



Fakulta elektrotechnická Research and Innovation Centre for Electrical Engineering

Zhodnocení současného stavu, aplikačního a výzkumného potenciálu systémů WAMS

Pracoviště:	KEE
Číslo dokumentu:	22190-019-2023
Typ zprávy:	Výzkumná zpráva
Řešitelé:	doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D., doc. Ing. Miloslava
	Tesařová, Ph.D., Ing. Mikhail Olkhovskiy, Ing. Lenka
	Raková, Ph.D., doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.,
	doc. Ing. Pavla Hejtmánková, Ph.D., Ing. et Ing. Martin
	Vinš, doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.
Vedoucí projektu:	doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
Počet stran:	95
Datum vydání:	15. 11. 2023
Oborové zařazení:	2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:

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

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni Research and Innovation Centre for Electrical Engineering Univerzitní 8 306 14 Plzeň **Kontaktní osoba:** doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D. tel. 37763 4343 nohac@fel.zcu.cz

Tato zpráva vznikla s podporou projektu TAČR NCK TN02000025 NCE II pracovního balíčku "Nové analytické nástroje pro využití dat z WAMS"

soubor: Reserze_WAMS-23-11-14.docx

RICE-S-01-2017-P02

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá mapováním současného stavu, aplikačního a výzkumného potenciálu systémů WAMS pro přesná synchronizovaná měření fázorů aktivních veličin v elektrizačních, zejména přenosových soustavách. Důležité hledisko je inovativnost metodických postupů a potenciální využitelnost u aplikačního partnera projektu.

Klíčová slova

elektrotechnika, energetika, měření, stabilita, řízení, optimalizace, spolehlivost

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Assessment of the current status, application and research potential of WAMS systems

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with the mapping of the current status, application and research potential of WAMS systems for precise synchronous measurements of active parameter phasors in power systems, especially transmission systems. An important aspect is the innovativeness of the methodological approaches and the potential applicability at the project's application partner activity.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

electrical engineering, power engineering, measurement, stability, control, optimization, reliability

Seznam symbolů a zkratek

GPS	Global Position System
WAMS	Wide Area Measurement Systém
PMU	Phasor Measurement Unit
AI	Artificial Intelligence
ML	Machine Learning
DL	Deep Learning
РТ	Phase Shifting Transformer
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systém
TSA	Transient Stability Assessment
PRTSA	Pattern Recognition based TSA
MLE, LLE	Maximal, Largest Lyapunov exponent
WAMPAC	Wide Area Monitoring, Protection and Control
TFCR	Transferred Flow Characteristic Ratio
SOGL	System Operation Guideline
LFC	Load Frequency Control
UFLS	Under-frequency Load Shedding

Obsah

1	Ú	VOD		5
2	v	YMEZI	ENÍ SYSTÉMŮ WAMS	6
3	A	KTUÁL	ſUÁLNÍ APLIKAČNÍ A VÝZKUMNÉ SMĚRY SYSTÉMŮ WAMS	
3.1 CHRÁNĚNÍ A PORUCHY V ELEKTRICKÝCH SÍTÍCH		NĚNÍ A PORUCHY V ELEKTRICKÝCH SÍTÍCH	10	
	3.	1.1	Teoretické směry	10
	3.	1.2	Aplikačně využitelné směry	11
	3.	1.3	Využitelnost WAMS a MPU v oblasti chránění a vyhledávání poruch v elektrických sítích	11
	3.	1.4	Optimalizace odpínání zátěže	12
	3.	1.5	Omezení provozní nejistoty řady připojených zařízení FACT	13
	3.	1.6	Metody ochrany založené na PMU	13
	3.	1.7	PMU aplikační vrstvy [13, 27, 70, 98-100]	16
	3.	1.8	Nalezení a detekování chyby	17
	3.	1.9	Další možnosti rozvoje využitelnosti WAMS pro chránění	18
	3.2	Data	, JEJICH ZPRACOVÁNÍ A VALIDACE, KYBERNETICKÁ BEZPEČNOST	22
3.3 Alokace PMU		ACE PMU	22	
	3.4	Ident	IFIKACE PARAMETRŮ A TEPLOTY VEDENÍ	23
3.5 Stavová estimace (State Estimation)		DVÁ ESTIMACE (STATE ESTIMATION)	24	
	3.	5.1	Možnosti využití synchronních měření fázorů napětí a proudu z PMU	25
	3.	5.2	Metoda lineární estimace stavu - Linear State Estimation (LSE)	25
	3.	5.3	Metoda dynamické estimace stavu ES s využitím Kalmanova filtru	27
	3.6	Regu	lace U a Q a vyhodnocení toků Q	28
	3.	6.1	Možnosti regulace napětí v ES	28
	3.	6.2	Možnosti regulace napětí v ES pomocí WAMS	32
3.7 VÝPOČET ZTRÁT A JEJICH ALOKACE V PS		ČET ZTRÁT A JEJICH ALOKACE V PS	40	
3.8 STABILITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY		LITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	41	
		8.1	Napěťová stabilita soustavy (Voltage Stability)	41
	3.	8.2	Setrvačnost soustavy (Inertia)	67
	3.	8.3	Statická úhlová stabilita soustavy	79
	3.	8.4	Dynamická úhlová stabilita soustavy	79
	3.	8.5	Detekce nízkofrekvenčních oscilací	86
	3.	8.6	Lokalizace centra oscilací v ES	86
		3.8.6.	1 Monitorování NF oscilací a určení jejich zdroje	87
		3.8.6.	2 Analýza tlumícího momentu sítě a Wide Area Damping Controller (WADC)	89
		3.8.6	3 Závěry a doporučení pro další práce kapitoly 3.8.6	91
	3.9	Nápr	avná opatření (Remedial Measures)	93

1 Úvod

Zařazení WAMS do Národního centra kompetencí II – Energetika (NCE-II)

ČEPS se v 1 čtvrtletí 2022 připojil do konsorcia v rámci výzkumného programu TAČR "Národní centrum kompetencí," a to do kapitol "Energetika" a "Kybernetická bezpečnost." V rámci energetických témat byly podány tři projekty, přičemž jedním z nich je "Dispečerské řízení v nových podmínkách – nové analytické nástroje pro využití dat z WAMS." Cílem projektu je v několika fázích postupně analyzovat nejnovější možnosti (state of the art) v oblasti technologie, architektury a nástrojů WAMS, vyhodnocení využitelnosti pro ČEPS, návrh konkrétních nástrojů a vytvoření sady prototypů.

Záměr příslušného balíčku projektu NCE-2

V rámci rozšíření portfolia analytických funkcí bychom chtěli prozkoumat možnosti využití dat z WAMS a prototypovat vybrané analytické nástroje.

Výstupem aktivity bude:

1) Analýza aktuálního stavu v oblasti technologie měření a architektury WAMS

2) Analýza současného stavu (state of the art) v oblasti analytických podpůrných nástrojů pro hodnocení bezpečnosti či detekci anomálií, které využívají data z WAMS

3) Hodnocení využitelnosti analytických nástrojů v prostředí ČEPS

4) Blueprint dokument vybraných nástrojů, který bude obsahovat

- a. Business zadání problému a jeho využití v ČEPS
- b. Popis vstupních a výstupních dat
- c. Reference na využití metody a stupeň pokročilosti (TRL)
- d. Matematickou reprezentaci
- e. Požadavky na vstupní data pro experimenty

5) Sada prototypů vybraných analytických nástrojů v jazyce Python, analytický design (v jazyce UML/BPMN/Archimate), dokumentace řešení

6) Ověření prototypů na vybraném vzorku dat

2 Vymezení systémů WAMS

Wide Area Monitoring System (WAMS) je pokročilý systém pro monitorování elektroenergetických sítí, který umožňuje sledování a sběr dat z rozsáhlého území ES. Hlavním přínosem je synchronní měření fázorů napětí a proudu s výrazně vysokou četností a přesností měření a přesným časovým přiřazením dat událostí, které jsou vstupem pro analytické funkce systému WAMS. Díky tomu lze zvýšit přesnost estimací a analyzovat dynamické jevy v soustavě. Systémy WAMS umožňují získávat (i průběžné) komplexní a detailní informace o chování sítě v reálném čase a při historické analýze. WAMS tak hraje významnou roli jak ve zpětné analýze vzniklých situací, tak v operativě, tj. dispečerském řízení.

Systémy WAMS (Wide Area Monitoring System) se skládají z jednotek měření fázorů (PMU - Phasor Measurement Units), datových koncentrátorů (PDC - Phasor Data Concentrator), centrálního serveru a aplikačního softwaru. Správné umístění PMU zajišťuje, že systém je schopen monitorovat a zaznamenávat klíčové parametry v celé síti bez slepých míst. To je zásadní pro získání komplexních informací o chování sítě a důležitým předpokladem pro následné rychlé reakce na vznikající problémy.

WAM (Wide Area Measurement) lze využít nejen pro pokročilý monitoring soustavy, ale i pro účely řízení a chránění soustavy:

- systémy WACS (Wide Area Control System) pro automatické akční zásahy
- systémy WAPS (Wide Area Protection System): adaptivní systémy chránění



WAMS nalézají uplatnění nejen v přenosových sítích, ale jejich aplikační potenciál se přesouvá do sítí distribučních, dokonce v souvislost se Smart Grids i do sítí nn.

Analytické funkce centrály WAMS ČEPS jsou následující:

- detekce a monitoring ostrovních provozů;
- monitoring fázorových úhlů U a dalších veličin;
- detekce a analýza oscilací výkonu a kmitočtu;

- monitorování stability napětí;
- monitorování úhlové stability;
- detekce snížení rezervy statické stability;
- podpora ex-post analýz.

Využití WAMS v SDŘS TRIS pro účely dispečerského řízení:

• detekce a monitoring ostrovních provozů mimo sledovanou oblast ČEPS (u PPS, s nimiž má dohodu o spolupráci a výměnu měření);

- hybridní stavová estimace;
- zpřesnění výpočtu ztrát PS;
- signalizace detekce oscilací;
- signalizace detekce narušení napěťové stability.

Další užití:

- ex-post analýzy mimořádných událostí;
- validace výpočetních modelů (DTS, DSA, MODES, ...);
- hodnocení funkce LFC (SIDS).

Očekávání ČEPS od rozšíření WAMS (v rámci ČEPS i mezinárodně):

• Rozšíření datové výměny mezi evropskými PPS

o Přínosy WAMS jsou významnější, pokud systém pokrývá větší rozsah propojených soustav.

o Data z více PMU by přinesla možnost nadstavbových funkcí (např. nástroje analýzy elektrizační soustavy s využitím umělé inteligence / machine learning nebo heuristiky).

o Potenciální rozvoj detekce poruchových stavů, což umožní včasnou reakci dispečerů (v tuto chvíli se nepoužívá).

o Možnost využití dat z WAMS pro návrhy optimálních opatření.

- Hlubší integrace do dispečerského řízení.
- Zvýšení informovanosti o provozní situaci v soustavě.

• Posílení analýzy poruch a jiných událostí v evropské soustavě s možností přesnějšího určení počátku, průběhu a příčiny poruchy.

• Možnost využití dat z WAMS pro včasnou identifikaci potenciálních krizových provozních stavů.

• Centrálně zpracované výstupy systémů WAMS rozšíří funkčnost stávajících evropských systémů včasného varování – detekce nebezpečných ustálených i dynamických nestabilních stavů a včasná reakce na ně (riziko: PPS se obecně mají tendenci bránit centralizaci).

• Možnost využití dat z WAMS při analýze dopadu připojování nových technologií na elektrizační soustavu.

• Možnost dalšího využití dat z WAMS při analýze poruchových dějů a jejich dopadu na zákazníky připojené k elektrizační soustavě (již jsou příklady využití v minulosti).

• Do budoucna možnost doplnění o příslušné reagující prostředky automatického řízení WAMS → WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection and Control), což zajistí velmi rychlé reakce řídicího systému na nebezpečné dynamické jevy.

3 Aktuální aplikační a výzkumné směry systémů WAMS

V rámci využití technologie WAMS v kontextu výzev moderní energetiky a disciplíny big data je <u>obecně</u> vhodné řešit následující témata:

- Real-time monitorování a rozhodovací vstupy pro řízení elektrizační soustavy. Je nutné zkontrolovat a případně navrhnout obecně aplikovatelné principy v kontextu s dostupným výpočetním výkonem pro možnost kombinace big data a real-time simulací.
- Integrace obnovitelných zdrojů vzhledem k výzvám české převážně fosilní energetiky a integrace OZE je vhodné vyvíjet analytické modely, které jednak simulují aktuální dopad OZE na síť při využití meteorologických a historických hodnot, ale také mapují potenciál další výstavby v jednotlivých částech sítě.
- Detekce anomálií a jejich potlačení v rámci této disciplíny je zapotřebí umět detekovat včas anomálie, ale také využít moderních metod AI/ML pro detekci předcházejících stavů. Některé anomálie se vlivem změny konfigurace sítě mohou měnit a z lidského pohledu je jejich detekce náročná.
- Orchestrace dat a dostupnost pro rozhodování zavést kontinuální proces orchestrace a prioritizace dat, která se používají při denních rozhodnutích řízení elektrizační soustavy. Jelikož se konfigurace, ale i výzvy energetiky mění, je nutné toto téma řešit kontinuálně.
- Kybernetická bezpečnost rozdělení dat dle citlivosti při dopadu úniku nebo zneužití dat
- Využití moderních analytických metod pro práci s daty v tomto případě je to kombinované téma, které cílí na využití moderních metod AI/ML – aktuálně například využití nerunových sítí při sběru, kontrole, analýze, simulaci a vyhodnocení dat. Moderní analytické metody nabízejí široké spektrum možností ve všech výše zmíněných disciplínách od citlivostní analýzy relevantních vstupních dat až po optimalizaci výpočetního výkonu při rozsáhlých simulačních modelech.

3.1 Chránění a poruchy v elektrických sítích

Tato oblast využívá v současnosti možnosti provádění měření napětí a proudů z PMU pro následné vyhodnocení a sledování stavu systému v jeho provozu. Vzniklé anomálie mohou upozornit na nestandardní stav, identifikovat poruchu, pomoci při nastavení režimu systému ochran. Postřehy využitelnosti lze rozdělit na oblast teoretickou a aplikační

3.1.1 Teoretické směry

- 1) Vylepšení spolehlivosti el. ohran Teoret. studie bez aplikač. výstupu (článek 2)
 - Zdroj: Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke "Power System Relaying"
- Návrh centralizovaného algoritmu multifunkční ochrany vedení Emulace PMU v Matlabu - Zpracování hodnot úhlu napětí – použito pro simulaci a model chorvatské sítě 400 kV (článek 104)
 - Zdroj: Igor Ivankovic, Igor Kuzle, Ninoslav Holjevac "Wide Area Information-Based Transmission System Centralized Out-of-Step Protection Scheme" (2017).
- 3) Výkonové toky a přetížení vedení (článek 17) Algoritmus a simulační ověření pro aplikaci. Využití informace WAMS (měření fáze) pro aplikaci TFCR jako identifikačního kritéria algoritmu - TFCR odvozeno prostřednictvím simulací zkratů – ověřeno v PSCAD – doporučeno
 - Zdroj: Xu Yan, Han Ping, and Zhang Li "A Novel Algorithm for Power Flow Transferring Identification Based on WAMS"
- 4) Lokalizace poruch v síti:
 - a) (článek 58) Lokalizace 1f a 3f zkratů pří různých délkách vedení porovnáním naměřených U a I v uzlech sítě s předem vypočtenými uloženými v databázi.
 Zobrazeno pouze schéma algoritmu, bez matematické definice. – simulace v programu Neplan - výhodou je přesnější určení místa poruchy (do 1/3 celkové délky vedení)
 - Zdroj: Z. Čonka, V. Kohan, M. Kolcun, J. Pálfi, I. J. Rudas "Fault localization method using WAM systems", r.2020
 - b) (článek 76) Analýza základních komponent soustavy jako metoda pro lokalizování poruchy prostřednictvím proudového a napěťového fázoru získaného z PMU -Simulačně ověřeno na IEEE standardizovaných modelech v MATLABu - dle tvrzení je metoda značně odolná vůči šumům v měřených datech
 - Zdroj: Yagang ZHANG, Zengping WANG, Jinfang ZHANG "A Novel Fault Identification Using WAMS/PMU"
 - c) (článek 91) Identifikace poruchy, řízení systému ochran Na základě vyhodnocení fázoru napětí je lokalizována porucha - Simulace poruch pro devíti uzlový systém se 3 zdroji v software MATLAB-Simulink
 - Zdroj: S. Roy and Dr. P.S. Babu "An Advanced Fault Locating Technique with WAMS based Backup Protection Scheme for Power System with Simultaneous Faults", r. 2016
 - d) (článek 74,61) Analýza fázorových dat pro řízení ES, rozpoznání poruch pouze obecné přiblížení technologie WAMS pro monitorování poruch v síti

- Zdroj: LU Jinjun, SHAN Xin "WAMS Based Power Grid Disturbance Recognition and System Response Assessment".
- e) (článek 74,60) Identifikace síťových poruch a posouzení odezvy zařízení Navržení rámce pro online monitorování, analýzu, vyhodnocení poruch, jakož i posouzení odezvy síťových zařízení (pro odstraňování, nebo zmírňování poruch) - Žádné testování na datech, ani modely; poskytuje pouze teoretický rámec pro diskutovanou aplikaci
- Zdroj: LU Jinjun, SHAN Xin "WAMS Based Power Grid Disturbance Recognition and System Response Assessment"
- •

3.1.2 Aplikačně využitelné směry

- Inovativní distanční ochrana: Dle informace WAMS se vytvoří model soustavy (následné matematické úpravy s použitím lineárního řešiče) - Eliminuje nulovou složku vzájemné indukčnosti, vzdálenost poruchy dle článku počítá přesněji a s větší tolerancí k poruchovému odporu (článek 36)
 - Zdroj: Liu Lin, Kang Xiaoning, Wang Qi, Jiao Zaibin "A Novel WAMS-Based Distance Protection Scheme for Parallel Transmission Lines"
- 2) Lokalizace poruch v síti:
 - a) Metoda Postup nalezení poruchy v síti s využitím WAMS, který by mohl sloužit jako pomůcka pro operátora - Simulačně prezentováno na třech případech v programu Neplan (článek 63)
 - Zdroj: Zsolt Čonka, Vladimir Kohan, Michal Kolcun, Pálfi Judith, Imre J. Rudas "Fault localization method using WAM systems"
 - b) Lokalizace Praktický článek popisující laboratorní měření s PMU (třídy M) konfigurovaným podle IEEE standardů (síť je zastoupena modelem) - a následnou aplikací vyhodnocovacího algoritmu (článek 70).
 - Zdroj: Andrey Yablokov, Igor Ivanov, Filipp Kulikov, Andrey Zhukov, Dmitriy Dubinin, Andrey Tychkin, Anton Panaschatenko "Synchrophasor-based Fault Location with Class M Fault Capture and Built-in Line Parameter Estimation"

3.1.3 Využitelnost WAMS a MPU v oblasti chránění a vyhledávání poruch v elektrických sítích

V současnosti jsou v trendu nově vznikající koncepce inteligentních sítí a mikrosítí, které jsou zapojeny do konvenční sítě energetického systému. (začleněním různých obnovitelných zdrojů energie a nelineárních zařízení na bázi střídačů přináší s sebou problémy ve formě např. častých výpadků napájení). Zavedení PMU v moderních energetických systémech mohou mít zásadní význam pro monitorování a řízení energetických systémů, které zahrnují zdroje založené na střídačích, což má význam zejména pro regiony s vysokou penetrací zdrojů a přináší podstatné zlepšení a přínosná řešení, především problémů a výzev v oblasti ochrany soustavy i z hlediska výzev a řešení perspektivního vývoje klimatu.

Podle návrhu v [1] budoucnost synchro-fázorových sítí spočívá ve využití normy IEC 61850-90-5. pro efektivní komunikaci mezi všemi součástmi sítě, která nahradí současnou normu IEEE C37.118.2. Kromě toho lze dosáhnout rychlé reléové komunikace pomocí normy

IEC 61850. Tento přístup umožňuje pozdější přezkoumání dalších údajů a zároveň zajišťuje rychlou a spolehlivou komunikaci mezi všemi komponentami sítě.

V současné době jsou energetické soustavy provozovány blíže k mezím stability a to zejména kvůli deregulaci trhů s elektřinou a nárůstu poptávky po elektrické energii. Nicméně v důsledku významných poruch, jako jsou výpadky generátorů nebo přenosové poruchy na vedení [32], může v konečném důsledku způsobit následující nevyváženost činného a jalového výkonu značné současné kolísání napětí a frekvence spolu s nestabilitou. V důsledku toho existuje větší pravděpodobnost, že by se díky tomu celá soustava mohla zhroutit [33]. Možným řešením je odepnutí zátěže

3.1.4 Optimalizace odpínání zátěže

Technika se dělí do dvou hlavních kategorií na základě cílů a měření; patří mezi ně odpojování zátěže pod frekvencí (UFLS) a odpojování zátěže pod napětím (UVLS) [35]. V minulosti se používaly různé způsoby snižování zatížení pod frekvencí (UFLS) a lze je obecně rozdělit na klasické, adaptivní, částečně adaptivní.

V klasických metodách UFLS používají relé lokálně měřenou frekvenci jako vstup a průběžně ji porovnávají s předem určenou frekvencí. Hlavními výhodami těchto systémů jsou jednoduchost, snadná obsluha a spolehlivost. Mohou však mít i nevýhody, jako je ošetření strmých a postupných frekvenčních nárůstů stejnou měrou, což může vést k nadměrnému nebo nedostatečnému vyřazení zátěže [38].

PMU jsou potenciálně účinným řešením pro zlepšení UFLS [39-41], shromažďují a přenášejí důležité informace o energetickém systému, jako je napětí, proud, frekvence a rychlost změny frekvence (ROCOF) pomocí IEEE C37.118.2 nebo IEC 61850-90-5 normy. Spolehlivost měření založených na PMU však může být ovlivněna např. přechodnými jevy. Řídicí schéma by proto mělo zohledňovat potenciální nejistotu měření [45,46]. V odkazu [47] byl navržen nový přístup, který řeší výše uvedené problémy. Tento přístup využívá synchronních fázorových údajů získaných z PMU k výpočtu absolutní hodnoty frekvence a ROCOF. Nový přístup využívá k výpočtu dvou sad kritérií ROCOF. zátěže, kterou je třeba odpojit, a iniciuje odpojení zátěže. Výsledkem tohoto přístupu je citlivější systém, který zvládne rychlou dynamiku v moderní energetické síti (MPN). Přijetí PMU však zlepšuje přesnost odhadu a míry monitorování, což nabízí efektivnější řešení pro UFLS v MPN. Kromě toho je v [48] navržena metoda, jak řešení chyb měření, výpadků komunikace a časových zpoždění. Výše uvedené faktory jsou zahrnuty do formulace problému, aby byly výsledky přesnější a odrážely reálné scénáře. A konečně, v [49] je navržen přístup, který bere v úvahu spojení napříč zatěžovacími sběrnicemi a je robustní vůči selhání PMU a komunikačnímu zpoždění a dále zlepšuje efektivitu řešení odběru. Nicméně výše uvedené metody nejsou vhodné pro dynamické podmínky v reálném čase a jsou otevřeným polem pro výzkum pro energetiky.

Lze tedy konstatovat např. pro dynamické a nelineární zatížení, že dynamika zatížení a nabíjení elektrických vozidel v distribučním sektoru může způsobit nestabilitu frekvence. Proto je nutné zohlednit informace i z WAPS [56]. (Překročení vzdálenosti reléových zón, vyvolaných tlakem abnormálních podmínek, může vést ke kaskádovému vypínání a výpadkům proudu. Využití informací z WAMS a předvídaných adaptivních reléových schémat mohou být lepším řešením pro zvládání takovýchto situací v budoucnu).

3.1.5 Omezení provozní nejistoty řady připojených zařízení FACT

Provozní nejistoty mají rozhodující vliv na dálkovou ochranu přenosových vedení. Flexibilní ochranná schémata založená na systému WAMS mohou být navržena tak, aby zvládala nejistoty spojené s distanční ochranou a získala řídicí parametry zařízení FACTS v krátkém časovém období [4].

V tomto je třeba dobře zvážit **optimální umístění PMU** (bez komplexního plánu pro plošnou ochranu, chybí optimální rozmístění PMU, které by zajistilo úplnou pozorovatelnost elektrizační soustavy. Správné umístění PMU je nezbytné pro detekci a prevenci různých typům nestabilit a nejistot v soustavě [57]). Dále potom **časová zpoždění** při výměně a přenosu informací v PMU mohou ovlivnit přesnost a účinnost WAPS. Je třeba přijmout vhodná opatření, aby bylo povedeno přesné a správné zvládání časových zpoždění prostřednictvím adaptivní identifikace v reálném čase. [57]

3.1.6 Metody ochrany založené na PMU

Synchronní fázorová měření způsobila revoluci v oblasti ochrany elektrizační soustavy tím, že poskytují vysoce přesné a časově synchronizované fázorové údaje. Tato data detekují a reagují na různé události v elektrizační soustavě, včetně poruch, stavů mimo provoz a výpadků a dalších abnormálních provozních podmínek. Vývoj sofistikovaných ochranných schémat, jako je adaptivní mimofázová ochrana (OSP), diferenciální ochrana a záložní ochrana, které se spoléhají na přesná a časově synchronizovaná data tak, aby bylo možné detekovat a reagovat na události a změny v elektrizační soustavě přispěly k možnému řešení. [3]. (Diferenciální ochrana je běžně používaným ochranným zařízením v elektrizačních soustavách. Chrání výkonové transformátory, generátory a další kritická zařízení před poškozením v důsledku poruch. Spočívá v měření rozdílu proudu tekoucího do a z napájení chráněné zóny. Když v zóně dojde k poruše, naruší se rovnováha proudu, diferenciální OSP chrání generátory energetické soustavy před poškozením v důsledku ztráty synchronizace a záložní ochrana se používá jako sekundární ochranný systém, který chrání před selháním zařízení nebo poruchou primární ochranné systémy).

Obecně se k ochraně přenosové soustavy používá primární a záložní ochrana vedení [63,64]. Konvenční záložní ochrana se provádí hlavně na základě nezávislého úsudku v návaznosti na místní údaje. Konvenční záložní ochrana navíc nemůže upravovat, na měnící se scénáře, zatížení a impedanci poruchy [65]. Výsledkem je, že symetrické poruchy nelze detekovat z jiných zatěžovacích stavů, včetně invaze zátěže, výkonových výkyvů a poruch generátorů [66]. Záložní ochrana navíc může pracovat nesprávně, což vede ke kaskádovým poruchám nebo k výpadkům [66,67].

Implementace fázorových měřicích jednotek (PMU) v energetických systémech se v poslední době všeobecně uznává. Informace o napětí a proudu jsou dodávány jednotkami PMU pomocí GPS. Výzkumníci navrhují celoplošné záložní ochrany (WABP), které využívají data shromážděná z různých míst v oblasti sítě k detekci poruch na přenosovém vedení. Jsou zdokumentovány tři významné kategorie - metody: První zahrnuje využití parametrů elektrických veličin, druhá zahrnuje WABP na základě informací o spínacím stavu ochranného relé zařízení a třetí kategorie kombinuje elektrické veličiny a jističe/ochranná relé. [1]



Princip WABP - WABP zahrnuje ochranné zařízení, které měří elektrické vlastnosti sítě a přenáší data do centra pro ochranu systému v regionu. Centrum pak vyhodnocuje data a rozhoduje, zda došlo k poruše. Pokud je porucha zjištěna, centrum vydá příkaz k odpojení příslušného vypínače, izolující část sítě s poruchou [1]. Je tedy možné sledovat 3 metody.

Metoda 1 - Schéma WABP založené na parametrech elektrických veličin [69-76]



Schéma širokoúhlé záložní ochrany (WABP) - Toto schéma využívá informace o elektrických parametrech, jako je hodnocení poruchového napětí, porovnání fázového a amplitudového proudu, srovnání směrového složeného napětí a proudu a kumulativní algoritmus porovnání impedance.

Realizace WABP - Tato schémata umožňují provádět širokoúhlou záložní ochranu bez modifikace běžné architektury záložní ochrany. Porovnáním variace elektrického množství mezi spočítanými a odhadovanými hodnotami k určitému prahu se podařilo úspěšně identifikovat vadnou linku.

Identifikace vadné přenosové linky - Vadná přenosová linka byla identifikována analýzou variací úhlů proudu pozitivní sekvence napříč všemi přenosovými linkami. Pro určení stanice nejbližší vadné lince se analyzovaly magnitudy pozitivní sekvence napětí (PSV) stanic a spočítala se absolutní odchylka úhlů proudu pozitivní sekvence (PSC) na obou koncích každé linky připojené ke stanici.

Alternativní techniky - K řešení omezení metody pro vysoké impedanční poruchy byly navrženy alternativní techniky. Například byl navržen unikátní algoritmus WABP pro identifikaci vadných větví na základě komponenty trvalého stavu. Další speciální algoritmus WABP byl navržen na základě distribuce napětí komponenty poruchy.

Řešení bez ohledu na systémové proměnné - Některé algoritmy WABP nepotřebují proměnné spojené s impedancí přenosové linky, ale pouze fázorová data napětí a proudu. Tyto algoritmy byly úspěšné.

Decentralizovaný přístup - Byl představen decentralizovaný způsob detekce a odstranění poruch na přenosových linkách v energetických systémech. Tento přístup využívá data o rychlosti otáček všech generátorů a magnitudy PSV k identifikaci zranitelné ochranné zóny a nejbližší stanice k poruše.

Širokoúhlá detekce a lokalizace poruch - Všechna tyto schémata mají omezení v počtu pozorování a potřebují relevantní data, jako je napětí a proudy na přenosových linkách. To může být nákladné a náročné při provádění v reálném čase v rozsáhlém regionu.

Nové schéma pro řešení těchto problémů - Bylo navrženo nové schéma WABP, které řeší problémy se širokoúhlou detekcí a lokalizací poruch, a to s omezeným počtem synchronizovaných PMU, což je ekonomicky efektivní řešení pro energetické systémy. Nicméně tato schémata vyžadují mnoho pozorování a dat, což může být nákladné a náročné při provádění v reálném čase v rozsáhlém regionu.

Metoda 2 - Schéma WABP založené na spínacím stavu ochranného relé [77-81]



Schéma záložní ochrany - Zakládá se na informacích o přepínání a aktualizacích a zahrnuje genetický algoritmus a algoritmus odolnosti vůči poruchám.

Inteligentní agenti - lze použít širokoúhlá data, jako jsou stavy a operace běžných ochranných relé, k detekci poruch prostřednictvím spolupráce inteligentních agentů.

Zjednodušení nastavení a prevence kaskádových výpadků - Schéma záložní ochrany, které se spoléhá na stavy primárních a pomocných ochranných relé a vypínačů k zjednodušení nastavení a prevenci kaskádových výpadků.

Komplexní schéma záložní ochrany - Schéma záložní ochrany, které zohledňuje vliv všech vzdálených relé v síti pomocí ochranné funkce.

Záložní ochrana založená na relé druhého a třetího stupně - Přístup k záložní ochraně, který spoléhá na stav relé druhého a třetího stupně, ale má omezení v rychlosti a datovém zácpě u koncentrátoru fázorových dat.

Hlavní nevýhoda těchto schémat - Hlavním nedostatkem těchto schémat je, že často potřebují informace o stavu vypínače, což by je mohlo v tu chvíli udělat nepraktickými a drahými.





Nové metody záložní ochrany přenosových linek - Tato studie představuje nové metody záložní ochrany přenosových linek, které využívají měření fázorových údajů. Tyto metody zahrnují širokoúhlou záložní ochranu (WABP) založenou na elektrických parametrech a stavu ochranných zařízení.

Implementace do dvou fází na určených stanicích - Navrhované metody se doporučují implementovat ve dvou fázích na předem stanovených stanicích. První fáze identifikuje poruchy a zatížené situace, zatímco druhá fáze odpojí vadnou linku od elektrického napájení.

Využití fázorového odhadu stavu - Reziduální vektor fázorového odhadu stavu k detekci poruch a zlepšení bezpečnosti stávajícího systému záložní ochrany.

WABP technika pro přenosové linky - WABP technika pro přenosové linky, která pracuje na základě synchronizovaných dat a akcí relé třetí zóny vzdálenosti. Tato technika vyžaduje méně synchronizovaných zařízení než jiné metody širokoúhlé ochrany.

Nová strategie WABP založená na detekci zařízení - Strategie WABP založená na detekci zařízení, která řeší problém selhání zařízení a efektivně lokalizuje poruchy.

Zlepšení bezpečnosti a spolehlivosti elektrických systémů: Výše uvedené metody představují inovativní přístupy ke zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti elektrických systémů pomocí záložní ochrany. Využívání širokoúhlých informací, synchronizovaných dat a techniky detekce zařízení přináší zásadní pokrok pro záložní ochranu, což je klíčové pro stabilitu a efektivitu elektrických systémů v moderním světě.

Omezení strategie: Hlavním omezením strategie může být omezení efektivity v případě komunikačních poruch nebo zpoždění.

3.1.7 PMU aplikační vrstvy [13, 27, 70, 98-100]

Správa elektrických systémů v reálném čase - Pro efektivní správu elektrických systémů je potřeba rychlé sběry a zpracování synchronizovaných dat. Měřící jednotky fázoru (PMU) s jejich schopností synchronizovaného měření a vysokofrekvenčního vzorkování hrají klíčovou roli při analýze složitých dynamických procesů elektrického systému.

Detekce abnormalit - Tato měření pomáhají detekovat neobvyklé situace v elektrickém systému a umožňují rychlé korekční akce pro nápravu problémů.

Důležitost fázorů napětí - I drobné změny fázorů napětí na různých stanicích v distribučním systému jsou důležité pro lepší kontrolu a ochranu elektrické sítě.

Výzkum v oblasti synchro-fázorových měření - V této oblasti probíhá rozsáhlý výzkum. Následující obrázek shrnuje aplikace měření fázorů napětí (synchro-fázorů) v přenosových a distribučních systémech, tedy všechny základní skupiny aplikací PMU



3.1.8 Nalezení a detekování chyby

Určení polohy poruchy v elektrické síti je klíčovým úkolem. Metody založené na PMU (Měřící jednotky fázoru) mohou sloužit k rozpoznání rozsáhlých výpadků elektřiny a rychlé identifikaci poruch. PMU poskytují reálné údaje o napětí, proudu a frekvenci v reálném čase, což umožňuje stále plnou pozorovatelnost elektrického systému a rychlou detekci poruch.

Pokud bychom chtěli sledovat např. model vadné stanice, je toto možné vyjádřit procentem pozitivního fázoru napětí před a po poruše na stanici PSVnaf. Tento model pomáhá identifikovat poruchu, viz. následující vztah:

"Percentage of Positive sequence voltage (PSVn)"

$$(PSVn) = \left| \frac{PSV_{nbf} - PSV_{naf}}{PSV_{nbf}} \right| \times 100$$

kde n = číslo zařízení; PSVnbf = sekvence kladného napětí (před poruchou); a PSVnaf = sekvence kladného napětí (po poruše).

WAMS - Doporučuje se použití WAMS (Wide Area Measurement Systems), které zahrnují PMU s inteligentními elektronickými zařízeními a synchronizovanými daty z obou konců přenosových linek.

Diferenciální ochrana - Důležité je implementovat diferenciální ochranu založenou na Kirchhoffových zákonech pro účinnou ochranu přenosových linek s využitím PMU.

Problémy s aktualizací fázorů - Aktualizace fázorů může způsobit chyby v odhadu v čase kvůli neustálé povaze elektrických systémů. Přesná synchronizace a měření fázorů jsou klíčové pro efektivní ochranu.

Využití Wavelet a Fourierovy transformace [162]. - Tyto techniky jsou diskutovány pro klasifikaci poruch v přenosových linkách. Některé metody zahrnují použití pouze PMU dat z generátorové stanice pro snížení nákladů a složitosti systému.

Umělá inteligence (AI) a strojové učení (ML) - V poslední době se stále více využívají techniky umělé inteligence a strojového učení pro diagnostiku poruch, včetně detekce, identifikace a lokalizace poruch v přenosových sítích.

3.1.9 Další možnosti rozvoje využitelnosti WAMS pro chránění

Integrace PMU (Měřící jednotky fázoru) s dalšími technologiemi pro monitorování a řízení sítě, jako jsou SCADA systémy, by mohla zvýšit schopnosti PMU při detekci a reakci na kybernetické útoky a jiné hrozby pro elektrickou síť. Budoucí práce by mohly zkoumat integraci PMU s algoritmy umělé inteligence (AI) a strojového učení (ML), což umožní automatickou a okamžitou detekci a reakci na kybernetické hrozby.

Výzkum může být prováděn na vývoji bezpečnějších PMU odolných vůči kybernetickým útokům a hackingu, což zajistí spolehlivost a stabilitu elektrického rozvodného systému. To by mohlo zahrnovat použití pokročilých šifrovacích technik a bezpečných komunikačních protokolů k ochraně dat přenášených PMU a vývoji bezpečných firmwarů a softwarů odolných vůči malware a jiným bezpečnostním hrozbám.

Měření harmonických zkreslení může být použito k monitorování a analýze výkonu obnovitelných energetických systémů, jako jsou větrné turbíny a solární fotovoltaické systémy, které jsou známy svými významnými harmonickými zkresleními. Detekcí a řešením těchto problémů může být zlepšena výkonnost těchto systémů, což vede k lepší výrobě energie a efektivitě.

Pro zvýšení celkové účinnosti a spolehlivosti elektrického systému může být použita technologie detekce odpojení s kontrolními strategiemi, jako je omezování zátěže a řízení odpojení, které by mohlo snížit účinky odpojení a zvýšit odolnost elektrického systému vůči poruchám a rušení.

Přístup k odpojení může být dále zkoumán z hlediska kybernetické bezpečnosti, zejména co se týče možných útoků a zranitelností. Identifikací potenciálních hrozeb a vývojem metod mitigace lze zlepšit bezpečnost elektrického systému.

Vytvoření AI modelu pro identifikaci detekce poruch a nahrazení ztracených nebo vadných informací správnými informacemi je složitý úkol, který vyžaduje odbornost v oblasti datové vědy a strojového učení.

Jedním z hlavních cílů odhadu stavu systému je přesně určit stavové proměnné elektrického systému, jako je napětí a fázový úhel. V budoucnosti mohou výzkumníci pracovat na vývoji přesnějších a spolehlivějších PMU, které budou schopny poskytovat přesnější měření a zlepšovat přesnost odhadu.

Literatura kapitoly 3.1

[1] Chinmayee Biswa, Binod Kumar Sahu, Manohar Mishra, Pravat Kumar Rout: Real-Time Grid Monitoring and Protection: A Comprehensive Survey on the Advantages of Phasor Measurement Units

[3] Phadke, A.G.; Bi, T. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems. J. Mod. Power Syst. Clean Energy 2018, 6, 619–629

[4] Arefin, A.A.; Baba, M.; Singh, N.S.S.; Nor, N.B.M.; Sheikh, M.A.; Kannan, R.; Abro, G.E.M.; Mathur, N. Review of the Techniques of the Data Analytics and Islanding Detection of Distribution Systems Using Phasor Measurement Unit Data. Electronics 2022, 11, 2967

[13] Joshi, P.M.; Verma, H.K. Synchrophasor measurement applications and optimal PMU placement: A review. Electr. Power Syst. Res. 2021, 199, 107428

[27] Horowitz, S.H.; Phadke, A.G.; Henville, C.F. Power System Relaying; John Wiley Sons: Hoboken, NJ, USA, 2022

[32] Abdelwahid, S.; Babiker, A.; Eltom, A.; Kobet, G. Hardware implementation of an automatic adaptive centralized underfrequency load shedding scheme. IEEE Trans. Power Deliv. 2014, 29, 2664–2673

[33] Tang, J.; Liu, J.; Ponci, F.; Monti, A. Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements. IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28, 2035–2047

[35] Monti, A.; Muscas, C.; Ponci, F. Phasor Measurement Units and Wide Area Monitoring Systems; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2016

[38] Derviškadi'c, A.; Zuo, Y.; Frigo, G.; Paolone, M. Under frequency load shedding based on PMU estimates of frequency and ROCOF. In Proceedings of the 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 15 August 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018; pp. 1–6

[39] Karimi, M.; Wall, P.; Mokhlis, H.; Terzija, V. A new centralized adaptive underfrequency load shedding controller for microgrids based on a distribution state estimator. IEEE Trans. Power Deliv. 2016, 32, 370–380

[41] Jegarluei, M.R.; Cortés, J.S.; Azizi, S.; Terzija, V. Wide-area event identification in power systems: A review of the state-of-the-art. In Proceedings of the 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA), Split, Croatia, 24–26 May 2022; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2022; pp. 1–7

[45] Roscoe, A.J.; Dy'sko, A.; Marshall, B.; Lee, M.; Kirkham, H.; Rietveld, G. The case for redefinition of frequency and ROCOF to account for AC power system phase steps. In Proceedings of the 2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Liverpool, UK, 20–22 September 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2017; pp. 1–6

[46] Frigo, G.; Derviškadi'c, A.; Zuo, Y.; Paolone, M. PMU-based ROCOF measurements: Uncertainty limits and metrological significance in power system applications. IEEE Trans. Instrum. Meas. 2019, 68, 3810–3822

[47] Zuo, Y.; Frigo, G.; Derviškadi´c, A.; Paolone, M. Impact of synchrophasor estimation algorithms in ROCOF-based under-frequency load-shedding. IEEE Trans. Power Syst. 2019, 35, 1305–1316

[48] Golpira, H.; Bevrani, H.; Messina, A.R.; Francois, B. A data-driven under frequency load shedding scheme in power systems. IEEE Trans. Power Syst. 2022, 38, 1138–1150

[49] Bekhradian, R.; Sanaye-Pasand, M.; Mahari, A. Adaptive Wide-Area Load Shedding Scheme Based on the Sink and Source Concept to Preserve Power System Stability. IEEE Syst. J. 2022, 17, 503–512

[56] Liu, W.; Lin, Z.; Wen, F.; Ledwich, G. A wide area monitoring system based load restoration method. IEEE Trans. Power Syst. 2013, 28, 2025–2034

[57] Itiki, R.; Libonati, F.; Burgués, H.; Martini, M.; Essakiappan, S.; Manjrekar, M.; Bai, L.; Di Santo, S.G. A proposed wide-area stabilization system through a large-scale fleet of electric vehicles for grid. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2022, 141, 108164

[65] Adamiak, M.; Apostolov, A.; Begovic, M.; Henville, C.; Martin, K.; Michel, G.; Phadke, A.; Thorp, J. Wide area protection— Technology and infrastructures. IEEE Trans. Power Deliv. 2006, 21, 601–609

[66] Horowitz, S.H.; Phadke, A.G. Third zone revisited. IEEE Trans. Power Deliv. 2005, 21, 23–29

[67] Tan, J.C.; Crossley, P.A.; McLaren, P.G.; Gale, P.F.; Hall, I.; Farrell, J. Application of a wide area backup protection expert system to prevent cascading outages. IEEE Trans. Power Deliv. 2002, 17, 375–380

[69] He, Z.; Zhang, Z.; Chen, W.; Malik, O.P.; Yin, X. Wide-area backup protection algorithm based on fault component voltage distribution. IEEE Trans. Power Deliv. 2011, 26, 2752–2760

[70] Ma, J.; Li, J.; Thorp, J.S.; Arana, A.J.; Yang, Q.; Phadke, A.G. A fault steady state component-based wide area backup protection algorithm. IEEE Trans. Smart Grid 2011, 2, 468–475

[71] Nayak, P.K.; Pradhan, A.K.; Bajpai, P. Wide-area measurement-based backup protection for power network with series compensation. IEEE Trans. Power Deliv. 2014, 29, 1970–1977

[72] Eissa, M.M.; Masoud, M.E.; Elanwar, M.M.M. A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit. IEEE Trans. Power Deliv. 2009, 25, 270–278

[73] Zare, J.; Aminifar, F.; Sanaye-Pasand, M. Communication-constrained regionalization of power systems for synchrophasor-based wide-area backup protection scheme. IEEE Trans. Smart Grid 2015, 6, 1530–1538

[74] Dubey, R.; Samantaray, S.R.; Panigrahi, B.K.; Venkoparao, V.G. Koopman analysis based wide-area back-up protection and faulted line identification for series-compensated power network. IEEE Syst. J. 2016, 12, 2634–2644

[75] Mirhosseini, S.S.; Akhbari, M. Wide area backup protection algorithm for transmission lines based on fault component complex power. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2016, 83, 1–6

[76] Jena, M.K.; Samantaray, S.R.; Panigrahi, B.K. A new decentralized approach to widearea back-up protection of transmission lines. IEEE Syst. J. 2017, 12, 3161–3168

[78] Tong, X.; Wang, X.; Wang, R.; Huang, F.; Dong, X.; Hopkinson, K.M.; Song, G. The study of a regional decentralized peer-to-peer negotiation-based wide-area backup protection multi-agent system. IEEE Trans. Smart Grid 2013, 4, 1197–1206

[79] Li, Z.; Yin, X.; Zhang, Z.; He, Z. Wide-area protection fault identification algorithm based on multi-information fusion. IEEE Trans. Power Deliv. 2013, 28, 1348–1355

[80] Yu, F.; Booth, C.; Dysko, A.; Hong, Q. Wide-area backup protection and protection performance analysis scheme using PMU data. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2019, 110, 630–641

[81] Chen, M.; Wang, H.; Shen, S.; He, B. Research on a distance relay-based wide-area backup protection algorithm for transmission lines. IEEE Trans. Power Deliv. 2016, 32, 97–105

[82] Navalkar, P.V.; Soman, S.A. Secure remote backup protection of transmission lines using synchrophasors. IEEE Trans. Power Deliv. 2010, 26, 87–96

[83] Sharafi, A.; Sanaye-Pasand, M.; Aminifar, F. Transmission system wide-area backup protection using current phasor measurements. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2017, 92, 93–103

[84] Li, W.; Tan, Y.; Li, Y.; Cao, Y.; Chen, C.; Zhang, M. A new differential backup protection strategy for smart distribution networks: A fast and reliable approach. IEEE Access 2019, 7, 38135–38145

[98] Goh, H.H.; Chua, Q.S.; Lee, S.W.; Kok, B.C.; Goh, K.C.; Teo, K.T.K. Evaluation for voltage stability indices in power system using artificial neural network. Procedia Eng. 2015, 118, 1127–1136

[99] Li, H.; Bose, A.; Venkatasubramanian, V.M. Wide-area voltage monitoring and optimization. IEEE Trans. Smart Grid 2015, 7, 785–793

[100] Su, H.Y.; Liu, C.W. Estimating the voltage stability margin using PMU measurements. IEEE Trans. Power Syst. 2015, 31, 3221–3229

[162] Abdollahi, A.; Seyedtabaii, S. Comparison of fourierwavelet transform methods for transmission line fault classification. In Proceedings of the 2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), Shah Alam, Malaysia, 23–24 June 2010; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2010; pp. 579–584

3.2 Data, jejich zpracování a validace, kybernetická bezpečnost

Aktuální výzvy technologií, které shromažďují velké množství dat, jsou:

- Objem dat ukládání, processing a časově, energeticky a výpočetně optimální analýza dat
- Rychlost generování dat real-time data processing je disciplínou, která optimalizuje datové vstupy při zachování relevance výstupních dat návazných fyzikálních či jiných analytických modelů
- Rozdílnost dat (data variety) s rostoucím využitím technologie WAMS jsou data nejen rozdílné povahy (různé fyzikální veličiny, ekonomické veličiny), ale mohou mít i jinou strukturu, což s sebou přináší problém unifikace dat pro analytické modely Věrohodnost – při velkém množství dat stoupá potřeba kontroly věrohodnosti dat a včasné detekce chyb – ať už způsobených chybou v měření nebo špatnou konverzí apod. K tomuto účelu se jeví vhodné technologie AI/ML pro vyhodnocení věrohodnosti dat
- Validace dat, ztráta dat a detekce datových anomálií aproximace ztracených měřených dat, detekce datových anomálií jako příznak kyberataku či jako příznak poruchového či jinak nebezpečného stavu ES
- Bezpečnost dat s narůstajícím objemem dat je nutné řešit šifrování a bezpečné uložení dat. Jedním ze základních konceptů je identifikace skutečně potřebných dat a poté jejich zabezpečená archivace.

V souvislosti s tímto se dnes hovoří o bezpečnosti kyber-fyzikálních systémů (cyber-physical systems), kdy nejde jen o zajištění bezpečnosti provozu např. stability ES, ale také o odolnost systémů proti kybernetickým atakům, či odolnost proti zarušení vstupních dat.

Při rešerši jsme narazili na články zabývající se touto problematikou, některé z nich jsou uvedeny v seznamu. Toto téma však neodpovídá odbornému zaměření naší výzkumné skupiny, proto zde nebude proveden detailní rozbor této problematiky.

3.3 Alokace PMU

Toto téma se netýká aplikace WAMS ale její architektury. Řada článků řeší optimální umístění jednotek PMU tak, aby byla zajištěna "pozorovatelnost" ES (power sytem observability) s co nejnižším počtem jednotek PMU či náklady.

Článek (19) "Allocation of Optimal PMUs for Power System Observability Using PROMETHEE Approach" ve svém úvodu uvádí a porovnává celou řadu metod a navrhovaný postup porovnává s jinými často používanými metodami alokace PMU na sítích IEEE, ale na reálných sítí, např. polské ES. Stanovený počet PMU se ale nijak výrazně neliší od výsledků jiných metod.

Článek (30) "A Cross-Domain Optimization Framework of PMU and Communication Placement for Multi-Domain Resiliency and Cost Reduction" bere v úvahu důležitost PMU (essential versus redundant), PDC a komunikačních cest (primary versus backup).

Vzhledem k tomu, že ČEPS plánuje rozšíření WAMS o distanční ochrany SEL s integrovanou PMU funkcí a výhledově i o jiné tzv. IED (Intelligent Electronic Device) v PS, které umožňují využití jako PMU, aktuálně nepokládáme za přínosné toto téma dále rozvíjet.

3.4 Identifikace parametrů a teploty vedení

Využití WAMS lze vidět i pro přesnější měření fázoru proudu (navržení metody kalibrace měření), kdy je snaha omezit a potlačit počáteční systémové chyby měření a tím docílit takových dat, která jsou dále upotřebitelná pro výpočty, např. pro lepší stanovení vytíženosti přenosové kapacity vedení a jeho monitorování.

Jako přínosný se v tomto jeví (článek 70) "Synchrophasor-based Fault Location with Class M Fault Capture and Built-in Line Parameter Estimation".

3.5 Stavová estimace (State Estimation)

ČEPS aktuálně již využívá WAMS pro hybridní stavovou estimaci v SDŘS TRIS pro účely dispečerského řízení.

Potřeba spolehlivé dodávky elektrické energie klade velké nároky na moderní systémy řízení sítě, na podpůrné systémy a na softwarové nástroje pro bezpečné, efektivní a cenově optimální řízení. Řízení elektrické sítě je založeno na jejím stavovém vektoru. Výsledky měření jsou využívány pro estimaci činného a jalového výkonu a vektorů napětí a proudů. Výpočetní algoritmy však platí jen pro současně měřená data. Nepřesnost měření má původ jednak v chybách jednotlivých částí měřicího řetězce, ale také v asynchronnosti měřených veličin a časovém zpoždění na komunikačních linkách. Všechny tyto chyby mají za následek zhoršení přesnosti výpočtů.

Estimace stavu sítě je definována jako proces získávání spolehlivých dat pro dispečerské řízení, analýzu a hodnocení provozu a vychází z měření, která mohou být získána z WAMS nebo SCADy (viz Obr 3.5.1). Estimovaná data více vyhovují vzájemným poměrům mezi uzly sítě. Software pro estimaci může být součástí systémů SCADA nebo WAMS. [3.5.1], [3.5.2]



Obr. 3.5.1: Dvě varianty estimace stavu ES

Estimace (odhad) stavu elektrizační soustavy (ES) se provádí pomocí programu, tzv. estimátoru. Estimátor, který je nezbytnou součástí informačního systému dispečinku každé přenosové soustavy, zpracovává dálková měření ze soustavy, která jsou, jak bylo řečeno výše, zatížená různými chybami, a provádí verifikaci, filtraci a korekci všech veličin měřených v reálném čase a dopočet veličin neměřených. Tzn., že estimátor má za úkol identifikovat a opravit chybná data z měření a chyby v topologii sítě, měřené hodnoty zpřesnit a neměřené dopočítat. Dále estimátor vytváří databázi tzv. estimovaných hodnot, které jsou na rozdíl od hodnot naměřených dostatečně přesné a poskytují spolehlivý ucelený obraz o stavu řízené ES. Výstupy estimace stavu ES jsou ověřené, zpřesněné a dopočtené hodnoty aktivních parametrů soustavy (P, Q, U, I, ...), seznamy chyb měření a ověřené stavy topologie ES. Tyto výstupy z estimace stavu ES se dále využívají především pro Kontingenční analýzu a Power Flow analýzu.

V současné době je nejčastěji estimace stavu ES hodnocena na základě naměřených dat z telemetrie, které jsou dále zpracovány systémem SCADA. Lze využít buď statickou, nebo dynamickou estimaci. Statická estimace je založena na metodě vážených nejmenších čtverců. Tato metoda vychází z rovnic ustáleného chodu sítě a vyhodnocuje jeden časový snímek. Naopak dynamická estimace zpracovává i historii, trend a predikci stavu ES a je při ní zapotřebí dynamický model ES. V tomto případě je pro estimaci stavu ES použit Kalmanův filtr. [3.5.3]

3.5.1 Možnosti využití synchronních měření fázorů napětí a proudu z PMU

Spolehlivost klasických estimátorů se uvádí v průměru cca 90 %. Jednou z cest, jak se přiblížit k 100% spolehlivosti je využití synchronních měření fázorů napětí a proudů pomocí PMU. Jednou z možných variant je rozšíření klasické statické estimace o hybridní algoritmus (viz Obr. 3.5.2) začleňující do estimace měření z PMU. Při této hybridní estimaci je odhad stavu ES provedený pomocí SCADA systému ověřován (zpřesňován) pomocí hodnot z měření PMU. [3.5.3]



Obr. 3.5.2 : Schéma postupu při estimaci stavu ES s využitím hybridního algoritmu

3.5.2 Metoda lineární estimace stavu - Linear State Estimation (LSE)

Zavedení měření synchrofázorů pomocí PMU umožňuje řešit stavovou estimaci efektivněji ve srovnání s tradiční telemetrií. Zde jde o metodu lineárního odhadu stavu, nebo-li Linear State Estimation (LSE). LSE jako statická estimace využívající data z PMU je založena na výpočtu lineárních rovnic, které se snadno řeší a proces estimace je méně časově náročný. Tradiční estimátory využívají k odhadu napětí v uzlu ES naměřené hodnoty toku činného a jalového výkonu vedením. Protože měřené toky výkonů mohou být nesynchronizované, není možné

stav systému pozorovat přímo. Odhad stavu ES je možné získat pouze měřením obsahujícím časové zkreslení. Aplikace měření PMU a WAMS tyto nedostatky eliminuje.

Na Obr. 3.5.3 je vidět zjednodušený algoritmus metody LSE. Vychází z metody vážených nejmenších čtverců (Weighted Least Square, tj. WLS) a je blíže popsán v článku [3.5.5]. Vstupní rozhraní LSE je zodpovědné za příjem modelu, dat z PMU a stavu vypínače. Statický model je načten jednou při spuštění LSE, zatímco ostatní dva jsou streamy v reálném čase. LSE má čtyři základní moduly, kterými jsou proces topologie, analýza pozorovatelnosti, odhad stavu a detekce chybných (validních) dat. Procesor topologie sítě má určit současnou topologii sítě z telemetrovaného stavu jističů. Protože se topologie systému mění v reálném čase, je vyžadována I analýza pozorovatelnosti v reálném čase pro korelaci měření PMU s topologií, takže LSE je schopen identifikovat pozorovatelnou oblast systému. Algoritmus estimace stavu ES používá metodu vážených nejmenších čtverců (WLS) k získání nejlepšího odhadu stavu systému. Detekce a identifikace chybných (validních) dat je ve skutečnosti dvoufázový proces. Krok detekce chybných dat používá algoritmus Chi-kvadrát ke zjištění, zda existují chybná data, a krok identifikace chybných dat identifikuje chybná data pomocí metody největšího normalizovaného rezidua. Po odstranění identifikovaných chybných dat proběhne znovu LSE. Proces bude pokračovat, dokud budou přítomna chybná data. Výstupní estimovaná data a celý algoritmus LSE se zpřesní eliminací chybně naměřených dat a měřením pomocí PMU, oproti současné telemetrii. [3.5.4]



Obr. 3.5.3: Vývojový diagram algoritmu LSE

3.5.3 Metoda dynamické estimace stavu ES s využitím Kalmanova filtru

Z hlediska zpřesnění estimace stavu ES je vhodnější aplikovat dynamickou estimaci a metodu algoritmu využívající naměřená data z WAMS (PMU) a Kalmanův filtr, tj. nástroj k odhadnutí neznámých stavů stochastických lineárních dynamických systémů na základě naměřených dat zatížených šumem. V současnosti je dynamický odhad stavu energetické soustavy stanovován pomocí tzv. rozšířeného Kalmanova filtru (Extended Kalman filter, EKF), který k linearizaci využívá Taylorův rozvoj dané funkce v bodě aktuálního odhadu, nebo pomocí tzv. Unstended Kalman filter (UKF), který problém nelinearizuje, ale pracuje přímo s jeho nelineární podstatou a využívá statické vzorkování. Při náhlých změnách toku výkonů v ES nebo při výskytu poruchy v ES vykazuje EKF vzhledem k linearizaci nepřesnosti v estimaci stavu ES. Pro zlepšení estimace je možné využít Kalmanův filtr MKPF, který obsahuje oba filtry jak EKF, tak i UKF.

Dále je možné estimaci stavu ES pomocí PMU stanovit na základě metody strojového učení tzv. Machine learning, nebo využitím umělé neuronové sítě, tzv. Artificial Neural Network (ANN). [3.5.6]

Literatura kapitoly 3.5

- [1] Distribuovaná synchronní měření v elektrických sítích" <u>http://www.ais-brno.cz/synchronous-measurement.php?lang=cz</u>
- [2] "Estimace stabilního stavu elektrické sítě" <u>http://www.ais-brno.cz/estimation-steady-state.php?lang=cz</u>
- [3] B. Sadecký, E. Janeček, "Estimace stavu elektrizační soustavy", CIRED PS03 Pavlov, 2009 <u>http://www.ais-</u> <u>brno.cz/clanky/CIRED PS03 2009 Pavlov/Janecek Estimace Pavlov.pdf?lang=cz</u>
- [4] A. Aljazaeri, P. Toman, "A Review of the Use of Phasor Measurement Units in Power System State Estimation," 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPE54603.2022.9814130. https://ieeexplore.ieee.org/stamp.jsp?tp=&arnumber=9814130
- [5] L. Zhang et al., "Benefits of using linear state estimation for synchrophasor applications," IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2017.8274251. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8274251
- [6] X. Liu, X. Zeng, L. Yao, G. I. Rashed and C. Deng, "Power System State Estimation Based on Fusion of WAMS/SCADA Measurements: A Survey," 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2018.8582102. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8582102

3.6 Regulace U a Q a vyhodnocení toků Q

3.6.1 Možnosti regulace napětí v ES

Napětí v ES je základním parametrem v ES. To znamená, že je jakostním parametrem dodávky elektřiny v ES. Jeho kvalita je posuzována jak do absolutné hodnoty, tak i do jeho průběhu sinusovky v AC sítích [1]. Cílem regulace U a Q v ES je tedy:

- zajištění kvality dodávky elektřiny odběratelům (stabilita napětí).
- snížení technických ztrát v provozované soustavě (přenosové, distribuční) související s přenosem jalového výkonu po vedeních,
- snížení dalších nákladů provozního a investičního charakteru.

V současné době je regulace napětí (označení veličiny U=V – absolutní hodnota) spojena s regulací jalového výkonu pomocí statických charakteristik V= f(Q), i když je možno provádět regulaci i podle jiných metod – převrácených statických charakteristik a virtuálních metod [2]. Záleží na převládající složce (činné nebo jalové) propojující impedance mezi generátorem výkonu a spotřebou (zatížením sítě), mezi uzly soustavy 1-2, při zanedbání ztrát - obr.1.



Obr. 1 Úbytek napětí na vedení v ES[1]

Hodnota jednotlivých složek úbytku napětí je:

$$\Delta u = \Delta v = RIj + XIr, \, \delta u = \delta v = XIj + RIr$$
^[1]

V sítích velmi vysokého napětí (VVN, VHV), a zvlášť vysokého napětí (ZVN, EHV) lze uvažovat že R << X, a tím lze úbytek napětí od činného odporu zanedbat, a lze stanovit úbytek na propojovacím vedení, který je úměrný pouze reaktanci, a je závislý na protékajícím jalovém výkonu:

$$\Delta u = \Delta v \approx \frac{XQ_2}{V_2}, \ \delta u = \delta v \approx \frac{XP_2}{V_2}$$
[2]

Udržování napětí na spotřebitelských (uzel soustavy) svorkách v přijatelném rozsahu (povolených mezích):

- závislé na průchozím jalovém výkonu,
- tok jalového výkonu na vedení se zvyšuje, pokud se napětí na vysílací sběrnici zvýší nebo pokud se napětí na přijímacích sběrnicích sníží = regulace napětí,
- tok jalového výkonu na lince zvyšuje rozdíl napětí mezi vysílací a přijímací sběrnicí,

- čím silnější je zkratový výkon v dané sběrnici, tím méně jalového výkonu z linky snižuje její napětí vzhledem k hodnotě vysílací sběrnice.
- malé změny velikosti extrémních okrajových napětí vedení (hodnoty kolem 1 v poměrných jednotkách p.u.) a cos9 (hodnoty kolem 1) spolu významně ovlivňují množství a směr toku jalového výkonu na vedení. Tato oblast ilustruje kritický účinek obr.2, který má změna napětí a/nebo úhlů vektoru napětí na reaktivní řízení toku energie, zejména v ručním provozu,
- tok činného výkonu je více než jalový výkon ovlivněn změnou úhlu zatížení v důsledku vysoké hodnoty strmosti sinθ kolem θ = 0,0 - fázový posuv.
- na rozdíl od frekvence, která je v propojené soustavě všude stejná může být napětí v jednotlivých místech ES různé,
- důležitou fyzikální vlastností je lokální charakter napětí. Prakticky to znamená, že napětí může být v každém uzlu soustavy jiné. Regulátor napětí a jalových výkonů je možné implementovat decentralizovaným způsobem, kdy každý uzel soustavy s možností změny dodávky jalového výkonu má vlastní regulátor,
- změnou dodávky jalového výkonu do uzlu soustavy se dosáhne změny napětí v tomto uzlu a uzlech elektricky blízkých,
- lze provádět regulaci napětí centralizovaně nebo decentralizovaně držet hodnotu napětí místně na požadované hladině pomocí regulačních prostředků ovlivňujících hladinu napětí,
- hladinu napětí v určitém místě ES můžeme měnit tedy změnou hodnoty jalového výkonu, na straně odběru – kompenzace., a na straně dodávky – změna Q u výrobců nebo pomocí regulačních prostředků ES, popřípadě změnou napětí nastavením převodu transformátorů.



Obr. 2 Napěťová stabilita ES [2]]

V současné době se řízeni (regulace) napětí (SVC – static voltage control) v ES provádí decentralizovaně pomocí statických napěťových charakteristik k_Q – obr.3. Centralizované řízení koriguje hodnoty v pilotních uzlech, tak aby bylo optimální využití zdrojů jalového

(kompenzačního) výkonu v ES minimalizující jeho průtok soustavou. Pilotní uzly jsou zároveň odběrovým místem (distribuční soustava) ve kterých je napětí drženo v povolené toleranci. Metodika regulace je principielně shodná s regulací frekvence (LFC) - obr.3, kdy požadovaná hodnota výkonu (P_{sched}) generátoru je nastavované sekundárním regulátorem frekvence a předávaných výkonů z dispečinku ES. U regulace napětí se požadovaná hodnota nastavuje terciární regulací – průběžně se vypočítávají (estimují) hodnoty v PU. Vlastní regulace je provedena na primární úrovni automatickou regulací buzení (AVR) – u regulace frekvence se nastavuje požadovaný výkon hmotnostním průtokem pracovního média pohonného motoru generátoru regulovaným ventily (Gov)



Obr. 3 Regulace napětí a frekvence v ES [3]

V některých soustavách se metoda SVC nepoužívá a je použita metoda přímého působení terciární regulace na AVR. V České ES se používá systém trojstupňové regulace napětí – obr.4, která je složena:

- primární regulace Q/U (PRN) čas působení 1 sec až několik sekund. Reaguje na rychlé změny U buzením generátorů,
- sekundární regulace Q/U (SRQ)- SVC)- čas od 1 do několika minut požadovaná hodnota napětí v uzlu je zadávaná terciární regulací,
- terciární regulace (TRN)- udržuje požadované U v uzlu a koordinuje hodnoty výroby Q u zdrojů zapojených do uzlu (kompenzátory, tlumivky, PVE, buzení alternátorů) (obr.4). Proces regulace je aperiodický s jedním překmitem, doba cca 120 sec.. Terciární regulace Q/U je pomalý pochod ¼ hod a více; Je to centralizovaná služba v národním rozměru ES, koordinující výrobu Q a úroveň U v jednotlivých uzlech. Respektuje omezení v jednotlivých částech soustavy. Využívá dispečerské měření v reálném čase z jednotlivých bodů.

Terciární regulace je řízena systémem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition - "dispečerské řízení a sběr dat"). To je pojem používaný pro software, který z centrálního pracoviště monitoruje průmyslová a jiná technická zařízení a procesy a umožňuje jejich ovládání. Výpočtem chodu sítě se určují jednotlivá napětí v uzlech, výkony a proudy ve větvích ES. Měřená data jsou předávána prostřednictvím komunikačního rozhraní do dispečinku, spolu se zadanou konfigurací a pasivními parametry sítě se provádí odhad chodu sítě – estimace. tzn. odhad nejpravděpodobnějšího aktuálního provozního stavu. Výpočet nových stavů (napětí v pilotních uzlech) se provádí iterační metodou.



Obr. 4 Princip třístupňové regulace napětí v ES ČR [1]]

Řízení napětí v DS je principielně stejné jako v PS, přičemž DS je zodpovědná na udržení napětí u odběratelů, a je napájená z PS HRTy – obr.5, popřípadě distribuovanými generátory (DG) připojenými do DS. Připojené DG mají možnost změny dodávky jak činného, tak jalového výkonu – jsou schopné provádět regulaci napětí.



Obr. 5 Regulační prvky napětí v DS [1]"

V současnosti v souvislosti s nárůstem možností přenosu velkého objemu informací, které je možné využít pro řízení s odezvou ve velmi krátkém čase se rozšiřují možnosti rychlého dynamické řízení soustavy, a tím zvýšit její stabilitu. Zároveň se mění skladba energetických zdrojů z dřívějších převážně rotujících generátorů na statické polovodičové generátory. Dále pak je patrný přechod na decentralizovaný způsob možnosti zajištění napájení spotřeby, který umožňuje zachovat napájení pro význačnější podíl elektrické spotřeby při rozpadu objektivní funkce centrálních ES – zajištění napájení spotřeby.

Veškerá regulace napětí a toku jalových výkonů (kromě automatických regulací - PRN)" je v současnosti založena na pasivní metodách, což představuje monitorování sítě a přenos dat ze sběrných jednotek (popřípadě ochran) propojovacími linkami (většinou opticky) do řídícího centra (dispečinku) ES, Tyto metody jsou snadno implementovatelné, ale nejsou schopny podávat dostatečně přesné okamžité informace o stavu sítě, protože jsou zatíženy poměrně dlouhým dopravním zpožděním informačních toků.

Perspektivní se jeví použití bezdrátové komunikace, která je daleko rychlejší (technologie WAMS) o jejíž spolehlivosti nejsou zatím známy ale dostatečně relevantní data. Lze ovšem předpokládat, že bude nutno používat klasické metody jako paralelní spolehlivostní prvek k této technologii. V některých případech při využití statických generátorů se bez okamžité znalosti informací o jejich provozu neobejdeme.

3.6.2 Možnosti regulace napětí v ES pomocí WAMS

S měřením synchronních fázorů napětí a proudů se otevírají nové možnosti v oblasti zlepšení řízení, bezpečnosti a stability ES. Synchronizované měření probíhá s definovanou hustotou (např. 50 snímků/s) s vysokou přesností časové synchronizace (povolená chyba $1 \Box \mu s$), což umožňuje získávat data fázorů napětí a proudu v různých místech elektrické soustavy a následně porovnávat fázory se stejnou časovou značkou. Z těchto údajů lze přesně určit rozdíl fázových úhlů napětí (vzhledem k vztažnému napětí) v různých místech soustavy, což napomáhá estimovat stav sítě a následně odhalit nežádoucí stavy a poruchy. Měření synchronních fázorů nevede k vývoji nového samostatného monitorovacího systému, ale naopak jeho začlenění do stávajících [3]. V přenosové soustavě ČR fungují systémy WAMS jako doplněk ke SCADA systémům – obr. 6.



Obr. 6 Využití WAMS v systému SCADA [1]

Z PMU jsou zasílány informace o trojfázovém synchronním měření napětí a proudů, aktuální frekvenci a derivaci frekvence, v centrále dochází k dopočtu veličin P a Q pro první harmonickou a výpočet sousledných složek napětí a proudů. Tyto informace jsou v on-line nebo off-line režimu zpracovány následujícími analytickými funkcemi. Jako jedna z nejdůležitějších funkcí nabývající stále většího významu je detekce ostrovních provozů (islanding). Jedná se o stav, kdy dojde k odpojení určité části sítě a vzniká ostrovní provoz. Tento stav je možné identifikovat monitorováním a analýzou informací z PMU. Aplikace

provádí detekci vzniku a ukončení ostrovních provozů na základě měření frekvence a derivace frekvence ostrovních provozů.

V poslední době distribuovaná generování elektřiny je převážně založeno na využité OZE související s útlumem využití klasických spalující konvenčních paliva. To vede k rychlému a nepřetržitému rozvoji instalací elektrárenských zdrojů využívajících OZE, ale zároveň se zvyšuji jejich požadavky na spolehlivosti jejich dodávky elektřiny. Tyto zdroje, zatím obvykle připojené na napětí nízkého napětí (LV), musí dodržovat provozní parametry, které jsou obvykle definovány standardizujícími institucemi jako jsou IEC a IEEE (obr.7), a které zároveň kladou požadavek na dobu odpojení s ohledem na stabilitu napětí v ES (Low Voltage Rate Time – LVRT) -obr.8 z provozu při mimo-limitních hodnotách napětí v ES. Tyto požadavky rovněž stanovují místními operátoři (PS, DS) sítí v pravidlech provozování soustavy, a také regulujícími orgány jednotlivých zemí. Zároveň s rozvojem inteligentních mikrosítí je předpoklad že distribuované generátory (DG) připojené do distribučních sítí by měly být schopny pracovat v ostrovním režimu, tj. udržet napájení vymezené ostrovní zátěže



Obr. 7 Povolené hodnoty f a V pro DG definované standardy IEC a IEEE [4]



Obr. 8 Vymezení LVRT na FV generátoru v ES [8]

Ostrovní režim je stav, kdy výkon DG pokračuje v napájení části sítě, i v případě, kdy napájení z DS je odpojeno. Problém je, že ostrov vzniknout aniž bychom o tom věděli – je nedetekovaný, což může být nebezpečné (např. pro provozní personál DS, který nemusí být obeznámeni ze situací, že konkrétní část sítě je stále pod napětím). Také neúmyslný a nekontrolovaný ostrov může poškodit odběratelská zařízení, zejména v situacích opětovného přifázování ostrova. Z tohoto důvodu musí distribuované generátory detekovat ostrovní režim, a okamžitě být odpojeny od DS. Je sice pravda, že pravděpodobnost vzniku nedetekovaného ostrova je velmi malá, protože když se ztratí napájení z DS, tak generovaná (jak aktivní i reaktivní) složka výkonu distribuovaných generátorů musí téměř dokonale pokrývat požadavky zátěže včetně ztrát, jinak by napěťová a frekvenční relé odpojily generátor.

Existuje několik metod pro jeho detekce. které se liší v závislosti na typu DG. Některé metody detekce ostrova jsou vhodné pro synchronní generátory, zatímco jiné jsou vhodné pro statické DG založené na technologii střídačů. Jsou i metody, které lze použít pro oba tyto systémy. Principielně lze metody detekce ostrovního provozu rozdělit do tří hlavních kategorií [4-8].

Pasivní metody detekce ostrova:

Při použití této metody jsou monitorovány v síti stanovené proměnné (napětí, frekvence, fázový úhel, celkové harmonické zkreslení). Ostrovní provoz je detekován ze změn těchto proměnných (pod-napětím nebo přepětím, stejně tak je to i u frekvence), rychlost změny napětí nebo frekvence, rychlé změny fáze napětí, harmonické monitorování napětí atd..

Pokud monitorovací algoritmus detekuje velké nebo náhlé změny těchto proměnných v napájecím bodě (CCP – Common Coupling Point) sítě –obr.10, DG odpojí . Nejběžnější pasivní metody popsány [7] - [11]:

- pod/nad napětí přepětí, monitoruje, zda se síť nachází v dovolených mezích napětí obr.7,
- 2. pod/nad frekvence monitoruje, zda síť je mimo limitní hodnoty frekvence .
- 3. monitorování míry změny frekvence (ROCOF) a napětí (ROCOV) obr.9,
- 4. sledování fáze monitoruje rychlé skoky napětí sítě, harmonická napětí (3., 5. har), nebo celkové harmonické zkreslení (THD) napětí sítě [10], [11].



Obr. 9 RoCoF v ES [5]

Aktivní metody detekce ostrova [4-6:

Tyto metody byly vyvinuty k překonání omezení pasivních metod. Aktivní metody injektují určitou formu rušení do sítě a odhadují její stav, z odezvy DG, pokud je připojen do ES. Aktivní metody lze zhruba zahrnout do metod, které odhadují impedanci sítě, kde se řídicí jednotka DG snaží měnit proměnnou ES, jako je napětí, nebo frekvence. Jednou z nepříjemností těchto metod je to, že způsobují narušení v ES, které by mělo být logicky udržováno na co nejmenší hladině. Kromě toho může dojít k interferenci mezi DG u paralelních propojených střídačů.

Metody detekce ostrova založeného na komunikaci:

Tato kategorie metod je založena na komunikaci mezi systémem DG a ES. V odkazu [4-5] jsou podrobně diskutovány tři hlavní metody založené na komunikaci. Nejznámější je metoda přenosu dat po elektrickém vedení (PLCC - Power-Line Carrier Communication), kdy signál vytvořený metodou odpojení SPD (The Surge Protection Device) - omezující přepětí atmosférického původu na linkách, tím že odvádí proudové vlny do země – obr.10, čímž se omezuje amplitudu přepětí, tak aby nebyla nebezpečná pro elektrické instalace, spínací a kontrolní zařízení) je spojena s metodou kontroly dohledu a sběru dat (SCADA). Metody založené na komunikaci po vedení se zřídka dnes používají hlavně kvůli vysokým nákladům na komunikaci.



Obr. 10 : PowerLline Carrier Communication [5]

Tradiční technologie detekce ostrova (pasivní a aktivní metody), nejsou vhodné pro systémy s FV generátorem- obr.11, u kterých se vyžaduje, aby v průběhu (through) poklesu napětí zůstaly generátory v činnosti. Jsou to tzvn. (LVRT - Low-Voltage Ride-Through) -jednofazové střídače bez transformátoru (Transformerless)). Když dojde k poruše v ES vede to k poklesu napětí, FV generátor musí zůstat připojený po dobu (např. 3 sekundy – obr.8) jako podpora obnovení napájení sítě, které je známá jako provoz na nízkém napětí při (LVRT). [11], Systém musí být odpojen od sítě po 2 vteřinách, kdy dochází k ostrovnímu provozu.

Požadavky LVRT a anti-islandingu mohou být mezitím splněny, pokud je funkce detekce ostrova realizována na centrální jednotce řízení (CMU) PV generátoru a ne na střídačích FV. Pro možnost detekce ostrova na CMU [12-14] jsou preferovány metody detekce ostrova založeného na komunikaci. V současné době mohou mít metody založené na SCADA potíže s dodržením zadaného času dodání dat do systému SCADA, který může být 5 až 10 sekund. Dokonce i zvážení velmi malé doby zpracování pro posouzení ostrova jsou daleko za požadovaným dobou odpojení uložené regulací, tj. 2 sekundy. Pro splnění požadavků proti islandingu se dá použít algoritmus frekvenčního rozdílu - obr.11, využívající WAMS. Na měření

fázoru jsou využity PMU tak, aby shromažďovaly frekvence různých míst a mohla se odlišit ostrovní událost od připojených systémů na základě sledováním frekvenčního rozdílu mezi body soustavy i – generátor a j – CPP. Pokud FV generátory napájí zatížení a ES jsou ve stabilitě. Frekvence různých uzlů v systému jsou teoreticky stejné. Zatímco pokud se FV generátory odpojí od sítě, jejich frekvence se obecně liší od frekvence sítě. Ostrování lze detekovat na základě toho, zda jsou frekvence mezi FV generátory a zatížením stejné. Ve stavu propojení se sítí, kdy se v síti vyskytují poruchy, se změna frekvence rozprostírá v síti a povede k frekvenčnímu rozdílu mezi uzly v prostoru a čase [12], což může způsobit falešné ostrovní spouštění. Aby bylo možné odlišit ostrovní stav od jiných poruch v síti a zlepšila se přesnost pro detekci ostrova, měla by být pro tuto metodu nastavena přiměřená časová prahová hodnota - T_{th}. Když zjištěný rozdíl frekvencí překročí prahovou hodnotu po určitou dobu, bude spuštěn program v CMU pro ochranu ostrova, aby se odpojil FV generátor od sítě, a tím chránit zařízení FV generátoru.

Ve srovnání se systémem SCADA může četnost dopravy dat z PMU být 100krát za sekundu vyšší.



Obr. 11 : Algoritmus frekvenčního rozdílu založeného na PMU [4]

Čas zpracování může být nyní velmi malý. Poskytuje možnost splnit požadavky diskutované metody pro detekci ostrova do 2 sekund. V [12] tato metoda úspěšně detekovala ostrování v energetickém systému Severní Ameriky a nebyla falešně spuštěna prahovou T_{th} a f_{th}, které jsou nastaveny na 20 mHz, což jsou 3 sekundy. Pokud jde o FV generátory, tak dynamický výkon systému závisí na strategii řízení FV střídače, přičemž FV elektrárny mají menší setrvačnost ve srovnání se synchronním generátorem. Lze tak provádět analýzu pro různé výkony FV generátoru připojených do přípojnice spolu se synchronním generátorem, takže algoritmus anti-ostrova může být správně upraven tak, aby efektivně realizoval rychlé detekce ostrova ve velkých foto-voltaických elektrárnách.

Další nevýhodou detekce ostrova klasickými metodami je jich nesprávná funkce tj. nedetekce ostrova vlivem Nedetekčních Zón. FV střídače připojené k síti musí mít implementovány metody ochrany proti pod/nad frekvenci (OFP/UFP) a metody ochrany proti pod/přepětí (OVP/UVP), které způsobí, že FV střídač přestane dodávat energii do veřejné sítě, pokud frekvence nebo amplituda napětí v bodě společné vazby (PCC) mezi zákazníkem a rozvodnou sítí je mimo předepsané hodnoty.


Obr. 12 : FV-DG napájecí zdroj ostrovní RLC zátěží [5]

Tyto "ochranné prvky jsou nastaveny na hodnotách spouštění fyzických relé. Ve skutečnosti jsou ale obecně implementována v ovládajícím softwaru střídače. Tato bezpečnostní zařízení jednak chrání zařízení spotřebitelů, ale také slouží jako metody detekce proti nesprávnému vyhodnocení ostrovního provozu.

V konfiguraci znázorněné na obr-11, jsou znázorněny toky energie do uzlu "a". Samotný uzel "a" je bod společné vazby (PCC – Power Common Point) mezi rozvodnou sítí a FV střídačem. Když je dálkově ovládaný vypínač (recloser) sepnut, a tím je připojena rozvodná síť, činný a jalový výkon P_{FV} + jQ_{FV} teče ze střídače FV do uzlu "a":

$$\Delta P = P_{load} - P_{FV}$$
$$\Delta Q = Q_{load} - Q_{FV}$$

a výkon P_{load} + jQ_{load} teče z uzlu "a" do zátěže jako součet toků energie v uzlu "a". Pokud FV střídač pracuje s jednotkovým účiníkem (což znamená, že výstupní proud FV střídače je ve fázi s napětím v uzlu "a"), pak Q_{FV} = 0 a Δ Q = Q_{load}.

Chování systému v době odpojení sítě bude záviset na P a Q v okamžiku, než se spínač odepne a vytvoří ostrov. Pokud je Δ P=0, amplituda napětí se změní a OVP/UVP může detekovat změnu a zabránit ostrovnímu provozu. Jestliže Δ Q = 0, napětí zátěže vykáže náhlý posun ve fázi a pak řídicí systém měniče způsobí, že se frekvence výstupního proudu měniče, a tím i frekvence v "a" se mění, dokud opět nebude Δ Q=0 (tj. dokud není dosaženo rezonanční frekvence zátěže). Tato změna frekvence může být detekována OFP/UFP. I když sledující PLL (fázový závěs) rychle mění frekvenci, obvody PLL mohou omezit rychlost změny frekvence a tím bude trvat fázový posun.

Všechny fotovoltaické střídače pro aplikace spolupráce s rozvodnou sítí musí mít ve většině zemí různé stupně ochrany OVP/UVP a OFP/UFP. Pokud tedy buď skutečný výkon zátěže a FV systému (výstup střídače) neodpovídají, nebo rezonanční frekvence zátěže neleží poblíž síťové frekvence, přechod do ostrova nenastane. To pokrývá drtivou většinu praktických provozních případů.

Primární slabinou OVP/UVP a OFP/UFP z hlediska prevence ostrovního výskytu je jejich relativně velká nedetekční zóna (NDZ). Navíc reakční doby pro tyto ochranné metody mohou být variabilní nebo nepředvídatelné.

Pokud $\Delta P = \Delta Q = 0$, v situaci kdy se rozvodná síť odpojí nebo připne, čímž nedojde k dostatečné změně amplitudy nebo frekvence v "a" a tím k aktivaci kteréhokoli ze standardních zařízení na ochranu proti přepětí/podpětí nebo frekvenci, což odpovídá případu, kdy produkce FV (výstupu střídače) kryje výkon zátěže, a zátěž má účiník=1 při síťové frekvenci. Ve skutečnosti se P a Q nemusí přesně rovnat nule, aby k této situaci došlo, protože lze očekávat, že velikost síťového napětí se bude mírně odchylovat od nominálních hodnot, a proto nemohou prahové hodnoty pro čtyři ochranná zařízení proti pře/podpětí nad/pod frekvence (čtyři kvadranty) být nastaveny libovolně malou hodnotu, aby FV střídač nebyl vystaven rušivým poruchám.

U střídačů nastane ΔP , které není detekováno (NDZ), na základě Ohmova zákona, který říká, že napětí zátěže je odpor zátěže krát výstupní proud měniče, který je konstantní. Střídač s vypnutím UVP/OVP na 88 % a 110 % bude mít NDZ pro odpovídající rozsah zatížení až 114 % až 91 %. ΔQ_{NDZ} lze vypočítat pomocí rovnic pro nevyváženost jalového zatížení a rezonanční frekvenci:

$$\Delta Q = V^2 \left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right)$$

kde základní frekvence je:

$$f = \frac{1}{2}\pi\sqrt{LC}$$

Bylo prokázáno, že pravděpodobnost výskytu ΔP a ΔQ v NDZ při OVP/UVP a OFP/UFP může být vysoká [7,8,9]. Proto běžné vybavení pod/přepěťovou napěťovou a frekvenčně ochranou je nedostatečné.

Příklad pod/nad frekvenční a pod/přepěťové NDZ pro L,C zátěž je na obr.13:- odporová zátěž je bez vlivu.



Obr. 13 : NDZ střídače [5]

Tyto "ochranné prvky jsou nastaveny na hodnotách spouštění f

Literatura uvádí, že pravděpodobnost, že P a Q spadnou do NDZ OVP/UVP a OFP/UFP, může být v některých případech významná [7,8,9]. Z tohoto důvodu jsou samotná standardní pře/pod pěťová a frekvenční ochranná zařízení obecně považována za nedostatečnou ochranu proti ostrovnímu přepětí. Mapování NDZ těchto čtyř standardních metod pří zátěži RLC v grafu prostoru P-Q lze nalézt v literatuře [4-7].

Literatura kapitoly 3.6

- [1] Emil Dvorský Přednášky z předmětu RES (Řízení a regulace v ES) https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/res
- [2] Lenka Raková "Regulace frekvence a napětí v ostrovních mikrosítích s fotovoltaickými systémy" Disertační práce, KEE, FEL, ZCU 2014.
- [3] Luci Vanišová "Využití synchroních fázorů pro řízení přenosové soustavy" Diplomová práce, Katedra elktroenergetiky, EE, FEL, ČVUT, 2014
- [4] Adrian Timbus, Alexandre Oudalov and Carl N.M. Ho "ABB Switzerland Ltd., Corporate Research"
- [6] "Surge protective device types" https://www.rfwireless-world.com/Articles/Basics-andtypes-of-surge-protection-devices.html
- [7] Balaguer, I.J., Heung-Geun Kim, Peng, F.Z., Ortiz, E.I. "Survey of photovoltaic power systems islanding detection methods", Industrial Electronics. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, 2008.
- [8] A. Timbus , A. Oudalov and C. N. M. Ho, "Islanding detection in smart grids," in Proc. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 3631 – 3637, Atlanta, GA, 12-16 Sept. 2010.
- [9] Soo-Hyoung Lee, Jung-Wook Park, "New Islanding Detection Method for Inverter-Based Distributed Generation Considering Its Switching Frequency," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 5, pp. 2089-2098, Sept. 2010.
- [10] Ankita Samui and S. R. Samantaray, "Assessment of ROCPAD Relay for Islanding Detection in Distributed Generation," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, no. 2, June 2011.
- [11] A.H. Mohammadzadeh Niaki, S. Afsharnia, "A new passive islanding detection method and its performance evaluation for multi-DG systems" https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779614000200

3.7 Výpočet ztrát a jejich alokace v PS

Zpřesněný výpočet ztrát

Článek (130) "Model for 400 kV Transmission Line Power Loss Assessment Using the PMU Measurements" uvádí výsledky testování zpřesnění výpočtu ztrát vedení se zaměřením na ztráty koronou. Využívá se k tomu znalost velikosti a úhlu proudu z PMU rozdílové ochrany vedení. Do algoritmu přicházejí i údaje o aktuálních povětrnostních podmínkách. Model byl nasazen a testován u chorvatského TSO.

Alokace ztrát mezi uživatele sítě

Článek (131) "Near-real-time loss allocation methodology based on the power system states" popisuje navrženou metodu pro spravedlivou alokaci celkových ztrát mezi odběratele a výrobce, přičemž bere v úvahu dynamické změny stavů sítě, které jsou poskytovány přesnou stavovou estimací (hybridní). Podle autorů navrhovaný systém není ani obtížný, ani nepřidává nadměrnou výpočetní zátěž; z toho vyplývá, že tuto metodiku lze snadno implementovat v řídicích centrech energetických soustav.

3.8 Stabilita elektrizační soustavy

Pro vyhodnocení stability ať již frekvenční, napěťové, nebo úhlové byly jako zdroj informací a následného zpracování byly WAMS od počátku své existence používány. Ačkoli byly metody poměrně různorodé, přesto se převážná část postupů soustředila na vyhodnocování stavových proměnných a na zpracování určitého indexu, který respektoval napěťové, výkonové nebo impedanční poměry globální či lokální. Dalším provázáním těchto indexů vznikaly další odvozené informativní kvantitativní ukazatele.

Ani v současnosti, kdy hodnocení přechází široce k sofistikovanějším metodám, však vhodné návrhy tradičních indexů stability nepozbývají smysl a jejich rozvoj a nové myšlenky jsou stále přínosné jako podklad pro zpracování nadstavbové. Článek (105) je dobrým příkladem teoretického rozboru se snahou uvádět nové indexy hodnocení stavu stability a úrovně nebezpečnosti událostí zejména s ohledem na nelinearitu systému a jeho dynamické chování.

3.8.1 Napěťová stabilita soustavy (Voltage Stability)

Napěťová stabilita (*Voltage stability*) je schopnost soustavy udržovat napětí v přípustných mezích ve všech uzlech po narušení výchozího stavu (např. v důsledku změny zatížení nebo vzniku poruchy).

Rozdělení z hlediska typu narušení výchozího stavu se dělí na dvě kategorie:

- Napěťová stabilita způsobená malými rozruchy (Small-disturbance voltage stability) malými narušeními výchozího stavu mohou být např. malé změny zatížení či dodávky výkonu.
- Napěťová stabilita způsobená velkými rozruchy (Large-disturbance voltage stability)
 velkým narušením výchozího stavu může být výpadek zdroje, výpadek vedení a ztráta zatížení.

Rozdělení dle časového rámce, ve kterém se jev nestability napětí vyvine:

- Krátkodobá stabilita napětí (Short- time voltage stability STVS) (řádově sekundy) je ovlivněna prvky dynamické povahy, rychle se měnící zátěží (indukční motory, elektronicky řízené zátěže a měniče HVDC) a vyžaduje dynamické modelování zátěže a chování generátorů a dalších sítových a řídicích prvků. Pro analýzu je zapotřebí adekvátní řešení diferenciálních rovnic systému.
- Dlouhodobá stabilita napětí (Long- time voltage stability LTVS) (0,5–30 minut) je ovlivněna prvky s pomalejší dobou reakce, např. změnami odboček transformátoru, termostaticky řízenými zátěžemi a omezovači proudu generátoru. Po zapůsobení prvků se použije statická analýza k vyhodnocení mezí stability a identifikaci proměnných ovlivňujících stabilitu.

Druhy hodnocení napěťové stability z měření PMU:

Online hodnocení (*Online assessment*) - online analýza využívá data s nízkou obnovovací frekvencí nebo získaná se zpožděním. Kromě toho výpočetní proces k určení stability není dostatečně rychlý.

Hodnocení v reálném čase (*Real-time assessment*) - vstupní data odpovídají nejnovějšímu stavu soustavy. Zpracování je dokončeno s krátkým zpožděním a proto je výstup k dispozici téměř okamžitě, obvykle během jedné nebo dvou sekund.

Trendy v oblasti vyhodnocování napěťové stability

Aby bylo možné vysledovat trendy v oblasti vyhodnocení napěťové stability (VSA – *Voltage Stability* Assessment) byly z dostupných zdrojů vybrány články především přehledového charakteru (*Review*), které odkazují na další články, kde jsou uvedeny podrobnosti o zmiňovaných přístupech a metodách. Kromě toho byly zpracovány i některé články popisující metody vyhodnocení VSA. Jedná se především o články z posledních 5-10 let se zaměřením (nejen) na využití metod strojového učení (*ML – Machine Learning techniques*).

V minulosti byla pozornost věnována především statické stabilitě napětí. I s nástupem WAMS tento trend stále přetrvává a přesouvá se do oblasti detekce dlouhodobé nestability napětí v reálném čase po odeznění rušení (odkaz 1 - Voltage Stability Assessment Using Synchrophasor Measurements: Trends and Development, 2017). Důvodem pro hodnocení dlouhodobé stability je jednodušší matematický aparát, kratší výpočetní čas, menší nároky na výpočetní techniku, menší nároky na přesnost výpočtů a snadná interpretace výsledků, např. pomocí ukazatelů VSI (*Voltage Stability Index*). Analýza krátkodobých jevů naopak vyžaduje řešení soustav diferenciálních rovnic a složitější modely zátěží a síťových prvků, podrobnější data, vyšší nároky na přesnost a čas výpočtů, nicméně využití PMU představují příležitost pro vyhodnocení krátkodobé stability napětí. Vysoká rychlost aktualizace měření PMU umožňuje sledovat rychlou dynamiku systému. Z hlediska typu rušení, malá rušení jsou většinou analyzována statickým přístupem. Naopak, velké poruchy mají rychlou dynamiku a pro jejich analýzu je nutné vyhodnocení v reálném čase pomocí technologie PMU-WAMS. Články se věnují především detekci napěťové stability, méně pak její predikci. V oblasti predikce je velký prostor právě pro metody strojového učení.

V posledních letech lze vysledovat, že autoři se věnují více krátkodobé stabilitě napětí a stabilitě ohrožené velkými narušeními, tj. rychlým dynamickým jevům. V této oblasti se v posledních letech začínají prosazovat metody založené na umělé inteligenci (*AI – Artificial Intelligence*) a strojovém učení (ML). Vyšetřování a predikce krátkodobé stability ale vyžaduje detailní modely zatížení a z hlediska ML i dostatečný objem validovaných dat pro trénování AI.

Používané metody a ukazatele VSI

Napěťová stabilita může být analyzována pomocí statických nebo dynamických metod. Základní rozdělení a specifikaci metod je provedeno v (2 - Voltage Stability Assessment and Control Using Indices and FACTS: A Comparative Review, 2023).



Statická analýza založená na metodách ustáleného chodu sítě (load-flow) se hodně používá ke stanovení rezervy napěťové stability (voltage stability margin) a k posouzení dlouhodobé stability napětí. Přestože statická analýza poskytuje informace o rezervě statické stability napětí, neposkytuje informace o příčinách problému se stabilitou napětí. Pro svoji názornost jsou často používané metody vykreslující křivky PU, PQ a QU, dále pak metoda MSV (minimum singular value) a CPF (continuation power flow). Možné použití a omezení těchto metod statické analýzy uvádí (2).

Důležitou roli při monitorování a estimaci rezervy stability a maximální zatížitelnosti a případně identifikaci kritických oblastí hrají ukazatele napěťové stability VSI (Voltage stability indices). VSI mohou být stanoveny pro vedení, uzle nebo pro celou soustavu. Ukazatele pro vedení jsou vhodné pro identifikaci kritických vedení v propojených soustavách, uzlové ukazatele pro identifikaci slabých uzlů. V literatuře najdeme desítky těchto ukazatelů, s trochou nadsázky lze říci, co autor, to nový ukazatel nebo alespoň vylepšený ukazatel. To bohužel znesnadňuje orientaci v oblasti analýzy napěťové stability. Autoři také často používají stanovení několika indexů, aby tak zajistili přesnější a spolehlivější výsledky. Základní přehled, výhody a nevýhody jednotlivých ukazatelů uvádí (2). Další články (3-7) uvádí také přehledy ukazatelů, uvádí jejich definici, různě je člení do skupin a provádí jejich porovnání. (3 - A Recap of Voltage Stability Indices in the Past Three Decades, 2019) shrnuje 40 ukazatelů, 15 z nich pak je otestováno a výsledky porovnány z hlediska detekce rezervy stability. (7 - Voltage stability indices for stability assessment: a review, 2018) uvádí přehled dokonce 66 ukazatelů. Vhodnost ukazatelů nejen z hlediska hodnocení stability napětí, ale i posouzení velikosti a lokace DG se diskutuje v (5 - A comprehensive review of the voltage stability indices, 2016). Clánek (6 - Voltage instability detection using synchrophasor measurements: A review, 2019) představuje metodologie detekce nestability napětí založené na měření synchrofázorů. Jsou diskutovány a popsány ukazatele a metodiky pro detekci statické stability vhodné pro aplikaci v reálném čase. Ukazatele stanovené z měřených dat PMU jsou založeny hlavně na odhadu parametrů Théveninova ekvivalentu, modelech ekvivalentních generátorů, konceptu uzlových ztrát jalového výkonu a kritéria rozdílu zdánlivého výkonu. Některé z nich jsou otestovány na 39uzlové a 118uzlové síti IEEE na detekci nestability, kdy všechny zatěžovací uzly sítě jsou současně zatěžovány tak, aby systém přešel ze stabilního do nestabilního stavu.

U těchto ukazatelů je pak zobrazen jejich časový průběh a hodnocena úspěšnost detekce blížící se nestability.

Metody dynamické analýzy jsou porovnatelné s vyšetřováním přechodových stavů, kdy systém je modelovaný pomocí diferenciálních rovnic. Obecně využívají výsledků simulací v časové rovině a pro zjištění krátkodobé a dlouhodobé nestability napětí se využívají přesné modely prvků energetického systému. Uvažuje se dynamické chování zátěží, generátorů, automatických regulátorů napětí (AVR) a transformátorů s regulací pod zatížením. Metody pro analýzu přechodové stability napětí (short-time large signal analysis) jsou více rozvedeny a porovnány v (8- Review on Transient Voltage Stability of Power Systém, 2020 a 2).

Tradiční metody a jejich modifikace

Mezi tradiční metody online analýzy napěťové stability patří Thévininův ekvivalent (TE). Síť ve sledovaném uzlu je nahrazena dvouuzlovým obvodem. Pokud se velikost zátěžové impedance rovná Theveninově impedanci, pak systém dosáhne limitu stability a maximálního přenosu výkonu, což je maximální dodávaný výkon rovný limitu zatížitelnosti vedení. Pokud je učiněn jakýkoli pokus o zvýšení zátěže nad limit (snížení impedance zátěže), může dojít ke kolapsu napětí nebo by se systém ustálil v nestabilním rovnovážném bodě.



TE se vypočítá za předpokladu, že všechny generátory a zátěže z jednotlivých zátěžových uzlů jsou konstantní během časového okna, kdy jsou získávána měření. Tento předpoklad ale v reálných systémech neplatí. Ve skutečnosti změny zátěže v jiných zátěžových uzlech vedou ke změnám napětí TE. V literatuře lze nalézt řadu metod, které se snaží vylepšit TE, např. zahrnutím vlivu zátěže v jiných uzlech než ve vyšetřovaném (10 - Estimating the Voltage Stability Margin Using PMU Measurements, 2016) nebo zvažováním dynamického chování generátoru pomocí zahrnutí náhradního modelu generátoru využívajícího dat z PMU (11 - GECM-Based Voltage Stability Assessment Using Wide-Area Synchrophasors, 2017), anebo se používají víceuzlové náhradní obvody.

V článku (12 - Dynamic Thévenin equivalent and reduced network models for PMU-based power system voltage stability analysis, 2018) je zaveden Théveninův ekvivalent s dynamickou (měnící se) impedancí, která se odhaduje pomocí polynomiální interpolace aplikované na data PMU získaná v určitém vzorkovacím okně/intervalu. Pomocí polynomiální interpolace jsou napěťové fázory modelovány jako funkce zatěžovacího proudu. Pomocí získané funkce je vypočítána dynamická impedance, ne jako jedno číslo (jako např. pomocí metody NLS – metoda nelineárních nejmenších čtverců), ale jako vektor jednotlivých hodnot (viz Obr.). Tento postup je vhodný pro vyšetřování stability napětí v reálném čase.



Fig. 3. From *m* snapshots of voltage and current phasors, the NLS method estimates a single fixed complex number as TE impedance, however, the Poly method estimates a complex vector (with *m* components) as TE impedance.

Aby bylo možné kvantifikovat vliv jiných zátěží nebo generátorů v dané oblasti, kde nejsou všechny uzly osazené PMU, je v tomto článku navržen model redukované sítě (RNM). Index dynamické nestability (ISI) lze vypočítat pomocí odhadované dynamické impedance TE, která ukazuje, jak blízko je energetický systém bodu kolapsu napětí. Navržená metoda byla posouzena prostřednictvím různých simulačních scénářů a ilustrována pomocí skutečných naměřených dat. Porovnání hodnot impedancí TE získaných navrhovaným postupem Z_{th, Poly}, pomocí metody NLS Z_{th, NLS} a metodou 2 vzorků Z_{th, 2S}, která poskytuje nejlepší estimace TE, je vidět lepší zachycení dynamických jevů navrhovanou metodou.



Fig. 20. Load and TE impedance magnitude seen from bus B1041. Contribution of other loads' variation in the TE impedance are shown with dashed-lines.

V článku (13 - A PMU-Based Method for Smart Transmission Grid Voltage Security Visualization and Monitoring, 2017) se TE využívá ke stanovení hranice napěťové stability VSB (voltage stability boundary) v PQ rovině.



Figure 5. Load power parameter space.

Figure 8. Voltage stability boundary (VSB) in a complex load power space.

Nejprve se ze vzorků po sobě jdoucích měření určí směr nárůstu zatížení. Poté se vypočítají parametry TE a impedance zátěže. Pomocí metody Mobiovy transformace se z těchto hodnot stanoví rezerva zatížitelnosti P. Při úvaze kvadratické závislosti P na Q se sestaví hranice stability, která může být využita pro vizualizaci provozního stavu.

V článku (14 - Online Voltage Stability Assessment using Wide Area Measurements, 2019) je navržen ukazatel stability napětí, který je založen na rychlosti změny napětí s ohledem na změnu činného a jalového výkonu zátěže. Na rozdíl od jiných ukazatelů stability počítajících s konstantním účiníkem, přesně vyhodnocuje situaci i při různých typech zátěží i s měnícím se účiníkem, a dokáže identifikovat zatěžovací uzel, který je nejkritičtější z pohledu napěťové stability.

V článku (15 - Measurement-based Voltage Stability Assessment for Load Areas Addressing n-1 Contingencies, 2016) se řeší vyšetřování napěťové stability s ohledem na kritérium n-1. Využívá je rozšířený TE s N+1 uzly, který reprezentuje N uzlů oblasti zatížení a externí soustavu. Výpočet napěťové stability se provádí zvlášť pro každý hraniční uzel a provádí se analýza senzitivity pro n-1 kontingence. Metoda využívá měření synchrofázorů v reálném čase v N hraničních uzlech a online stavovou estimaci pro oblast zatížení k analýze citlivostí ekvivalentních přenosových admitancí a výkonových toků pomocí modifikovaného distribučního faktoru výpadku linky (MLODF), aby se odhadnula napěťová stabilita přenosu v hraničních uzlech za předpokladu kritéria n-1.

Dále budou uvedeny některé metody, které nevychází z TE. V článku (16 - Online monitoring of voltage stability margin using PMU measurement, 2020) jsou křivky PU a QU stanoveny pomocí 3 po sobě jdoucích měření z PMU. Výpočet vychází z předpokladu přibližně kvadratické závislosti P a Q a napětí. Aktualizace křivek může probíhat v pravidelných intervalech.



V článku (17 - Voltage stability assessment using PMUs and STATCOM, 2022) je popsáno využití této metody pro zvýšení rezervy napěťové stability pomocí zařízení STATCOM.

Článek (18 - Synchrophasor based Early-Warning Voltage Instability Index, 2017) zavádí pro detekci nestability napětí ukazatel hodnotící napěťovou citlivost uzlu před a po vzniku poruchy. Ukazatel vychází z poměru změny napětí ke změně Q) a počítá rozdíl těchto hodnot pro čas t1 a t2. Hodnoty ΔU a ΔQ se určují z redukované Jakobian matice. Admitanční matice soustavy je sestavena přímo z naměřených dat z PMU. Výpočet ukazatele trvá 0,1 sekundy při četnosti dat z PMU 10 vzorků za sekundu.



V článku (19 - Online Static Voltage Stability Monitoring for Power Systems Using PMU Data, 2020) je statická napěťová stabilita sledována prostřednictvím minimálních singulárních hodnot MSV (minimum singular values) Jacobian matice výkonových toků. Ta je stanovena přímo z hodnot výkonů P a Q, velikosti a fázové úhlu uzlových napětí naměřených PMU, což by mělo zkrátit vyhodnocovací čas.

Metody strojového učení využité pro analýzu napěťové stability (v reálném čase)

Metody založené na strojovém učení (ML- Machine Learning) jsou stále populárnější pro zpracování big dat v reálném čase. Článek (9 - A Review of Machine Learning Approaches in Synchrophasor Technology, 2017) uvádí přehled využití metod ML v různých oblastech provozu ES: analýza přechodné stability, analýza napěťové stability, detekce a klasifikace

poruch, lokalizace oscilací a kybernetická bezpečnost. V úvodu je provedeno rozdělení metod ML a u jednotlivých oblastí použití jsou uvedeny využívané metody a odkazy na další články. Co se týká analýzy napěťové stability, přehled byl zaměřen na analýzu v reálném čase. Ze starších metod se využívá fuzzy logika (FL – fuzzy logic) a umělé neuronové sítě (ANN - artificial neural networks), z nových metod pak ANFIS (adaptive neuro-fuzzy logic interference systems), rozhodovací stromy (DT – decision trees) a metoda podpůrných vektorů (SVM - support vector machines), dále pak metody hlubokého učení (Deep Learning), např. CNN (Convolutional Neural Network). Jedná se především o metody učení pod dohledem (supervised learning).

ANFIS je neuronová síť, která se používá pro adaptivní učení. Jedná se o kombinaci neuro-fuzzy systému a algoritmu učení. ANFIS se dokáže z dat učit a na základě těchto dat předvídat. Učící algoritmus je schopen upravit váhy spojení mezi neurony v síti, což umožňuje síti učit se a přizpůsobovat se novým datům. Model ANFIS je široce používán jako výkonný nástroj pro téměř všechny aplikace v ES, jako je stabilita soustavy, kvalita napětí, poruchy přenosových vedení a řízení frekvence. V oblasti stability napětí se využívá k predikci rezervy stability a napěťového kolapsu.

Metody DT se používají pro klasifikaci i hodnocení bezpečnosti ES. Rozhodovací stromy jsou typem algoritmu, který lze použít pro klasifikační i regresní úlohy. Fungují tak, že vytvářejí stromovou strukturu rozhodnutí, kde každá větev představuje jiné rozhodnutí, které je třeba učinit.

SVM je metoda strojového učení s učitelem, sloužící zejména pro klasifikaci a také pro regresní analýzu. V poslední době se SVM stala účinnou výpočetní metodou díky široké škále aplikací pro zpracování analýzy velkých dat. Metoda se používá např. k vyhodnocení bezpečnosti ES, klasifikaci závažnosti stavu.

Konvoluční neuronová síť CNN je typ neuronové sítě pro hluboké učení, která se učí přímo z dat. CNN jsou zvláště užitečné pro hledání vzorů v obrázcích pro rozpoznání objektů, tříd a kategorií.

Odhadem meze napěťové stability pomocí metod ANN a SVM se zabývá článek (20 - Voltage Stability Margin Estimation Using Machine Learning Tools, 2023). Jako vstup pro metody ML bylo vygenerováno 10 000 provozních scénářů prostřednictvím simulací Monte Carlo s ohledem na variabilitu zatížení a bezpečnostní kritérium n-1. Poté byla stanovena hranice stability napětí všech scénářů pomocí nosových křivek PU za účelem získání databáze. Tyto informace umožnily strukturovat datovou matici pro trénování umělé neuronové sítě a metody podpůrných vektorů SVM, schopných předpovídat rozpětí stability napětí, a to i v reálném čase. Výkonnost obou predikčních nástrojů byla hodnocena prostřednictvím střední kvadratické chyby a koeficientu determinace. Neutronová síť vykazovala lepší výsledky. Příprava dat byla realizována s využitím SW nástrojů DIgSILENT PowerFactory, metody OPF (optimal power flows) PYPOWER vytvořené v Pythonu, ANN a SVM dostupné v knihovně "Scikit-learn" (ML a analýza dat v jazyce Python) a hyperparametrová optimalizace modelů provedená s použitím GridSearchCV.



Figure 2: Methodology stages for estimating the voltage stability margin

Monitorováním dlouhodobé stability napětí v reálném čase s využitím metod ML se zabývá článek (21 - Machine Learning Based Real-Time Monitoring of Long-Term Voltage Stability Using Voltage Stability Indices, 2020). Jedná se o kombinaci metody ML (Random Forest Regression) s tradičním vyjádřením pomocí ukazatelů napěťové stability VSI. Oproti jiným přístupům vstupem do vrstvy ML není set měření z PMU, ale několik různých vhodně zvolených ukazatelů stability. Článek se zabývá přípravou dat, trénováním a testováním algoritmu. Algoritmus porovnává různé modely ML, z nichž každý používá jinou skupinu vstupních VSI nebo princip strojového učení. Výsledky testování jsou diskutovány a na jejich základě vybrán model využívající metodu Random Forest Regression. Systém byl laboratorně testován, implementován na aplikační platformě synchrofázorů PhasorSmart v reálném čase a ověřen pomocí simulátoru reálného času RTDS . Byl také analyzován dopad chyb měření synchrofázorů na navrhovanou techniku. Algoritmus stanovuje rezervu zatížitelnosti vedení.



FIGURE 2. Proposed approach for computing LM in real-time.

Možný přístup ke zrychlení vyšetření napěťové stability nabízí článek (22 - Fast assessment of the voltage stability using reconfigured power system network and artificial neural network approaches, 2023). Princip spočívá ve zjednodušení sítě, eliminace některý uzlů spolu s odpovídajícími změnami impedancí vedení. Stabilita napětí původní (14 uzlové testovací sítě IEEE) a 3 překonfigurovaných (12, 10 a 8 uzlových) sítí byla vyhodnocena pomocí několika větvových ukazatelů stability napětí indikátorů. Na základě maximální zatížitelnosti vedení je se sestaveno pořadí kontingencí pro všechny 4 sítě. Pro nejohroženější vedení je provedeno trénování ANN, vstupem je faktor zatížitelnosti systému a výstupem jsou ukazatele stability

při kritické události. Bylo zjištěno, že není znatelný rozdíl mezi ukazateli stanovenými pomocí metody Newton-Raphson a pomocí ANN, ale při použití ANN došlo ke snížení času potřebného pro vyhodnocení stability. Navržený přístup může předpovídat hodnotu ukazatelů stability jednoho vedení. Lze vyvinout algoritmus, který dokáže překonfigurovat systém a předpovídat hodnotu indexů stability všech linek systému současně bez použití řešení load flow, to ale není již náplní článku.



Figure 11. Line stability indices of the most severe line (5-1) under critical contingency conditions.



Figure 17. Computation time of different systems.

Rozhodovací stromy (DT) mohou nabídnout užitečné nástroje pro včasnou identifikaci nestability napětí. Jsou založeny na historických datech, např. předem provedených off-line analýz tisíců potenciálních provozních podmínek. Metoda DT explicitně nemodeluje fyzický systém, ale vytvářejí matematický vztah mezi mnoha páry vstup-výstup pro daný systém. Vycházet se může z měření nebo simulovaných výstupů. Přesnost modelu se může lišit v závislosti na přesnosti simulovaných výstupů replikujících chování původního systému. Článek (23 - Decision Trees for Voltage Stability Assessment, 2020) popisuje dvě různé metody trénování rozhodovacích stromů pro hodnocení stability napětí, z nichž mohou být odvozena preventivní opatření. V popisovaném postup je pro každou topologii sítě pro základní zapojení i kontingence proveden výpočet chodu sítě (metoda Continuation Power Flow CPF) pro různá zatížení sítě. Výsledky tvoří databázi, která se pak používá k trénování rozhodovacích stromů, které se používají k predikci stability napětí uvažovaného systému z naměřených výkonů a

napětí zátěže. Počet vytvořených DT je úměrný počtu zátěžových uzlů a uvažovaných topologií. Počet větví stromu se zvyšuje s nárůstem dat. Naměřený stav je pak pomocí DT klasifikován podle zvolených pravidel, např. vzdálenost od meze stability, velikost napětí v uzlech, na stabilní (s dodrženým/nedodrženým napěťových limitů), nestabilní, hraničně stabilní.



Fig. 3. Proposed workflow for the creation of decision trees

Článek (24 - Neuro-Fuzzy Based Algorithm for Online Dynamic Voltage Stability Status Prediction Using Wide-Area Phasor Measurements, 2015) popisuje algoritmus nevyužívající neuronové sítě, ale neuro-fuzzy systém (NFS) v kombinaci s metodou výběru vlastností (Pearson future selection algorithm), která minimalizuje počet vstupů do NFS, dobu tréninku a komplikace neuro-fuzzy systému, kdy se vybírají jen vstupní veličiny s nejsilnější korelací k výstupu. Výstupem prediktoru je ohodnocení stavu stabilní/nestabilní.



Fig. 2. proposed algorithm for dynamic voltage stability status prediction

Metody strojového učení se také využívají pro vyšetřování a predikci krátkodobé stability. V této oblasti se uplatňují především metody hlubokého učení (Deep Learning).

V článku (25 - A short-term voltage stability online assessment based on multi-layer perceptron learning, 2023) je k analýze krátkodobé napěťové stability použit přístup založený na hlubokém učení, aby bylo možné zjistit skryté závislosti z chování systému po poruše. Využívají se přímá měření z PMU. Navrhovaný přístup využívá vícevrstvého modelu hlubokého učení založeného na perceptronech, aby bylo možné provést co nejpřesnější předpověď stavu krátkodobé stability napětí. Rychlá predikce stability napětí poskytuje operátorům soustavy dostatek času na přijetí účinných nápravných opatření proti velkým poruchám. Výsledky offline simulací různých typů poruch jsou vloženy do klasifikátoru jako vstupy. Poté, co byl klasifikátor trénován pomocí výsledků offline simulací, provádí online klasifikaci stavu ES z naměřených dat.



Fig. 4. Procedure of the proposed method.



Fig. 5. Proposed performance.

Krátkodobá stabilita je hodnocena podle ukazatele, který hodnotí, zda napětí během přechodného jevu nepokleslo pod stanovenou hodnotu, dále pak posuzuje i případnou dobu, po kterou toto nastalo (červený průběh uzlového napětí, kde byla zjištěna krátkodobá napěťová nestabilita, ačkoli se napětí nakonec ustálilo; naopak uzly s modrým a zeleným průběhem byly z pohledu krátkodobé stability stabilní).



Fig. 12. An unstable case of STVS in IEEE 39-bus test system against a 3 phase short circuit on line 21-22.

Zpožděná obnova napětí způsobené poruchou (např. vlivem RES) je zahrnuta do vyhodnocení krátkodobé stability napětí v reálném čase v článku (26 - Real-Time Short-Term Voltage Stability Assessment Using Combined Temporal Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory Neural Network, 2022). Metoda využívá neuronové sítě CNN a přenos učení (Transfer Learning). Trénovaný model používá jako vstup časové řady trajektorií postporuchových uzlových napětí, aby bylo možné predikovat stav krátkodobé nestability.



Figure 2. Proposed framework for STVS assessment.

Navržený přístup také využívá techniku přenosu učení pro hodnocení STVS (předem trénovaný model), která se dokáže přizpůsobit novému prostředí (případ N-1) s použitím pouze několika označených vzorků.



Figure 8. Transfer learning process.

Výkonnost navrhovaného modelu (TempCNN-LSTM) je porovnáván s dalšími populárními modely hlubokého učení a strojového učení, jako jsou TempCNN, LSTM, SVM a DT.



Figure 13. Performance with missing PMUs data on test systems.

Metoda Deep Transfer Learning je využita pro analýzu krátkodobé stability napětí v článku (27 - PMU measurements based short-term voltage stability assessment of power systems via deep transfer learnin, 2023). Oproti předchozímu článku, metoda využívá dynamické informace v reálném čase zachycené PMU k vytvoření počáteční datové sady. Využívá temporal ensembling pro označování vzorků a využívá generativní adversariální sítě nejmenších čtverců (LSGAN) pro rozšiřování dat, což umožňuje efektivní hluboké učení na malých souborech dat. Metoda navíc zlepšuje přizpůsobivost topologickým změnám zkoumáním spojení mezi různými poruchami. Experimentální výsledky na testovacím systému IEEE 39-bus ukazují, že navrhovaná metoda zlepšuje přesnost vyhodnocení modelu přibližně o 20 % prostřednictvím učení přenosu a vykazuje silnou adaptabilitu na topologické změny. Tento přístup, který využívá mechanismus sebepozorování modelu, nabízí významné výhody oproti metodám mělkého učení a dalším přístupům založeným na hlubokém učení.



Fig. 4. Flow chart of the proposed method.

V článku (28 - Fast online decision tree-based scheme for predicting transient and short-term voltage stability status and determining driving force of instability, 2022) je představena metoda, která na základě měřených dat z PMU je schopna predikovat přechodovou stabilitu a krátkodobou napěťovou stabilitu a rozlišit je, aniž by bylo potřeba měřit data po vzniku poruchy. Využívá se klasifikátor na bázi rozhodovacích stromů a měření z PMU instalovaných v uzlech, kde jsou připojené generátory a indukční motory. Těsně po vzniku poruchy/rušení je rozlišeno, zda se jedná o stabilní či nestabilní stav, v případě nestabilního stavu zda jde o narušení přechodné stability soustavy nebo o krátkodobou nestabilitu napětí (napěťový kolaps nebo trvale nízké napětí bez obnovy).



Fig. 10. Flowchart of the proposed scheme.



U uzlů s generátory a motory se sleduje P, Q a kmitočet. K dispozici jsou hodnoty měření před odstraněním poruchy. Poté je určen jeden generátor a motor (kandidáti), jejichž chod je nejvíce narušený (u G s výrazným nárůstem kmitočtu, u M s poklesem), ty mají největší vypovídací hodnotu z hlediska stability systému. Navrhované schéma používá pouze hodnoty rychlosti, P a Q kandidátského generátoru a kandidátského motoru ve čtyřech časových okamžicích včetně vzorku před a vzorku po výskytu poruchy a vzorku před a vzorku po okamžiku odstranění poruchy. Funkce generované v těchto čtyřech časových okamžicích obsahují dostatek informací o provozním bodu systému ve stavu před narušením, závažnosti poruchy v systému, podílu na době odstranění, účinnosti odstranění poruchy při obnově systému. Pro vytvoření klasifikátoru byl v tomto článku použit algoritmus DT Random Forest. Tato struktura obsahuje velké množství stromů a konečná předpověď je provedena na základě nejvíce predikované třídy mezi výsledky z jednotlivých stromů.

SW pro hodnocení napěťové stability

Informace o SW používaných v praxi pro vyhodnocení stability napětí jsou v dostupných zdrojích velmi strohé, většina zdrojů představuje metody, případně nástroje v počátečním stavu vývoje, bez nasazení v reálných soustavách. (viz předešlé).

Přehled SW a HW, včetně systémů HIL (hardware-in-the-loop) pro budoucí použití a výzkum WAMS je uveden v (29 - WAMS challenges and limitations in load modeling, voltage stability

improvement, and controlled island protection—A review, 2021). V přehledu jsou uvedeny silné stránky nástrojů a zařízení a využití.

Článek (30 - A Comprehensive Software Suite for Power Grid Stability Monitoring Based on Synchrophasor Measurements, 2017), představuje sadu SW nástrojů vyvinutých pro nasazení v jednom z řídicích center americké společnosti Southern Company. Nástroj GSAS (Grid Stability Awareness Systém) je určen pro monitorování a analýzu stability energetického systému v reálném čase na základě měření synchrofázorů) a představuje alternativu k jiným řešením, např. GE Phasorpoint. GSAS se skládá z pěti nástrojů. Nástroj pro monitorování oscilací detekuje rostoucí nebo špatně tlumené oscilace v raných fázích události, která vede k náhlým změnám tlumení, a poskytuje včasné varování při špatně tlumených režimech.



Fig. 2. A snapshot of the GSAS oscillation monitoring tool.

Fig. 3. A snapshot of GSAS voltage stability monitoring tool.

Nástroj pro monitorování stability napětí vypočítává index stability napětí a související úroveň spolehlivosti přenosu pro každé monitorované přenosové vedení. Index stability napětí je založen na analýze citlivosti dQ/dV z měření synchrofázorů v reálném čase. Nástroj pro sledování přechodné stability se zaměřuje na dynamické sledování chování, identifikace systémových poruch a poskytování včasného varování před trendem přechodné nestability systému na základě analýzy rozdílu fázorových úhlů poté, co dojde k významné události. Nástroj detekce událostí detekuje velké poruchy/změny v energetickém systému podle definovaných kritérii a provádí automatizovanou analýzu.

Výsledky testování komerčních SW na vyhodnocení napěťové stability z měření synchrofázorů provedeného NASPI (North American Synchrophasor Initiative) jsou uvedeny v dokumentu (31 - Using Synchrophasor Data for Voltage Stability Assessment, 2015). Bylo testování 5 komerčních SW. Všichni zúčastnění dostali identické datové sady pro každý ze dvou testovacích případů. Data zahrnovala model soustavy v ustáleném stavu, všechny provozní předpoklady, místa měření PMU a data PMU. Cílem bylo otestovat aplikace několika výrobců na známému souboru dat a porovnat různé výpočetní metody, algoritmy a vizualizační techniky používané každým nástrojem. Testovací případ 1 byl relativně jednoduchý případ, kdy byla provedena analýza stability napětí založená na synchrofázorech pro N-0 podmínky (tj. nebyla provedena kontingenční analýza). Případ 2 byl složitější případ, kdy byla provedena analýza stability napětí založená na synchrofázorech pro kontingenční podmínky N-O a N-1. Výsledky dosažené SW byly porovnány s řešením, které NASPI získala simulací chodu sítě v časových krocích, jejíž výstupem byla i data PMU, obsažená v datové sadě jako vstupní data pro testování SW. Rozdíly ve výsledcích některých SW byly značné, nejlepších výsledků dosáhl SW využívající lineární stavovou estimace a analýzu PV/QV. Součástí dokumentu jsou i informace o SW, které jejich výrobci poskytují, SW a HW požadavky a ukázky grafických rozhraní.

Využití výsledků VSA pro řízení a přípravu provozu soustavy

Článek (32-Compliance monitoring using synchrophasor technology in Indian power systém, 2022) představuje využití technologie synchrofázorů v ES Indie. Oblasti využití jsou: ověření odezvy primární regulace frekvence, hodnocení setrvačnosti a RoCoF, sledování napěťové stability, nesymetrie napětí, validace modelu generátoru, vyladění a ověření činnosti regulátoru, odolnost větrných a solárních elektráren na poklesy napětí, činnost systému chránění a dynamika chování zařízení FACTS (SVC/STATCOM). Sledování napěťové stability se provádí pomocí sledování nejen velikosti napětí, ale i rozdílovém úhlu fázorů v závislosti na průchozím výkonu. Sledování rozdílového úhlu fázorů indikuje mnohem dříve hrozící problémy s napěťovou stabilitou (33 - Application of synchrophasor angular difference as a grid monitoring tool and for assessment of Real time voltage Stability-Case Study, 2021). Rezerva stability, kdy dojde k výstraze, je stanovena offline simulací. Příklad zobrazení sledovaných veličin pomocí grafů PV a δP během normálního stavu a jeho obnovy jsou zobrazeny níže.



Figure 7 : PV and \deltaP plots for voltage stability assessment

Seřazení nahodilých událostí (kontingencí) je zásadní pro posouzení bezpečnosti a stability soustavy. V rozsáhlých soustavách je kontingenční analýza časově náročná a ne všechny kontingence mají nakonec vážný dopad, proto je vhodné sestavit pořadí kontingencí/výpadků vedení podle jejich závažnosti. Pořadí závažnosti kontingencí se určuje vzhledem k dopadu na napěťové poměry v uzlech soustavy, čím větší změna napětí, tím vyšší příčka v pořadí. Článek (34 - Ranking power system contingencies for real-time assessment of voltage stability based on PMU data, 2021) se věnuje **stanovení pořadí závažnosti kontingencí/výpadků vedení s ohledem na stabilitu napětí**, pomocí komplexního ukazatele stability stanoveného nejen pomocí velikosti, ale i fázového úhlu napětí, který se váže k tokům činného výkonu. Obě tyto hodnoty lze získat přímo z měření synchrofázorů v reálném čase. Komplexní ukazatel se vypočítá pomocí ukazatele velikosti napětí a ukazatele fázového úhlu a váhových koeficientů beroucích v úvahu počet kontingencí. Ukazatel velikosti napětí pak zahrnuje střední hodnotu napětí (s vyloučením minimálních a maximálních hodnot) a citlivostní faktor, který zvyšuje citlivost indikátoru na podstatné rozdíly napětí v síti. Ukazatel je testován na 30uzlové síti IEEE a porovnán s jinými ukazateli.



Fig. 1. Network contingencies selection flowchart



Fig. 4. Results of contingencies ranking for voltage deviation index



Fig. 6. Result of contingencies ranking for voltage-angle deviation index



Fig. 5. Result of contingencies ranking for the angle deviation index

Článek (35 - WAMS-based coordinated automatic voltage regulation incorporating voltage stability constraints using sequential linear programming approximation algorithm, 2018) představuje nový řídicí algoritmus pro automatickou regulaci napětí. Jedná se o koordinovanou regulaci napětí (CVR), která zahrnuje omezovací podmínky napěťové stability. Napěťová stabilita je hodnocena pomocí rychlého L-indexu, pomocí něhož se zajistí adekvátní rezerva napěťové stability. Hodnota indexu L se nabývá hodnot mezi 0 a 1, hodnota 1 je mez stability. Pomocí indexu L se identifikují slabé zatěžovací uzly, které vyžadují významnou podporu v regulaci jalového výkonu. Pro stanovení optimálních řídicích zásahů je použita metoda worst-case, jejímž cílem je minimalizovat maximální změny uzlových napětí, aby nedocházelo k velké fluktuaci napětí. Pro řešení nelineárního optimalizačního modelu je vyvinut účinný iterativní algoritmus řešení využívající sekvenční lineární programování (SLP). Metoda je testována na 30-, 40- a 118uzlové sítích IEEE a porovnána s jinými dvěma metodami. Oproti těmto metodám navrhovaný algoritmus dosahuje nižší fluktuace napětí Y, větší rezervu statické napěťové stability VSI a nižší podíl přenosových ztrát k celkovému zatížení sítě LR.



Fig. 7. Comparison results for IEEE 118-bus system under the selected test examples in Case I. (a) Results of y_{rms} ; (b) results of VSI; (c) results of LR.

Článek (36 - Real Time Wide Area Voltage Stability Index in the Korean Metropolitan Area, 2009) popisuje metodu analýzy napěťové stability přenosového koridoru mezi dvěma oblastmi (s vysokou hustotou odběru a zdrojovou oblastí). Oblasti jsou nahrazené virtuálními uzly, k metoda je založená na Théveninově ekvivalentu. Metoda při znalosti impedancí propojovacích vedení umožňuje monitorovat jen jeden konec vedení, což vede k úspoře počtu PMU jednotek. Záměrem bylo využití dat z PMU nesvázaných s daty z estimace. Simulace je provedena na reálné síti korejské společnosti KEPCO, kde byl záměr tuto metodu nasadit. Zda byla nakonec nasazena, není známo.



Figure 12. Korean power system grid and the major transmission lines.

Hlavní autor předchozího článku je spoluautorem článku (37 - Real-Time Voltage Stability Assessment Method for the Korean Power System Based on Estimation of Thévenin Equivalent Impedance, 2019), kde výše uvedená metoda je rozšířena o odhad parametrů modelu zatížení (tzv. ZIP model zátěže) z naměřených dat, algoritmus odhadu je vysvětlen v článku. Dynamické chování zátěže ovlivňuje poměry v síti a její zahrnutí do analýzy napěťové stability zpřesňuje výpočet rezervy stability. Červené křivky určují závislost činného zatížení na napětí, které se mění s rostoucím zatížením z. Kritické zatížení odpovídá křivce z_c. Oproti klasickému vyjádření meze stability, kdy se neuvažuje ZIP model zátěže, se kritický bod dostal pod vrchol nosové křivky, kdy se nosová křivka ještě dotýká křivky zátěže při kritickém zatížení.



Figure 11. PV curves with the ZIP load.

Závěry a doporučení pro další práce kapitoly 3.8.1

- Existuje celá řada ukazatelů stability napětí, v článcích je však obtížné poznat, které jsou nakonec vyžívány v reálných aplikacích
- Uvedené metody jsou v naprosté většině jen testovány na testovacích sítích IEEE, případně na modelech reálných sítích, není z článků jasné, zda a jak byly nasazeny v praxi
- U metod založených na modelech (model-based) je trendem využívat přesnější modely zatížení a generátorů pro zachycení dynamiky soustavy. Dále využívat různé matematické postupy pro zrychlení výpočtů, aby metody byly využitelné pro online nebo real-time monitoring.
- U metod založených přímo na měřeních PMU se většinou využívá Théveninův ekvivalent. Řada metod se snaží vylepšit TE, např. zahrnutím vlivu zátěže v jiných uzlech než ve vyšetřovaném, nebo zahrnutím dynamického chování sítě a jejích prvků.
- Vyskytují se i metody, které vychází z klasických offline metod založených na Jacobian matici výkonových toků, ale tuto matici sestavují přímo z naměřených dat.
- V posledních letech lze vysledovat, že autoři se věnují více krátkodobé stabilitě napětí a stabilitě ohrožené velkými narušeními, tj. rychlým dynamickým jevům. V této oblasti se v posledních letech začínají prosazovat metody založené na umělé inteligenci a strojovém učení.
- Články se věnují především detekci napěťové stability, méně pak její predikci. V oblasti predikce je velký prostor právě pro metody strojového učení.

- Analýzu napěťové stability je možné zahrnout do sekundární regulace napětí či do stanovení pořadí kontingencí.
- Popis a zkušenosti s reálnými aplikacemi se v dostupných zdrojích téměř nevyskytovaly.

Literatura kapitoly 3.8.1

- [1] J. D. Pinzón and D. G. Colomé, "Voltage stability assessment using synchrophasor measurements: Trends and development," 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Quito, Ecuador, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126724.
- [7] Rabiaa Gadal, Aziz Oukennou, Faissal El Mariami, Abdelziz Belfqih, Naima Agouzoul, "Voltage Stability Assessment and Control Using Indices and FACTS: A Comparative Review", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2023, Article ID 5419372, 18 pages, 2023. https://doi.org/10.1155/2023/5419372
- [8] Danish, Mir Sayed Shah, Tomonobu Senjyu, Sayed Mir Shah Danish, Najib Rahman Sabory, Narayanan K, and Paras Mandal. 2019. "A Recap of Voltage Stability Indices in the Past Three Decades" *Energies* 12, no. 8: 1544. https://doi.org/10.3390/en12081544
- [9] Sindy L Ramírez-P, Carlos A Lozano-M, Nayiver G Caicedo-D "Review and Classification of Indices for Voltage Stability Monitoring using PMU Measurements". Journal of Engineering Science & Technology Review, 2018, doi:10.25103/jestr.114.23
- [10] Javad Modarresi, Eskandar Gholipour, Amin Khodabakhshian, "A comprehensive review of the voltage stability indices", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 63, 2016, pp 1-12, https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.010.
- [11] Chappa, H, Thakur, T. Voltage instability detection using synchrophasor measurements: A review. Int Trans Electr Energ Syst. 2020; 30:e12343. https://doi.org/10.1002/2050-7038.12343
- [12] AR Nageswa Rao, Priya Vijaya & M Kowsalya (2021) Voltage stability indices for stability assessment: a review, International Journal of Ambient Energy, 42:7, 829-845, DOI: <u>10.1080/01430750.2018.1525585</u>
- [13] X. Li, Z. Li, L. Guan, L. Zhu and F. Liu, "Review on Transient Voltage Stability of Power System," 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Chengdu, China, 2020, pp. 940-947, doi: 10.1109/iSPEC50848.2020.9351059.
- [14] M. D. Lal and R. Varadarajan, "A Review of Machine Learning Approaches in Synchrophasor Technology," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 33520-33541, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3263547.
- [15] H. -Y. Su and C. -W. Liu, "Estimating the Voltage Stability Margin Using PMU Measurements," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3221-3229, July 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2477426.
- [16] Su, Heng-Yi, and Tzu-Yi Liu. 2017. "GECM-Based Voltage Stability Assessment Using Wide-Area Synchrophasors" *Energies* 10, no. 10: 1601. <u>https://doi.org/10.3390/en10101601</u>

- [17] li Bidadfar, Hossein Hooshyar, Luigi Vanfretti, "Dynamic Thévenin equivalent and reduced network models for PMU-based power system voltage stability analysis", Sustainable Energy, Grids and Networks, Volume 16, 2018, Pages 126-135, <u>https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.07.002</u>.
- [18] Su, Heng-Yi, and Tzu-Yi Liu. 2017. "A PMU-Based Method for Smart Transmission Grid Voltage Security Visualization and Monitoring" *Energies* 10, no. 8: 1103. <u>https://doi.org/10.3390/en10081103</u>
- [19] A. Chandra and A. K. Pradhan, "Online Voltage Stability Assessment using Wide Area Measurements," 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS), Jaipur, India, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPS48983.2019.9067663.
- [20] F. Hu, K. Sun et al., "Measurement-based voltage stability assessment for load areas addressing n-1 contingencies", *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 11, no. 15, pp. 3731-3738, 2017, 10.1049/iet-gtd.2016.1913
- [21] Pankaj Sahu, M. K. Verma "Online monitoring of voltage stability margin using PMU measurements", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020, https://doi.org/10.11591/ijece.v10i2.pp1156-1168
- [22] *Suresh Babu Palepu, Manubolu Damodar Reddy* "Voltage stability assessment using PMUs and STATCOM", <u>http://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i1.pp1-10</u>
- [23] C. Jamroen and S. Dechanupaprittha, "Synchrophasor based early-warning voltage instability index," 2017 IEEE Manchester PowerTech, Manchester, UK, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2017.7981164.
- [24] Jianhong Pan, Aidi Dong, Jiashu Fan, Yang Li, "Online Static Voltage Stability Monitoring for Power Systems Using PMU Data", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, Article ID 6667842, 8 pages, 2020. <u>https://doi.org/10.1155/2020/6667842</u>
- [25] Guañuna, G.; Chamba, M.; Granda, N.; Cepeda, J.; Echeverría, D.; Vargas, W. "Voltage Stability Margin Estimation Using Machine Learning Tools". Revista Técnica "energía". No. 20, Issue I, Pp. 1-8, 2023, Doi: https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n1.2023.570
- [26] K. D. Dharmapala, A. Rajapakse, K. Narendra and Y. Zhang, "Machine Learning Based Real-Time Monitoring of Long-Term Voltage Stability Using Voltage Stability Indices," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 222544-222555, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3043935.
- [27] Santosh Kumar Gupta and Sanjeev Kumar Mallik "Fast assessment of the voltage stability using reconfigured power system network and artificial neural network approaches", Engineering Research Express, 2023, DOI 10.1088/2631-8695/acf189
- [28] V. S. Narasimham Arava and L. Vanfretti, "Decision Trees for Voltage Stability Assessment," 2020 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), Tempe, AZ, USA, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/SmartGridComm47815.2020.9302952.
- [29] A. Ahmadi and Y. A. Beromi, "Neuro-fuzzy based algorithm for online dynamic voltage stability status prediction using wide-area phasor measurements," 2015 30th International Power System Conference (PSC), Tehran, Iran, 2015, pp. 14-20, doi: 10.1109/IPSC.2015.7827720.

- [30] Meysam Shahriyari, Amin Safari, Anas Quteishat, Hadi Afsharirad, "A short-term voltage stability online assessment based on multi-layer perceptron learning", Electric Power Systems Research, Volume 223, 2023, <u>https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109562</u>.
- [31] Adhikari, Ananta, Sumate Naetiladdanon, and Anawach Sangswang. 2022. "Real-Time Short-Term Voltage Stability Assessment Using Combined Temporal Convolutional Neural Network and Long Short-Term Memory Neural Network" *Applied Sciences* 12, no. 13: 6333. <u>https://doi.org/10.3390/app12136333</u>
- [32] Y. Li, S. Zhang, Y. Li, J. Cao and S. Jia, "PMU Measurements-Based Short-Term Voltage Stability Assessment of Power Systems via Deep Transfer Learning," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-11, 2023, Art no. 2526111, doi: 10.1109/TIM.2023.3311065.
- [33] Mahmoud Lashgari, S. Mohammad Shahrtash, "Fast online decision tree-based scheme for predicting transient and short-term voltage stability status and determining driving force of instability", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 137, 2022, <u>https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107738</u>.
- [34] Raju Chintakindi, Arghya Mitra, "WAMS challenges and limitations in load modeling, voltage stability improvement, and controlled island protection—A review", Energy Reports, Volume 8, Supplement 1, 2022, Pages 699-709, <u>https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.217</u>.
- [35] J. Ma, S. Feuerborn, C. Black and V. M. Venkatasubramanian, "A comprehensive software suite for power grid stability monitoring based on synchrophasor measurements," 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT.2017.8086009.
- [36] Using Synchrophasor Data for Voltage Stability Assessment, NASPI, 2015, <u>https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/7.pdf</u>
- [37] Chandan Kumar, Alok Pratap Singh, Saibal Ghosh, Akash Modi, Saurav Kumar Sahay, "Compliance monitoring using synchrophasor technology in Indian power systém", 2022 CIGRE Canada Conference & Expo, CIGRE-539, https://cigreconference.ca/papers/2022/paper 539.pdf
- [38] A. P. Singh, S. Ghosh, S. K. Sahay, C. Kumar, A. Modi and S. Mondal, "Application of synchrophasor angular difference as a grid monitoring tool and for assessment of Real time voltage Stability-Case Study," 2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS), Kharagpur, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPS52420.2021.9670318.
- [39] Azad, S., Asgharinejad Keisami, M. H., Amiri, M. M., Mosallanejad, A., Ameli, M. T. (2022). 'Ranking power system contingencies for real-time assessment of voltage stability based on PMU data', *Journal of Energy Management and Technology*, 6(2), pp. 91-97. doi: 10.22109/jemt.2021.270938.1275
- [40] Heng-Yi Su, Tzu-Yi Liu, "WAMS-based coordinated automatic voltage regulation incorporating voltage stability constraints using sequential linear programming approximation algorithm", Electric Power Systems Research, Volume 163, Part A, 2018, Pages 482-490, <u>https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.07.024</u>.

- [41] Han, Sang-Wook, Lee, Byong-Jun, Kim, Sang-Tae, Moon, Young-Hwan, "Real Time Wide Area Voltage Stability Index in the Korean Metropolitan Area", Journal of electrical engineering & technology Vol.4, No.4, 2009, pp.451-456
- [42] Lee, Yunhwan, and Sangwook Han. 2019. "Real-Time Voltage Stability Assessment Method for the Korean Power System Based on Estimation of Thévenin Equivalent Impedance" *Applied Sciences* 9, no. 8: 1671. <u>https://doi.org/10.3390/app9081671</u>

3.8.2 Setrvačnost soustavy (Inertia)

V souvislosti s útlumem klasických zdrojů se synchronními generátory se očekává nárůst podílu OZE a s tím spojené zvyšování podílu nesynchronních výroben připojených přes střídače (FVE a VTE), které přináší problémy se stabilitou soustavy v důsledku snížení její setrvačnosti. S poklesem setrvačnosti v energetických systémech způsobí stejná ztráta výroby nebo zátěže mnohem rychlejší změnu frekvence a je k dispozici mnohem méně času na regulaci a vyrovnání výkonové nerovnováhy, než je tomu ve stejné ES s vyšší setrvačností. Snížení setrvačnosti ES má za následek i zvýšení rizika vzniku ostrovních provozů a zvýšení hodnoty RoCoF. Dále se vyžaduje rychlejší odepnutí či změna zátěže při podfrekvenci a může dojít k výpadkům/odpojení decentralizovaných zdrojů. Přehled o problematice systémů se sníženou setrvačností uvádí např. článek (125) "Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions – A review". Otázky setrvačnosti potažmo flexibility soustavy či propojených soustav se řešily i v mezinárodních projektech, např. <u>MIGRATE</u> (články 135, 136, 137) nebo <u>EdgeFLEX</u> (články 133, 134). Díky možnosti estimace setrvačnosti soustavy mohou vzniknout nové UseCase, jak se široce diskutováno v závěru článku (132).

Problematikou možností ztráty setrvačnosti a předcházením a eliminací jejího vzniku v propojených TSO v rámci Evropy se dlouhodobě zabývá zejména ENTSO-E. V průběžně aktualizovaném dokumentu (102) "Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF), 2020" ENTSO-E informuje o současném i předpokládaném budoucím vývoji ES z pohledu rizika ztráty setrvačnosti. Dále dává doporučení k eliminaci snížení setrvačnosti ES a možnosti měření a vyhodnocení parametru RoCoF, včetně návrhu maximální hodnoty RoCoF pro zachování setrvačnosti v ES v rámci kontinentální Evropy. Zároveň ENTSO-E uvádí, že s poklesem výroby elektřiny ze synchronních výrobních modulů a nárůstem instalace FVE a VTE bude zapotřebí, aby provozovatelé TSO monitorovali a předpovídali setrvačnosti ES pod kritickou úroveň. Dle článku 39 nařízení Komise (EU) 2017/1485 (System Operation Guideline) všichni provozovatelé přenosových soustav (PPS) každé dva roky aktualizují analýzu setrvačnosti v rámci jejich TSO a popřípadě mají společně zajistit udržení její minimální přípustné hodnoty v rámci všech synchronně propojených TSO v kontinentální Evropě.

V současné době lze hodnotu setrvačnosti stanovit jejím dopočtením z naměřených hodnot veličin získaných ze systému SCADA nebo ze systému WAMS. Hlavní rozdíl v těchto přístupech sběru dat je časové rozlišení. V systému SCADA je časové rozlišení v řádu sekund a u WAMS využívající PMU je časové rozlišení v řádu jednotek milisekund. Oba dva přístupy jsou porovnány v článku (102).

Vyhodnocení a estimace setrvačnosti elektrizační soustavy

Ve zdroji (102) jsou představeny základní dva přístupy pro stanovení setrvačnosti. Prvním z nich je **On-line monitorování založené na modulačním přístupu**, které je založeno na spektrální analýze frekvenčního chování systému. V definovaném uzlu sítě je injektován rušivý činný výkon (sinusový nebo obdélníkový nebo jiný cyklický signál) pomocí např. HVDC nebo řízené baterie, který způsobí v ES oscilace na dané charakteristické frekvenci. Ze znalosti injektovaného rušivého signálu a on-line naměřené 32

odezvy pomocí PMU v různých uzlech ES je možné identifikovat přenosovou funkci systému a následně odhadnout hodnotu setrvačnosti v dané ES (tj. celkově setrvačnost generátorů i zatížení). Tato metoda je vhodná především pro menší ES v ostrovním provozu, kdy stačí nižší

amplituda injektovaného signálu rušení, proto zde není dále více řešena. Pro rozsáhlou synchronizovanou a propojenou ES v rámci kontinentální Evropy není tato metoda vhodná. Pro rozsáhlejší sítě by byla zapotřebí vyšší amplituda signálu rušení, což by mohlo mít za následek výkonové oscilace a rušení sousedních TSO. Navíc pro rozsáhlejší TSO se snižuje přesnost a aplikovatelnost této metody.

Druhým přístupem dle zdroje (102) je **On-line monitorování s "významným rušením" estimace frekvence v reálném čase**. Tato metoda je více deterministická. Princip je založen na měření napětí a proudů v PMU pro následné vyhodnocení přenosové funkce systému a sledování hodnoty frekvence v reálném čase, ze které lze zjistit změnu činného výkonu (vypnutí nebo redispečink výroby, zatížení, vedení), která tuto změnu frekvence způsobila. Přechodné jevy jsou ovlivněny velikostí dostupné setrvačnosti, kterou je možné estimovat pomocí přenosové funkce systému nebo pomocí více sofistikovaných algoritmů. Níže je uvedeno několik příkladů metod, které lze využít pro estimaci setrvačnosti ES z dat získaných pomocí WAMS (PMU).

Estimace efektivní setrvačnosti oblasti ES ("effective area inertia")

Tato metoda je stručně představena v článku (102) a detailněji byla řešena v rámci projektu MIGRATE, viz zdroj (137) a článek (132). Projekt MIGRATE zavádí zobecněný koncept nezávislého odhadu setrvačnosti v decentralizovaných regionech z naměřených dat přeshraničních toků výkonů pomocí PMU. Metoda byla testována např. na datech z TSO ve Velké Británii. V této metodě je výkonová nerovnováha v ES považována za časově proměnou funkci, ne za diskrétní změnu výkonu. Efektivní setrvačnost oblasti ES je vztažena na ekvivalentní konstantu setrvačnosti v ohraničené oblasti sítě, která by charakterizovala vztah mezi změnou výkonu v oblasti ostrovní části ES (nebo mimo ni) a pozorovaným RoCoF v dané ostrovní části ES. Problémem je, že jediný ekvivalentní model reprezentující celou ostrovní část ES, jako jediné "centrum setrvačnosti", ignoruje kolísání výkonu (tedy úhlů) a oscilace mezi generátory v rámci této ES. Toto však není možné aplikovat pro ES, kde jsou oblasti s velkou a naopak oblasti s velmi nízkou setrvačností. Parametr RoCoF (změna frekvence v čase) může být poté velmi odlišný v jednotlivých částech sítě, viz Obr. 1.



Obr. 3.8.2-1 Rozdílné hodnoty RoCoF v ES ve Velké Británii [132]

Aby bylo možné začlenit vliv kývání výkonu a dynamiku oscilací do estimace setrvačnosti systému, lze energetický systém považovat za několik center setrvačnosti propojených vedením. Tzn. celou síť je možné rozdělit na několik menších oblastí. Přičemž se předpokládá,

že v každé této oblasti jsou hodnoty frekvence a velikosti úhlů pro celou tuto oblast shodné. Tyto jednotlivé oblasti jsou pak navzájem propojeny vedením, kde však existuje riziko ztráty úhlové stability. Oblast, kterou lze považovat za ekvivalentní centrum setrvačnosti, je znázorněna na Obr. 2. Metodika estimace setrvačnosti vyžaduje přesně časově synchronizovaná data z PMU. A zároveň má být TSO ohraničena měřením PMU na všech přeshraničních vedeních. Pomocí WAMS je pak zjišťován především tok výkonů z/do dané oblasti ("centra setrvačnosti") a je stanovena hodnota ekvivalentní frekvence odpovídající frekvenci v celé oblasti. Výpočtem parametru RoCoF a detekcí odchylek výkonu od jmenovitého stavu sítě lze pak vyhodnocovat frekvenční stabilitu.



Obr. 3.8.2-2 Princip stanovení efektivní setrvačnosti oblasti [132]

Změna výkonu přes hranici oblasti vede ke změně frekvence v oblasti a z toho se vypočítá efektivní setrvačnost oblasti H_{EA} .Hodnota efektivní setrvačnosti oblasti H_{EA} zahrnuje jak setrvačnost všech synchronních zdrojů uvnitř oblasti, tak i reakci nesynchronních výrobních zdrojů na aktuální poruchu nebo výkonovou nerovnováhu v ES. Lze ji vypočítat ze změřené hodnoty změny toku přeshraničního výkonu Δp_b (hodnota z PMU) a průměrné odchylky frekvence v dané oblasti $\frac{df_a}{dt}$ od její jmenovité hodnoty.

$$H_{EA} = \frac{\Delta p_b(t)}{2\frac{df_a(t)}{dt}} \left(MW \cdot s^2\right)$$

Celkovou změnu toku přeshraničního výkonu pro danou oblast lze vypočítat sečtením výkonů naměřených pomocí PMU na všech přeshraničních vedeních oblasti a následným odečtením výkonu v ustáleném stavu před poruchou (výkonovou nerovnováhou). Vzhledem k tomu, že výsledný $RoCoF = \frac{df_a}{dt}$ je obecně zašumělý signál, tak je pro stabilnější výpočet estimace setrvačnosti vhodné využít integraci výkonu $\Delta p_b(t)$ od času vzniku poruchy (t₀) do času (t), tj. doby, kdy je energie dodávána nebo odebrána z vyšetřované oblasti ES přes hraniční vedení, než se ustálí výkonová nerovnováha. Během období, kdy probíhá díky setrvačnosti odezva systému, se integrovaná odchylka výkonu a frekvenční posun (změna frekvence) mění lineárně.

$$H_{EA} = \frac{\int_{t_0}^t \Delta p_b(t)}{\Delta f_a(t)} \ (MW \cdot s^2)$$

Efektivní hodnoty setrvačnosti lze určit nezávisle pro všechny oblasti, které jsou ohraničeny měřením PMU. Měřené hodnoty přeshraničních výkonů umožňují vyhodnotit, jak jejich změny ovlivní průměrnou hodnotu frekvence v dané oblasti.

Současně lze předpokládat, že úhlové zrychlení ekvivalentního "centra setrvačnosti" $d\delta$, v reakci na danou výkonovou nerovnováhu, závisí na setrvačnosti, tj. $f = d\delta/dt$. Větší úhlové zrychlení v systému s nízkou setrvačností bude mít za následek rychlejší ztrátu synchronizace oblasti s menším rušením výkonu než ekvivalentní scénář v síti s vyšší setrvačností. Proto setrvačnost sítě souvisí jak s frekvenční, tak i s úhlovou stabilitou. Celkový proces estimace setrvačnosti je znázorněn na Obr. 3.



Obr. 3.8.2-3 Navržený postup estimace efektivní setrvačnosti [132]

Navržená metoda byla v rámci projektu MIGRATE testována pomocí simulací dynamického modelu severské energetické soustavy Norska a Švédska (Nordic power system) v plném rozsahu, který obsahuje 1 900 generátorů, 3 300 zátěží, 7 900 uzlů. Z výsledků na Obr. 4 je vidět, že navržená metoda estimace efektivní setrvačnosti je více přesná, než současně využívaná metoda estimace rotační setrvačnosti. Tzn., že efektivní setrvačnost charakterizuje skutečný poměr frekvence/výkonu lépe než rotující setrvačnost. Což je dáno tím, že rotační setrvačnost zahrnuje pouze kinetickou energii uloženou v synchronních zdrojích instalovaných a provozovaných v dané oblasti sítě. Oproti tomu efektivní setrvačnost zahrnuje i příspěvek nesynchronních výrobních zdrojů, závislost zátěže na napětí a frekvenci, řízené odezvy výkonových elektronických měničů OZE, akumulace, HVDC atd. Závislost zátěže na napětí a výkonu výrazně snižuje RoCoF.



Obr. 3.8.2-4 Výsledky testování metody v rámci projektu MIGRATE [132]

Dále byla tato metoda v rámci projektu MIGRATE testována na základě reálně naměřených dat např. ve Skotsku, Irsku, Velké Británii (velký podíl OZE), Itálii a Finsku. Např. v Irsku byla uvažována výroba z vodních a geotermálních zdrojů se synchronními generátory. Celá oblast byla rozdělena na 4 dílčí oblasti ("centra setrvačnosti"), ve kterých byly porovnávány hodnoty estimované efektivní setrvačnosti a rotační setrvačnosti všech instalovaných synchronních generátorů. Z výsledků vyplývá, že estimace efektivní setrvačnosti přibližně odpovídá realitě.

Na Obr. 5 je uveden navržený příklad zjednodušeného schématu pro regulaci a zajištění frekvenční stability v rámci TSO, která by byla rozdělena do dvou oblastí ("center setrvačností") a regulace činných výkonů (udržení hodnoty frekvence) by probíhala i na základě zjištěné aktuální hodnoty setrvačnosti v dané oblasti.



Obr. 3.8.2-5 Návrh regulačního schématu pro zajištění frekvenční stability v ES [137]

Dle (102) je pro zpřesnění výpočtu potřeba u rozsáhlejších oblastí, které jsou rozděleny na menší centra setrvačnosti, určit přesný čas vzniku poruchy (výkonové nerovnováhy), znát hodnoty frekvence a hodnoty a směr toku výkonů před poruchou a z naměřených dat z PMU znát přesné časové okno řešené události.

Podobné závěry jsou prezentovány také v článku (140).

Estimace setrvačnosti ES pomocí dynamického ekvivalentu

Přibližně od roku 2019 se v navrhovaných metodách pro estimaci setrvačnosti sítě studují techniky pro redukci modelu sítě na její dynamický ekvivalent. Dynamický ekvivalent umožní použít i pro velmi rozsáhlé a propojené TSO např. v rámci ENTSO-E např. metodu řešenou v projektu MIGRATE: Zároveň díky dynamickému ekvivalentu sítě se zpřesní estimace setrvačnosti, viz zdroj (102). Například je tato metoda popsána v článku (141), kde jsou prezentovány i výsledky jejího testování pomocí simulací. Cílem je zpřesnění estimace setrvačnosti vytvořením dynamického ekvivalentu části ES v okolí rozvoden (obecně uzlů v ES), kde není všude měření pomocí PMU. Tyto dynamické ekvivalenty pak mohou poskytnout ekvivalentní setrvačnost připojených zdrojů a informaci o odezvě setrvačnosti zatížení každé této oblasti po výskytu poruchy.

Princip je založen na redukci sítě použitím Wardovy metody, viz Obr. 6. Pokud je dán energetický systém s PMU instalovanými pouze v N uzlech ze všech N_t uzlů v celém energetickém systému (algebraický model ES), tak je dynamický ekvivalentní model definovaný admitanční maticí celého systému Y_{EQ} . Ekvivalentní injektovaný proud se pak vypočítá dle rovnice níže z vektoru napětí V_R a admitanční matice Y_{EQ} . Ekvivalentní injektovaný proud je roven rozdílu proudů dodávaných do sítě generátory a proudů odebíraných zátěží.

$$I_{EQ} = Y_{EQ} \cdot V_R$$



Obr. 3.8.2-6 Dynamický ekvivalentní model ES [102]

Ekvivalentní zdroj (generátor) lze získat z dat měřených PMU pomocí algoritmů, jako je metoda rozptylu, kde se vychází z rozptylu velikosti vnitřního napětí generátoru udávaného jako funkce proměnných sítě, nebo pomocí metody Inter-area Model Estimation (IME).

Na Obr. 7 je vidět např. ekvivalentní generátor E1, který reprezentuje jakýkoliv generátor v síti. Předpokládá se, že je pomocí PMU naměřeno napětí $V_1 \angle \theta_1$. Hodnota proudu $I_1 \angle \alpha_1$ je výstupem Wardova ekvivalentu a rovná se I_{EQ} .


Obr. 3.8.2-7 Model ekvivalentního generátoru [102]

Z U a I měřených pomocí PMU v koncových uzlech, kde jsou připojeny ekvivalentní generátory jednotlivých ES, je možné odhadnout přechodové reaktance a následně vnitřní napětí, což umožňuje vypočítat zátěžný úhel rotoru, frekvenci a RoCoF.

Jakmile jsou získány úhly vnitřního napětí $\delta_i(t)$ ekvivalentních generátorů, může být stanovena rovnice kývání daného zdroje a použita k odhadu jeho setrvačnosti. Např. po události v oblasti A nastane nerovnováha výkonu ekvivalentního generátoru $\Delta P_i(t)$ zjištěného dle WAMS, z čehož je možné určit estimaci setrvačnosti H_i v oblasti B. Jmenovitá hodnota frekvence je f_0 .

$$\frac{H_i}{\pi \cdot f_0} \frac{d^2 \delta_i(t)}{dt^2} = \Delta P_i(t) \quad (-)$$

Před poruchou (výkonovou nerovnováhou) je setrvačnost brána konstantní. V době přechodného děje jde o nedeterministický (stochastický) systém, který lze řešit metodou nejmenších čtverců, kde $A_i = \frac{d^2 \delta_i(t)}{dt^2}$

$$H_i = \pi \cdot f_0 (A_i^T A_i)^{-1} A_i^T \Delta P_i(t)$$

Metoda byla testována na modelech sítí např. v článku (141) pomocí SW PowerFactory 2018, viz grafy níže na Obr. 8. Dle výsledků simulací jsou hodnoty RoCoF a estimované frekvence blízké reálným hodnotám.



Obr. 3.8.2-8 Výsledky testování estimace setrvačnosti ES pomocí dynamického ekvivalentu [102]

Nevýhodami této metody jsou potřeba dostatečných informací o parametrech v definovaných oblastech a propojovacích vedeních a nutnost mít umístěné měření PMU ve specifických uzlech za účelem identifikace dynamických ekvivalentů. Hlavní nevýhodou viz článek (102) je, že tato metoda nemůže být použita pro nepřetržité sledování setrvačnosti, jelikož je řízená událostmi v síti, tj. vznikem poruchy nebo výkonové nerovnováhy v ES.

Podobná metoda byla prezentována např. v článku (142) a testována na reálných datech z energetické sítě v Íránu a dále např. v článku (143) na modelu sítě IEEE 39 uzlové pomocí PSCAD.

Estimace setrvačnosti ES pomocí polynomické aproximace – Japonsko

V článku (65) a článku (144) se řeší možnosti estimace setrvačnosti pomocí WAMS v Japonsku, použitím polynomické aproximace.

Estimace je založena na náhradě celé soustavy jedním ekvivalentním generátorem. Z rovnice kývání ekvivalentního zdroje se pak na základě časové změny frekvence určí setrvačnost soustavy. Průběh naměřené frekvence z PMU může zahrnovat oscilační složky, což negativně ovlivní přesnost výpočtu RoCoF. Metoda používá techniku polynomiální aproximace na měřený frekvenční signál, která vyruší vliv velkých oscilačních složek. Metoda je ověřena prostřednictvím reálně naměřených dat. Oproti konvenčním metodám estimace setrvačnosti má být tato metoda přesnější.

Vztah pro výpočet estimace setrvačnosti je podobný jako u výše popsané metody využívající dynamický ekvivalent ES. I zde se využívá dynamický ekvivalent generátoru a navíc je zde zkoumán vliv počtu použitých aproximací na přesnost výpočtu.

$$M_{j} = \frac{\Delta P_{j}(f_{sj})}{\frac{df_{j}}{dt}} - \Delta M_{j} = \frac{\Delta P_{j}}{2\pi f_{sj} |A_{1j}|}$$
$$M_{j} = 2 \cdot H_{j} \cdot S_{j}$$
$$\Delta f_{j} / f_{sj} = A_{5j}t^{5} + A_{4j}t^{4} + A_{3j}t^{3} + A_{2j}t^{2} + A_{1j}t^{1}$$

Kde M_j je moment hybnosti, H_j je konstanta setrvačnosti oblasti a S_j celkový generovaný výkon v dané oblasti. ΔM_j je změna setrvačné energie způsobená odstavení generátoru v oblasti j. Δf_j je změna frekvence, f_{sj} je jmenovitá hodnota frekvence, $d f_j/d f_{sj}$ je parametr RoCoF, ΔP_j změna činného výkonu způsobená přechodovým jevem a A_{1j} koeficient polynomu 1. stupně.

Z výsledků výpočtu estimované setrvačnosti v porovnáním s konvenčním přístupem výpočtu setrvačnosti pomocí RoCoF (viz Obr. 9) vychází, že u µPMU1, který se nachází blízko místa ztráty výkonu, má odhadovaná setrvačnost nejvyšší hodnotu kvůli silnému vlivu oscilačních složek. Oscilační efekt je utlumen, když jsou µPMU (µPMU2, µPMU3 a µPMU4) vzdálené, tj. estimace setrvačnosti je pak realističtější. Pro eliminaci vlivu oscilací je využita při estimaci setrvačnosti aproximace pomocí polynomu 1. až 5. stupně. Při použití polynomiální metody je zřejmé, že se estimované hodnoty setrvačnosti ze všech µPMU se vzrůstajícím řádem polynomu již významně nemění a aproximace pomocí 5. stupně polynomu je dostačující na vyhlazení naměřeného průběhu frekvence (eliminuje oscilace) a vede ke zpřesnění hodnoty estimace se výsledná hodnota estimované setrvačnosti z jednotlivých PMU téměř nemění, tj. pro celou oblast ES vychází téměř stejné hodnoty, ať je měření PMU kdekoliv v ES.





Wide Area RoCoF Sharing (WARS)

Zde se WAMS se používají k přenosu informací a přesných měření ze vzdálených geografických míst napříč propojenými energetickými systémy. Metoda je popsána např. v článku (124) a princip je zobrazen na Obr. 10.

Každá oblast energetického systému je měřena sítí PMU rozptýlenou v systému, které jsou připojeny k hlavnímu koncentrátoru fázorových dat (PDC) prostřednictvím komunikačních kanálů (znázorněných čárkovaně na obrázku). To umožňuje získat frekvenční odezvu v rámci centra setrvačnosti ("Centre of inertia" Col) sběrem několika frekvencí a hodnotu RoCoF. Při převaze instalovaného výkonu OZE v jedné z oblastí, dojde v této oblasti ke snížení setrvačnosti a zvýšení hodnoty parametru RoCoF. Hodnota RoCoF je pak posílána do ostatních oblastí (G_{eni} až G_{enn}) a jejich regulátorů (C_i až C_n), které tím získají informaci o setrvačnosti v oblasti s nízkou setrvačností. Zdroje v oblastech s vyšší setrvačností nebo podpůrné zdroje (např. baterie) v oblastech s nižší setrvačností pak mohou pomocí regulace přispět k udržení

frekvenční stability ES. Tato metoda slouží zejména k urychlení zapůsobení primární regulace (viz oranžový průběh na Obr. 11).





Obr. 3.8.2-11 Frekvenční odezva energetického systému v závislosti na setrvačnosti ES [124]

Možnosti využití této metody byly testovány pomocí simulací modelu propojených energetických sousta Norska, Švédska a Finska, viz Obr. 12. Odezva na změnu výkonu ve Švédsku zůstala stejná, protože je to oblast se sníženou setrvačností. Optimální odezva systému byla počítána použitím metody Simulated annealing algorithm (SAA).



Obr. 3.8.2-12 Návrh modelu primární regulace pomocí WARS v Norsku, Švédsku a Finsku [124]

Literatura kapitoly 3.8.2

[65] T. Kerdphol, M. Watanabe, Y. Mitani and I. Ngamroo, "Inertia Assessment From Transient Measurements: Recent Perspective From Japanese WAMS," in IEEE Access, vol. 10, pp. 66332-66344, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3185056. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9802111.

[102] ENTSO-E, Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF), Version 17, 2020. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/cleandocuments/SOC%20documents/Inertia%20and%20RoCoF_v17_clean.pdf.

[125]Kamala Sarojini Ratnam, K. Palanisamy, Guangya Yang, Future low-inertia powersystems:Requirements, issues, and solutions - A review, Renewable and SustainableEnergyReviews,Volume124,2020,ISSN1364-0321,https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109773.

[124] Chamorro, H.R., Sevilla, F.R.S., Gonzalez-Longatt, F., Rouzbehi, K., Chavez, H. and Sood, V.K. (2020), Innovative primary frequency control in low-inertia power systems based on wide-area RoCoF sharing. IET Energy Syst. Integr., 2: 151-160. https://doi.org/10.1049/iet-esi.2020.0001.

[132] D. Wilson, J. Yu, N. Al-Ashwal, B. Heimisson, V. Terzija, Measuring effective area inertia to determine fast-acting frequency response requirements, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 113, 2019, Pages 1-8, ISSN 0142-0615, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.034.

 [133] Nouti, Diala & Ponci, Ferdinanda & Monti, A. Heterogeneous Inertia Estimation for Power Systems with High Penetration of Converter-Interfaced Generation. Energies, 2021.
 14. 10.3390/en14165047.

https://www.researchgate.net/publication/353951723_Heterogeneous_Inertia_Estimati on_for_Power_Systems_with_High_Penetration_of_Converter-Interfaced_Generation.

[134] edgeFLEX, Inertia Estimation Concept for Low Inertia Power Systems, 2021. https://edgeflex-h2020.eu/files/content-

edgeflex/Content_Pages/Progress/Deliverables/edgeFLEX_883710_D2.4.pdf.

[135] MIGRATE - The Massive InteGRATion of power Electronic devices. https://www.h2020-

migrate.eu/_Resources/Persistent/b955edde3162c8c5bf6696a9a936ad06e3b485db/19 109_MIGRATE-Broschuere_DIN-A4_Doppelseiten_V8_online.pdf.

[136] MIGRATE - Recommendations for the future evolution of the synchronized measurement technology and deployment in Europe, 2018. https://www.h2020-migrate.eu/_Resources/Persistent/8a50c2fa6992ff7238e16f4de830ced183aa4f4a/D2.5%20-

%20Recommendations%20for%20the%20future%20evolution%20of%20the%20synchr onized%20measurement%20technology%20and%20deployment%20in%20Europe.pdf.

[137]MIGRATE - Lessons Learned from Monitoring & Forecasting KPIs on Impact of PEPenetration,2018.migrate.eu/_Resources/Persistent/9c7ae793e3316f9a19f4999c4b428fa46f45572a/D2.3%20-

%20Lessons%20Learned%20from%20Monitoring%20and%20Forecasting%20KPIs%20 on%20Impact%20of%20PE%20Penetration.pdf.

[140] K. Tuttelberg, J. Kilter, D. Wilson and K. Uhlen, "Estimation of Power System Inertia From Ambient Wide Area Measurements," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 6, pp. 7249-7257, Nov. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2843381. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8370893.

[141] G. R. Moraes et al., "Measurement-Based Inertia Estimation Method Considering System Reduction Strategies and Dynamic Equivalents," 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2019.8810634. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8810634.

[142] M. Hayerikhiyavi and A. Dimitrovski, "A Practical Assessment of the Power Grid Inertia Constant Using PMUs," 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), Tempe, AZ, USA, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/NAPS50074.2021.9449705. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9449705.

[143] L. Lavanya and K. S. Swarup, "Estimation of Inertia in Power Systems Using Law of Conservation of Energy," 2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS), Kharagpur, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPS52420.2021.9670371. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9670371.

[144] T. Kerdphol, M. Watanabe, R. Nishikawa, T. Tamaki and Y. Mitani, "Determining Inertia of 60 Hz Japan Power System using PMUs from Power Loss Event," 2021 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/TPEC51183.2021.9384932.

https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9384932

3.8.3 Statická úhlová stabilita soustavy

Základním kamenem určujícím schopnost soustavy správně reagovat na rychlé vnější změny je její statická úhlová stabilita (alias "stabilita malých kyvů", "small signal stability"). Pro její vyhodnocení existují jak všeobecná matematická systémová kritéria, tak odvozené vztahy pro zjednodušené topologie elektrizační soustavy, popřípadě numerické varianty těchto kritérií. Pro vyhodnocení jsou však vyžadovány přesné parametrické údaje, kterých kvalitním zdrojem mohou být právě WAMS.

Statická stabilita v ES je schopnost přirozeného setrvávání systému s konstantními předávanými činnými elektrickými výkony a fázemi uzlových napětí. Je možno také definovat její splnění jako stav systému, kdy velmi malé a značně pomalé změny výkonů a fází napětí mají za následek opět jen velmi malé změny těchto provozních parametrů. Toho je nejlépe dosaženo fyzikálním principem systému s případnou podporou regulace.

V užších podmínkách okolí synchronních alternátorů má hodnocení této stability značný význam a lze vlastně hovořit o udržování synchronismu soustrojí. Malé vychýlení otáček soustrojí zapříčiní při staticky stabilním provozním stavu téměř neprodlené obnovení synchronních otáček a tedy i frekvence generovaného napětí bez vzniku výrazného přechodného děje. Pro splnění popsané stability je nezbytné, aby zpětné vazby ovlivňující výkonovou rovnováhu měly správný směr a dostatečnou intenzitu, protože bilance činného výkonu ovlivňují fázové posuvy napětí a naopak.

Inovativními trendy jsou jak nutnost respektování destabilizace navyšováním podílu nesynchronních jednotek, tak snaha o posílení stability na základě provedených rozborů za podpory WAMS různými akčními opatřeními zaměřenými převážně na tlumení výkyvů od stabilního stavu. Článek (4) je nejen ilustrací těchto přístupů, ale taktéž uvádí postup korigující možná systémová zpoždění a chybovost vstupních dat.

3.8.4 Dynamická úhlová stabilita soustavy

Všeobecně lze chápat dynamickou úhlovou stabilitu (alias "transient stability") a její hodnocení (transient stability assessment - TSA) jako určitou nadstavbu vyšetřování stability statické. Podstatné změny v charakteru dynamického chování komponent elektrizační soustavy změn přinesly potřebu sledovat, vyhodnocovat a korigovat schopnost soustavy reagovat stabilně na děje rychlé nebo s mohutným počátečním impulsem. Měření WAMS se jeví jako velmi hodnotný zdroj rozborů, zejména pro průběžné hodnocení dynamické stability.

Jako zajímavé aplikace se aktuálně ukazují metody řízení výkonových poměrů a fázi napětí pomocí PST a FACTS (články 6 a 7). Rozsáhlé jsou možnosti analýzy s rozborem vzorového chování (pattern recognition based TSA - PRTSA) nástroji umělé inteligence (Artificial Intelligence - AI), resp. neuronových sítí (Machine Learning - ML, Deep Learning - DL) (články 16, 27, 103). Hybridní přístup využití WAMS pro upřesnění parametrů zjednodušeného schématu soustavy a následného tradičního vyhodnocení je výhodný pro součinnost s konservativními metodikami (články 37, 40). Rozšířený přístup pro analytické hodnocení stability (vyšetření maximálního Ljapunovova exponentu – MLE, LLE) lze rovněž optimalizovat na základě měření WAMS (článek 109).

Ve vědeckých článcích se většinou hovoří o dvou metodách TSA (Transient Stability Analysis). Jednou z těchto metod je simulace v časové oblasti, která je však časově velmi náročná a není vhodná pro aplikace v reálném čase. Druhá metoda je přímá a je založena na výpočtu uložené kinetické energie systému. Má však nevýhodu, a to obtížnost vytvoření energetické funkce pro složité systémy. V (X1) konstatují, že v současné situaci, kde je vyžadována online TSA složitého systému, již klasické metody nesplňují potřebná kritéria. Je třeba provést aproximaci velmi nelineární a složité funkce. Ideálním nástrojem pro takovou úlohu je neuronová síť. Vzhledem k tomu, že v datech PMU je důležitá časová sekvence, přichází v úvahu aplikace rekurentních neuronových sítí, například LSTM (Long Short-Term Memory).

Metody vyhodnocování založené na datech v reálném čase jsou vyvíjeny již dlouhou dobu. Algoritmus navržený v (X1) je trénován offline. Stav stability systému se potom získá klasifikací profilu systému bezprostředně po ukončení poruchy. Klasifikátor dostává na vstup následující veličiny: činný výkon *P*, jalový výkon *Q*, amplitudu napětí *U*, fázový úhel *Θ*. Použijí se hodnoty těchto veličin bezprostředně po události. V [X1] se uvádí, že výsledky testů systému predikce stability, který využívá prvky LSTM (Obr. 3.8.4-1), jsou přesnější než při použití SMV (Support Vector Machine). Algoritmus byl testován na modelu IEEE-39. Vytvoření databáze pro trénování algoritmu se provádí pomocí offline simulací. Doba trvání simulace je 30 s. Pokud rozdíl úhlů libovolných dvou generátorů přesáhne 360 stupňů, je takový případ v databázi označen jako nestabilní, v opačném případě je vzor označen jako stabilní. Simulace byly provedeny v PSAT toolboxu programu Matlab. Vstupní matice příznaků X_i je definována jako *p* x (*t* + 1), kde *p* je počet algebraických proměnných, *t* je počet po sobě jdoucích časových kroků po incidentu.



Obrázek 3.8.4-1. Struktura LSTM-klasifikátora (X1).

Celkem bylo vygenerováno 14 000 případů incidentů. Pro vytvoření souboru dat bylo vybráno 3800 stabilních případů a 3800 nestabilních případů. Testovací databáze obsahovala 1300 stabilních případů a 1300 nestabilních případů. Matice vstupních dat měla dimenzi 169x7. Data byla vzorkována každých 10 ms až do hodnoty 60 ms po incidentu. Dimenzionalita buněk LSTM byla zvolena 256 a počet neuronů v hustě propojené vrstvě byl 500. Hodnota parametru *Batch Size* byla rovna 100. Byla také použita technika *Dropout,* aby se zabránilo *overfitingu*. Protože v tomto problému jsou náklady na falešné selhání (FN) systému mnohem vyšší než náklady na falešně pozitivní výsledky (FP), byl do ztrátové funkce zaveden mechanismus, který penalizuje výskyt falešně negativní výsledky. To se provádí přidáním koeficientu *L* do ztrátové funkce *Loss*:

$$Loss = -\frac{1}{m} \left[\sum_{i=1}^{m} L \cdot Y_i \log \frac{e^{y_1}}{e^{y_1} + e^{y_2}} + (1 - Y_i) \log \frac{e^{y_2}}{e^{y_1} + e^{y_2}} \right]$$

V tabulce 3.8.4-1 jsou uvedeny výsledky klasifikace, z nichž je patrné, že použití faktoru L snižuje FN. Je také vidět, že klasifikační přesnost SVM je ve srovnání s LSTM nižší.

Tabulka 3.8.4-1. Výsledky klasifikace (X1).

	FP	FN	Overall
LSTM with weighted cost function	0,66 %	0,29 %	0,48 %
LSTM with normal cost function	0,12 %	0,67 %	0,39 %
Polynomial kernel SVM	4,32 %	4,43 %	4,37 %

V (X2) se odhad stability systému provádí na základě vizualizace dynamického procesu a následného zadání dat neuronové síti. Vektory napětí v uzlech systému jsou převedeny na dvourozměrnou matici. Konvoluční neuronová síť se skládá ze dvou konvolučních vrstev, dvou *pooling* vrstev a dvou hustě propojených vrstev (Obr. 3.8.4-2). Pro získání dat bylo simulováno zatížení od 95 % do 105 % v krocích po 2 %, bylo získáno 5 kroků. Činný a jalový výkon generátoru byl v rozsahu 85 % až 105 % v krocích po 1 %. Celkem bylo získáno 30000 přechodných dějů. Každý vzorek je 2D tenzor o dimenzi 78x800, představuje časovou řadu reálné a imaginární části napětí v každém uzlu.



Obrázek 3.8.4-2. Struktura CNN-klasifikátora (X2).

K trénování algoritmu bylo použito celkem 4440 stabilních vzorků a 4040 nestabilních vzorků, přičemž počet nestabilních vzorků byl získán rozšířením dat z 144 nestabilních vzorků. Přesnost klasifikace se pohybovala mezi 79,2 % a 98,9 % v závislosti na velikosti vzorku, batch size, a procentu nestabilních případů při trénování.

V (X3) byly jako vstupní data pro neuronovou síť použity dynamické trajektorie úhlu rotoru generátorů, rychlosti a zrychlení. Struktura neuronové sítě je znázorněna na Obr. 3.8.4-3 a její parametry v Tab. 3.8.4-2.



Obrázek 3.8.4-3. Struktura CNN-klasifikátora (X3).

Layer	Input	Kernel Size/Stride	Kernel Number	Padding	Output
Convolution	9×10×5	5×5/1×1	32	Same	9×10×32
Maxpooling	9×10×32	2×2/2×2	32	Same	5×5×32
Convolution	5×5×32	3×3/1×1	64	Same	5×5×64
Maxpooling	5×5×64	2×2/2×2	64	Same	3×3×64
Merge	3×3×64	-	-	-	576
Fully connected	576	120	1	-	120
Fully connected	120	30	1	-	30
Linear	30	1	1	-	1

Tabulka 3.8.4-2. Parametry neuronové sítě navržené v článku (X3).

V tomto článku, stejně jako v předchozím, je zdůrazněn význam chybné klasifikace nestabilního stavu. Bylo vygenerováno 20400 vzorů, z toho 13175 stabilních a 7225 nestabilních. Pro učení bylo náhodně vybráno 16320 vzorů, zbylých 4080 bylo použito pro testování. Váhy stabilních a nestabilních případů jsou upraveny pomocí koeficientů w_0 a w_1 :

$$Loss = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} w_0 (y_{i0} - \overline{y_{i0}})^2 + \sum_{i=1}^{N_1} w_1 (y_{i1} - \overline{y_{i1}})^2}{N_0 + N_1}$$

 N_0, N_1 – počet nestabilních a stabilních vzorů;

 $y_{i0}, \overline{y_{i0}}$ – nestabilní skutečné a předpovězené vzory;

 $y_{i1}, \overline{y_{i1}}$ – stabilní skutečné a předpovězené vzory.

V (X4) je navržen mechanismus hodnocení stability systému založený na použití sítí CNN a LSTM (Obr. 3.8.4-4). CNN pracuje s maticí X, která má pevnou velikost, ale je periodicky aktualizována doplňováním V(t) metodou first-in-first-out. Když dojde k poruše, v čase t_f , spustí to operaci LSTM sítě H_{θ} , ta zahájí nepřetržitý sběr dat během poruchy. V čase t_c , když se zkrat vypne, spustí CNN, může to vyžadovat více než jeden cyklus běhu, dokud není získána spolehlivá předpověď, v čase t_r nebo před uplynutím lhůty.



Obrázek 3.8.4-4. Struktura CNN-LSTM (X4).

V podobných systémech vzniká otázka transfer learningu, je obtížné ho realizovat, protože pro různé systémy bude vstupní matice neuronové sítě různá, její velikost bude záviset na počtu datových kanálů. Proto potřebujeme algoritmus, který by zvládl úlohu sjednocení vstupních dat.

Dalším pokročilým řešením je kombinace CNN a LSTM navržená v (X5). Horní větev struktury (Obr. 3.8.4-5) v tomto případě plní roli vícetřídního klasifikátoru, který slouží k detekci provozních stavů systému, k nimž dochází v důsledku změn topologie nebo poruch. Dolní větev definuje kritické alternátory v případě nestability systému.



Obrázek 3.8.4-5. Architektura ConvLSTM (X5).

Parametry, které vstupují do neuronové sítě, jsou následující: velikosti proudu a napětí, úhel rotoru, úhel napětí a frekvence. Data jsou reprezentována ve formě 3D tenzoru, který je znázorněn na Obr. 3.8.4-6. Jedna z os obsahuje výše uvedených 5 parametrů, druhá osa je časová a používá 5 časových kroků, velikost třetí osy závisí na počtu alternátorů zastoupených v systému.



Obrázek 3.8.4-6. Strukturování vstupních dat pro ConvLSTM (X5).

CNN, jejíž architektura je znázorněna na Obr. 3.8.4-7, je navržena v (X6) k rozlišení tří stavů, a to ustáleného stavu systému, nestability úhlu rotoru a nestability napětí.



Obrázek 3.8.4-7: Architektura konvoluční neuronové sítě navržené v (X6).

V (X7) byla konvoluční síť použita k rozlišení nestability úhlu rotoru a nestability napětí. Zde byla také použita aktivační mapa tříd (CAM/GradCAM), která je slibným nástrojem pro vizualizaci procesu. Také algoritmus Grad-CAM byl použit v (X8) k identifikaci slabých míst v topologii sítě z pohledu TSA.

Literatura kapitoly 3.8.4

[X1] Zheng, L., Hu, W., Hou, K., Xu, X., & Shao, G. (2017). Real-time transient stability assessment based on deep recurrent neural network. IEEE. doi: https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2017.8378321

[X2] Hou, J., Xie, C., Wang, T., Yu, Z., Ying, L., & Dai, H. (2018). Power System Transient Stability Assessment Based on Voltage Phasor and Convolution Neural Network. IEEE. doi: https://doi.org/10.1109/icei.2018.00052

[X3] Zhou, Y., Zhao, W., Guo, Q., Sun, H., & Lv, H. (2018). Transient Stability Assessment of Power Systems Using Cost-sensitive Deep Learning Approach. IEEE. doi: https://doi.org/10.1109/ei2.2018.8582047

[X4] Azman, S. K., Isbeih, Y. J., Moursi, M. S. E., & Elbassioni, K. (2020). A unified online deep learning prediction model for small signal and transient stability. IEEE Transactions on Power Systems, 35(6), 4585–4598. doi: https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2999102

[X5] Hijazi, M., Dehghanian, P., & Wang, S. (2023). Transfer learning for transient stability predictions in modern power systems under enduring topological changes. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 1–15. doi: https://doi.org/10.1109/tase.2023.3277536

[X6] Shi, Z., Yao, W., Tang, Y., Ai, X., Wen, & Ai, X. (2023). Intelligent power system stability assessment and dominant instability mode identification using Integrated Active Deep learning. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 1–15. doi: https://doi.org/10.1109/tnnls.2023.3238168

[X7] Zhou, Y., Xu, T., Yang, L., Liu, M., Chen, X., Yang, Y., Guo, Q., & Sun, H. (2021). Transient Rotor Angle and Voltage Stability Discrimination Based on Deep Convolutional Neural Network with Multiple Inputs. 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). doi: https://doi.org/10.1109/cieec50170.2021.9510199

[X8] Qin, C., Jia, Y., Li, Z., Li, G., Li, L., & Zhu, Y. (2022). Identification of transient voltage stability weakness in power systems based on Grad-CAM. 2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). doi: https://doi.org/10.1109/icpre55555.2022.9960337

3.8.5 Detekce nízkofrekvenčních oscilací

V napájecích systémech ovládaných výkonovou elektronikou je multimodální oscilace jednou z příčin, které ohrožují stabilitu systému. Stávající velkoplošný měřicí systém (WAMS) se však zaměřuje na singlemodální oscilaci, jako je nízkofrekvenční oscilace, tj. nesplňuje požadavky na multimodální monitorování oscilací vzhledem k využívání konvenčních fázorových měřicích jednotek (PMU). Výhodou je možnost analýzy vlivu vyšších harmonických.

Ilustrativní je zejména článek (56), kde místo PMU byly využity WPMU (širokopásmové fázorové monitorovací jednotky) vyhodnocující multimodální fázory. Mezi úpravy patří nasazení širokopásmových fázorových monitorovacích jednotek (WPMU) v několika důležitých uzlech pro dynamickou detekci oscilace a spouštění funkce záznamu vln. Fázorová data zachycená WPMU mohou být přenášena společně se zaznamenanou vlnou pro analýzu oscilací v reálném čase. Navržená metoda byla ověřena na modelu regionální sítě.

3.8.6 Lokalizace centra oscilací v ES

Hlavním cílem je řešení problémů stability výkonů na straně zdrojů. Je navržena metoda založená na informacích z WAMS pro nalezení centra výkonových oscilací v elektrizační soustavě a stanovení hodnoty napětí v tomto centru.

Nízkofrekvenční (NF) oscilace nabývají většího významu s rozšiřováním a propojováním energetických soustav. NF oscilace se obecně objevují při narušení ustáleného stavu daného energetického systému, kdy dojde k relativnímu rozkmitání rotorů synchronních generátorů. To vede k **rozkmitání činného výkonu, napětí** a dalších elektrických veličin s ekvivalentní frekvencí. Pokud energetický systém postrádá adekvátní tlumení (tj. **tlumící moment sítě**), výkonové oscilace mohou trvat relativně dlouho (Pozn.: do ustálení kmitání rotorů, což bude **mechanicko-elektrický přechodný děj**), přičemž během toho mohou narušovat provozní stabilitu a omezovat kapacitu přenosu vedení. [1]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Pozn.: dle analyzované odborné literatury v této části VZ pro daný technický segment (energetické sítě) se jedná o oscilace s frekvencí >4 Hz. Dle článku [2] je lze podrobněji typologicky rozdělit do následujících kategorií:

- Torzní oscilace; 0,2 2 Hz způsobené mechanickým kmitáním rotorů generátorů
- Lokální oscilace; 0,7 4 Hz způsobené změnou výkonu jednoho, nebo více generátorů na jedné elektrárně
- Mezioblastní oscilace; 0,1 0,7 Hz způsobené změnou synchronních provozních podmínek elektrizační soustavy (způsobené nerovnovážnou výkonovou bilancí)
- Oscilace způsobené špatným nastavením PSS; obtížně odhadnutelný frekvenční rozsah
- Infraoscilace; ¬0,003 Hz spojené se stejnou příčinou jako lokální oscilace

Analyzovaná odborná literatura se zabývá omezováním zejména mezioblastních oscilací s využitím WAMS dat (nebo jasný frekvenční rozsah nevymezuje). Mezioblastní oscilace totiž mají systémový charakter, relativně velkou amplitudu a mohou se vzájemně šířit mezi subsystémy [2].

Pozn.: článek [2] je primárně praktický článek popisující měření NF oscilací pomocí WAMS, obsahující záznamy a diskuze těchto měření a následnou verifikaci výsledků na PSCAD modelu.

Kritické je během diagnostiky a nouzového "řízení" nízkofrekvenčních oscilací rychle a s adekvátní přesností nalézt jejich zdroj. Aktuálně se využívají 2 metody (případně jejich kombinace), tedy využití **online modelu pro analýzu oscilací** (závisí na přesnosti vlastního modelu a jeho parametrů a je v podstatě nepoužitelný při stavech, nebo situacích, které model nezahrnuje) a využití **naměřených dat prostřednictvím WAMS** (je třeba zpracovat velké množství dat v reálném čase, přičemž operátoři nemusejí mít k dispozici data z klíčových vedení) [1].

3.8.6.1 Monitorování NF oscilací a určení jejich zdroje

Jak bylo naznačeno v úvodu, NF oscilace jsou způsobeny rozkmitáním rotorů synchronních strojů, tedy pro jejich potlačení je klíčová jejich detekce a určení jejich zdroje (centra – pravděpodobně se bude jednat o problematické mezioblastní oscilace).

Článek [3] popisuje rozšířenou Pronyho metodu navrženou pro analýzu NF oscilací s využitím WAMS synchrofázorových dat. V navrhované metodě jsou kromě odhadu modálních informací extrahovány IMF (Intristic Mode Functions) pomocí nové "explicitní" matematické formulace. Dále je navržen indikátor založený na energetickém a fázovém vztahu IMF, který umožňuje provozovatelům systému rozpoznat generátory/aktuátory s největším vlivem v konkrétních režimech. Metoda je využívána jako online rozhraní pro monitorování oscilací, poskytující vstupy pro modul WADC (viz níže). Účinnost navrhované metody je ověřena pomocí tří případových studií, ve kterých je výpočet IMF ve srovnání s jinými metodami jednodušší a přesnější.

Článek [4] oproti tomu odvozuje funkci vyjádření amplitudy napětí a následně polohy centra multifrekvenčních oscilací na základě třístrojového modelu. Tato funkce je ovlivněna výkonovou amplitudou oscilací, impedancí vedení, frekvencí oscilací a počáteční fází oscilací. Na tomto základě potom formuluje novou strategii detekce oscilací s pohybujícím se centrem mimo vzorkovací frekvenci a využitím WAMS dat v multioperačním režimu. Podrobně může navrhovaná strategie získat informace o amplitudě/fázi napětí sběrnice poskytované WAMS a lokálním kritériem $U_{cos\phi}$ pro určení polohy centra oscilací mimo vzorkovací frekvenci. Pozn.: navržená strategie je relativně jednoduchá dokáže detekovat i oscilace mimo vzorkovací frekvenci yjejich centra, avšak je ověřená jen na relativně jednoduchém modelu, přičemž by u složitějších systémů mohla být obtížně aplikovatelná kvůli značnému narůstání délky rovnic pro výpočet pomocných koeficientů formulovaných funkcí.

Článek [5] popisuje principy online výpočtu a analýzy dvou typů NF oscilací pro jejich detekci a řízení s využitím WAMS big dat. Konvenční lineární model datového úložiště má však dle autorů potíže splnit požadavky na vysokou rychlost zpracování, vícenásobnou souběžnost a vysokou spolehlivost v čemž spatřují hlavní problém. Jako řešení navrhují nový model dvousložkového elastického datového úložiště. Transformuje lineární model datového prostoru na plošný, realizuje management skupin měřených datových sad síťových stanic ve vertikálním směru a management více jednotek PMU nahrávajících datové sady v horizontálním směru, díky čemuž je zajištěn spolehlivý a rychlý přístup k datům z WAMS.



Obr. 3.8.6-1 Struktura navrženého plošného datového modelu v [5]

Článek [6] se zabývá novým přístupem k online analýze oscilačních procesů v energetických systémech na základě WAMS dat, vychází z vyhodnocování změn kinetické energie oscilací rotorů synchronních generátorů. Navržená energetická analýza umožňuje nejen určit zdroj kmitů, ale také posoudit oscilační stabilitu a případně i velikost regulačního zásahu, aby se předešlo možnému narušení stability. Autoři uvádí také praktické výsledky energetické analýzy oscilačních procesů v reálném energetickém systému. Pozn.: podobný přístup (byť značně komplexněji) popisuje i článek [1].



Obr. 3.8.6-2 Schématické znázornění určení přebytečné kinetické energie [6]

V neposlední řadě potom článek [7] parametrizuje oscilace prostřednictvím tzv. oscilačních módů, které jsou určeny třemi základními parametry: amplituda (MW), frekvence (Hz) a poměr tlumení (%). Tyto oscilační módy lze odhadnout v reálném čase pomocí algoritmů modálního odhadu aplikovaných na signály změřené prostřednictvím PMU v rámci systému WAMS. Běžně se tyto odhady provádějí při načtení nové sady měření, avšak kvůli "včasnému varování" operátora je (dle autorů) potřeba navržení krátkodobého predikčního mechanismu (několik sekund do budoucnosti) – predikce výsledků modálního odhadu. V tomto smyslu navrhují autoři platformu Big Dat pro analýzu streamovaných dat pocházejících z WAMS, která je schopna analyzovat data z modálního odhadu a automaticky provádět prediktivní vyhodnocení stavu oscilační stability. Jako rozhraní pro data management je využita Cassandra a pro analýzu dat potom Python, kde je regresor časové řady trénován pomocí neuronových sítí. Práce obsahuje i případovou studii s praktickou aplikací. Pozn.: autoři v příkladech přesností predikce mají značně rozdílnou chybu a je tak otázkou jaké přesnosti by navržený postup dosáhl na větším počtu vzorků a jestli by operátor na jejich základě dokázal účinně reagovat.

Článek [8] popisuje detekci multimodálních oscilací, které konvenční PMU detekovat nedokážou. Autoři navrhují vylepšený rámec WAMS měření, který zahrnuje nasazení

širokopásmových PMU (WPMU) v několika důležitých uzlech pro dynamičtější detekci oscilací, přičemž zároveň spouští funkci záznamu oscilací tradičních PMU. Synchronizované multimodální fázory zaznamenané pomocí WPMU společně se zaznamenanými oscilacemi pomocí tradičních PMU jsou přenášena do hlavní měřící stanice pro analýzu v reálném čase.



Obr. 3.8.6-3 Struktura navrženého upraveného rámce WAMS pro detekci multimodálních oscilací [8]

3.8.6.2 Analýza tlumícího momentu sítě a Wide Area Damping Controller (WADC)

Jak bylo naznačeno v úvodu, na potlačení NF oscilací má zásadní vliv tlumící moment sítě. Během nouzového "řízení" NF oscilací je klíčové znát tlumící schopnosti soustavy, které lze případně i vylepšit (viz níže). WADC pak v podstatě využívá měření WAMS pro analýzu soustavy a dle své technické realizace dynamicky upravuje buzení synchronních generátorů pro rychlejší stabilizaci rotoru/ů.

Např. článek [9]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** navrhuje Adaptive Supervisory Controller – a daptivní sledovací regulátor (ASC) pro zlepšení tlumení soustavy s použitím WAMS měření a zohledněním zpoždění přenosu dat. Regulátor tlumení je založený na principu lineární maticové nerovnosti se smíšenou citlivostí (LMI) s omezením umístění pólů. K modelování časových zpoždění potom používá Padeovu aproximaci. Časová zpoždění jsou v ASC považována za parametrickou nejistotu.



Obr. 3.8.6-4 Struktura regulátoru se zahrnutým časovým zpožděním [9]



Obr. 3.8.6-5 Schématické znázornění časového zpoždění e^{-hs} [9]

Lze říci, že se jedná o rannou formu WADC (článek vyšel v roce 2007) a na základě WAMS informace výše popsaným způsobem upravuje buzení synchronních generátorů pro lepší tlumení oscilací rotorů.

Článek [10]**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** potom předkládá přímo rešerši WADC u r ozsáhlejších energetických síti. Podobně jako u předchozího článku je upravováno buzení pro

lepší tlumení soustavy na základě informací WAMS, struktura takového systému je principiálně znázorněna na Obr. 6.



Obr. 3.8.6-6 Schématické znázornění WADC systému [10]

Hierarchická posloupnost kroků návrhu (výběru) WADC dle toho článku je následně znázorněna na Obr. 7.



Obr. 3.8.6-7 Schématické znázornění návrhu WADC [10]

Po prezentaci různých technik realizace WADC předkládá srovnávací tabulku off-line i adaptivních technik.

Controller Design Methods	Residue	Pole Placement	Robust	LQG	Optimization			
Robustness	Some	Weak	Strong	Weak	Some degree	Structure	OD	MB
	degree					Identification result	Dynamic model	Operation point in
Calculation cost	Low	Low	High	High	High			model bank
Dependence on linear system model	Yes	Yes	No	Yes	No	Most used Identification method	RLS, SSI, Prony	KF, Bayesian approach, NN
Difficulty of	Difficult	Difficult	Easy	Easy	Easy	Parameter design occasion	Online	Offline
coordinate controller design						Parameter design methods	Residue Pole	Any
Theoretical best control performance	Not so good	Good	Not so good	Good	Good	Demand for parameter	High	Low
Application in online adaptive control	Yes	Yes	Yes	Not often	No	calculation speed Adaptability to system change	Strong	Weak

Obr. 3.8.6-8 Přehled a porovnání offline (vlevo) a adaptivních (vpravo) technik realizace WADC [10]

Článek [11] navíc uvažuje ještě ztrátu některých měřených dat z WAMS systémů (jako stochastickou nepředvídatelnou událost). Navrhuje tak jednotný model dat se systémy WAMS zohledňující jak časové zpoždění přenosu, tak ztrátu dat. Obdobně jako článek [9] využívá Padeovu aproximaci pro modelování časových zpoždění, začleněného do linearizovaného modelu s WAMS, díky čemuž lze provést analýzu dopadu poškození měřených dat i časových

zpoždění zvlášť (pro stanovení nutné časové rezervy). Následně navržený model aplikuje na analýzu tlumícího momentu. Z výstupů analýzy navrhuje parametry WADC.



Obr. 3.8.6-9 Prezentovaný vliv ztráty dat na stabilizaci zátěžného úhlu [11]

V neposlední řadě článek [12] taktéž popisuje specifickou modifikaci WADC s využitím strojového učení. Nevyužívá tak model systému, viz OD na Obr. 8 vpravo.

3.8.6.3 Závěry a doporučení pro další práce kapitoly 3.8.6

Pro další výzkum se jeví na základě analyzovaných článků perspektivně detekce NF oscilací a jejich centra pomocí vhodné energetické metody (relativně přesná a nevyžaduje zásadní úpravy infrastruktury), která má tak dobrý potenciál reálné aplikovatelnosti.

Poté může navazovat návrh vhodného WADC, který na základě detekovaných NF oscilací a jejich centra bude upravovat buzení u konkrétních synchronních generátorů a tím zlepšovat tlumící schopnosti soustavy.

Literatura kapitoly 3.8.6

- https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8315223
 Y. Shu, X. Zhou and W. Li, "Analysis of low frequency oscillation and source location in power systems," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 4, no. 1, pp. 58-66, March 2018, doi: 10.17775/CSEEJPES.2017.00660.
- https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8893487
 Bektimirov, A. T., et al. "Analysis of the Kazakhstan's Grid Oscillation Instability by Using WAMS System and PSCAD Program." 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2019, https://doi.org/10.1109/upec.2019.8893487.
- [3] https://www.mdpi.com/1996-1073/12/7/1267
 Khodadadi Arpanahi, Moossa, et al. "An Augmented Prony Method for Power System Oscillation Analysis Using Synchrophasor Data." Energies, vol. 12, no. 7, 2019, p. 1267, https://doi.org/10.3390/en12071267.
- [4] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8881341
 XU, Chunlei, et al. "An Out-of-Step Splitting Strategy Based on WAMS Information for Oscillation Center Migration under Multi-Operation Mode." 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019, https://doi.org/10.1109/isgtasia.2019.8881341.

- [5] https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/3541973/ Song, Hua, and Yongjun Chen. "Study of WAMS Big Data Elastic Store Model in Low-Frequency Oscillation Analysis." Mathematical Problems in Engineering, vol. 2020, 2020, pp. 1–8, https://doi.org/10.1155/2020/3541973.
- [6] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9805848 Zhukov, Andrey, et al. "Monitoring of the Dynamics of Changes in the Kinetic Energy of Power Plants to Improve the Reliability of Power System Control." 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA), 2022, https://doi.org/10.1109/sgsma51733.2022.9805848.
- [7] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9806014 Cepeda, Jaime, et al. "Big Data Platform for Real-Time Oscillatory Stability Predictive Assessment Using Recurrent Neural Networks and Waprotector's Records." 2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA), 2022, https://doi.org/10.1109/sgsma51733.2022.9806014.
- [8] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9556779
 W. Huang, J. Sheng, N. Ma and X. Xie, "An Improved WAMS Framework for Multi-modal Oscillation Detection in a Power Electronics Dominated Power System," 2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Shanghai, China, 2021, pp. 657-661, doi: 10.1109/CICED50259.2021.9556779.
- [9] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4538563
 Z. Hu and J. V. Milanovic, "The Effectiveness of WAM Based Adaptive Supervisory Controller for Global Stabilization of Power Systems," 2007 IEEE Lausanne Power Tech, Lausanne, Switzerland, 2007, pp. 1652-1659, doi: 10.1109/PCT.2007.4538563.
- [10] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115015506
 Xinran Zhang, Chao Lu, Shichao Liu, Xiaoyu Wang, A review on wide-area damping control to restrain inter-area low frequency oscillation for large-scale power systems with increasing renewable generation, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 57, 2016, Pages 45-58, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.167.
- [11] https://www.mdpi.com/1996-1073/11/11/3186
 Zhou, Tao, Zhong Chen, Siqi Bu, Haoran Tang, and Yi Liu. 2018. "Eigen-Analysis Considering Time-Delay and Data-Loss of WAMS and ITS Application to WADC Design Based on Damping Torque Analysis" Energies 11, no. 11: 3186. https://doi.org/10.3390/en1111318
- [12] https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9798042
 A. Sengupta and D. K. Das, "Delay Dependent Wide Area Damping Controller Using Deep Learning Technique," 2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), Shillong, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEPE55035.2022.9798042.

3.9 Nápravná opatření (Remedial Measures)

Měření z PMU lze využít i při řešení poruchových stavů a následných nápravných opatřeních. Jedním z využití je odlehčení zatížení sítě při nízké frekvenci UFLS (Under Frequency Load Shedding), vhodné nastavení hranic oblastí ostrovního provozu či podpora při obnovování provozu sítě (Power Systém Restoartion).

Odlehčení sítě při podfrekvenci UFLS

Problematika je náročná na zpracování vstupních veličin frekvence a zní stanovenou změnu frekvence, neboť průběh frekvence obsahuje při přechodných dějích oscilace. Dále je problém se zpožděním při vyhodnocení RoCoF.

Článek (94) "WAMS Based Underfrequency Load Shedding With Short-Term Frequency Prediction" a taktéž článek (138) "Under Frequency Load Shedding based on PMU Estimates of Frequency and ROCOF" diskutují úskalí při využití měření z PMU pro UFLS. Článek (139) "Impact of Synchrophasor Estimation Algorithms in ROCOF-Based Under-Frequency Load-Shedding" uvádí možné metody estimace RoCoF (139) zaležené na modelech statického. Resp. dynamického signálu. V článku (111) "WAMS-Supported Power Mismatch Optimization for Secure Intentional Islanding" se uvažuje o koordinaci UFLS s možným vytvořením hranic ostrovních provozů, tak aby byly ostrovy delší čas provozovatelé i s OZE.

Obnovování provozu sítě

Tuto problematiku nastiňuje článek (22) "Frequency Monitoring and Control during Power System Restoration Based on Wide Area Measurement System", kde je navržena metodiky frekvenčního monitoringu a řízení během prvních kroků obnovování provozu, obsahuje relativně jednoduchý model sítě založený na jednom generátoru pro každý uvažovaný ostrov a statický model zátěže. Detailní modelování zátěže a optimalizace zátěže generátorů, má zabránit nebezpečné nerovnováze mezi zátěží a výrobou a velkým frekvenčním odchylkám. Prezentovaný přístup optimalizuje zatížení generátorů pouze na základě aktuálního stavu energetického systému, což vede k bezpečné, hladké a rychlé obnově.

Seznam obrázků

Obr. 3.5.1: Dvě varianty estimace stavu ES	24
Obr. 3.5.2 : Schéma postupu při estimaci stavu ES s využitím hybridního algoritmu	25
Obr. 3.5.3: Vývojový diagram algoritmu LSE	26
Obr. 1 Úbytek napětí na vedení v ES[1]	28
Obr. 2 Napěťová stabilita ES [2]]	29
Obr. 3 Regulace napětí a frekvence v ES [3]	30
Obr. 4 Princip třístupňové regulace napětí v ES ČR [1]]	31
Obr. 5 Regulační prvky napětí v DS [1]"	31
Obr. 6 Využití WAMS v systému SCADA [1]	32
Obr. 7 Povolené hodnoty f a V pro DG definované standardy IEC a IEEE [4]	33
Obr. 8 Vymezení LVRT na FV generátoru v ES [8]	33
Obr. 9 RoCoF v ES [5]	34
Obr. 10 : PowerLline Carrier Communication [5]	35
Obr. 11 : Algoritmus frekvenčního rozdílu založeného na PMU [4]	36
Obr. 12 : FV-DG napájecí zdroj ostrovní RLC zátěží [5]	37
Obr. 13 : NDZ střídače [5]	38
Obr. 3.8.2-1 Rozdílné hodnoty RoCoF v ES ve Velké Británii [132]	68
Obr. 3.8.2-2 Princip stanovení efektivní setrvačnosti oblasti [132]	69
Obr. 3.8.2-3 Navržený postup estimace efektivní setrvačnosti [132]	70
Obr. 3.8.2-4 Výsledky testování metody v rámci projektu MIGRATE [132]	71
Obr. 3.8.2-5 Návrh regulačního schématu pro zajištění frekvenční stability v ES [137]	71
Obr. 3.8.2-6 Dynamický ekvivalentní model ES [102]	72
Obr. 3.8.2-7 Model ekvivalentního generátoru [102]	73
Obr. 3.8.2-8 Výsledky testování estimace setrvačnosti ES pomocí dynamického ekviv	/alentu
[102]	73
Obr. 3.8.2-9 Výsledky estimace setrvačnosti pomocí polynomické aproximace [65]	75
Obr. 3.8.2-10 Princip WARS [124]	76
Obr. 3.8.2-11 Frekvenční odezva energetického systému v závislosti na setrvačnosti E	S [124]
	76
Obr. 3.8.2-12 Návrh modelu primární regulace pomocí WARS v Norsku, Švédsku a Finsk	u [124]
	76

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	3.6.2023	K. Noháč
1	Všechny	Kompletní rozšíření	26.9.2023	K. Noháč
2	Všechny	Korekce a stylistické úpravy	14.11.2023	K. Noháč