

Marián Mešter

Stabilita a flexibilita elektrizačnej sústavy pri prechode na nízkouhlíkové siete

Abstrakt: Cieľom predkladaného článku je poukázať na nevyhnutnosť doplnenia nových tried stability elektrizačnej sústavy, preukázať súvislosti medzi pojmami stabilita a flexibilita sústavy, zasadiť oba pojmy do kontextu bezpečnosti elektrizačnej sústavy ako najvyššieho cieľa prevádzky sústavy a vyzdvihnúť potrebu výskumu v tejto oblasti.

Kľúčové slová: stabilita; flexibilita, klasifikácia stability, flexibilita, zdroje flexibility, bezpečnosť energetických sústav

Abstract The aim of the present paper is to point out the necessity of adding new classes of power system stability, to demonstrate the links between the concepts of stability and flexibility of the power system, to place both concepts in the context of power system security as the final goal of power system operation, and to highlight the need for research in this area. **(Stability and flexibility of the electricity system in the transition to low-carbon grids)**

Keywords: stability; flexibility, stability classification, flexibility, sources of flexibility, power system security

I. ÚVOD

Celosvetovo sme svedkami rastúcich problémov so stabilitou elektrizačných sústav, pri prechode k nízkouhlíkovým energetickým sieťam. Tieto typy energetických sietí sa vyznačujú vysokým podielom zdrojov s výkonovou elektronikou (označované ako CIG converter-interfaced generation, alebo tiež IGB inverter-based generation), prepojenými obnoviteľnými zdrojmi energie (OZE), distribuovanými energetickými zdrojmi (DEZ), úložiskami a flexibilnými záťažami (napr. elektrické vozidlá (EV)), inteligentnými technológiami sietí (napr. inteligentné merače, automatizácia rozvodní, mikrosiete, IoT), distribuovanými platformami na obchodovanie, virtuálnymi elektrárňami apod. Jedná sa o dvojcestné prenosy energie a dát v rámci konceptu „prosumer“. Vzájomne závislá povaha týchto technológií vytvára zložité interakcie medzi konvenčnými a novými technológiami s dopadom na rozhodovanie o investíciách a prevádzkových postupoch. Skúsenosť z krajín s vysokým podielom obnoviteľných zdrojov, ako sú napr. Austrália, Veľká Británia a Írsko dokazujú systémovú závislosť medzi konvenčnými a novými technológiami, ktorá vytvára zložité dynamické interakcie, ktoré vyžadujú radikálne nové postupy riadenia, kontroly a prevádzky s cieľom udržať stabilitu elektrizačnej sústavy a teda aj jej bezpečnosť a spoľahlivosť. Uvedené faktory zohrávajú významnú úlohu pri zmene dynamiky sústavy, najmä pokiaľ ide o okamžitý mix výroby, s dôsledkami na systémovú zotrvačnosť (uložená energia v synchronne rotujúcich zariadeniach), skratovú odolnosť a rezervu jalového výkonu.

Pri diskusiách o stabilite sústavy sa dostal do popredia relatívne nový pojem flexibilita sústavy. Pri dosahovaní flexibility sústavy potrebnej na prispôbenie variabilnej a distribuovanej výroby elektriny z OZE má zásadnú úlohu spotrebiteľ. Flexibilita je považovaná za schopnosť riadenia zdrojov v elektrizačnej sústave, ktoré slúžia na zmiernenie zmien a neistôt v systéme [1]. Cieľom predkladaného článku je (i) poukázať na nevyhnutnosť doplnenia nových tried stability, resp. reklasifikácie existujúcich tried stability (ii) preukázať súvislosti medzi oboma pojmami: stabilita a flexibilita

elektrizačnej sústavy a (iii) vyzdvihnúť potrebu výskumu v tejto oblasti.

II. STABILITA S VYSOKÝM PODIELOM OZE

V konvenčných elektrizačných sústavách, synchronne generátory, okrem poskytovania plynulej regulácie napätia (prostredníctvom ich automatických napäťových riadiacich slučiek a využitím ich dostupnej kapacity jalového výkonu), poskytujú prirodzenú odozvu počas výkyvov frekvencie (zotrvačná odozva) a injekcií vysokých skratových prúdov po poruche, pretože ich statorové vinutia sú priamo spojené so sústavou. Avšak, zvyšujúci sa podiel CIG technológií vedie k výraznému zníženiu kapacity skladovanej energie, k poklesu skratovej odolnosti a schopnosti regulovať frekvenciu a napätie. Všetky tieto faktory priamo ovplyvňujú stabilitu elektrizačnej sústavy.

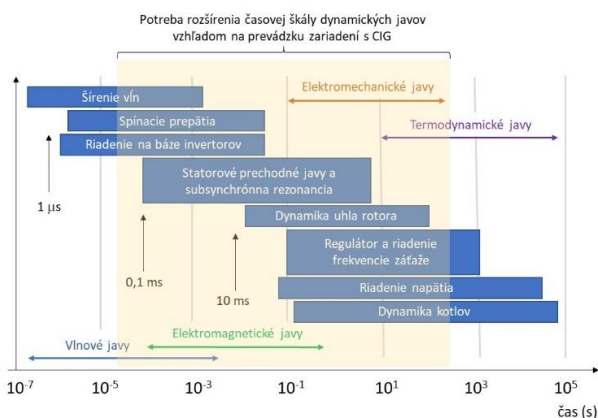
Medzi ďalšie podstatné vplyvy na stabilitu elektrizačnej sústavy patria (i) bezprecedentný rast podielu DER, najmä malých fotovoltaických systémov (< 100 kW) a EV, ktoré vedú k väčšej neistote v profiloch dopytu výroby a zaťaženia, čo vyžaduje dodatočné rezervy na udržanie stability sústavy, (ii) volatilita na strane spotreby a (iii) hrozba kaskádových vypnutí DER iniciovaných poruchami na úrovni prenosových sústav. Napríklad v Nemecku bolo do konca roka 2019 nainštalovaných 49 GW fotovoltaickej výrobnéj kapacity, pričom viac ako 52 % tvoria systémy označované ako systémy malého rozsahu (< 100 kW) a viac ako 98 % z nich je pripojených do NN sústavy [2].

Keďže časť elektrizačných sústav smeruje k 100 % penetrácii obnoviteľných zdrojoch (v zásade všetky s CIG), očakáva sa, že v najbližších rokoch problematika stability dramaticky eskaluje. Dôsledkom týchto zmien je aj potreba prehodnotenia doteraz platných definícií stability elektrizačných sústav ako aj definovanie nových postupov pre zabezpečenie bezpečnej a spoľahlivej prevádzky. Keďže bezpečnosť je dôležitým, ak nie konečným cieľom riadenia elektrizačnej sústavy, smeruje vývoj nových systémov riadenia od statického stanovenia bezpečnosti (založeného na intenzívnom výpočte toku výkonov), ku dynamickému stanoveniu bezpečnosti.

III. REKLASIFIKÁCIA STABILITY

V auguste 2004 uverejnil inštitút IEEE komplexnú štúdiu venovanú definíciám a klasifikácii stability elektrických systémov, ktorá bola vytvorená v spoločnej pracovnej skupine s výborom CIGRE [3]. Po zhruba 20 rokoch bolo nevyhnutné celú štúdiu prepracovať, a tak v máji 2020 zverejnila pracovná skupina IEEE PES-TR77 (Power System Dynamic Performance Committee) novú správu: „Definície stability a charakteristika dynamiky správania v systémoch s vysokým prienikom výkonovej elektroniky“ [4].

Štúdiá [4] sa zameriava na dve časové škály, a to na elektromagnetické a elektromechanické prechodné javy a jej súčasťou je reklasifikácia a doplnenie jednotlivých typov stability v kontexte dopadov OZE s CIG (obr. 1).



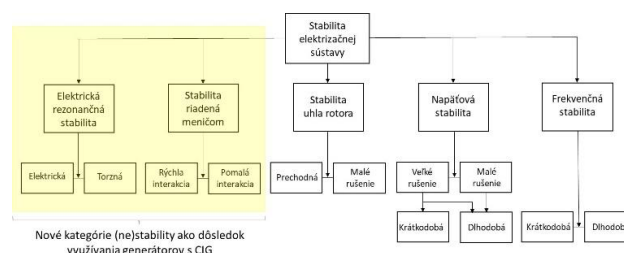
Obr. 1. Časová škála dynamických javov v elektrizačnej sústave [4].

Obr. 1 znázorňuje časové škály pre rôzne triedy dynamických javov v elektrizačných sústavách. Časový rozsah týkajúci sa riadenia zariadení s CIG sa pohybuje od niekoľkých mikrosekúnd až po niekoľko milisekúnd, teda zahŕňa vlnové a elektromagnetické javy. Ak vezmeme do úvahy penetráciu CIG, tak rýchlejšia dynamika získa na dôležitosti pri analýze budúceho dynamického správania energetického systému v porovnaní s javmi v časovom rozmedzí niekoľkých milisekúnd až minút. Zameranie na časový rozsah elektromechanických prechodových javov umožnilo niekoľko zjednodušení v systéme modelovania zdrojov, čo výrazne pomohlo pri analýze súvisiacich javov. Kľúčovým aspektom týchto zjednodušení je predpoklad, že napätia a prúdy dominuje základná frekvenčná zložka systému (50 alebo 60 Hz). V dôsledku toho sa elektrizačná sústava môže modelovať s ohľadom na fázy napätia a prúdu v ustálenom stave, čo poznáme pod pojmom kvázistacionárny prístup modelovania [5]. S týmto prístupom modelovania sú vysokofrekvenčná dynamika a dynamika spojená so spínaním výkonovej elektroniky reprezentované buď modelmi v ustálenom stave alebo zjednodušenými dynamickými modelmi. Z toho vyplýva, že rýchle javy, ako napríklad prepínanie, nemožno úplne zachytiť. Vzhľadom na vyššie uvedené časové rozsahy prevádzky súvisiace s CIG existuje potreba rozšíriť šírku pásma skúmaných javov a zahrnúť rýchlejšiu dynamiku v rámci elektromagnetických časových škál (obr. 1).

Klasifikácia stability elektrizačnej sústavy je založená na vnútornej dynamike javov vedúcich k problémom so stabilitou. Klasifikácia do časových stupní sa vzťahuje na komponenty, javy a riadenia, ktoré je potrebné modelovať, aby sa správne reprodukoval problém, ktorý je analyzovaný. Vplyvmi distribuovaných zdrojov pripojených na

distribučnej úrovni na prenosovú sústavu sa zaoberá [6], a preto sa v správe neriešia. Okrem toho sa správa nezaobera (i) prípadmi, keď nesprávne nastavenie riadenia spôsobuje miestnu nestabilitu, (ii) prípadmi, keď nestabilitu riadiacej slučky možno priamo charakterizovať bez modelovania energetického systému, (iii) otázkami stability spojenými s mikrosieťami (táto téma je riešená napr. v [7]), (iv) javmi šírenia elektromechanických a elektromagnetických vln [8], [9].

Pôvodná štúdiá o stabilite [3] klasifikovala stabilitu elektrizačných sústav do troch rôznych foriem stability – uhlová stabilita rotora, stabilita napätia a stabilita frekvencie. Každá forma stability je potom rozdelená na stabilitu malých porúch a stabilitu veľkých porúch. Je stanovený aj vzťah medzi krátkodobou stabilitou, dlhodobou stabilitou a vyššie uvedenými formami stability. Aktualizovaná štúdiá [4] rozšírila triedy stability o dve nové kategórie elektrických rezonančnú stabilitu a stabilitu riadenú meničom (obr. 2.).



Obr. 2. Reklasifikácia stability elektrizačnej sústavy z dôvodu nasadenia OZE a DER s CIG [3,4].

Formálna definícia stability elektrizačnej sústavy je nasledovná: stabilita energetického systému je schopnosť elektrického energetického systému pri danom počiatočnom prevádzkovom stave znovu získať stav prevádzkovej rovnováhy po vystavení fyzickému narušeniu, pričom väčšina systémových premenných je ohraničená tak, že prakticky celý systém zostáva neporušený [4].

IV. STABILITA UHLA ROTORA

Stabilita uhla rotora sa týka schopnosti vzájomne prepojených synchronných strojov v napájacom systéme zostať v synchronizácii za normálnych prevádzkových podmienok (počas ktorých sú vystavené malému alebo veľkému rušeniu) a znovu získať synchronizáciu [4]. Stroj udržiava synchronizmus, ak je elektromagnetický krútiaci moment rovný a opačný ako mechanický krútiaci moment dodávaný hnacím motorom. Preto tento typ stability závisí od schopnosti synchronných strojov udržiavať alebo obnovovať rovnováhu medzi týmito dvoma protichodnými krútiacimi momentmi.

Synchronné stroje udržiavajú stabilitu obnovením síl, v okamihu keď porucha spôsobí, že jeden alebo viac strojov zrýchli alebo spomalí v porovnaní s ostatnými. V ustálených podmienkach existuje rovnováha medzi vstupným mechanickým krútiacim momentom a vyvažovacím elektromagnetickým krútiacim momentom každého stroja a otáčkami všetkých prepojených strojov. Porucha naruší túto rovnováhu a vedie k nevyváženosti krútiaceho momentu, čo má za následok buď zrýchlenie, alebo spomalenie rotorov synchronných strojov podľa zákona pohybu rotujúceho telesa V dôsledku toho sa uhol rotora synchronného stroja (strojov) môže zvýšiť nad maximálnu hodnotu a stroj (stroje) tzv. "vypadne zo synchronizmu" (out of step) vzhľadom ku ostatným strojom. Výrazné zvýšenie rýchlosti strojov však nemusí nevyhnutne viesť k strate synchronizácie, ak všetky stroje

zrýchľujú alebo spomaľujú spolu. Kľúčovým faktorom pri určovaní stability systému je rozdiel uhla medzi strojom alebo skupinou strojov a zvyškom systému.

Stabilita uhla rotora s malým rušením: týka sa schopnosti energetického systému udržiavať synchronizmus pri malých poruchách, ako sú malé zmeny zaťaženia a výroby. Malé poruchy sú tie zmeny, pre ktoré sú odchýlky uhlov rotorov synchronných strojov od rovnovážneho bodu také malé, že systémové rovnice môžu byť lineárne okolo rovnovážneho bodu bez toho, aby viedli k významným chybám. Časový rámec, v ktorom sa očakáva, že oscilácie uhla rotora po malom narušení sa zoslabia je menší ako 20 sekúnd [11].

Prechodná stabilita uhla rotora: týka sa schopnosti energetického systému udržiavať synchronizmus pri vystavení závažným poruchám ako je skrat na prenosovom vedení, odpojenie veľkých elektrární, alebo odpojenie veľkých záťaží. Odzva systému zahŕňa veľké odchýlky uhlov rotorov synchronných strojov. V dôsledku toho už nie je vhodné linearizovať systémové rovnice ako v prípade malých porúch, pričom vývoj uhlov rotorov sa zvyčajne analyzuje pomocou metód numerickej integrácie. Stabilita v tomto prípade závisí od počiatočného prevádzkového stavu systému a od závažnosti poruchy. Ustálený stav po poruche sa zvyčajne líši od prevádzkového bodu pred poruchou. Časový rámec v štúdiách prechodnej stability je zvyčajne kratší ako 10 sekúnd po poruche, aj keď v prípade rozsiahlych prepojených sústav môže byť tento časový rámec predĺžený na 20 sekúnd [4].

V. NAPĚŤOVÁ STABILITA

Napätiová stabilita sa vzťahuje na schopnosť elektrizačnej sústavy udržiavať stabilné napätie na všetkých zberniciach (uzloch) v systéme po poruche [4]. Závisí to od schopnosti kombinovaných výrobných a prenosových sústav poskytovať energiu požadovanú záťažou. Táto schopnosť je obmedzená maximálnym prenosom energie do konkrétnej sady uzlov a je spojená s poklesom napätia, ku ktorému dochádza, keď činný a/alebo jalový výkon prúdi cez indukčné reaktancie prenosovej sústavy.

Stabilita krátkodobého napätia zahŕňa dynamiku rýchlo pôsobiacich komponentov sústavy, ako sú indukčné motory, elektronicky riadené záťaže, ZVN jednosmerné prenosové vedenia a CIG generátory. Časové pásmo je rádovo niekoľko sekúnd, podobné stabilite uhla rotora alebo stabilite poháňanej meničom (typ pomalej interakcie). Preto je potrebné použiť modely s príslušným stupňom detailu. Pre krátkodobú stabilitu napätia je nevyhnutné dynamické modelovanie záťaženia a hlavným problémom sú skraty v blízkosti záťaže. Najbežnejším prípadom krátkodobej napätivej nestability je zastavenie indukčných motorov po veľkej poruche buď stratou rovnováhy (medzi elektromagnetickými a mechanickými krútiacimi momentmi), alebo nedostatočnou „príťažlivosťou“ k rovnovážnemu bodu v dôsledku neskorého vypnutia poruchy [4].

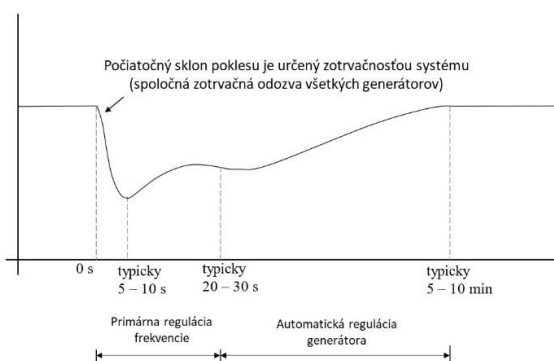
Dlhodobá stabilita napätia zahŕňa vplyvy pomalšie pôsobiacich javov, ako sú prepínanie odbočiek transformátorov, termostaticky regulované záťaže a obmedzovače prúdu generátorov. Časový úsek prechodného javu sa môže predĺžiť na niekoľko minút a na analýzu dynamického výkonu systému sú potrebné dlhodobé simulácie. Tento typ stability zvyčajne nie je spôsobený počiatočnou poruchou, ale následným výpadkom prenosového a/alebo výrobného zariadenia po odstránení poruchy a následnou stratou dlhodobej rovnováhy. Dlhodobá nestabilita potom nastáva, keď sa dynamika záťaženia pokúsi obnoviť spotrebu energie nad maximálnu hranicu prenosu. Nestabilita môže nastať aj vtedy, keď nápravné opatrenie nie je schopné včas obnoviť stabilnú rovnováhu po narušení a preto návrat k rovnováhe nie

je možný. Alternatívne by narušenie rovnováhy vedúce k nestabilite mohlo byť spôsobené aj trvalým zvyšovaním zaťaženia (napr. zvýšenie ranného zaťaženia).

VI. FREKVENČNÁ STABILITA

V prepojenej elektrizačnej sústave, v ktorej dominuje synchronná výroba, má prvoradý význam regulácia frekvencie. Najčastejšie analyzované udalosti sú tie, ktoré spôsobujú pokles systémovej frekvencie. Obr. 3 znázorňuje tri odlišné periódy počas udalosti, ktorá spôsobuje pokles frekvencie a s tým súvisiace ovládacie prvky: (i) počiatočnú zotrvačnú odzvu synchronných generátorov, (ii) primárnu frekvenčnú odzvu generátorov a tlmenie zaťaženia a (iii) automatické riadenie generátorov, ktoré vráti frekvenciu späť na jej nominálnu hodnotu.

Obr.3. Príklad frekvenčnej odzvy elektrizačnej sústavy na veľkú poruchu [12]

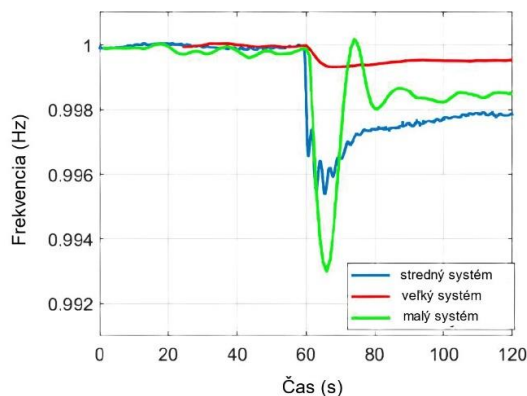


Zotrvačná odzva systému je prirodzenou fyzickou reakciou synchronnej výroby na náhlu nerovnováhu medzi výrobou a spotrebou. Ak dôjde napríklad k náhlemu nútenému výpadku veľkého generátora, v okamihu, ktorý nasleduje po strate výroby, zaťaženie sa okamžite nezmení a nemôže okamžite zmeniť. Výsledkom je, že v dôsledku základných fyzikálnych princípov (a nie ovládacích prvkov) budú všetky zostávajúce synchronne generátory reagovať v pomere k ich elektrickej blízkosti, zotrvačnosti a elektrickému výkonu, aby poskytli časť celkového strateného výkonu na pokračovanie v napájaní záťaže. Po tejto extrémne rýchlej elektrickej reakcii spôsobí dodatočná elektrická energia dodávaná každým synchronným generátorom z uloženej rotačnej kinetickej energie v rotoroch generátorov nerovnováhu medzi elektrickým a mechanickým krútiacim momentom na hriadieli každého generátora, čím sa spomalia všetky generátory, čo vedie k počiatočnému rozpadu frekvencie systému. Ide o inherentnú zotrvačnú odzvu synchronných generátorov v dôsledku fyzikálnych zákonov a nie zásahov riadenia. Táto nekontrolovaná frekvenčná odzva je prvou fázou odzvy znázornenej na obr. 3.

Za predpokladu, že by všetky generátory boli bez riadenia, systémovej frekvencia by naďalej klesala, aktivovali by sa schémy odopínania záťaže a ostatné ochranné prvky, čo by v extrémnych prípadoch viedlo k výpadku systému. Aby sa predišlo týmto problémom, musí mať primeraný počet výrobných zariadení určitý rezervný výkon/palivo a musí pracovať pod maximálnou kapacitou. Tieto zariadenia reagujú zvýšením svojho výstupného výkonu, aby nahradili stratený výkon, a tým zastavili pokles frekvencie a vrátili systém do nového a správneho rovnovážneho prevádzkového bodu.

CIG vo svojej podstate neposkytujú zotrvačnú odpoveď. Avšak teória aj prax preukázali, že CIG prispievajú k frekvenčnej odzve [4,

13, 14]. CIG môžu poskytovať primárnu frekvenčnú odozvu rýchlejšie, pretože limitujúcim faktorom v mnohých prípadoch (napr. solárne systémy a akumulácia energie) je doba odozvy výkonovej elektroniky a nie mechanických systémov (napr. kotlov a turbín). Keďže penetrácia CIG sa zvyšuje, je pravdepodobné, že frekvenčná odozva energetických systémov bude mať tendenciu smerovať k grafu zodpovedajúcemu menším systémom, ako je znázornené na obr. 4, ktorý kladie väčší dôraz na kvalitu a rýchlosť ovládacích prvkov spojených s primárnou frekvenčnou odozvou.



Obr. 4. Príklady priebehov frekvenčnej odozvy pre veľký systém (červená), stredne veľký systém (modrá) a malý systém (zelená) [4]

Vzhľadom na klesajúcu zotrvačnosť siete v dôsledku zníženia pomeru zastúpenia synchronných generátorov vo výrobe, sa frekvenčné výkyvy stávajú rýchlejšími, a preto sa pravdepodobnosť nestability zvyšuje. To kladie väčší dôraz na potrebu navrhnuť vhodné rýchlo pôsobiace regulátory na zastavenie poklesov frekvencie. Vysoký prienik CIG však nemusí viesť automaticky k výraznému zníženiu zotrvačnosti sústavy, a to v prípade, ak synchronné generátory zostanú pripojené, ale nezaťažené. Frekvenčná odozva sústav s CIG je komplexný jav, ktorý si vyžaduje ďalší výskum.

VII. REZONANČNÁ STABILITA

Pojem rezonančná stabilita zahŕňa subsynchronnú rezonanciu (SSR), spojenú buď s elektromechanickou rezonanciou (torznou) alebo výlučne elektrickou rezonanciou. Termín SSR, ako je definovaný v pôvodných publikáciách týkajúcich sa tohto javu [15], sa môže prejavíť v dvoch možných formách: (i) v dôsledku rezonancie medzi sériovou kompenzáciou a mechanickými torznými frekvenciami hriadeľa turbogenerátora a (ii) v dôsledku rezonancie medzi sériovou kompenzáciou a elektrickými charakteristikami generátora. Prvá z nich sa vyskytuje medzi sériovo kompenzovanou sústavou a mechanickými režimami torzných kmitov na hriadeľ turbogenerátora, zatiaľ čo druhá je čisto elektrická rezonancia a nazýva sa efekt indukčného generátora (IEG, alebo tiež samobudenie) [16], [17]. Tento jav vzniká pri chode generátora, ktorý napája kapacitnú záťaž v prebudenom stave. Preto bola na obr.2. rezonančná stabilita rozdelená do týchto dvoch kategórií.

Torzná rezonancia vzniká v dôsledku torzných interakcií medzi sériovo kompenzovaných vedení a mechanickým hriadeľom turbogenerátora a sú v odbornej literatúre dobre zdokumentované. Podľa pracovnej skupiny IEEE [15] sa subsynchronné oscilácie delia na subsynchronné rezonancie (SSR) a subsynchronné oscilácie závislé od zariadenia (DDSSO device-dependent subsynchronous oscillations). SSR zahŕňa stav elektrizačnej sústavy, pri ktorom si sústava vymieňa

energiu s turbogenerátorom v jednom alebo viacerých prirodzených subsynchronných torzných režimoch oscilácie. Oscilácie môžu byť zle tlmené, nedostatočne tlmené alebo dokonca negatívne tlmené a rastúce [15, 16, 17], čím ohrozujú mechanickú integritu hriadeľa turbogenerátora. DDSSO vznikajú v dôsledku interakcie rýchlo pôsobiacich riadiacich zariadení, ako sú jednosmerné prenosové vedenia, statické VAR kompenzátory (SVC), statické synchronné kompenzátory (STATCOM) a stabilizátory elektrizačnej sústavy (PSS) s torznými mechanickými režimami blízkych turbogenerátorov. Je dôležité poznamenať, že DDSSO nie sú vždy škodlivé, v niektorých prípadoch môže byť interakcia prospešná a v skutočnosti môže prispieť k zlepšeniu torzného tlmenia. [18].

Elektrická rezonancia. V prípade elektrizačných sústav len s konvenčnými turbogenerátormi sú problémom týkajúcim sa SSR torzné interakcie a rezonancia. IGE (alebo jav samobudenie) nebol v sústavách s konvenčnými synchronnými strojmi pozorovaný v reálnych podmienkach. Avšak už okolo roku 2003 sa predpokladalo, že indukčné generátory s premenlivými otáčkami používané v generátoroch veterných turbín (DFIG) budú veľmi náchylné na samobudiaci režim [19]. Je to spôsobené tým, že generátor DFIG s premenlivými otáčkami je indukčný generátor priamo pripojený k sústave, čo umožňuje vznik elektrickej rezonancie medzi generátorom a sériovou kompenzáciou.

VIII. STABILITA RIADENÁ MENIČOM

Dynamicke správanie CIG sa výrazne líši od konvenčných synchronných generátorov. Je to dôsledok použitia meničov so zdrojom napätia (VSC – voltage source convertes). VSC sú samočinné meniče, ktoré sú schopné samočinnnej komutácie, teda dokážu generovať striedavé napätie bez potreby spoliehať sa na systém striedavého prúdu.

Typické CIG zariadenie sa spolieha na riadiace slučky a algoritmy s rýchlymi časovými odozvami. V tomto ohľade môže široký časový rámec súvisiaci s riadením CIG viesť ku krížovým spojeniam s elektromechanickou dynamikou strojov a elektromagnetickými prechodnými javmi v sústave, čo môže viesť k nestabilným osciláciám energetického systému v širokom frekvenčnom rozsahu [20]. Javy nestability, ktoré vykazujú relatívne nízke frekvencie, sú klasifikované ako stabilita poháňaná meničom s pomalou interakciou (zvyčajne menej ako 10 Hz), zatiaľ čo javy s relatívne vysokými frekvenciami sú klasifikované ako stabilita poháňaná meničom s rýchlou interakciou (zvyčajne desiatky až stovky Hz a prípadne do kHz) [4].

Stabilita poháňaná meničom s rýchlou interakciou. Tieto typy nestability zahŕňajú problémy so stabilitou celého systému spôsobené rýchlymi dynamickými interakciami riadiacich systémov založených na výkonovej elektronike (CIG, HVDC, FACTS) s rýchlo reagujúcimi komponentami elektrizačnej sústavy, ako je napr. prenosová sústava, dynamika statorov synchronných generátorov alebo iné výkonové elektronické zariadenia. Nestabilita v dôsledku interakcií s rýchlym meničom môže vzniknúť mnohými spôsobmi. Napríklad interakcie rýchlych prúdových slučiek CIG s pasívnymi komponentmi systému môžu spôsobiť vysokofrekvenčné oscilácie, zvyčajne v rozsahu stoviek hertzov až niekoľkých kilohertzov [21, 22]. Tento jav bol v komunite výkonovej elektroniky označovaný ako harmonická nestabilita.

Stabilita poháňaná meničom s pomalou interakciou. Tieto typy nestability zahŕňajú celosystémové nestability poháňané pomalými dynamickými interakciami riadiacich systémov výkonových elektronických zariadení s komponentmi elektrizačnej sústavy s pomalou odozvou, ako je elektromechanická dynamika synchronných generátorov a niektorých regulátorov generátorov. Táto kategória nestability poháňanej meničom môže byť podobná stabilite napätia v

tom zmysle, že maximálny prenos výkonu medzi meničom a zvyškom systému môže byť hlavnou príčinou nestability. Tieto dva mechanizmy sa líšia do tej miery, že pokiaľ je nestabilita napätia poháňaná záťažou, tak nestabilita poháňaná meničom je spojená s ovládaním elektronického meniča [4].

Rozšírenie a reklasifikácia základných pojmov stability je nevyhnutná, aby bolo možné obsiahnuť nové problémy, ktoré so sebou prináša vysoká penetrácia zariadení s výkonomou elektronikou. Je však dôležité opakovane uviesť, že klasifikácia uvedená v tomto článku je založená na vnútornej dynamike systému (časové konštanty spojené s aktuálnymi fyzikálnymi javmi) a nie na poruche, ktorá iniciuje nestabilitu.

IX. FLEXIBILITA

Smernica Európskeho parlamentu a rady EÚ č.944/2019 o spoločných pravidlách pre vnútorný trh s elektrinou zdôrazňuje potrebu organizovať trhy s elektrinou flexibilnejšie a plne integrovať všetkých trhových aktérov vrátane výrobcov energie z OZE, poskytovateľov nových energetických služieb, uskladňovania energie a flexibilnej spotreby [23]. Technologický pokrok v riadení sústavy a vo výrobe elektriny z OZE prináša spotrebiteľom mnohé príležitosti. Nedostatok informácií o spotrebe energie v reálnom alebo takmer v reálnom čase bráni spotrebiteľom stať sa aktívnymi účastníkmi trhu s energiami a aktívnymi účastníkmi energetickej transformácie. Tým, že sa spotrebiteľom umožní väčšia účasť na trhu s energiami a poskytnú sa im na tento účel nástroje, mali by občania v Únii pocítiť výhody vnútorného trhu s elektrinou a zároveň by sa mali dosiahnuť ciele Únie v oblasti využitia energie z obnoviteľných zdrojov.

Smernica vyslovene uvádza nasledovné pravidlá:

1. všetky skupiny odberateľov (priemyselní, komerční a domácnosti) by mali mať prístup k trhom s elektrinou a možnosť obchodovať so svojou flexibilitou a vlastnou vyrobenou elektrinou,
2. odberateľom by sa malo umožniť plné využitie výhod agregácie výroby a dodávky vo väčších regiónoch, ako aj cezhraničnej hospodárskej súťaže,
3. významnú úlohu sprostredkovateľov medzi skupinami odberateľov a trhom pravdepodobne zohrajú účastníci trhu zapojení do agregácie,
4. členské štáty by mali mať možnosť vybrať si vhodný model implementácie a prístup k riadeniu v záujme nezávislej agregácie, pričom musia dodržiavať všeobecné zásady stanovené v tejto smernici.

Takýto model alebo prístup by mal zahŕňať možnosť vybrať si trhové alebo regulačné zásady, ktoré poskytujú riešenia na dosiahnutie súladu s touto smernicou, ako sú modely vyrovnávania odchýlky alebo zavedenie úprav profilu spotreby. Vybraný model by mal obsahovať transparentné a spravodlivé pravidlá, aby sa umožnilo nezávislým agregátorom plniť si svoje úlohy ako sprostredkovateľov a aby sa zabezpečilo, že koncový odberateľ bude mať z ich činností primerané výhody. Na všetkých trhoch s elektrinou vrátane podporných služieb a kapacitných trhov by sa mali vymedziť produkty, aby sa podporila účasť subjektov s riadením odberu [23].

Pod pojmom „agregácia“ sa rozumie funkcia, ktorú vykonáva fyzická alebo právnická osoba, ktorá zlučuje viacero odberných miest alebo vyrobenej elektriny na účely predaja, nákupu alebo aukcie na akomkoľvek trhu s elektrinou a „nezávislý agregátor“ je účastník trhu sprostredkujúci agregáciu a ktorý nie je vlastnícky prepojený s dodávateľom odberateľa. Agregátor je schopný cielene meniť

aktuálnu spotrebu (odber elektriny zo sústavy) alebo naopak dodávku elektriny do sústavy. Tento potenciál sa nazýva flexibilita. Každá firma potrebuje na svoju prevádzku energiu, ale v rôznych časoch jej môže potrebovať rôzne množstvo. Príkladmi využívania flexibility vo výrobe alebo spotrebe je napr. akumulácia chladu alebo tepla, využívanie priemyselných čerpadiel, batériových úložísk atď. Vyrovnávanie rozdielov môže zabezpečiť agregátor, ktorý na svoju činnosť potrebuje poskytovanie flexibility zo strany výrobcov elektriny, prevádzkovateľov zariadenia na uskladňovanie elektriny alebo aktívnych odberateľov.

X. DEFINÍCIA FLEXIBILITY

Samotný pojem smernica nedefinuje a v odbornej terminológii nie je zavedená jednotná definícia, viď Tabuľka I.

Flexibilita je v podstate nevyhnutnou podmienkou pre zvýšenie podielu OZE v elektrizačnej sústave s cieľom dosiahnuť ciele definované pre penetráciu obnoviteľných zdrojov. Rýchle a masívne začleňovanie OZE do energetiky je hlavným faktorom, ktorý podporuje výskum týkajúci sa flexibility. OZE sa stávajú cenovo efektívnymi a lacnejšími na výrobu elektrickej energie v dôsledku jednoduchej a lacnej palivovej základni a dostupných dotácií. Avšak OZE generujú premenlivý výstup elektrickej energie, čo spôsobuje neistotu a fluktuácie vo výrobe elektrickej energie. Tieto fluktuácie ovplyvňujú energetický mix zdrojov, postup a frekvenciu nasadzovania zdrojov dispečingom. Preto je flexibilita nevyhnutne potrebná. Fluktuujúce ceny paliva, rast penetrácie OZE, nástup nových technológií pre spotrebiteľov a environmentálne predpisy a politiky sú hlavnými faktormi, ktoré ovplyvňujú výskum flexibility.

Na základe uvedených definícií je možné identifikovať štyri aspekty flexibility, ktoré obsahujú čas, riadiacu funkciu, neistotu a náklady. Prvé tri vlastnosti sa dajú považovať za technické normy a posledná je daná ekonomickými princípmi. Okrem týchto dimenzií sú dôležité aj iné atribúty, ako napríklad umiestnenie zdrojov flexibility a ich blízkosť k prenosovému alebo distribučnému systému [24].

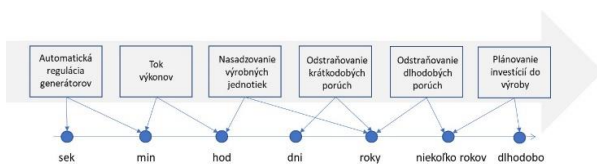
Prvá dimenzia: čas. Časový interval reakcie popisuje, ako rýchlo systém reaguje na odchýlky a vracia sa do pôvodného stavu. Na základe cieľov štúdie sa časové obdobie môže líšiť od niekoľkých sekúnd po niekoľko mesiacov [24]. Na základe zvoleného časového intervalu môže systém vykonávať rôzne úrovne flexibility. Krátke časové intervaly sa sústreďujú na krátkodobú flexibilitu systému a ukazujú časový interval odpovede v priebehu niekoľkých minút alebo hodín. Naopak, dlhé časové intervaly sa zameriavajú na dlhodobé plánovanie systému a zobrazujú zmeny, ako je kombinácia výroby, legislatívne politiky a zmena spotreby počas niekoľkých mesiacov. Energetický systém môže mať dostatočnú dlhodobú flexibilitu, ale môže trpieť nedostatkom krátkodobej flexibility. Napríklad systém môže mať dostatočnú kapacitu na pokrytie nárastu zaťaženia počas roka, ale nemôže zabezpečiť denné zmeny dopytu. Preto je rozhodnutie o časových intervaloch na hodnotenie flexibility systému nevyhnutné.

TABUĽKA I

Definície flexibility elektrizačnej sústavy

	Ref.	Definícia
1.	[25]	"Schopnosť systému nasadiť svoje zdroje na reakciu na zmeny v čistom zaťažení, pričom čisté zaťaženie je definované ako zostávajúce zaťaženie systému, ktoré nie je obslužené premenlivou výrobou."
2.	[26]	"Flexibilita vyjadruje rozsah, do akého môže energetický systém modifikovať svoju výrobu a spotrebu elektrickej energie v reakcii na variabilitu, očakávanú alebo inak definovanú."
3.	[27]	"Potenciál nasadenia kapacity v určitom časovom rámci."
4.	[28]	"Schopnosť energetického systému zvládať variabilitu a neistotu vo výrobe a dopyte, pričom udržiava uspokojivú úroveň spoľahlivosti za rozumné náklady v rôznych časových horizontoch."
5.	[29]	"Schopnosť systému reagovať na súbor odchýlok, ktoré sú identifikované kritériami riadenia rizika, prostredníctvom nasadenia dostupných kontrolných opatrení v rámci preddefinovaných časových rámcov a cenových limitov."
6.	[30]	"Prevádzková flexibilita je definovaná vo vzťahu k výkonnosti (MW), rýchlosti zmeny výkonu (MW/min), t.j. schopnosti zvýšiť výrobu energie s určitou rýchlosťou a trvanie rýchlej zmeny (min), t.j. schopnosti udržať zmeny výkonu po určitú dobu."
7.	[31]	"Všeobecná charakteristika schopnosti súboru generátorov reagovať na zmeny a neistotu v čistom zaťažení."
8.	[32]	"Schopnosť energetického systému spoľahlivo a nákladovo efektívne riadiť variabilitu a neistotu dopytu a ponuky vo všetkých relevantných časových rámcoch."
9.	[33]	"Pripravenosť energetického systému na vyššie podiely premenných obnoviteľných zdrojov energie."

Druhá dimenzia: riadiace funkcie. Riadiace funkcie zahŕňajú súbor korekčných postupov, ktoré sa môžu uskutočniť v prevádzkovom procese počas časového intervalu reakcie. Súbor riadiacich funkcií závisí od časového obdobia reakcie. Obrázok 5 zobrazuje bežné korekčné funkcie v energetických systémoch pre rôzne časové intervaly. V každom časovom období je operátor/dispečer vybavený konkrétnymi korekčnými procesmi.



Obr. 5. Korekčné funkcie v elektrizačnej sústave v rôznych časových intervaloch

Tretia dimenzia: neistota. V skutočnosti je neistota nedostatkom úplných informácií o budúcom stave systému. Prevádzka a plánovanie sú vždy ovplyvnené neistotou. Tradične sa neistota týka pravdepodobných výpadkov systémových komponentov, chýb v predpovedi zaťaženia a trhových cien. V posledných rokoch, s narastajúcim prienikom OZE, pribudol do systému nový typ neistoty v dôsledku nepresnej predpovede výroby z variabilných OZE. Neistota systému určuje, koľko flexibility je potrebné na jej riadenie. Zároveň ukazuje, ako flexibilný je systém. Zvolený interval na pokrytie neistoty systému je určený s ohľadom na cieľový interval, ktorý odzrkadľuje množstvo preferovaného rizika.

Štvrtá dimenzia: náklady. Ďalším aspektom flexibility sú odchýlky a neistota v nákladoch na reakciu, ktoré sú funkciou riadiacich procesov. Plánovač prevádzky alebo dispečer sústavy sa vždy snažia poskytnúť flexibilitu systému a zároveň minimalizovať náklady. S ohľadom na túto cieľovú funkciu sú navrhnuté najekonomickjšie riadiace procesy na reakciu na neistotu. Okrem minimalizácie nákladov na flexibilitu sa niekedy zohľadňuje aj hraničný náklad alebo hraničné riziko na zabezpečenie flexibility systému. V situácii, ak je hraničný náklad vysoký (nízke riziko), neexistujú žiadne obmedzenia na riadiace postupy a s nimi súvisiace náklady. Ak však je hraničný náklad nízky (vysoké riziko), niektoré riadiace procesy by mohli byť ekonomicky nevýhodné a mohli by byť zanedbané.

Správna definícia štvorice dimenzií povedie k poskytnutiu a hodnoteniu potrebnej flexibility v kontexte plánovania a prevádzky elektrizačnej sústavy.

XI. ZDROJE FLEXIBILITY

Odborná literatúra rozdeľuje flexibilitu do dvoch oblastí: na fyzickú a štruktúrnu. Fyzická flexibilita sa vzťahuje na fyzickú schopnosť systému reagovať na zmeny dopytu a výroby, čo je potrebné, ale nie postačujúce pre flexibilnú prevádzku systému. Štruktúrna flexibilita je schopnosť využívať fyzickú flexibilitu pomocou prevádzkových pokynov alebo trhových postupov. Dôležitosť štruktúrnej flexibility by nemala byť podceňovaná, pretože väčšinou umožňuje dosiahnuť správnu prevádzku systému. Tabuľka II identifikuje zdroje flexibility v energetickom systéme a ich vzťah k fyzickej alebo štruktúrnej flexibilitě. Ak je dominantným zdrojom flexibility jeho vlastná fyzická charakteristika, je pod kategóriou „fyzický“, napr. flexibilné konvenčné výrobné jednotky. Štruktúrne možnosti, ako napr. zlepšenie dizajnu trhu, poskytujú flexibilitu hlavne prostredníctvom dizajnu trhu alebo operačných postupov, ktoré sú väčšinou nestranné voči použitiu rôznych technológií. Zdroje flexibility, ako napríklad využitie flexibility strany dopytu, vyžadujú fyzickú flexibilitu zo strany systémových komponentov spolu s vhodnými prevádzkovými a trhovými štruktúrami.

TABUĽKA II

Rozdelenie zdrojov flexibility v elektrizačnej sústave [24].

Zdroje flexibility	Fyzická flexibilita	Štruktúrna flexibilita
Flexibilné konvenčné výrobné jednotky	✓	
Využitie flexibility na strane dopytu	✓	✓
Prepojenie sústav a flexibilita na strane sústavy	✓	✓
Zlepšenie dizajnu trhu		✓
Väčšia kontrola nad OZE/DEZ	✓	✓
Nové/ďalšie podporné služby		✓
Systém skladovania energie	✓	
Iniciatíva inteligentnej siete	✓	✓
Sektorová integrácia		✓

Flexibilné konvenčné výrobné jednotky. Fyzická flexibilita systému je podporovaná rýchlym spustením konvenčných jednotiek s vysokou schopnosťou zmeny výkonu, nízkym minimálnym výrobným obmedzením a krátkymi minimálnymi dobami zapnutia a vypnutia. Zvýšený cyklus prevádzky elektrární na fosilné palivá spôsobuje výrazný nárast počtu nútených výpadkov jednotiek, opráv a údržby a

vysoké opotrebenie a únavu výrobných jednotiek. Na druhej strane, ekonomická efektívnosť konvenčných jednotiek je neistá, najmä pre uhoľné elektrárne. Okrem toho je potrebná významná investícia do výrobných infraštruktúr elektrární, aby sa jednotky stali flexibilnými. Preto bude nevyhnutné vykonať analýzu nákladov a vyhodnotiť najekonomickjšiu voľbu pre zlepšenie flexibility systému. Ďalšou možnosťou je využitie viacerých flexibilných jednotiek, ako sú jednotky so spaľovacím motorom alebo spaľovacou turbínou s nízkym minimálnym výrobným obmedzením a vysokou účinnosťou.

Využitie flexibility na strane dopytu. Ide o dôležitú možnosť ako zvýšiť flexibilitu celého systému. Riadenie na strane dopytu by mohlo poskytovať rôzne rovnováhy v časovom intervale (od sekúnd po sezónu) prostredníctvom ponuky energetických, kapacitných a pomocných služieb, ako sú regulácia, nasledovanie záťaže, náhrada za núdzovú situáciu atď., ktoré by mohli byť využité na zvýšenie flexibility systému [24, 38]. Riadenie dopytu s ohľadom na podmienky systému, či už prostredníctvom programov založených na cene pre individuálnych spotrebiteľov alebo agregovaním reaktívneho dopytu, by rovnako viedlo k zvýšeniu flexibility.

Prepojenie sústav a flexibilita na strane sústavy. Ak existuje dostatočná fyzická výbava a infraštruktúra, spojenie rovnovážnych oblastí by bolo kľúčom k rozvoju fyzickej a štruktúrálnej flexibility. Siete, ktoré sú charakterizované fyzickými spojeniami medzi blízkymi regiónmi, poskytujú zvýšený prístup k rôznym typom dopytu a výroby energie. Okrem toho by geografické rozšírenie mohlo vyrovnávať celkovú výrobu z OZE a celkový dopyt po elektrickej energii. Zdroje flexibility zo strany siete sa delia na diskrétne a spojité zdroje [34]. Plánovanie rozšírenia prenosovej sústavy a zmena topológie sústavy pri prevádzke sú typické diskrétne zdroje. Spojité zdroje, ako sú prenosové sústavy (HVDC) a zariadenia pre flexibilné prenosové systémy (FACTS), by pomohli dispečerovi systému monitorovať a riadiť sústavu efektívnejšie, zvýšením prenosovej kapacity vedení.

Zlepšenie dizajnu trhu. Štyri základné charakteristiky štandardného dizajnu trhu sú: veľkosť, rýchlosť, neutrálne vzťahy k hráčom a poskytovanie prístupov založených na funkciách hráčov. Prepojenie sústavy zvýši flexibilitu systému. Avšak využitie získanej flexibility je závislé na vhodnom dizajne trhu. Preto je dôležité stanoviť správne a účinné štruktúrne konfigurácie na riadenie a prevádzku spojovacích vedení a trhov súčasne a koordinovane. Hlavnou vlastnosťou dizajnu trhu je existencia rýchleho a frekventovaného energetického trhu, často nazývaného trh v reálnom čase alebo vyvažovací trh, ktorý prináša systémovú flexibilitu vďaka takmer okamžitému vykonávaniu a presnejšiemu predpovedaniu výroby obnoviteľných zdrojov energie a lepšiemu prispôbeniu reálnych podmienok systému. Dlhé intervaly usporiadania nedávajú dostatočné podnety pre flexibilné zdroje. Kratšie intervaly povedú k lepšiemu cenovému paradigmatu, ktorý potom vyhovuje aj flexibilným zdrojom. Byť neutrálnym k hráčom znamená, že všetky zdroje (bez ohľadu na ich typ technológie) sú spravodlivo konkurenčné a zodpovedajú za svoje rôzne spolupráce pri poskytovaní požadovaných služieb [35]. V dizajne trhu sa definuje nová dodatočná služba bez ohľadu na typ technológie a odkazuje sa na požadovanú rýchlosť odpovede, úroveň odpovede alebo dĺžku výkonu. Okrem toho musia byť platby rozdelené podľa prevádzky zdrojov. Dvaja dodávatelia, ktorí predkladajú rozličné úrovne tej istej služby, by mali byť platení v súlade s ich úrovňou služby. Viac služieb znamená vyššie platby. Okrem toho dvaja rôzni dodávatelia, ktorí poskytujú rovnakú úroveň služby, by mali byť platení rovnako bez ohľadu na ich typ.

Väčšia kontrola nad OZE/DEZ. Neistota a variabilita silne penetrovaných OZE spôsobili nedostatok flexibility. Preto by kontrola nad výrobou z OZE mohla situáciu zmierniť. Napríklad, keď je vyrobená energia vyššia ako požadovaný systémový dopyt, alebo systém zápasí s preťažením prenosového vedenia, flexibilita môže byť poskytnutá znížením výroby z OZE. Obmedzenie výroby z OZE je poslednou preferovanou voľbou vlastníkov, pretože by stratili časť príjmu a ich náklady by sa zvýšili. Obmedzenie výroby z OZE môže byť buď vykonané zásahom dispečera, alebo automatizovanými postupmi na trhu. Nové vývojové trendy v oblasti OZE sa venujú možnostiam poskytovať rôzne dodatočné služby, ako je napríklad odpoveď na zmeny zotrvačnosti [36, 37].

Nové / ďalšie podporné služby. Regulačné, rotujúce a nerotujúce rezervné podporné služby pokrývajú väčšinu požiadaviek na vyváženú výrobu a dopyt buď v normálnych podmienkach, alebo v prípade krízy. Avšak ak bude rásť penetrácia OZE, tieto služby už nebudú postačovať na dosiahnutie potrebnej flexibility systému. V budúcich energetických systémoch budú hrať významnú rolu najmä (i) sledovanie zaťaženia, (ii) rezerva frekvenčnej odozvy a (iii) zotrvačná odozva.

Systém skladovania energie. Zatiaľ čo výkon OZE je sprevádzaný variabilitou, energetické skladovanie môže pomôcť elektrickému systému absorbovať nadbytočnú výrobu z OZE v prípade nedostatku produkcie. Skladovanie môže byť realizované na troch úrovniach elektrického systému, ako napríklad prečerpávacie skladovanie v primárnom zdroji na výrobu, veľké batériové skladovanie na úrovni prenosu a elektrické vozidlá na distribučnej úrovni. Hoci poskytovanie skladovania pre každú úroveň prináša nové prevádzkové náklady na systém, ich integrácia vysokým prienikom OZE môže odmeniť systém viacnásobnými službami, ktoré zlepšia flexibilitu systému.

Iniciatíva inteligentných sietí. Inteligentné siete sú systémy, v ktorých sú komponenty systému spojené medzi sebou prostredníctvom dvojsmernej komunikačnej štruktúry a považujú sa za najlepšiu infraštruktúru pre integráciu mnohých DEZ v sústave. Koordinácia medzi prevádzkovateľmi prenosovej sústavy a distribučných prevádzkovateľov prostredníctvom inteligentných sietí poskytuje veľký potenciál pre oboje - fyzickú aj štruktúrnú flexibilitu systému. Pokroky v elektromobiloch, malých batériách, inteligentných meračoch, komunikačných linkách medzi distribuovanými zdrojmi energie a distribučnými prevádzkovateľmi, riaditeľných a prerušiteľných zaťažení, riadenie spotreby apod., všetky poskytli nové možnosti flexibility pre systém. Ďalším príkladom iniciatívy inteligentných sietí je úloha distribučných prevádzkovateľov v Európe, ktorí integrujú reguláciu dopytu, skladovanie elektriny a obnoviteľné zdroje energie na úrovni distribúcie a ďalej koordinujú so stranou prenosu a ponúkajú to ako zdroj flexibility.

Sektorová integrácia. Integrácia medzi rôznymi typmi energetických centier, ako sú plyn a elektrina a ich energetickými nosičmi, je ďalším zdrojom flexibility, ktorý zvyšuje bezpečnosť dodávky energie. Táto možnosť umožňuje systému prevádzať rôzne typy energie medzi sebou pomocou skladovania, čo ďalej zvyšuje poskytovanú flexibilitu. Pre sektorovú integráciu je potrebné revidovať rámcové podmienky trhu, aby spotrebiteľ mohol optimalizovať a vybrať si ideálny typ energetického zdroja.

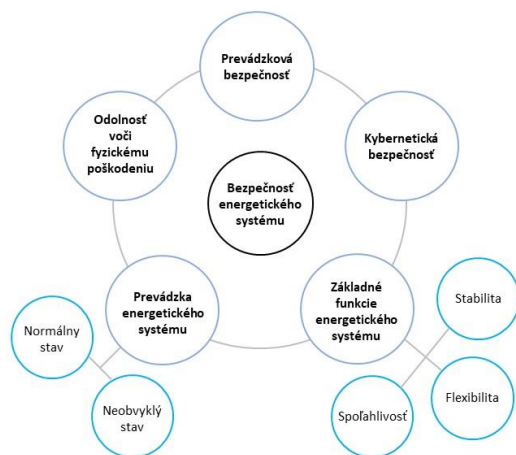
V rámci Slovenska je možné identifikovať niekoľko oblastí, ktoré si budú vyžadovať intenzívne úsilie, aby bolo možné pravidlá flexibility uplatniť. Nevyhnutnou podmienkou je zavedenie role agregátora do legislatívy v celom rozsahu chápania tohto pojmu. Ďalej je to definícia metódy rozúčtovania aktivít agregátora na dotknuté subjekty trhu

s elektrinou, motivácia pre vznik kombinovaných odberných miest s výrobou (nemáme skúsenosti s aplikáciou batérií v domácnostiach) a v neposlednom rade je to aj riadenie na strane odberu. Aktuálne sa v sústave využíva blokovanie spotrebičov pomocou HDO (hromadné diaľkové ovládanie), ktorých podiel však v bilančných skupinách klesá, alebo inštitút IMS (inteligentných meracích systémov). Na druhej strane rastie výstavba s vykurovaním pomocou tepelných čerpadiel, elektrických kotlov alebo priamo podlahovým kúrením. V tejto oblasti bude teda predpokladom uplatnenia flexibility podpora inštalácie spotrebičov s možnosťou akumulácie alebo odloženia spotreby pri výstavbe nových aj rekonštrukcii starších objektov. Zároveň bude potrebné zaviesť novú kategóriu energetickej efektívnosti, ktorá bude odrážať mieru poskytovania spomínanej akumulácie alebo odloženej spotreby a takúto kategorizáciu použiť pri následnom posudzovaní zámerov s podporou alebo zapojením sa do služieb na princípe flexibility [38].

XII. STABILITA A FLEXIBILITA V KONTEXTE BEZPEČNOSTI ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

Z uvedeného je zrejmé, že oba pojmy sú navzájom prepojené, pričom jeden aspekt posilňuje ten druhý. Ako stabilita, tak aj flexibilita popisujú želané aspekty a vlastnosti elektrizačných sústav a oba pojmy sa z veľkej časti prekrývajú v cieľoch a zdrojoch.

Stabilné systémy sú zvyčajne flexibilnejšie. Elektrizačná sústava s dobrou stabilitou je lepšie vybavená na zvládanie fluktuácií vo výrobe a v spotrebe. Stabilita zabezpečuje, že systém sa rýchlo zotaví z rušivých vplyvov, čo ho robí prispôsobivejším zmenám. Na druhej strane flexibilita zvyšuje stabilitu, nakoľko flexibilná elektrizačná sústava sa dokáže hladko prispôbiť vo výrobe a spotrebe, čím sa znižuje pravdepodobnosť vzniku veľkých rušivých vplyvov, ktoré by mohli viesť k nestabilitám. Zachovanie rovnováhy medzi týmito dvoma aspektami je nevyhnutné pre udržanie bezpečnej, spoľahlivej a odolnej elektrizačnej sústavy.



Obr. 6. Rámec bezpečnosti moderného energetického systému

Na základe týchto skutočností je možné stabilitu a flexibilitu považovať za rovnocenné pojmy a zaradiť ich ku základným funkciám energetického systému, spolu so spoľahlivosťou. Všetky tri základné funkcie majú svoje definície, zdroje a metriky a preto patria plnohodnotne do rámca bezpečnosti moderného energetického systému (obr.6.). Pre komplexný pohľad na celú problematiku je nevyhnutné skúmať vzťahy medzi jednotlivými funkciami a aspektami bezpečnosti,

ako najvyššieho cieľa prevádzkovania energetického systému. Pre ďalší výskum v tejto oblasti bude potrebné zohľadniť aj pojmy ako sú odolnosť sústavy (najmä skratová), nedostatok (rotačného) momentu zotrvačnosti a syntetická zotrvačnosť.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla s podporou Agentúry na podporu výskumu a vývoja SR na základe zmlúv APVV-19-0576 a APVV-21-0312 a Slovenskej akadémie vied na základe zmluvy VEGA 1/0757/21.

LITERATÚRA

- [1] E. Kaushik, V. Prakash, O.P. Mahela, B. Khan, A. El-Shahat Abdelaziz, "Comprehensive overview of power system flexibility during the scenario of high penetration of renewable energy in utility grid", MDPI Energies, Vol 15, Issue 2, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15020516>
- [2] B.-M. S. Hodge, H. Jain, C. Brancucci, G.-S. Seo, M. Korpás, J. Kiviluoma, H. Holttinen, J.C. Smith, A. Orths, A. Estanqueiro, L. Söder, D. Flynn, T.K. Vrana, R. W. Kenyon, B. Kroposki, "Addressing technical challenges in 100% variable inverter-based renewable energy power systems." WIREs Energy and Environment, 2020. <https://doi.org/10.1002/wene.376>.
- [3] P. Kundur et al., "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions", in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [4] N. Hatziaargyriou et al., "Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies", in IEEE Power and Energy Society, technical report PES-TR77, May 2020, https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PES_TP_TR77_PSDP_STABILITY_051320.html
- [5] P. Mattavelli, A.M. Stankovic, and G.C. Verghese, "SSR analysis with dynamic phasor model of thyristor-controlled series capacitor," IEEE Trans. Power Syst., vol. 14, no. 1, pp. 200-208, Feb. 1999.
- [6] "Contribution to Bulk System Control and Stability by Distributed Energy Resources Connected at Distribution Network", IEEE Power and Energy Society, Tech. Rep. PES-TR22, Jan. 2017. available on-line: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/technical-publications/technical-reports/PESTRPDEFMRH0022.html>
- [7] "Microgrid Stability, Definitions, Analysis, and Modeling, IEEE Power and Energy Society", Tech. Rep. PES-TR66, Jun. 2018. (available on-line: https://resourcecenter.ieee-pes.org/technical-publications/technicalreports/PES_TR0066_062018.html)
- [8] A. Semlyen, "Analysis of disturbance propagation in power systems based on a homogenous dynamic model", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, no. 2, pp. 676-684, Mar. 1974.
- [9] R. L. Cresap and J. F. Hauer, "Emergence of a new swing mode in the western power system", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 100, no. 4, pp. 2037-2045, Apr. 1981
- [10] J. Machowski, J.W. Bialek and J. R. Bumby, "Power System Dynamics: Stability and Control", John Wiley & Sons Ltd, 2008
- [11] M. J. Gibbard, P. Pourbeik, and D. J. Vowles, "Small-signal stability, control and dynamic performance of power systems". The University of Adelaide Press, 2015. <https://www.adelaide.edu.au/press/titles/small-signal>
- [12] Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies, IEEE Power and Energy Society, Tech. Rep. PES -TR1, Jan. 2013. <https://resourcecenter.ieee-pes.org/technical-publications/technicalreports/PESTR1.html>
- [13] N. Miller, D. Lew, and R. Piwko, "Technology capabilities for fast frequency response", GE International Inc. Rep., Mar. 2017. https://www.aemo.com.au/-/media/Files/Electricity/NEM/Security_and_Reliability/Reports/2017/2017-03-10-GE-FFR-Advisory-Report-Final--2017-3-9.pdf.
- [14] P. Pourbeik, S. Soni, A. Gaikwad, and V. Chadliev, "Providing primary frequency response from photovoltaic power plants", in CIGRE Symposium 2017, Dublin, Ireland, 2017.
- [15] IEEE subsynchronous resonance working group of the system dynamic performance subcommittee power system engineering committee, "Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations", IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-104, no. 6, pp. 1326-1334, Jun. 1985.
- [16] P. M. Anderson and R. G. Farmer, "Series compensation of power systems", Encinitas, CA, USA: PBLSH, 1996.

- [17] P. M. Anderson, B. L. Agrawal, and J. E. Van Ness, "Subsynchronous resonance in power systems", New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1990.
- [18] P. Pourbeik, A. Boström, and B. Ray, "Modeling and application studies for a modern static VAR system installation", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 21, no. 1, pp. 368–377, Jan. 2006.
- [19] P. Pourbeik, R. J. Koessler, D. L. Dickmader, and W. Wong, "Integration of large wind farms into utility grids (part 2 - performance issues)", in IEEE Power Engineering Society General Meeting, Toronto, Ont., Canada, 2003.
- [20] X. Wang and F. Blaabjerg, "Harmonic stability in power electronic based power systems: concept, modeling, and analysis", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 2858–2870, May. 2019.
- [21] X. Wang, F. Blaabjerg, and W. Wu, "Modeling and analysis of harmonic stability in an ac power-electronic-based power system", IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 12, pp. 6421–6432, Dec. 2014.
- [22] E. Ebrahimzadeh, F. Blaabjerg, X. Wang, and C. L. Bak, "Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants", IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 9, no. 1, pp. 12–23, Jan. 2018.
- [23] L 333/164. Smernica Európskeho parlamentu a Rady z júna 2019 "o spoločných pravidlách pre vnútorný trh s elektrinou a o zmene smernice odolnosti kritických subjektov". 2019.
- [24] A. Akrami, M. Doostizadeh, F. Aminifar, "Power system flexibility: an overview of emergence to evolution", J. Mod. Power Syst. Clean Energy 7, 987–1007 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40565-019-0527-4>
- [25] Lannoye E.; Flynn D.; O'Malley M. "Evaluation of Power System Flexibility", volume 27, pages 922–931. Evaluation of Power System Flexibility, 2012
- [26] Ch. H. Harnessing, "Variable Renewables: A Guide to the Balancing Challenge". International Energy Agency, 2011
- [27] F. Bouffard, M. Ortega-Vazquez, "The value of operational flexibility in power systems with significant wind power generation", pages 1–5. In Proceedings of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011
- [28] V. Silva, R. Belhomme D.S. Kirschen, L.F. Ochoa, "Evaluating and Planning Flexibility in Sustainable Power Systems", volume 4, pages 200–209. IEEE Trans. Sustain. Energy, 2013
- [29] T. Zheng, J. Zhao, F. Zhao, E. Litvinov, "Operational flexibility and system dispatch", pages 1–3. In Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012
- [30] Y.V. Makarov, C. Loutan, J. Ma, P. de Mello, "Operational Impacts of Wind Generation on California Power Systems", volume 24, pages 1039–1050. IEEE Trans. Power Syst, 2009
- [31] P. Denholm, M. Hand, "Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity", volume 39, pages 1817–1830. Energy Policy 2011, 2011.
- [32] EA. "Status of Power System Transformation: Advanced Power Plant Flexibility". IEA, 2019.
- [33] A. Akrami, M. Doostizadeh, F. Aminifar, "Power system flexibility: An overview of emergence to evolution", volume 7, pages 987–1007. J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 2019.
- [34] J. Li, F. Liu, Z. Li, "Grid-side flexibility of power systems in integrating large-scale renewable generations: a critical review on concepts, formulations and solution approaches". Renew Sustain Energy Rev 93:272–284
- [35] E. Ela, M. Milligan, A. Bloom, et al, "Wholesale electricity market design with increasing levels of renewable generation: Incentivizing flexibility in system operations". Electr J 29(4):51–60
- [36] AS Ahmadyar, S. Riaz, G. Verbic, et al, "A framework for assessing renewable integration limits with respect to frequency performance", IEEE Trans Power Syst 33(4):4444–4453
- [37] E Muljadi, V. Gevorgian, A. Hoke, "Short-term forecasting of inertial response from a wind power plant". In: Proceedings of IEEE energy conversion congress and exposition, Milwaukee, USA, 18–22 September 2016, p 5
- [38] A. Gérer, "Agregovaná flexibilita – kde sme a kam kráčame", ATP Journal, Vol.6 , XXVIII, ISSN 1335-2237

ADRESY AUTOROV

Ing. Marián Mešter, PhD. Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, marian.mester@tuke.sk, Východoslovenská distribučná, a.s. Mlynská 31, Košice SK 042091, Slovenská Republika, mester_marian@vsdas.sk