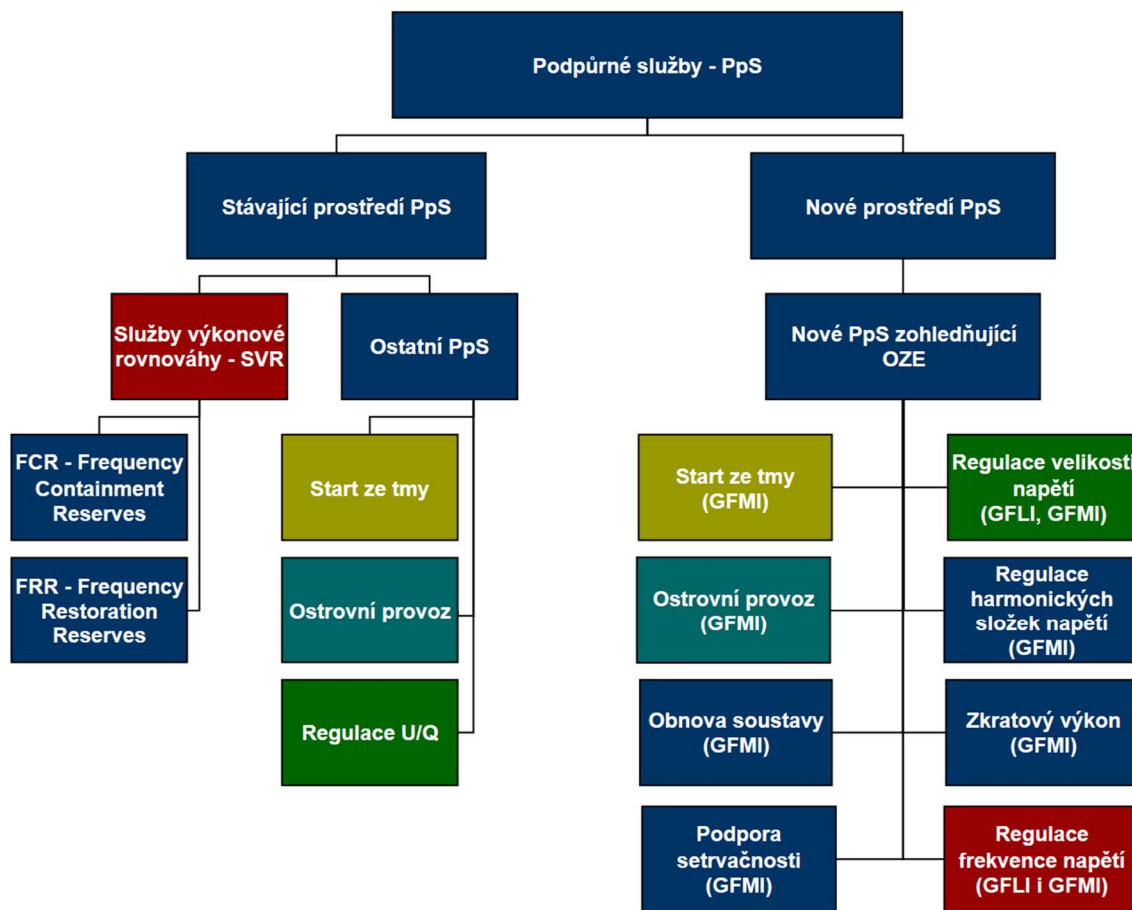
Vlivem probíhající transformace ES se na trzích s podpůrnými službami začínají objevovat zcela nové produkty. Nové produkty můžeme rozdělit do následujících kategorií podle účelu, za kterým jsou zaváděny:

- Regulace frekvence napětí
- Regulace velikosti napětí
- Poskytování startu ze tmy
- Obnova soustavy
- Umožnění ostrovního provozu
- Podpora setrvačnosti
- Navýšení zkratového výkonu
- Regulace harmonických složek napětí

Obr. 3.4 dává do souvislosti stávající („zažité“) podpůrné služby a nové formy podpůrných služeb, které zohledňují OZE (jak bez grid forming funkcí, tak s grid forming funkcemi). Stejně barvy značí, že mají PpS stejný účel. V závorkách jsou pak uvedeny typy střídačů (GFLI nebo GFMI), použitelné při zajišťování dané PpS.

Přístupy jednotlivých států a tak i implementace do jejich síťových kodexů se v tomto ohledu liší. Obdobně jako v případě „ostatních PpS“ (viz. kapitola 3.4.2) nejsou tyto služby harmonizovány a každý stát (eventuelně každý PPS) si definuje tyto služby dle vlastních specifických potřeb.

Příklady konkrétních nově vzniklých PpS zohledňujících OZE se nacházejí v kapitole 0 (bez grid forming funkcí) a v kapitole 3.1.1.1 (s grid forming funkcemi).



Obr. 3.4 Schematické zobrazení stávajícího a nového stavu PpS

### 3.6.1.1 Příklad UK

Vedle zohledňování grid forming funkcí také britský regulační orgán v posledních letech reformoval stávající („zažité“) trhy s podpůrnými službami, aby zohlednil OZE [87], dosáhl větší diverzifikace v oblasti poskytovatelů PpS a zjednodušil produkty.

Mezi vzniklými je např. PpS „Dynamic Containment“, která se dá v kontextu Evropských produktů zařadit do kategorie SVR. Jedná se o rychlou dynamickou službu určenou k obnovení jmenovité frekvence po významné odchylce s požadovaným dodáním plného výkonu do 1 s. Při porovnání s harmonizovanou (v Evropském prostředí) podpůrnou službou FCR se jedná o významně kratší čas (FCR má požadované dodání plného výkonu do 30 s). Služba Dynamic Containment je nakupována denně a minimální velikost nabídky je 1 MW. Teoreticky se tak jejího poskytování mohou účastnit všechny typy OZE, ale v praxi přísné technické požadavky umožňují poskytování této podpůrné služby pouze OZE s bateriovými uložišti [80].

Příkladem reformované PpS je pak tzv. služba pevné frekvence (Static Firm Frequency Response). Ta je přístupná pro konvenční SG, bateriová uložiště i agregované OZE v přenosových a distribučních soustavách (viz. kapitola 3.5.2), přičemž minimální velikost nabídky byla snížena ze 10 MW na 1 MW [88]. Požadovaná doba dodání plného výkonu činí 30 s po poklesu frekvence napětí pod 49,7 Hz a požadovaná doba dodávky je 30 minut.

## Závěr

V úvodu této výzkumné zprávy byly vymezeny klíčové pojmy spojené s probíhající globální transformací elektrizačních soustav a byly uvedeny konkrétní změny, kterým ES čelí. Dále byly zmíněny výzvy, spjaté s probíhající energetickou transformací. Odpovědí, na mnoho z těchto výzev mohou být grid forming funkce střídačů. Grid forming funkce byly obecně pospány a bylo uvedeno několik důvodů, proč ještě v současné době nejsou grid forming střídače a jejich grid forming funkce globálně nasazovány.

Následně byl proveden bližší technický popis jak grid forming, tak grid following střídačů a bylo provedeno jejich vzájemné porovnání. Dále byly popsány potenciální výzvy, které se mohou při implementaci grid forming střídačů objevovat, jakožto i konkrétní možnosti integrace a aplikace.

V následující části se výzkumná zpráva odklání od technických popisů a pojednává o legislativě a o možných přístupech při implementaci grid forming funkcí. Kapitola 3 dává do souvislosti pojmy podpůrné služby, síťové kodexy a grid forming funkce střídačů. Důraz byl kladen např. na legislativu UK ohledně grid forming funkcí a byly zmíněny i konkrétní projekty, které v souladu s legislativou podporují rozvoj grid forming funkcí a umožňují jejich praktické nasazování.

Dále se práce věnovala Evropskému přístupu k implementaci grid forming funkcí. Nejdůležitějším bodem je v této části pohled sdružení ENTSO-E na grid forming funkce. V dokumentu [66] doporučuje ENTSO-E vznášet na grid forming funkce obecné požadavky, které byly popsány v kapitole 3.2. V návaznosti na kapitolu 3.2 byla popsána doporučená metoda testování výrobních jednotek umožňujících realizaci grid forming funkcí. Těžiště implementace grid forming funkcí spatřuje ENTSO-E v integraci těchto funkcí do oblasti podpůrných služeb v národních měřících jednotlivých států.

Dále proto výzkumná zpráva v kapitole 3.3 pojednává o podpůrných službách. Byl proveden popis stávajícího stavu podpůrných služeb a následně popsány trendy v oblasti PpS za posledních pár let. Pozornost byla kladena koordinaci PPS a PDS, agregaci a reformám stávajících podpůrných služeb. V kapitole 3.6 nakonec práce pojednává o PpS, které nově vznikly / vznikají v souvislosti s probíhající transformací ES.

Nynější, ale i budoucí vývoj podpůrných služeb je a bude jednoznačně ovlivněn pokračující transformací energetického sektoru. Zatímco historicky byly PpS poskytovány téměř výhradně velkými výrobními jednotkami se synchronními generátory, v dnešní době se klíčovým prvkem stává zapojování OZE do poskytování podpůrných služeb. Zásadní roli tak sehrávají pokročilé funkce výkonové elektroniky jako jsou grid forming funkce střídačů. Grid forming funkce jsou jedním z nástrojů, který umožňuje větší integraci OZE do oblasti podpůrných služeb.

Lze očekávat, že Evropské síťové kodexy budou postupně rozšiřovány o povinné požadavky na grid forming funkce, za účelem harmonizace dostupných řešení. Tomu nasvědčuje i přístup Evropského sdružení operátorů přenosových soustav ENTSO-E. Nejpravděpodobněji tak bude vývoj směřovat k dobrovolnému nabízení grid forming funkcí v oblasti podpůrných služeb dle předem stanovených parametrů v měřítku jednotlivých národních států Evropy. Tato koncepce je deklarována ENTSO-E a na některých místech už probíhá její implementace (v UK již implementováno).

Je ovšem důležité zmínit, že ani grid forming funkce se neobejdou bez výzev a překážek při jejich implementaci. Mimo výzev, zmíněných v kapitole 2.4 může být překážkou například

skutečnost, že přesný podíl střídačů vybavených grid forming funkcemi v ES není zcela jasný. Např. studie publikovaná univerzitou v Strathclyde společně s britským PPS NESO predikuje, že aby Britská soustava se 100 % penetrací OZE pracovala stabilně, musí být alespoň 10 až 30 % připojených OZE vybaveno grid forming funkcemi [89], [13]. Tyto odhady je ovšem nutné chápat jako „scénářově“ podmíněné. Pro různé elektrizační soustavy tak může být minimální podíl grid forming střídačů odlišný v závislosti na míře penetrace OZE v energetickém mixu a dalších faktorech.

Dalším možným směrem potenciálního vývoje může být rozšíření tržních mechanismů. Vedle centralizovaných trhů s PpS a bilaterálních dohod se mohou začít prosazovat lokální tržní platformy, kde budou provozovatelé distribučních soustav nakupovat PpS pro lokální řízení přímo od místních zdrojů. Tento vývoj by vedl k větší integraci PDS do oblasti zajišťování podpůrných služeb.

## Literatura

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022), Grid codes for renewable powered systems, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-427-1.
- [2] Gursoy, Mehmetcan, and Behrooz Mirafzal. "On self-security of grid-interactive smart inverters." In *2021 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*, no. DOE-KSU-8767. Kansas State Univ., Manhattan, KS (United States), 2021. DOI:<https://doi.org/10.1109/kpec51835.2021.9446213>
- [3] Brouwer, Anne Sjoerd, Machteld Van Den Broek, Ad Seebregts, and André Faaij. "Impacts of large-scale Intermittent Renewable Energy Sources on electricity systems, and how these can be modeled." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (2014): 443-466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.076>
- [4] ENTSO-E, N. "Network code on load-frequency control and reserves." *Network Code on Load-Frequency Control and Reserves* (2013). Dostupné z: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/resources/LCFR/130628-NC\\_LFCR-Issue1.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/resources/LCFR/130628-NC_LFCR-Issue1.pdf)
- [5] Marchisio, A. "Mercato dei Servizi di Dispacciamento: i quattro driver più rilevanti degli ultimi anni." (2017).
- [6] Hatziargyriou, Nikos, Jovica Milanovic, Claudia Rahmann, Venkataramana Ajarapu, Claudio Canizares, Istvan Erlich, David Hill et al. "Definition and classification of power system stability–revisited & extended." *IEEE Transactions on Power Systems* 36, no. 4 (2020): 3271-3281. DOI: [10.1109/TPWRS.2020.3041774](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3041774)
- [7] ČEPS. Kodex I. - Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy [online]. [2022]. Dostupné z: <https://ceps.cz/cs/kodex-ps> [cit. 2025-08-30].
- [8] Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C. and Van Cutsem, T., 2004. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE transactions on Power Systems*, 19(3), pp.1387-1401. DOI: [10.1109/TPWRS.2004.825981](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825981)
- [9] Petr, Plachý. "Možnosti využití virtuální setrvačnosti pro stabilitu elektrizační soustavy." Master's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum., 2024. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/114975> [cit. 2025-08-30]
- [10] Fernández-Guillamón, Ana, Emilio Gómez-Lázaro, Eduard Muljadi, and Ángel Molina-García. "Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 115 (2019): 109369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109369>
- [11] What is Short Circuit Level?. [online]. [2020]. Dostupné z: <https://www.neso.energy/news/what-short-circuit-level>. [cit. 2025-08-21].
- [12] Uqaili, Muhammad Aslam, Anwar Ali Sahito, Irfan Ahmed Halepoto, Zubair Ahmed Memon, and Sada Bakhsh Dars. "Impact of distributed generation on network short circuit level." In *2014 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE)*, pp. 1-5. IEEE, 2014. DOI: [10.1109/VITAE.2014.6934455](https://doi.org/10.1109/VITAE.2014.6934455)

- [13] Matevosyan, Julia, Babak Badrzadeh, Thibault Prevost, Eckard Quitmann, Deepak Ramasubramanian, Helge Urdal, Sebastian Achilles et al. "Grid forming inverters: Are they the key for high renewable penetration?." *IEEE Power and Energy magazine* 17, no. 6 (2019): 89-98. DOI: [10.1109/MPE.2019.2933072](https://doi.org/10.1109/MPE.2019.2933072)
- [14] Rathnayake, Dayan B., Milad Akrami, Chitaranjan Phurailatpam, Si Phu Me, Sajjad Hadavi, Gamini Jayasinghe, Sasan Zabihi, and Behrooz Bahrani. "Grid forming inverter modeling, control, and applications." *Ieee Access* 9 (2021): 114781-114807. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3104617](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104617)
- [15] Anderson, Paul M., Basant L. Agrawal, and James E. Van Ness. *Subsynchronous resonance in power systems*. John Wiley & Sons, 1999.
- [16] Bongini, Lorenzo, and Rosa Anna Mastromauro. "Sub-synchronous torsional interactions and start-up issues in Oil&Gas Plants: A real case study." In *2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, pp. 1-6. IEEE, 2019. DOI: [10.23919/AEIT.2019.8893396](https://doi.org/10.23919/AEIT.2019.8893396)
- [17] Crotti, Gabriella, Giovanni D'Avanzo, Palma Sara Letizia, and Mario Luiso. "Measuring harmonics with inductive voltage transformers in presence of subharmonics." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021): 1-13. DOI: [10.1109/TIM.2021.3111995](https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3111995)
- [18] *Network Code on Cybersecurity*. Online. Dostupné z: [https://www.entsoe.eu/network\\_codes/nccs/](https://www.entsoe.eu/network_codes/nccs/). [cit. 2025-08-30].
- [19] Mirafzal, Behrooz, and Aswad Adib. "On grid-interactive smart inverters: Features and advancements." *IEEE Access* 8 (2020): 160526-160536. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3020965](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3020965)
- [20] Khajehoddin, Sayed Ali, Masoud Karimi-Ghartemani, and Mohammad Ebrahimi. "Grid-supporting inverters with improved dynamics." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66, no. 5 (2018): 3655-3667. DOI: [10.1109/TIE.2018.2850002](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2850002)
- [21] Vandoorn, T. L., J. D. M. De Kooning, Bart Meersman, and Lieven Vandeveldel. "Review of primary control strategies for islanded microgrids with power-electronic interfaces." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 (2013): 613-628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.062>
- [22] Liu, Jia, Yushi Miura, Hassan Bevrani, and Toshifumi Ise. "Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids." *IEEE Transactions on Smart Grid* 8, no. 5 (2016): 2268-2277. DOI: [10.1109/TSG.2016.2521405](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2521405)
- [23] Tayyebi, A., D. Groß, A. Anta, F. Kupzog, and F. Dörfler. "Interactions of grid forming power converters and synchronous machines—A comparative study. arXiv 2019." *arXiv preprint arXiv:1902.10750*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.10750>
- [24] Tayyebi, Ali, Dominic Groß, Adolfo Anta, Friederich Kupzog, and Florian Dörfler. "Frequency stability of synchronous machines and grid forming power converters." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 8, no. 2 (2020): 1004-1018. DOI: [10.1109/JESTPE.2020.2966524](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2966524)
- [25] A. Jain, J. N. Sakamuri, and N. A. Cutululis, "Grid forming control strategies for black start by offshore wind power plants," *Wind Energy Sci.*, vol. 5, no. 4, pp. 1297–1313, Oct. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/wes-5-1297-2020>

- [26] A. Jain, O. Saborío-Romano, J. N. Sakamuri, and N. A. Cutululis, "Blackstart from HVDC-connected offshore wind: Hard versus softenergization," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 15, no. 1, pp. 127–138, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12010>
- [27] A. W. Korai, E. Rakhshani, M. E. Adabi, J. L. R. Torres, and M. A. van der Meijden, "Modelling and simulation of wind turbines with grid forming direct voltage control and black-start capability," in *Modelling and Simulation of Power Electronic Converter Dominated Power Systems in PowerFactory*. Cham, Switzerland: Springer, 2020, pp. 245–268. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-54124-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-54124-8_16)
- [28] Guidelines on Technology Readiness Level (TRL) used for ENTSO-E Technopedia. Online. Roč. 2025. Dostupné z: [https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/technopedia/ENTSO-E\\_Technopedia-Guidelines\\_on\\_Technology\\_Readiness\\_Level\\_%28TRL%29.pdf](https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/technopedia/ENTSO-E_Technopedia-Guidelines_on_Technology_Readiness_Level_%28TRL%29.pdf). [cit. 2025-08-29].
- [29] Ravanji, Mohammad Hasan, Weihua Zhou, Nabil Mohammed, and Behrooz Bahrani. "Comparative analysis of the power output capabilities of grid-following and grid-forming inverters considering static, dynamic, and thermal limitations." *IEEE Transactions on Power Systems* 39, no. 2 (2023): 2693-2705. DOI: [10.1109/TPWRS.2023.3279373](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3279373)
- [30] Markovic, Uros, Ognjen Stanojev, Petros Aristidou, Evangelos Vrettos, Duncan Callaway, and Gabriela Hug. "Understanding small-signal stability of low-inertia systems." *IEEE Transactions on Power Systems* 36, no. 5 (2021): 3997-4017. DOI: [10.1109/TPWRS.2021.3061434](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3061434)
- [31] Crivellaro, Alessandro, Ali Tayyebi, Catalin Gavriluta, Dominic Groß, Adolfo Anta, Friederich Kupzog, and Florian Dörfler. "Beyond low-inertia systems: Massive integration of grid forming power converters in transmission grids." In *2020 IEEE power & energy society general meeting (PESGM)*, pp. 1-5. IEEE, 2020. DOI: [10.1109/PESGM41954.2020.9282031](https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9282031)
- [32] Green, Timothy C., and M. Prodanović. "Control of inverter-based micro-grids." *Electric power systems research* 77, no. 9 (2007): 1204-1213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.08.017>
- [33] Brucoli, Maria. Fault behaviour and fault detection in islanded inverter-only microgrids. Imperial College London (University of London), 2008.
- [34] Plet, Cornelis A., and Timothy C. Green. "A method of voltage limiting and distortion avoidance for islanded inverter-fed networks under fault." In *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-8. IEEE, 2011. ISBN: 978-90-75815-14-6
- [35] Oureilidis, Konstantinos O., and Charis S. Demoulias. "A fault clearing method in converter-dominated microgrids with conventional protection means." *IEEE Transactions on Power Electronics* 31, no. 6 (2015): 4628-4640. DOI: [10.1109/TPEL.2015.2476702](https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2476702)
- [36] Gkountaras, Aris, Sibylle Dieckerhoff, and Tevfik Sezi. "Evaluation of current limiting methods for grid forming inverters in medium voltage microgrids." In *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1223-1230. IEEE, 2015. DOI: [10.1109/ECCE.2015.7309831](https://doi.org/10.1109/ECCE.2015.7309831)
- [37] Huang, Linbin, Huanhai Xin, Zhen Wang, Leiqi Zhang, Kuayu Wu, and Jiabing Hu. "Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters

- considering current limitation." *IEEE Transactions on Smart Grid* 10, no. 1 (2017): 578-591. DOI: [10.1109/TSG.2017.2749259](https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2749259)
- [38] Zarei, Seyed Fariborz, Hossein Mokhtari, Mohammad Amin Ghasemi, and Frede Blaabjerg. "Reinforcing fault ride through capability of grid forming voltage source converters using an enhanced voltage control scheme." *IEEE Transactions on Power Delivery* 34, no. 5 (2018): 1827-1842. DOI: [10.1109/TPWRD.2018.2844082](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2844082)
- [39] Welck, Friedrich, D. Duckwitz, and C. Gloeckler. "Influence of virtual impedance on short circuit performance of virtual synchronous machines in the 9-bus system." In *NEIS 2017; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*, pp. 1-7. VDE, 2017. ISBN: 978-3-8007-4445-9
- [40] Denis, Guillaume, Thibault Prevost, Marie-Sophie Debry, Florent Xavier, Xavier Guillaud, and Andreas Menze. "The Migrate project: the challenges of operating a transmission grid with only inverter-based generation. A grid-forming control improvement with transient current-limiting control." *IET Renewable Power Generation* 12, no. 5 (2018): 523-529. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0369>
- [41] Pan, Donghua, Xiongfei Wang, Fangcheng Liu, and Rongliang Shi. "Transient stability of voltage-source converters with grid forming control: A design-oriented study." *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics* 8, no. 2 (2019): 1019-1033. DOI: [10.1109/JESTPE.2019.2946310](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2946310)
- [42] Wu, Heng, and Xiongfei Wang. "A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators." *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics* 8, no. 2 (2020): 1034-1049. DOI: [10.1109/JESTPE.2020.2976791](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.2976791)
- [43] Lasseter, Robert H., Zhe Chen, and Dinesh Pattabiraman. "Grid forming inverters: A critical asset for the power grid." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 8, no. 2 (2019): 925-935. DOI: [10.1109/JESTPE.2019.2959271](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2959271)
- [44] Roldán-Pérez, Javier, Alberto Rodríguez-Cabero, and Milan Prodanovic. "Design and analysis of virtual synchronous machines in inductive and resistive weak grids." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 34, no. 4 (2019): 1818-1828. DOI: [10.1109/TEC.2019.2930643](https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2930643)
- [45] Driesen, Johan, and Klaas Visscher. "Virtual synchronous generators." In 2008 IEEE power and energy society general meeting-conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, pp. 1-3. IEEE, 2008. DOI: [10.1109/PES.2008.4596800](https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596800)
- [46] Lu, Liang, and Nicolaos A. Cutululis. "Virtual synchronous machine control for wind turbines: a review." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1356, no. 1, p. 012028. IOP Publishing, 2019.
- [47] Wang, Shuo, Jiabing Hu, Xiaoming Yuan, and Li Sun. "On inertial dynamics of virtual-synchronous-controlled DFIG-based wind turbines." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 30, no. 4 (2015): 1691-1702. DOI: [10.1109/TEC.2015.2460262](https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2460262)
- [48] Lei, Yu, Wei He, Min Liao, Baozhi Zang, Jiabing Hu, and Yongning Chi. "Inertia characteristics analysis of DFIG-based wind turbines with virtual synchronous control in different operation areas." In *2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, pp. 2238-2244. IEEE, 2019. DOI: [10.1109/iSPEC48194.2019.8975015](https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975015)

- [49] X. Quan, R. Yu, X. Zhao, Y. Lei, T. Chen, C. Li, and A. Q. Huang, "Photovoltaic synchronous generator: Architecture and control strategy for a grid forming PV energy system," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 8, no. 2, pp. 936–948, Jun. 2020. DOI: [10.1109/JESTPE.2019.2953178](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953178)
- [50] J. Liu, D. Yang, W. Yao, R. Fang, H. Zhao, and B. Wang, "PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system," *Protection Control Modern Power Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, Dec. 2017.
- [51] S. Nogami, A. Yokoyama, T. Daibu, and Y. Hono, "Virtual synchronous generator model control of PV for improving transient stability and damping in a large-scale power system," *IEEE Trans. Power Energy*, vol. 138, no. 8, pp. 716–723, 2018. DOI: [10.1541/ieejpes.138.716](https://doi.org/10.1541/ieejpes.138.716)
- [52] GC0137: Minimum Specification Required for Provision of GB Grid Forming (GBGF) Capability (formerly Virtual Synchronous Machine/VSM Capability). Dostupné z: <https://www.neso.energy/industry-information/codes/gc/modifications/gc0137-minimum-specification-required-provision-gb-grid-forming-gbgf-capability-formerly-virtual-synchronous-machinevsm-capability>
- [53] The Grid Code. Online. Dostupné z: <https://www.neso.energy/industry-information/codes/grid-code-gc/grid-code-documents> [cit. 2025-08-14]
- [54] Stability Pathfinder. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.neso.energy/industry-information/balancing-services/network-services/stability-network-services>. [cit. 2025-08-14].
- [55] Long-term 2029 Tender. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.neso.energy/industry-information/balancing-services/stability-market/long-term-2029-tender>. [cit. 2025-08-20].
- [56] Stability Technical Requirements and Specification. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.neso.energy/document/357771/download>. [cit. 2025-08-16].
- [57] Voltage Technical Requirements and Specification. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.neso.energy/document/357781/download>. [cit. 2025-08-16].
- [58] Restoration Technical Requirements and Specification. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.neso.energy/document/357791/download>. [cit. 2025-08-16].
- [59] White Paper: Grid Forming Functional Specifications for BPS-Connected Battery Energy Storage Systems. Online. 2023. Dostupné z: [https://www.nerc.com/comm/RSTC Reliability Guidelines/White Paper GFM Functional Specification.pdf](https://www.nerc.com/comm/RSTC%20Reliability%20Guidelines/White%20Paper%20GFM%20Functional%20Specification.pdf). [cit. 2025-08-14].
- [60] GBGF Best Practice Guide. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/681971716/GBGF-Best-Practice-Guide-April-2023>. [cit. 2025-08-14].
- [61] Kong, Dechao, Antony Johnson, and Xiaoyao Zhou. "Best Practice: Grid-Forming Converter Technological Development in Great Britain." *IEEE Power and Energy Magazine* 23, no. 2 (2025): 20–29. DOI: [10.1109/MPE.2024.3442770](https://doi.org/10.1109/MPE.2024.3442770)
- [62] Specific Study Requirements for Grid Energy Storage Systems. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon->

- [liittaminen-kantaverkkoon/specific-study-requirements-for-grid-energy-storage-systems-en.pdf](#). [cit. 2025-08-14].
- [63] Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators Available online: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/631/oj> [cit.2025-09-28].
- [64] ACER proposes amendments to the electricity grid connection network codes. Online. Dostupné z: <https://www.acer.europa.eu/news/acer-proposes-amendments-electricity-grid-connection-network-codes>. [cit. 2025-08-14].
- [65] Summary of GFM capability & Performance Requirements Driven by System Needs. Available online: <https://globalpst.org/wp-content/uploads/202405GFM-draft.pdf> [cit. 2025-09-29].
- [66] GRID FORMING CAPABILITY OF POWER PARK MODULES. Online. 2024. Dostupné z: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/SOC/20240503\\_First\\_interim\\_report\\_in\\_technical\\_requirements.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/SOC/20240503_First_interim_report_in_technical_requirements.pdf). [cit. 2025-08-14].
- [67] Grid-Forming Capabilities: Towards System Level Integration. Dostupné z: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/RDC%20documents/210331\\_Grid%20Forming%20Capabilities.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/RDC%20documents/210331_Grid%20Forming%20Capabilities.pdf) [cit. 2025-08-14].
- [68] ČEPS. Kodex II. - Podpůrné služby [online]. [vid. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://ceps.cz/cs/kodex-ps> [cit. 2025-08-16].
- [69] Rebours, Yann G., Daniel S. Kirschen, Marc Trotignon, and Sbastien Rossignol. "A survey of frequency and voltage control ancillary services—Part II: Economic features." *IEEE Transactions on power systems* 22, no. 1 (2007): 358-366. DOI: [10.1109/TPWRS.2006.888965](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888965)
- [70] Kirschen, Daniel S., and Goran Strbac. *Fundamentals of power system economics*. John Wiley & Sons, 2018.
- [71] ENTSO-E WGAS. Survey on Ancillary Services Procurement, Balancing Market Design 2017. Available online: [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Market%20Committee%20publications/WGAS\\_Survey\\_final\\_10.03.2017.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Market%20Committee%20publications/WGAS_Survey_final_10.03.2017.pdf) [cit. 2025-08-17].
- [72] Commission Regulation (EU). Commission Regulation (EU) 2016/1388 of 17 August 2016 Establishing a Network Code on Demand Connection. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R1388&from=EN> [cit. 2025-08-18].
- [73] Regulation (EU). Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 Establishing a Network Code on Requirements for Grid Connection of Generators; Commission. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN> [cit. 2025-08-18].
- [74] Vagropoulos, Stylianos I., Pandelis N. Biskas, and Anastasios G. Bakirtzis. "Market-based TSO-DSO coordination for enhanced flexibility services provision." *Electric Power Systems Research* 208 (2022): 107883.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107883>

- [75] Dronne, Theo, Fabien Roques, and Marcelo Saguan. "Local flexibility markets for distribution network congestion-management in center-western Europe: which design for which needs?." *Energies* 14, no. 14 (2021): 4113. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144113>
- [76] Ramos, Ariana, Cedric De Jonghe, Virginia Gómez, and Ronnie Belmans. "Realizing the smart grid's potential: Defining local markets for flexibility." *Utilities Policy* 40 (2016): 26-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.03.006>
- [77] Energy Systems Integration Group, The Transition to a High-DER Electricity System: Creating a National Initiative on DER Integration for the United States. a Report of the Distributed Energy Resources Task Force, <https://www.esig.energy/wp-content/uploads/2022/08/ESIG-DER-integration-US-initiative-report-2022.pdf> [cit. 2025-08-22].
- [78] Lowitzsch, Jens, Christina E. Hoicka, and Felicia J. van Tulder. "Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package–Governance model for the energy clusters of the future?." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 122 (2020): 109489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109489>
- [79] Birk, Michael, José Pablo Chaves-Ávila, Tomás Gómez, and Richard Tabors. "TSO/DSO coordination in a context of distributed energy resource penetration." *Proceedings of the EEIC, MIT energy initiative reports, Cambridge, MA, USA* (2017): 2-3.
- [80] Gulotta, Francesco, Edoardo Dacco, Alessandro Bosisio, and Davide Falabretti. "Opening of ancillary service markets to distributed energy resources: A review." *Energies* 16, no. 6 (2023): 2814. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062814>
- [81] Fernández-Muñoz, Daniel, Juan I. Pérez-Díaz, Ignacio Guisández, Manuel Chazarra, and Álvaro Fernández-Espina. "Fast frequency control ancillary services: An international review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120 (2020): 109662. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109662>
- [82] Europe, Smart Energy. "The smartEn Map." *European Balancing Markets Edition* (2018).
- [83] Henriot, Arthur, and Jean-Michel Glachant. "Melting-pots and salad bowls: The current debate on electricity market design for integration of intermittent RES." *Utilities Policy* 27 (2013): 57-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2013.09.001>
- [84] Baritaud, Manuel. "Securing power during the transition." *Generation investment and operation, IEA (International Energy Agency)* (2012): 47.
- [85] Borne, Olivier, Klaas Korte, Yannick Perez, Marc Petit, and Alexandra Purkus. "Barriers to entry in frequency-regulation services markets: Review of the status quo and options for improvements." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018): 605-614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.052>
- [86] Barbero, Mattia, Cristina Corchero, Lluc Canals Casals, Lucia Igualada, and F-Javier Heredia. "Critical evaluation of European balancing markets to enable the participation of Demand Aggregators." *Applied energy* 264 (2020): 114707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114707>
- [87] Liu, Jinqi, Jihong Wang, and Joel Cardinal. "Evolution and reform of UK electricity market." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112317>

- [88] NationalGridESO Firm Frequency Response (FFR). Available online: <https://www.nationalgrideso.com/industry-information/balancing-services/frequency-response-services/firm-frequency-response-ffr> [cit. 2025-08-25].
- [89] Urdal, H., R. Ierna and A.J. Roscoe (2018), "Stability challenges & solutions for power systems operating close to 100% penetration of power electronic interfaced power sources: Exchange of experience between hybrid and major power systems", University of Strathclyde, Glasgow.

## Seznam obrázků

Obr. 0.1 Schematicky znázorněná transformace elektrizačních soustav [1] .....	7
Obr. 1.1 Typické frekvenční rozsahy subharmonických výkonových oscilací dle různých příčin [17]. .....	12
Obr. 2.1 Dělení a základní charakteristiky GFLI a GFMI [14].....	14
Obr. 3.1 Příklad blokového diagramu vyžadovaného NESO [53].....	21
Obr. 3.2 Doporučená testovací soustava [64].....	26
Obr. 3.3 Principiální schéma konceptu s agregátorem [78].....	30
Obr. 3.4 Schematické zobrazení stávajícího a nového stavu PpS .....	32

