SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

Matúš Kováč

Autoreferát dizertačnej práce

METÓDY A POSTUPY PRE HODNOTENIE NAPÄŤOVEJ STABILITY ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**
v študijnom odbore 5.2.30 elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 27.10.2015

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Matúš Kováč

Autoreferát dizertačnej práce

METÓDY A POSTUPY PRE HODNOTENIE NAPÄŤOVEJ STABILITY ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:
Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 27.10.2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Matúš Kováč
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Žaneta Eleschová, PhD.
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: doc. Ing. Peter Braciník, PhD.
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Katedra výkonových elektronických systémov
010 26 Žilina, Univerzitná 1

Ing. Rastislav Šmidovič, PhD.
Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a.s.
SED Žilina
010 08 Žilina, Obchodná 2

Autoreferát bol rozoslaný: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: .....

Na Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, miestnosť .....

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan FEI STU

Obsah

Ciele dizertačnej práce 4
Úvod 5
1 Súčasný stav riešenej problematiky 6
1.1 PU krivky 6
1.2 Modálna analýza 7
2 Aplikácia modálnej analýzy a PU kriviek na hodnotenie napäťovej stability 8
2.1 Návrh metodiky hodnotenia napäťovej stability 10
2.2 Variant 1 – zvyšovanie zaťaženia 12
2.3 Variant 2 – zvýšený tranzit 12
2.4 Variant 3 – rekonfigurácie 13
2.5 Variant 4 – plánované vypnutia 14
2.6 Metodika založená na prúdovom kritériu 16
3 Definovanie rizikových faktorov a návrh opatrení 16
4 Prínosy práce pre prax 17
4.1 Návrh implementácie vybraných metód pre posúdenie napäťovej stability ES prípravy v rámci procesu prevádzky ako aj v reálnej prevádzke ES 18
5 Záver 19
Použitá literatúra 21
Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce 22
Zoznam ostatných vybraných publikácií autora 22

Ciele dizertačnej práce

Tézy dizertačnej práce sú obsahovo zamerané na spracovanie problematiky napäťovej stability. Cieľom bolo analyzovať dostupné metódy a ich možnosť využitia pri posudzovaní napäťovej stability elektrizačnej sústavy v online a offline prevádzke. Predmetom skúmania bolo taktiež zistiť, aká je previazanosť modálnej analýzy s metódou PU kriviek a získané výsledky porovnať s metódou založenou na N-1 kritériu. Týmto spôsobom sme chceli získať pohľad na bezpečnosť sústavy z viacerých hľadísk. Pre dosiahnutie daných cieľov boli stanovené nasledovné tézy dizertačnej práce:

- Analýza možností použitia vybraných metód v rámci online a offline hodnotenia napäťovej stability elektrizačnej sústavy.
- Návrh implementácie vybraných metód pre posúdenie napäťovej stability ES v rámci procesu prípravy prevádzky, ako aj v reálnej prevádzke ES.
- Definovanie rizikových faktorov z hľadiska vzniku napäťovej nestability a návrh opatrení pre zabezpečenie napäťovej stability ES.

Úvod

Zvýšený prenos elektrickej energie a zároveň aj rastúca produkcia z obnoviteľných zdrojov energie má čoraz väčší vplyv na stabilitu elektrizačnej sústavy. Výstavba nových vedení a elektrární na podporu a posilnenie elektrizačnej sústavy sa stáva čoraz väčším problémom či už z hľadiska ekonomického, politického alebo dopadu na životné prostredie. Operátori sú nútení prevádzkovať elektrizačnú sústavu bližšie k jej limitom, pričom je samozrejme kladený dôraz na jej bezpečný chod. V minulosti slúžili medzištátne vedenia ako vzájomná podpora v prípade núdze, avšak v súčasnej dobe sú tieto vedenia využívané na „kúpu a predaj“ elektrickej energie. Aby bola zabezpečená bezpečná prevádzka sústavy, je dôležité poznať jej prevádzkové limity resp. „ako ďaleko“ sa nachádza od stavu, ktorý spôsobí jej nestabilitu.

Problematika napäťovej stability si dokázala za posledné tri desaťročia pritiahnuť zvýšenú pozornosť. Napäťové kolapsy, ktoré sa vyskytli v dôsledku napäťovej nestability zanechali tisíce ľudí bez elektrickej energie aj niekoľko hodín a spôsobili obrovské finančné škody. Keďže elektrizačné sústavy sú čoraz viac prevádzkované bližšie k svojím hraničným limitom, správne opatrenia na udržanie stabilných napätí v uzloch elektrizačnej sústavy zohrávajú dôležitú úlohu. Hoci sa napäťová nestabilita spočiatku posudzovala kvôli jej povahe (pomalšiemu vývoju vo väčšine prípadov) za statický jav, dnes je táto myšlienka už dávno prekonaná a problematika napäťovej nestability je považovaná za dynamický proces. V minulosti sa na analýzu napäťovej stability využívali najmä statické metódy avšak s rastúcim vývojom výpočtovej techniky sa do popredia dostávajú aj dynamické simulácie. Je preto snaha hľadať efektívne a nové algoritmy, ktoré by umožnili používať tieto simulácie v reálnom čase avšak statické simulácie sú z praktického pohľadu stále atraktívne.

Prvé otázky, ktoré sa inžinieri snažili vyriešiť, bola podstata napäťovej stability, ktorú skúmali na jednoduchých príkladoch. Snahou bolo tieto poznatky potom aplikovať na väčšie celky prostredníctvom počítačov, keďže použitie analytických metód vzhľadom na nelineárnu povahu a veľkosť sústavy nebolo a nie je možné. Búrlivejší vývoj začal od začiatku osemdesiatych rokov, kedy sa začali hľadať prostriedky, ako by bolo možné napäťovú nestabilitu predpovedať a zabrániť jej vzniku v elektrizačnej sústave. Do popredia sa dostávali najmä určité indexy, ktoré by kvantifikovali hranicu do bodu nestability. Ak by nastalo prekročenie hranice stanovenej daným indexom, sústava by sa stala napäťovo nestabilná. Aplikovali sa rôzne matematické metódy ako napr. singulárny rozklad matice alebo rozklad matice na vlastné čísla, ktoré naznačovali sľubnú cestu na posúdenie napäťovej stability. Atraktívnou stránkou týchto metód boli v tej dobe hlavne menšie nároky na výpočtovú techniku a prípadná možnosť ich aplikácie v online režime. Ďalšie metódy, ktoré našli uplatnenie v riešení napäťovej stability boli napr. aj metóda Ljapunových funkcií a bifurkačná teória, ktorá napomohla vysvetliť podstatu napäťovej nestability. Napäťová stabilita je veľmi rozsiahla téma a stále predstavuje otvorený problém. Zatiaľ sa nepodarilo nájsť nejakú všeobecnú teóriu pre túto oblasť, keďže elektrizačná sústava predstavuje komplexný nelineárny systém. Novú nádej možno prinesú aj synchrofázorové merania, ktoré sa vyznačujú svojou rýchlosťou a presnosťou a ukazujú veľmi dobré uplatnenie z hľadiska použitia v reálnom čase.

Hoci elektrizačná sústava Slovenskej republiky momentálne nemá problémy s napäťovou stabilitou, v štátoch ako napr. Nemecko je to momentálne veľmi aktuálny problém. Politika Európskej únie tlačí jednotlivé štáty zvyšovať výrobu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Klasické konvenčné elektrárne, ako sú jadrové alebo tepelné, budú postupne odstavované, čo spôsobí veľkú zmenu v správaní elektrizačnej sústavy. To bude mať určite aj dopad na napäťovú stabilitu a preto sa táto téma stala aj predmetom tejto práce.

Dizertačná práca sa zaoberá aplikáciou statických metód (modálnej analýzy a PU kriviek) na hodnotenie napäťovej stability elektrizačnej sústavy. Teoretická časť je zameraná na vysvetlenie mechanizmu napäťovej nestability, analýze vybraných metód a súhrnu významných napäťových kolapsov. Praktická časť sa venuje vytvoreniu metodiky, ktorá vznikla kombináciou modálnej analýzy a PU kriviek. Tieto hodnotenia sú ďalej doplnené metodikou, ktorá hodnotí stav sústavy na základe prúdového kritéria.

1 Súčasný stav riešenej problematiky

Mnohé z prvkov tvoriacich elektrizačnú sústavu vykazujú nelineárne správanie a táto komplexnosť spôsobuje ťažkosti pri vyhodnocovaní napäťovej stability. Kvôli danej zložitosti sa preto často pristupuje k rôznym zjednodušeniam a predpokladom pri vytváraní hodnotiacich metód. Tieto metódy majú svoje silné aj slabé stránky, ktoré je dôležité poznať ak chceme vyhodnotiť správne určitú situáciu a dostať relevantné výsledky.

Na riešenie napäťovej stability možno využiť statické metódy alebo dynamické simulácie. Riešenie napäťovej stability pomocou statickej analýzy slúži na posúdenie stability pracovného bodu (ekvilibria) vyšetrovaného systému, pričom sa vychádza z rovníc pre výpočet ustáleného stavu. Statická analýza umožňuje vyšetrovať široký rozsah systémových podmienok a môže poskytnúť vysvetlenie príčiny vzniku nestability a identifikovať kľúčové faktory spôsobujúce napäťovú nestabilitu. Taktiež sa dá použiť aj na vyhodnocovanie dlhodobej napäťovej nestability, keď sa v jednotlivých časových okamihoch ako sa systém vyvíja, analyzuje stav sústavy pre vybraný okamih práve pomocou statickej metódy. Základný výpočtový prostriedok pre hodnotenie statickej napäťovej stability je použitie algebraických rovníc na výpočet ustáleného stavu sústavy (angl. „power flow equations“). Ak numerická metóda použitá na výpočet diverguje, tak je možné použiť tento predpoklad pre identifikáciu straty stability sústavy. Problém však zostáva, že divergencia môže byť otázkou len numerickej metódy a nesúvisí s fyzikálnou podstatou nestability [1], [2]. Využitie statickej analýzy je atraktívne z hľadiska menších výpočtových a časových nárokov, poskytnutia užitočných informácií týkajúcich sa identifikácie kritických oblastí, prípadne mechanizmu spôsobujúceho nestabilitu a možnosti použitia v online prevádzke. Nevýhodou tohto prístupu je to, že sa zanedbáva dynamický vývoj sústavy a efekt kontrolných a ochranných zariadení. Medzi statické metódy patria napr. modálna analýza Jacobiho matice alebo PU a QU krivky, na základe ktorých sa dá vypočítať vzdialenosť stavu sústavy od bodu nestability.

Dynamická analýza poskytuje chronologický sled udalostí (napr. dosiahnutie hranice budenia, reakciu ochrán, pripojenie kompenzačných zariadení, reakcia regulátorov a kontrolných zariadení, atď.) vedúcich k určitému stavu v sústave. Na rozdiel napr. od pracovných bodov na PU krivke, ktoré nie sú časovo závislé, dynamická analýza odhalí celý priebeh zmeny napätia aj spolu s prechodným dejom a poskytne tak informáciu o tom kedy a či vôbec bude dosiahnutý nový ustálený stav. Dynamické analýzy sú vhodné pre detailné štúdie napäťových kolapsov, koordináciu ochranných a riadiacich prvkov a testovanie nápravných opatrení. Takýto matematický model je popísaný systémom diferenciálno – algebraických rovníc (DAE) [3]. Problémom dynamických metód ale ostáva náročnosť na výpočet a fakt, že neposkytujú mieru stupňa stability sústavy. Ako možná alternatíva na urýchlenie výpočtu sa ukázala metóda, ktorá je založená na časovej dekompozícii tzv. QSS metóda („Quasi Steady – State“) ktorá využíva možnosť zväčšenia veľkosti výpočtového kroku. Pri tejto metóde sa predpokladá, že krátkodobá dynamika je nekonečne rýchla, čo má za následok prechod diferenciálnych rovníc súvisiacich s krátkodobou dynamikou na alegebraické, pričom dlhodobá dynamika je stále modelovaná pomocou diferenciálnych rovníc [1], [3], [4], [5], [6], [8]. Ďalším prístupom je použitie kombinácie dvoch metód. Okamžite po odznení poruchy je systém opísaný kompletným modelom DAE rovníc pre riešenie krátkodobej dynamiky a vyšetrovanie dlhodobej nestability sa potom vykonáva pomocou QSS. „Prepnutie“ medzi jednotlivými metódami nastáva vtedy, ak sa dosiahne dostatočné utlmenie krátkodobej dynamiky [5], [9]. Ako ďalšia možnosť zrýchlenia výpočtu, ktorá by umožnila využitie dynamických simulácií v reálnom čase sa dá dosiahnuť pomocou paralelných výpočtov. Viac informácií o matematických metódach aplikovaných na napäťovú stabilitu možno nájsť napr. [1], [3], [7], [10], [11].

1.1 PU krivky

PU (alebo v angl. literatúre označované ako PV) krivky sú jedným zo základných nástrojov na posúdenie napäťovej stability elektrizačnej sústavy, pričom hrajú dôležitú úlohu na pochopenie

a fyzikálne vysvetlenie daného javu. Pre jednoduchý obvod pozostávajúci z ideálneho zdroja napätia, vedenia a záťaže je možné nájsť analytické riešenie pre PU krivky [3], [6], [12]. Pre väčšie sústavy je však nevyhnutné použiť počítače. PU krivky sa v tomto prípade počítajú tak, že sa zvyšuje zaťaženie vo vybraných uzloch elektrizačnej sústavy a zaznamenávajú sa hodnoty napätia a činného výkonu v daných uzloch. Tento proces pokračuje až do stavu, kedy numerická metóda použitá na výpočet ustáleného stavu diverguje, čo je považované za stav, kedy sústava stratí stabilitu (dosiahnutie bodu nestability resp. bodu kolapsu). Pre uzol, v ktorom sa zostrojuje PU krivka, sa týmto spôsobom získa informácia o citlivosti napätia na zmenu zaťaženia (ΔU/ΔP).

Základné použitie PU kriviek spočíva v nájdený vzdialenosti k bodu nestability. Takto je možné skúmať vplyv zmien konfigurácie sústavy, zmeny v rozložení zaťaženia, výroby na vzdialenosť k bodu nestability. Okrem toho na základe strmosti ΔU/ΔP je možné identifikovať uzly resp. oblasti, ktoré sú napäťovo „mäkké“.

1.2 Modálna analýza

Modálna analýza je metóda založená na dekompozícii štvorcových matíc na vlastné čísla, ktorá našla uplatnenie pre hodnotenie napäťovej stability [13]. Predpokladajme, že matica $\boldsymbol{A}$ je matica s rozmerom [n_xn]. Potom jej rozklad pomocou vlastných čísel a vektorov možno zapísať [14]

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{Y} \tag{1.1}$$

kde $\boldsymbol{X}$ je matica pravých vektorov, $\boldsymbol{Y}$ matica ľavých vektorov a $\boldsymbol{\Lambda}$ je diagonálna matica obsahujúca vlastné čísla λ. Na výpočet ustáleného stavu v sústave sa využíva známy linearizovaný systém rovníc

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial U} & \dfrac{\partial P}{\partial \theta} \\ \dfrac{\partial Q}{\partial U} & \dfrac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{J}_1 & \boldsymbol{J}_2 \\ \boldsymbol{J}_3 & \boldsymbol{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \boldsymbol{J} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \tag{1.2}$$

kde Jacobián $\boldsymbol{J}$ obsahuje prvé derivácie činných a jalových výkonov podľa amplitúdy napätia resp. fázy a $\boldsymbol{J_1}$ až $\boldsymbol{J_4}$ sú submatice $\boldsymbol{J}$. Pri tejto metóde sa udržuje v uzloch konštantný činný výkon ($\Delta P = 0$ MW) a sleduje sa vplyv zmeny jalového výkonu na hodnotu napätia, čo je vlastne analógia ku QU krivkám. Efekt zmien činného výkonu možno zahrnúť tak, že sa modálna analýza vykoná pri rôznych prevádzkových stavoch alebo inak povedané pri rôznych hodnotách zaťaženia činným výkonom. Na základe vyššie uvedenej myšlienky je možné z rovnice (1.2) odvodiť pre zmenu jalového výkonu vzťah

$$\Delta Q = (\boldsymbol{J}_4 - \boldsymbol{J}_3 \boldsymbol{J}_1^{-1} \boldsymbol{J}_2)\Delta U = \boldsymbol{J}_{QV}\Delta U \tag{1.3}$$

Maticu $\boldsymbol{J}_{QV}$ nazývame redukovaná Jacobiho matica. Vlastné čísla inverznej redukovanej Jacobiho matice spolu s prislúchajúcimi vlastnými vektormi matice identifikujú tzv. módy, cez ktoré sa môže systém dostať do napäťovej nestability. Hodnota vlastného čísla predstavuje relatívnu vzdialenosť k nestabilite a vlastné vektory poskytujú informáciu o mechanizme strate stability [13], [15], [18]. Aplikáciou modálnej analýzy na $\boldsymbol{J}_{QV}$ a jej inverziou možno získať vzťah

$$\Delta U = \boldsymbol{X}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{Y}\Delta Q = \sum_i \frac{x_i y_i}{\lambda_i}\Delta Q \tag{1.4}$$

kde x_i je i-ty pravý vlastný vektor a y_i je i-ty ľavý vlastný vektor, ktoré korešpondujú vlastnej hodnote λ_i. Vďaka vzťahu $\boldsymbol{X} = \boldsymbol{Y}^{-1}$ môžeme odvodiť nasledovné rovnice

$$\boldsymbol{Y}\Delta U = \boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{Y}\Delta Q \tag{1.5}$$

$$\boldsymbol{V}_m = \boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{Q}_m \tag{1.6}$$

kde $\boldsymbol{V_m}$ je vektor variácií modálnych napätí a $\boldsymbol{Q_m}$ vektor variácií jalového výkonu. Výhodou tohto zápisu je to, že vzťah medzi $\boldsymbol{V_m}$ a $\boldsymbol{Q_m}$ udáva diagonálna matica na rozdiel od rovnice(1.3), kde $\boldsymbol{J}_{QV}$ nie je diagonálna matica.. Keď $\lambda_i > 0$ pre ľubovoľné i, potom variácia $\boldsymbol{V_m}$ a $\boldsymbol{Q_m}$ sú v rovnakom smere a to znamená, že systém je napäťovo stabilný (s nárastom dodávky jalového výkonu rastie aj napätie, čo sa

považuje za stabilný stav) a naopak, ak pre vlastné číslo platí $\lambda_i < 0$, potom je systém napäťovo nestabilný. Vlastné číslo λ_i určuje „mieru“ stability i-teho módu. Čím je jeho hodnota menšia, tým bližšie je daný mód k napäťovej nestabilite. Ak platí $\lambda_i = 0$, tak Jacobián sa stáva singulárny a nastáva strata napäťovej stability (napäťový kolaps) [15]. Na základe daných výsledkov môžeme teda zhrnúť, že napäťový kolaps je vlastne kolaps modálneho napätia resp. módu [16]. Neexistuje nejaká všeobecná prahová hodnota najmenšieho vlastného čísla, ktorá by sa dala považovať za varovný signál, kedy je systém blízko bodu nestability. Vlastná hodnota hovorí o relatívnej vzdialenosti k bodu nestability a nie o absolútnej. Je to podmienené nelineárnym správaním a zároveň aj množstvom stavov a topológií, ktoré elektrizačná sústava môže nadobudnúť. Vzdialenosť k bodu nestability môžeme získať napr. pomocou PU kriviek.

Pomocou vypočítaných vlastných hodnôt je možné potom určiť problematické módy. Je však dôležité nájsť miesta v systéme (uzly), ktoré sa najviac podieľajú na stave jednotlivých módov. To umožňuje participačný faktor uzlov (PFU), ktorý je k-tom uzle pre i-ty mód pomocou vzťahu

$$P_{ki} = x_{ki} y_{ik} \tag{1.7}$$

Veľkosť participačného faktora hovorí zároveň o efektívnosti nápravných opatrení aplikovaných vo vybranom uzle na stabilizáciu módu. Podľa hodnoty participačného faktora možno rozdeliť módy na lokalizované alebo nelokalizované. Lokalizovaný mód obsahuje len zopár uzlov s vyššou hodnotou participačného faktora (majú dominantné postavenie) a s veľkým množstvom uzlov, ktorých participačný faktor je blízky 0. Pre nelokalizovaný mód je typické to, že v sústave sa nachádza veľa uzlov s malou ale podobnou hodnotu participačného faktora (participačný faktor sa rozloží medzi veľký počet uzlov) a zvyšná časť uzlov má hodnotu blízku k 0. Nestabilita takéhoto nelokalizovaného módu zahŕňa väčšiu časť systému [13]. Okrem participačného faktora pre uzly je možné zaviesť aj participačný faktor pre vedenia (PFV). Predpokladajme, že vektor $\boldsymbol{Q_m}$ má všetky elementy rovné nula okrem i-teho elementu, ktorý je rovný 1. Tak potom pomocou rovníc (1.5), (1.6) je možné písať

$$\Delta Q^{(i)} = x_i \tag{1.8}$$

$$\Delta U^{(i)} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q^{(i)} \tag{1.9}$$

$$\Delta \theta^{(i)} = -\boldsymbol{J}_1^{-1} \boldsymbol{J}_2 \Delta U \tag{1.10}$$

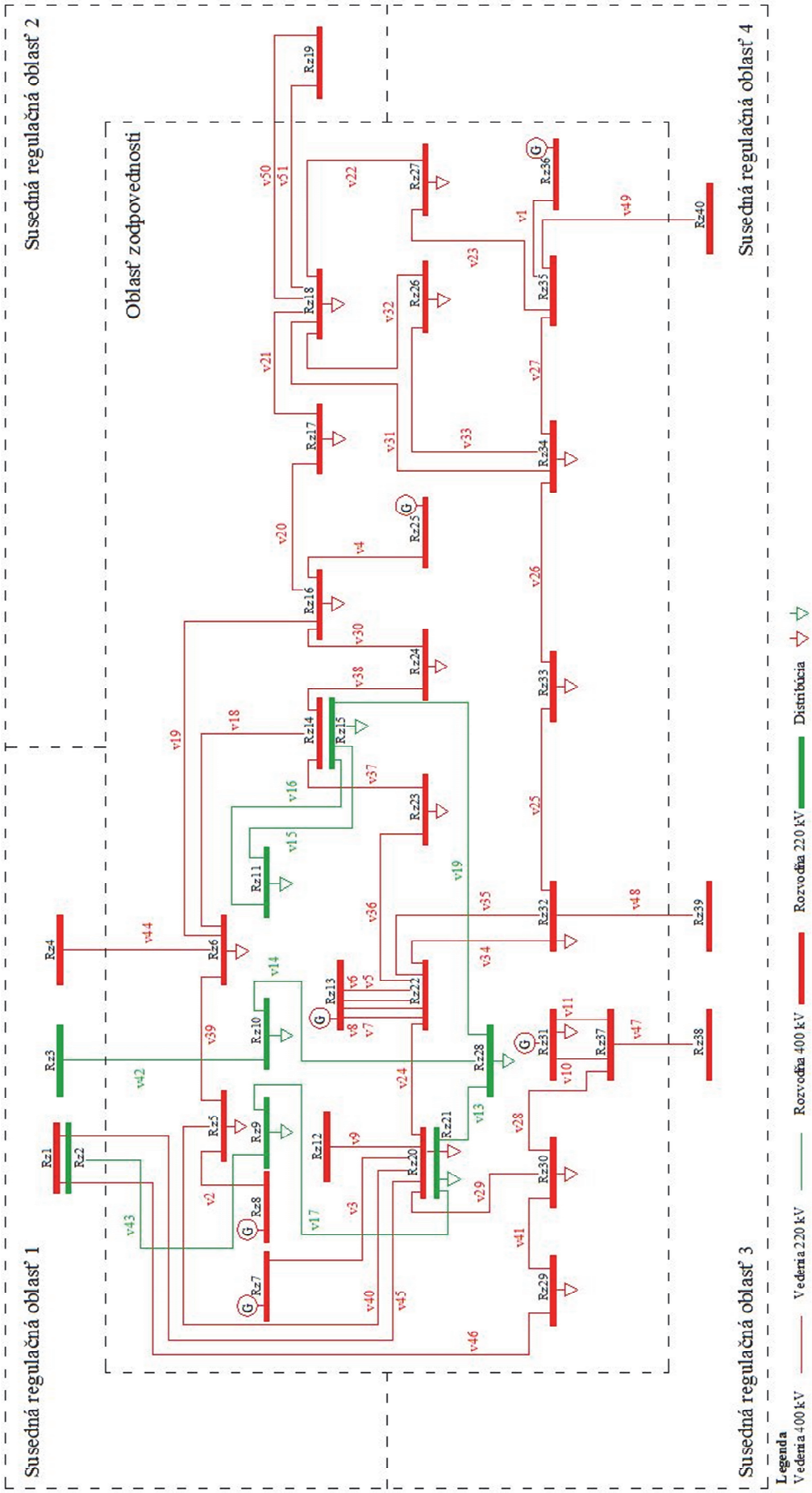
Na základe znalosti variácií napätí a uhlov pre oba konce vedenia môžeme vypočítať linearizovanú hodnotu strát jalového výkonu na vedení. Relatívny participačný faktor j-teho vedenia v i-tom móde je potom daný vzťahom

$$P_{ji} = \frac{\Delta Q_{loss(j)}}{max\, \Delta Q} \tag{1.11}$$

kde $\Delta Q_{loss(j)}$ sú straty jalového výkonu na j-tom vedení a $max\Delta Q$ je maximálna hodnota strát jalového výkonu na vedení vo vybranom móde. Pre každý mód dáva tento faktor informáciu, ktoré vedenia spotrebúvajú najviac jalového výkonu ako rekcia na zmenu v zaťažení jalového výkonu. Vedenia s vysokou hodnotou participačného faktora vedení sú silne zaťažené vedenia, ktoré sa najviac podieľajú na stave módu [6], [17]. Hodnota participačného faktora poskytuje zároveň užitočné informácie týkajúce sa nápravných opatrení ako je redistribúcia výkonových tokov, ktorá môže znížiť zaťaženie problémových vedení.

2 Aplikácia modálnej analýzy a PU kriviek na hodnotenie napäťovej stability

Hlavným cieľom práce bolo vytvorenie metodiky na hodnotenie napäťovej stability pomocou PU kriviek a modálnej analýzy. Získané výsledky boli porovnané s metodikou založenou na prúdovom kritériu, čo prináša iný pohľad na posúdenie stavu sústavy [19]. Model elektrizačnej sústavy, ktorý bol použitý na vyhodnocovanie napäťovej stability, bol prevzatý z [19]. Tento model pozostáva z prenosovej, distribučnej sústavy a susedných zahraničných prenosových sústav.



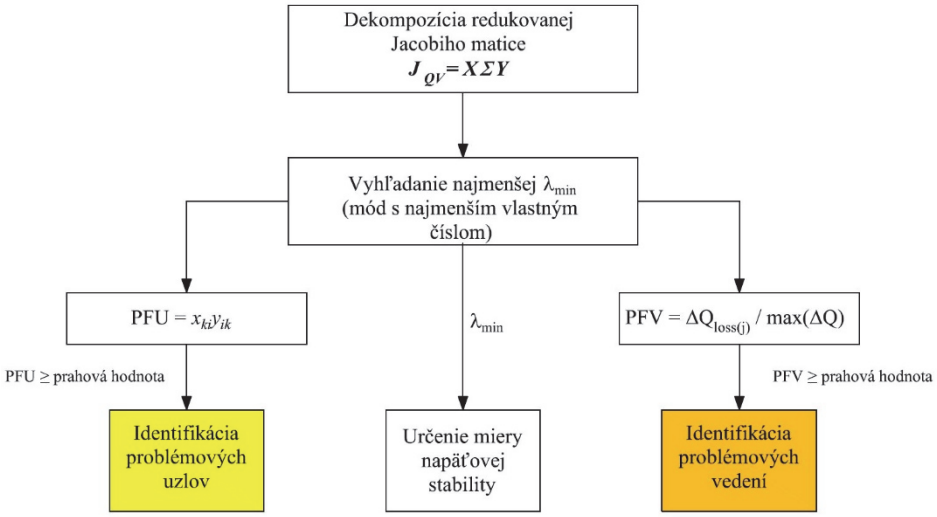
obr. 2.1 Schéma topológie východiskového modelu sústavy [19]

Schéma modelu prenosovej sústavy, ktorá je tvorená hladinami 400 kV a 220 kV je zobrazená na obr. 2.1. Model sledovanej oblasti (oblasti zodpovednosti), ktorá bola predmetom skúmania, je súčasťou väčšieho modelu sústavy vytvoreného vo vybranom simulačnom programe. Pri vyhodnocovaní výsledkov boli vzaté do úvahy len uzly na napäťovej hladine 400 kV patriace do oblasti zodpovednosti. Vychádzalo sa z predpokladu, že napätie v distribučných sústavách je ovplyvnené práve napätím v uzloch prenosovej sústavy a z toho dôvodu sa pracovalo s týmito uzlami.

Na hodnotenie napäťovej stability bola vytvorená aplikácia v programovacom jazyku JAVA spolu s grafickým užívateľským rozhraním [20]. Programy ako GLF a PSLF je možné použiť na výpočet ustáleného stavu sústavy a získané výstupné dáta sú potom uložené do .xls/.xlsx súboru alebo textového súboru. Tieto súbory sa dajú načítať prostredníctvom grafického užívateľského rozhrania a načítané dáta ďalej spracovať pomocou modálnej analýzy. Medzi základné funkcionality programu patrí načítanie dát, vykonávanie výpočtov v pomerných aj skutočných hodnotách, výpočet admitančnej matice a Jacobiho matice, výpočet vlastných čísel, participačného faktoru uzlov a vedení, vlastných vektorov, zobrazenie vypočítaných výsledkov priamo v tabuľkách a export údajov. V prípade, že sa v sústave nachádzali paralelné vedenia alebo uzly spojené prvkom s malou impedanciou (priečny spínač prípojníc), program vytvoril ekvivalentné náhradné vedenie resp. uzol, ktorý bol vyhodnocovaný v rámci modálnej analýzy. Na základe vyššie uvedeného teda platí, že ak sa v sústave nachádzalo paralelné vedenie, tak pri aplikácii modálnej analýzy sa vyhodnocoval participačný faktor vypočítaného ekvivalentného vedenia.

2.1 Návrh metodiky hodnotenia napäťovej stability

V tejto podkapitole je opísaný spôsob hodnotenia napäťovej stability pre vybrané prevádzkové stavy, ktoré sú analyzované v ďalšej časti práce. Vyhodnocovanie prebiehalo tak, že sa najprv odsimuloval ustálený stav. Zo získaných výsledkov bolo potrebné vyfiltrovať len tie uzly, ktoré patrili do oblasti zodpovednosti a boli na hladine 400 kV. K tomu bol použitý programovací jazyk Python a Excel. Takto upravené dáta sa stali vstupom pre vytvorenú softvérovú aplikáciu, pomocou ktorej bola použitá metóda modálnej analýzy. Výsledkom tejto metódy boli vypočítané vlastné čísla, participačné faktory uzlov (PFU) a participačné faktory vedení (PFV), ktoré zodpovedali módu s najmenším vlastným číslom. Postupový diagram pre aplikáciu modálnej analýzy je na obr. 2.2.



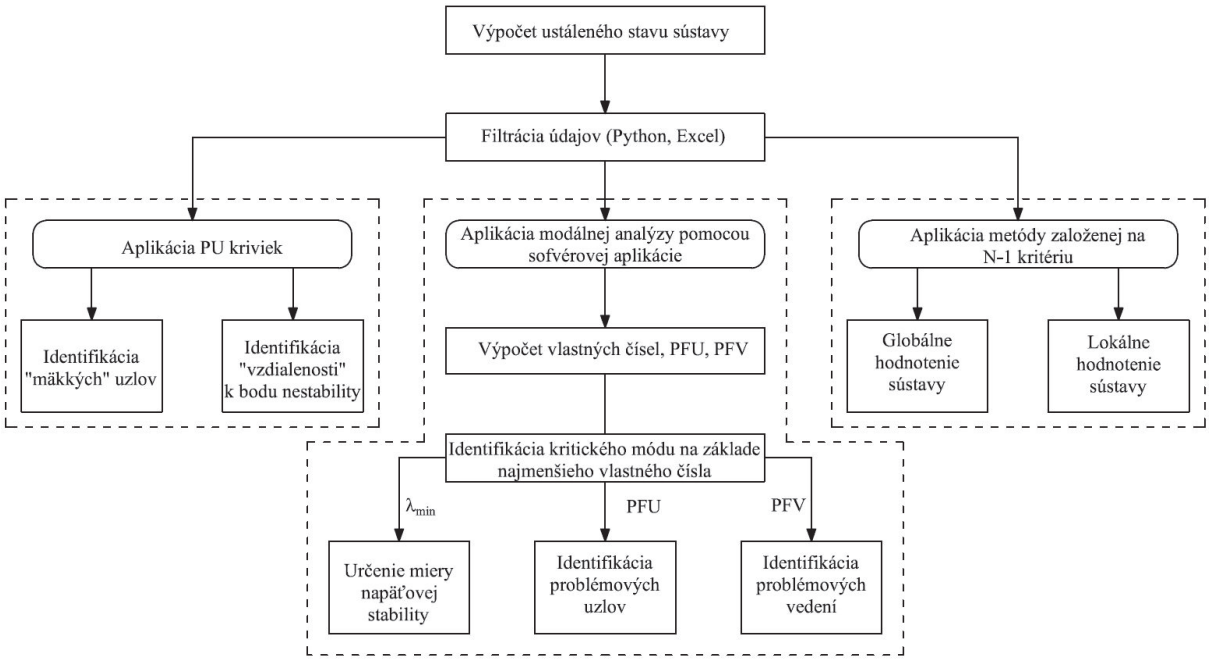
obr. 2.2 Postupový diagram hodnotenia založeného na modálnej analýze

Na základe získaných výsledkov zo simulácií sa stanovili prahové hodnoty pre PFU a PFV. Za prahovú hodnotu bolo zvolené také číslo, aby aspoň 5 uzlov resp. vedení presiahlo túto hodnotu pre

východiskový počiatočný stav. Tu je potrebné poznamenať, že tieto prahové hodnoty neplatia všeobecne. Dané hodnoty boli zvolené na základe dosiahnutých výsledkov pre našu simulovanú sústavu. Ak by sa daná metodika mala aplikovať na iný model elektrizačnej sústavy, bolo by potrebné na základe simulácií a výsledkov stanoviť nové prahové hodnoty. Uzly resp. vedenia, ktorých PFU a PFV presiahli stanovenú prahovú hodnotu možno považovať za problémové. Na záver sa vypočítané údaje exportovali vo formáte xls/xlsx, vyhodnotili a graficky spracovali.

Ďalším prístupom hodnotenia napäťovej stability bolo použitie PU kriviek. Tieto krivky sú súčasťou viacerých komerčných softvérov a predstavujú štandardnú metódu na hľadanie „vzdialenosti“ k bodu napäťovej nestability pri zvolenom spôsobe zaťaženia vo vybraných uzloch. Okrem toho sa taktiež vyhodnocovala strmosť PU kriviek na základe ktorej boli identifikované „mäkké uzly“.

Predchádzajúce 2 metódy sú zamerané na hodnotenie napäťovej stability elektrizačnej sústavy. Toto hodnotenie bolo doplnené ešte o metodiku postavenú na N-1 kritériu [19], ktorá pomocou globálneho kritéria ohodnotí celkový prevádzkový stav sústavy a prostredníctvom lokálneho kritéria identifikuje problematické vedenia. Hoci sú oba prístupy hodnotenia založené na rôznych princípoch a klasifikujú stav sústavy z iných pohľadov, zaujímavou otázkou bolo, ako sa obe metódy dopĺňajú a zároveň identifikujú problematické body v sústave. Celkový postupový diagram výpočtu a hodnotenia je zobrazený na obr. 2.3.



obr. 2.3 Postupový diagram výpočtu hodnotenia napäťovej stability

Na základe cieľov práce bolo stanovené preskúmanie možnosti využitia metód na hodnotenie napäťovej stability v rôznych stupňoch riadenia a prípravy prevádzky elektrizačnej sústavy. Preto sa pri výpočtoch vychádzalo z rôznych topológií a stavov. Výpočty boli postupne realizované pre nasledovné prevádzkové stavy:

- zvyšovanie zaťaženia („degradácia“ ustáleného stavu),
- zvýšený tranzit,
- rekonfigurácie,
- plánované vypnutia.

2.2 Variant 1 – zvyšovanie zaťaženia

Spôsob zvyšovania zaťaženia sústavy bol volený tak, že vo všetkých uzloch v sledovanej oblasti na hladine 110 kV sa postupne zvyšovala záťaž s krokom 2% počiatočného zaťaženia daného uzla (udržoval sa konštantný účinník) až do stavu, kedy numerická metóda divergovala. To bolo považované za dosiahnutie bodu nestability („nos“ PU krivky). Zvýšená spotreba bola pokrývaná energiou dodávanou zo susedných regulačných oblastí, kde sa zvyšovala výroba. Tento spôsob zaťažovania sa taktiež využil pri zostrojení PU kriviek pre rekonfigurácie a plánované vypnutia. Takýmto spôsobom je tak možné získať hranicu k bodu nestability a posúdiť tak stav, v akom sa posudzovaný systém nachádza. Aj keď je mnoho scenárov, ktorými by sa dalo zvýšenie zaťaženia robiť v jednotlivých uzloch a systém by mohol aj skôr dosiahnuť bod nestability, daný postup je všeobecne používaný a uznávaný v energetickej praxi. Na základe zostrojených PU kriviek sa zistilo, že sústava nadobudla stratu napäťovej stability keď dosiahla 1,96-násobok počiatočného zaťaženia. Ako napäťovo mäkká sa ukázala stredná a severná časť sledovanej regulačnej oblasti.

Pri zvyšovaní zaťaženia sústavy vyššie uvedeným spôsobom bola aplikovaná modálna analýza pre počiatočný stav a pre 1,2 – 1,4 – 1,6 – 1,8 – 1,96 násobok počiatočného zaťaženia. Pre každý ustálený stav sa vypočítala a zaznamenala hodnota najmenšieho vlastného čísla. Jeho priebeh je zobrazený v tab. 2.1. Číslo v riadku pre PFU a PFV udáva počet uzlov/vedení, ktorých hodnoty participačných faktorov boli väčšie ako prahová hodnota a sú teda označené ako problematické uzly resp. vedenia.

tab. 2.1 Výsledky hodnotenia variantu 1 na základe modálnej analýzy

	základný stav	**20 %**	**40 %**	**60 %**	**80 %**	**96 %**
Vlastné čísla	444,721	428,494	399,107	353,671	280,376	176,141
PFU	5	5	3	3	3	2
PFV	7	4	4	4	4	4

Zmenšovanie hodnoty vlastného čísla potvrdzuje zhoršovanie stavu sústavy. To vlastne aj znamená, že hoci modálna analýza nie je aplikovaná pre celú sústavu, ale pracujeme len s jej „výrezom“ a uzlami na hladine 400 kV, použitie metódy je stále korektné a korešponduje s teóriou. Aj keď hodnota vlastných čísel sa líši od hodnôt, ktoré by vyšli, ak by sa modálna analýza aplikovala na celú sústavu v ktorej by boli zahrnuté všetky regulačné oblasti, dôležitým faktom je, že trend vývoja vlastného čísla, na základe ktorého sa dá posúdiť stav sústavy z hľadiska napäťovej stability, zostal v súlade s teóriou.

Zatiaľ čo pre základný ustálený stav bolo nájdených 5 uzlov s hodnotou PFU vyššou ako prahová, pre kritický stav zostali len 2 uzly. Tento fakt je spôsobený tým, že so zvyšujúcim sa zaťažením sa mení aj tranzit cez sústavu a tým aj napäťové pomery. Zvýšenie zaťaženia v oblasti zodpovednosti spôsobilo odľahčenie cezhraničných vedení smerujúcich do regulačnej oblasti 3. To sa prejavilo zároveň aj v hodnotách PFU a v počte uzlov, ktoré presiahli prahovú hodnotu. Podľa hodnôt PFU sa jednalo o tzv. nelokalizovaný mód, čo znamená, že medzi hodnotami participačných faktorov uzlov nie sú výrazné rozdiely a daný mód je „rozložený“ medzi väčšinu uzlov. V sústave sa nachádzalo veľa uzlov s hodnotou PFU blízkou k prahovej hodnote. Otázkou je teda, či práve v takomto nelokalizovanom stave pomôže napr. pripojenie kompenzačného zariadenia do problematického uzla, resp. v jeho blízkej lokalite zlepšiť situáciu. Na základe hodnôt PFV boli identifikované ako problémové vedenia práve cezhraničné vedenia, ktoré museli potrebnú energiu na pokrytie spotreby preniesť.

2.3 Variant 2 – zvýšený tranzit

Táto situácia bola modelovaná tak, že v susednej regulačnej oblasti 3 bola zvyšovaná spotreba v uzloch na napäťovej hladine 110 kV. Tento deficit v regulačnej oblasti 3 musel byť pokrytý energiou, ktorá

spôsobila zvýšenie tranzitu cez oblasť zodpovednosti. Spotreba a taktiež výroba v oblasti zodpovednosti zostali rovnaké ako vo východiskovom stave pre variant 1.

Podľa hodnotenia tohoto variantu pomocou PU kriviek vyplynulo, že aj pri najvyššom simulovanom tranzite zostávajú hodnoty napätí nad nominálnou hodnotou. Tento jav je zapríčinený tým, že zvyšovanie tranzitu je mimo sledovanú oblasť a preto pokles napätia nie je až taký výrazný. Priebeh najmenšieho vlastného čísla spolu s uzlami a vedeniami, ktorých hodnoty prekročili prahovú hodnotu je zobrazený v tab. 2.2.

tab. 2.2 Výsledky hodnotenia variantu 2 na základe modálnej analýzy

	1329 MW	**1462 MW**	**1732 MW**	**2122 MW**	**2771 MW**
Vlastné čísla	455,591	444,721	419,363	372,567	266,481
PFU	5	5	5	5	3
PFV	7	7	7	6	6

Z hodnôt PFU sa ukázalo, že vyhodnocovaný mód je opäť „nelokalizovaný“ a to znamená, že v hodnotenej sústave nie sú uzly s výraznou hodnotou PFU. Treba vziať do úvahy ale fakt, že za kritickú oblasť, je možné považovať regulačnú oblasť 3, kde prebiehalo zvyšovanie zaťaženia. Tento fakt je potvrdený aj podľa strmosti PU kriviek, keď pre variant 1 je výrazne vyššia ako pre variant 2. Preto by v oblasti zodpovednosti nemalo veľký zmysel hľadať kritické uzly. Podľa PFV sa ukázali ako problémové vedenia cezhraničné, ktoré museli daný tranzit preniesť.

2.4 Variant 3 – rekonfigurácie

Rekonfigurácie sa týkali rozvodní Rz6 a Rz18. Konkrétne sa jednalo o vypnutia priečneho spínača prípojníc, čo viedlo k rozdeleniu uzla Rz6 na uzly Rz6_a a Rz6_b a uzla Rz18 na Rz18_a a Rz18_b. Cieľom rekonfigurácií bolo znížiť zaťaženie vedení v44 a v49 a zároveň zabezpečiť plnenie kritéria N-1.

tab. 2.3 Výsledky hodnotenia variantu 3 na základe modálnej analýzy

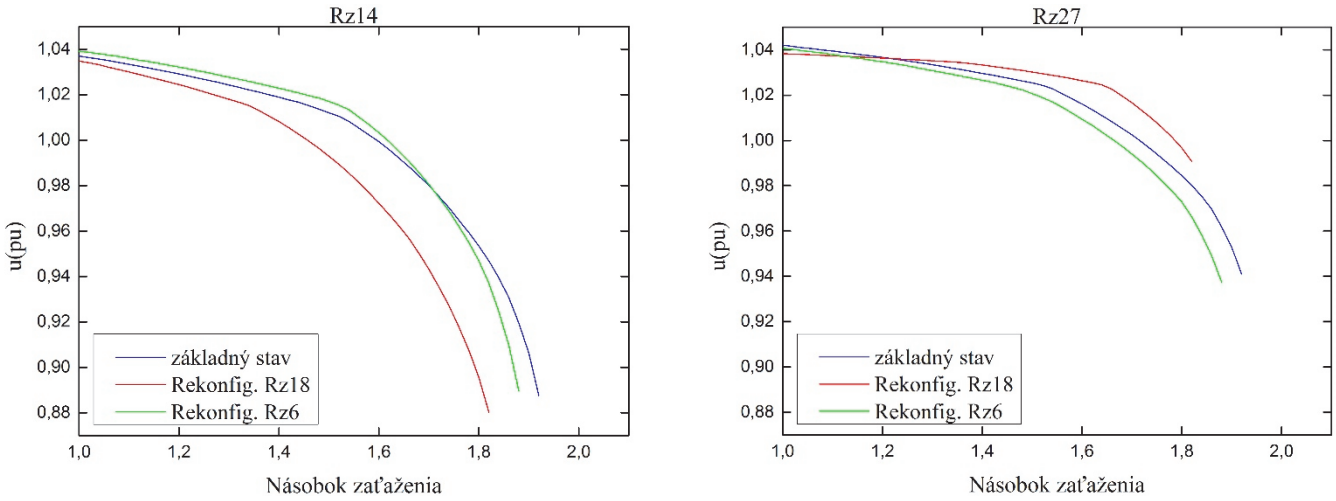
	Základný stav	**Rekonfigurácia Rz18**	**Rekonfigurácia Rz6**
Vlastné čísla	386,263	110,038	214,506
PFU	5	7	11
PFV	6	8	8

Ako vyplýva z tab. 2.3, na základe vlastného čísla sa situácia z pohľadu napäťovej stability zhoršila pre obe rekonfigurácie v porovnaní s východiskovým stavom. Ako najhorší stav sa ukazuje rekonfigurácia rozvodne Rz18, čo je vidno na základe najmenšej hodnoty vlastného čísla, ďalej nasleduje rekonfigurácia Rz6 a ako najmenej nepriaznivý stav vyšiel východiskový stav. Dovolíme si ešte pripomenúť, že na základe vlastného čísla sa dá povedať, ktorý z posudzovaných stavov je na tom relatívne lepšie/horšie z pohľadu napäťovej stability. Avšak nie je možné určiť na základe tohto čísla, aké maximálne zaťaženie ešte sústava znesie kým dosiahne bod, v ktorom stratí stabilitu.

Východiskový stav sústavy a stav sústavy pri rekonfigurácii Rz6 možno považovať za nelokalizovaný. Aj keď pre rekonfiguráciu Rz18 nie je možné povedať, že predstavuje lokalizovaný stav, ale hodnoty sa už viacej separujú od seba a vzniká skupina uzlov vo východnej časti oblasti zodpovednosti s vyššou hodnotou PFU. Je možné teda skonštatovať, že vplyvom danej rekonfigurácie dochádza k napäťovému „oslabeniu“ východnej časti sledovanej regulačnej oblasti. Rekonfigurácia uzla Rz6 spôsobila situáciu,

že nastalo oslabenie väzby medzi západnou časťou oblasti zodpovednosti a susednou regulačnou oblasťou 1. To je potvrdené aj tým, že uzly vybrané na základe PFU ako problematické sa nachádzajú v západnej časti. Pre základný stav boli na základe veľkosti PFV identifikované ako problémové cezhraničné vedenia. Situácia sa čiastočne zmenila pri oboch rekonfiguráciách, kde pri rekonfigurácii Rz18 sa medzi problémové zaradili 4 vedenia z oblasti zodpovednosti a pri rekonfigurácii Rz6 to bolo 1 vedenie.

Z PU kriviek vidno aký vplyv mali jednotlivé rekonfigurácie na napäťový profil jednotlivých uzlov a taktiež vplyv na zmenu vzdialenosti k bodu nestability. Ako bolo spomenuté vyššie, najhorší stav z hľadiska najmenšieho vlastného čísla nastal pri rekonfigurácii v uzle Rz18, potom nasledovala rekonfigurácia v uzle Rz6 a ako „najlepší“ sa ukázal východiskový stav. Pri základnom stave bolo maximálne zaťaženie sústavy 1,92 násobok počiatočného zaťaženia, pri rekonfigurácii Rz18 sa dosiahol stav 1,82 násobok a pri rekonfigurácii Rz6 sa sústava dokázala dostať do stavu 1,88 násobok počiatočného zaťaženia. V tomto prípade nastáva aj zhoda s klasifikáciou podľa vlastných čísel, ktoré identifikovali stavy v rovnakom poradí ako PU krivky. Toto však nemožno brať ako všeobecný prípad. Neplatí všeobecne, že čím vyššia hodnota vlastného čísla, tým je väčšia rezerva k bodu nestability (k „nosu“ PU krivky). Na obr. 2.4 sú zakreslené PU krivky pre 2 vybrané uzly.



obr. 2.4 PU krivky vo vybraných 2 uzloch pred a po rekonfiguráciách

Na záver možno zhrnúť, že sústava je schopná prevádzky pri všetkých 3 analyzovaných stavoch. Hoci rekonfigurácie pomohli odľahčiť viac zaťažené vedenia, z dosiahnutých výsledkov je ale zrejmé, že stav sústavy sa pri rekonfiguráciách z pohľadu napäťovej stability zhoršil.

2.5 Variant 4 – plánované vypnutia

Táto podkapitola je zameraná na vyhodnotenie vplyvu plánovaných vypnutí na prevádzku elektrizačnej sústavy. Pri každom plánovanom vypnutí nastala situácia, že bolo odstavené cezhraničné vedenie. Ako východiskový stav bol vybratý model s tranzitom 1329 MW a boli modelované nasledovné 3 varianty plánovaného vypnutia:

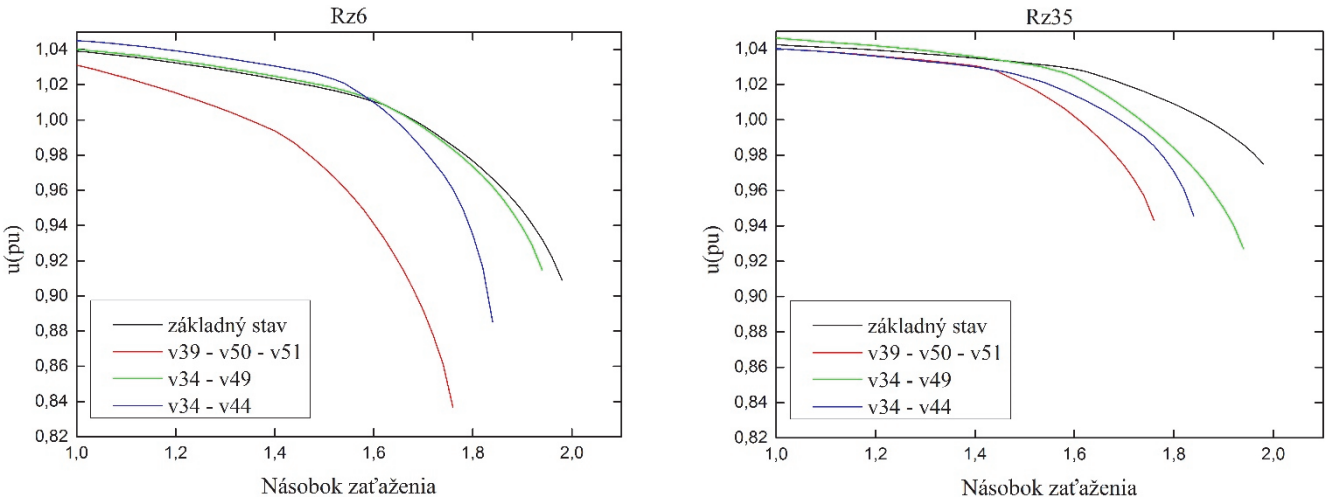
- plánované vypnutie vedení v39, v50, v51,
- plánované vypnutie vedení v34, v49,
- plánované vypnutie vedení v34, v44

Výsledky z modálnej analýzy sú zosumarizované v tab. 2.4. Podľa hodnôt vlastných čísel prislúchajúcich k jednotlivým stavom vyplýva, že najpriaznivejší stav je plánované vypnutie v34 - v49, to je nasledované východiskovým stavom, ďalej plánovaným vypnutím v34 - v44 a relatívne najhorší sa javí stav v39 - v50 - v51. Na základe hodnoty PFU vyplýva, že sa opäť jedná o nelokalizované módy. Pre všetky hodnotené stavy vyšlo, že problematické uzly definované prostredníctvom PFU sú hlavne uzly v južnej a západnej časti sledovanej regulačnej oblasti. I v tomto prípade však možno poukázať na fakt, že pri plánovanom vypnutí v39 - v50 - v51 sa aspoň čiastočne niektoré uzly výraznejšie separujú na základe PFU. Pre všetky stavy je typické to, že väčšina identifikovaných vedení na základe PFV sú cezhraničné vedenia.

tab. 2.4 Výsledky hodnotenia variantu 4 na základe modálnej analýzy

	základný stav	**v39 - v50 - v51**	**v34 - v49**	**v34 - v44**
Vlastné čísla	**455,591**	**292,043**	**476,493**	**442,163**
PFU	5	7	5	5
PFV	7	5	7	9

Z výsledkov PU kriviek je vidno (obr. 2.5), že z hľadiska rezervy k bodu nestability je na tom najhoršie sústava pri plánovanom vypnutí v39-v50-v51, kde sa dosiahlo maximálne zaťaženie 1,76-násobok počiatočného stavu. Tento stav je nasledovaný plánovaným vypnutím v34-v44 (1,84 násobok), potom v34-v49 (1,94 násobok) a ako najpriaznivejší sa javí základný východiskový stav (1,98 násobok). Tu nastal rozdiel v porovnaní s vlastným číslami, podľa ktorých je stav pri plánovaným vypnutí v34-v49 „relatívne lepší“ z pohľadu napäťovej stability ako východiskový stav. Tu sa opäť ukazuje, že najmenšie vlastné číslo klasifikuje jednotlivé stavy z hľadiska napäťovej stability avšak vzdialenosť do bodu nestability závisí od spôsobu degradácie stavu, rozložení zdrojov a podobne. Keď zoberieme do úvahy aj strmosť kriviek, tak opäť ako najhorší stav nastáva pri plánovanom vypnutí v39-v50-v51. Tu je vidno, že sústava je „napäťovo“ namáhaná najviac spomedzi všetkých stavov.



obr. 2.5 PU krivky vo vybraných 2 uzloch počas plánovaných vypnutí

Na záver možno zhodnotiť, že sústava je schopná prevádzky pri všetkých stavoch plánovaného vypnutia i keď pri plánovanom vypnutí v39 - v50 - v51 dochádza k výraznejšiemu zhoršeniu stavu sústavy z pohľadu napäťovej stability, čo vyplvýva z veľkosti vlastného čísla v porovnaní s ostatnými stavmi.

2.6 Metodika založená na prúdovom kritériu

Výsledky získané z tejto metodiky [19], ktorá hodnotí sústavu z tzv. lokálneho a globálneho hľadiska sú len stručne zosumarizované v tejto podkapitole, keďže to nebol primárnym cieľ práce. Lokálne hodnotenie, kedy sa klasifikuje stav vedení, sa porovnávalo s výsledkami PFV. Tu sa ukázalo, že ak je sústava viacej zaťažená, dochádzalo k čiastočnému prekrytiu výsledkov. Zhodu možno vysvetliť tým, že zväčšený prúd spôsobuje vyššie úbytky napätí a vyššie straty jalového výkonu a teda aj modálna analýza na základe PFV identifikuje tieto vedenia za problémové. Naopak, pri nižšom zaťažení sústavy sa výsledky líšili. Je potrebné si však uvedomiť, že obe metodiky vychádzajú z 2 rôznych princípov. Globálne hodnotenie, ktoré bolo porovnávané s vlastnými číslami klasifikovalo stav sústavy v rovnakom poradí až na prípad plánovaného vypnutia, kedy sa podľa tejto metodiky východiskový stav javil lepší ako plánované vypnutie v34 - v49.

Zámerom bolo ukázať, že je dôležité pracovať s viacerými hodnoteniami sústavy, keďže sústava sa môže javiť v dobrom stave z hľadiska jednej metodiky no druhá môže ukazovať, že v sústava sa nachádza v ohrození. Tieto metódy by bolo dobré teda použiť ako doplnkové, keďže jedna by identifikovala stav sústavy z pohľadu napäťovej stability a druhú z pohľadu N-1 kritéria.

3 Definovanie rizikových faktorov a návrh opatrení

Na základe výsledkov získaných zo simulácií a informácií dostupných z literatúry boli zosumarizované rizikové faktory, ktoré môžu spôsobiť napäťovú nestabilitu a v najhoršom prípade kolaps sústavy a rozpad. Medzi tieto rizikové faktory patrí:

- Vysoké zaťaženie sústavy
- Rekonfigurácie a plánované vypnutia
- Slabé prepojenie so susednými regulačnými oblasťami
- Vyčerpávanie rezerv jalového výkonu
- Veľké vzdialenosti medzi výrobou a spotrebou a slabá prepojenosť týchto oblastí vedeniami
- Nepriaznivá charakteristika záťaží
- Činnosť transformátorov s automatickým prepínačom odbočiek
- Slabá koordinácia ochranných a regulačných zariadení

Vznik viacerých blackoutov resp. vážnych situácií spojených s napäťovou nestabilitou viedol k vytvoreniu súboru opatrení, ktoré je dôležité dodržiavať pre zabezpečenie napäťovej stability elektrizačnej sústavy. Tieto pravidlá a opatrenia sú zhrnuté v nasledovných bodoch:

- Prevádzkovať sústavu tak, aby spĺňala N-1 kritérium.
- Monitorovať dostupné rezervy jalového výkonu.
- Monitorovať rezervu sústavy k bodu nestability.
- Posilňovať elektrizačnú sústavu – najmä dobré prepojenie problematických uzlov a výstavba cezhraničných vedení.
- Včasná identifikácia problematických miest v sústave.
- Disponovať kompenzačnými zariadeniami.
- Byť vybavený dostatočne dobrými monitorovacími systémami, disponovať stratégiami a plánmi, keď nastane v sústave napäťová nestabilita.
- Zabezpečiť kvalitnú príprava dispečerov.
- Vyrovnať sa s viacerými vážnymi poruchami pomocou riadiacich a ochranných systémov pôsobiacich v havarijných.
- Operatívne plánovanie – tu zohráva úlohu použitie simulačných nástrojov.
- Riadenie v reálnom čase – v zmysle tohto bodu ide napr. o zmenu výroby elektrickej energie z jednotiek ktoré sú ďaleko od spotreby na jednotky ktoré sú bližšie spotreby.
- Ochranné systémové schémy.

4 Prínosy práce pre prax

Hlavný prínos pre prax predstavuje vypracovanie hodnotení napäťovej stability elektrizačnej sústavy pomocou modálnej analýzy a PU kriviek. Tieto hodnotenia boli doplnené o klasifikáciu stavu sústavy metodikou založenou na prúdovom kritériu. Dôležitým výsledkom práce je porovnanie metodík a interpretácia získaných výsledkov. Súčasťou práce je spracovanie faktorov, ktoré vplývajú na napäťovú nestabilitu a sú naznačené metódy ako sa s týmito faktormi vysporiadať. Taktiež boli zosumarizované odporúčania a návrh implementácie metód pre posúdenie napäťovej stability v rámci procesu prípravy prevádzky ako aj v reálnej prevádzke. Pri všetkých odporúčaniach sme vychádzali z výsledkov simulácií a analýz súčasných odporúčaní a metód používaných na hodnotenie napäťovej stability.

PU krivky predstavujú štandardný nástroj na hodnotenie napäťovej stability elektrizačnej sústavy. Hlavná informácia získaná z PU kriviek je vzdialenosť resp. rezerva sústavy do bodu nestability. Na základe tejto informácie bolo možné porovnávať vplyv rôznych opatrení v sústave (rekonfigurácie, plánované vypnutia) na zmenu vzdialenosti k bodu nestability. V práci sme sa nezamerali len na túto myšlienku, ale analyzovali sme taktiež strmosť PU kriviek. Na základe nej sa podarilo identifikovať napäťovo mäkké uzly, ktoré majú pomerne vysokú strmosť PU krivky a vo väčšine prípadov sa tieto uzly nachádzali blízko seba. Týmto spôsobom sa dá dobre identifikovať oblasť, ktorá je napäťovo mäkká resp. najviac citlivá na zmeny zaťaženia.

Ustálený stav elektrizačnej sústavy je možné spočítať veľkým množstvom komerčných programov, no len málo z nich poskytuje na hodnotenie napäťovej stability metódu modálnej analýzy. Monitorovanie vlastného čísla ako globálneho indexu na hodnotenie napäťovej stability sa ukazuje ako užitočné pri porovnávaní rôznych prevádzkových stavov sústavy. Tento index, ako nám potvrdili výpočty a čo korešponduje aj s informáciami z dostupnej literatúry, nemá nejakú všeobecnú prahovú hodnotu a určuje teda len relatívnu mieru napäťovej stability sústavy. Ako vyplýva z výsledkov, prudké zmeny a poklesy ukazujú, že nastala topologická zmena v sústave, vyčerpávajú sa rezervy jalového výkonu a to značí, že sústava sa dostáva bližšie k stavu napäťovej nestability. Ďalším výsledkom, ktorý je možný z modálnej analýzy využiť sú participačné faktory. Od tých sa očakáva identifikovanie miest, ktoré môžu mať najväčší dopad na napäťovú stabilitu sústavy. Podľa dosiahnutých výsledkov vychádza, že PFU je horšie použiteľný index. Ak sa jedná o tzv. nelokalizované módy, tak nie je možné nájsť prostredníctvom PFU kritické uzly a určiť tak oblasť v sústave, kde aplikácia nápravného opatrenia prinesie sústave najväčší benefit. Na druhej strane PFV lepšie dokázal separovať problematické vedenia bez ohľadu na to či sa jednalo o nelokalizovaný mód. Jednotlivé vedenia a uzly boli vyberané na základe toho, či participačný faktor prekročil nami definovanú prahovú hodnotu. Je možné skonštatovať, že prahová hodnota pre PFU a PFV sa opäť nedá zvoliť ako nejaká všeobecne platná hodnota, ktorá by sa dala použiť pre všetky typy elektrizačných sústav. Tento fakt vyplýva zo skutočnosti, že jednotlivé elektrizačné sústavy nadobúdajú rôznu topológiu, odlišujú sa svojou rosiahlosťou a rozmiestením výroby a spotreby a podobne. Preto je potrebné tieto prahové hodnoty pre elektrizačnú sústavu, ktorá je predmetom skúmania, vždy na základe výsledkov získaných zo simulácií určiť.

Riešenie, ktoré sa v práci využilo bolo zaujímavé tým, že metodika modálnej analýzy sa neaplikovala na celý model elektrizačnej sústavy, ktorého súčasťou bola aj nami analyzovaná regulačná oblasť, ale priamo sa metóda aplikovala len na danú regulačnú oblasť (v práci sme to nazývali aj „výrez“). Nemuseli sme teda robiť z obrovským počtom uzlov, ale iba s uzlami, ktoré prislúchali danej regulačnej oblasti. Taktiež sa analyzovali uzly len na najvyššej napäťovej hladine (400 kV), keďže tie sme považovali za uzly, ktoré majú najväčší vplyv na napätie v ostatných častiach sústavy. Analýza ukázala, že použitie tejto úvahy spôsobuje, že výsledky z modálnej analýzy nekorešpondujú presne so stavom, ak by analyzovaný model obsahoval všetky regulačné oblasti a uzly aj na ostatných napäťových hladinách. Avšak trendovosť poklesu vlastného čísla sa pri degradácii sústavy zachovala a táto metóda sa ukázala byť použiteľná. Ako súčasť budúcej práce by mohlo byť porovnanie kompletného modelu sústavy s modelom, ktorý bol analyzovaný v tejto práci a získať tak informáciu o vplyve na priebeh najmenšieho vlastného čísla, PFU a PFV.

Hlavná výhoda navrhnutej metodiky hodnotenia spočíva v kombinácii modálnej analýzy a PU kriviek, čo poskytuje lepší pohľad na napäťovú stabilitu elektrizačnej sústavy. K tomuto hodnoteniu sme ešte čiastočne pridali metódu založenú na N-1 kritériu. Na prvý pohľad sa môže zdať zvláštne spájať 2 metódy hodnotiace stav elektrizačnej sústavy na inom princípe. Je však dôležité získať rôzne pohľady na prevádzkovú bezpečnosť a stav sústavy. Ak sa vrátime k hodnoteniu sústavy pri zvyšovaní tranzitu tak zistíme, že z PU kriviek (aj keď nie zostrojených v „klasickom“ zmysle) vyplýva, že sústava nie je napäťovo až tak namáhaná a z pohľadu napäťovej stability by mohla byť v poriadku. Metodika vychádzajúca z N-1 kritéria však označila daný stav za stav ohrozenia, čo poukazuje na dôležitosť kombinácie rôznych metód na hodnotenie stavu sústavy. Nebolo naším cieľom a ani sme neočakávali, že dostaneme rovnaké výsledky z oboch metodík. Cieľom bolo nájsť a zistiť ich spoločnú aplikovateľnosť. Výsledky získané z daných metodík boli graficky zobrazené na mape elektrizačnej sústavy, kde je dobre vidieť lokalita problémových miest.

4.1 Návrh implementácie vybraných metód pre posúdenie napäťovej stability ES v rámci procesu prípravy prevádzky ako aj v reálnej prevádzke ES

Výhodou analyzovaných metodík je možnosť ich použitia v rôznych stupňoch riadenia a prípravy prevádzky elektrizačnej sústavy. Z toho dôvodu boli analyzované rôzne prevádzkové stavy ako bolo zvyšovanie zaťaženia v sústave, zvýšený tranzit, rekonfigurácie a plánované vypnutia v elektrizačnej sústave, aby sme posúdili aplikovateľnosť daných metód.

a) Príprava prevádzky

Cieľom prípravy prevádzky je zabezpečiť bezpečný a spoľahlivý stav elektrizačnej sústavy. Do plánovania prípravy prevádzky patrí aj údržba a plánované vypnutia jednotlivých prvkov sústavy. Výsledky získané prostredníctvom modálnej analýzy a z PU kriviek umožnia jednotlivé prevádzkové stavy ohodnotiť z pohľadu napäťovej stability a získať tak informáciu, či plánované vypnutie je vhodné, resp. akú kombináciu prvkov počas údržby je možné považovať za bezpečnú. Týmto spôsobom je teda možné optimalizovať výber a množstvo prvkov, ktoré je potrebné odstaviť a získať tak vhodnú kombináciu. Takto sa zabezpečí zachovanie prevádzkovej bezpečnosti elektrizačnej sústavy.

b) Prevádzka sústavy v reálnom čase

Elektrizačná sústava je dynamicky sa meniaci systém a treba byť pripravený na stavy, ktoré nie sú zahrnuté v plánoch prípravy prevádzky a vedieť sa s nimi vysporiadať. Použitie vlastného čísla by sa mohlo javiť užitočné práve v online prevádzke. Môže nastať situácia, že nastane výpadok alebo preťaženie vedenia a operátor bude musieť urobiť rekonfiguráciu resp. iné opatrenie, ktoré zabezpečí, že sústava bude pracovať opäť v normálnych prevádzkových podmienkach. Na základe simulácií by sa mohlo stať, že sa nájdu viaceré konfigurácie, ktoré zabezpečia tento stav a budú spĺňať N-1 kritérium. Prostredníctvom vlastného čísla pre každý stav ale môže zistiť, ktorý z nich je najvhodnejší z hľadiska napäťovej stability a rozhodnúť sa na základe tohto prístupu. PU krivky by zároveň poskytli informáciu o vzdialenosti do bodu nestability a prípadne by určili vplyv danej rekonfigurácie na napäťové profily jednotlivých uzlov. V prípade, že by sa jednalo o lokalizovaný mód, PFU by dokázal dobre identifikovať miesta, ktorým by mala byť venovaná zvýšená pozornosť.

c) Plány rozvoja sústavy

Aplikácia metód nájde uplatnenie taktiež aj v rámci rozvoja sústavy. Výstavba nových vedení a výrobní elektrickej energie by mali zlepšiť napäťovú stabilitu elektrizačnej sústavy. Treba však získať informáciu, aký bude mať daný zásah vplyv na sústavu resp. kde by pripojenie daného prvku prinieslo najväčší prospech. Použitá metodika hodnotenia dokáže nájsť problematické oblasti v sústave, ktoré by mali byť posilnené či už vedeniami, novými zdrojmi prípadne aj kompenzačnými zariadeniami. To znamená, že je možné nájsť miesta v sústave, kde takéto zásahy a výstavby budú mať prospešný vplyv na sústavu.

5 Záver

Pojmy ako stabilita, bezpečnosť a spoľahlivosť elektrizačnej sústavy čoraz viac v súčasnosti naberajú na dôležitosti. Elektrizačná sústava predstavuje pravdepodobne najväčší systém aký kedy bol vytvorený a preto je nesmierne náročné takýto systém spravovať a udržiavať. S príchodom novej výpočtovej techniky sa zavádzajú nové metódy, algoritmy, prístupy ale aj zariadenia, ktoré nám čoraz lepšie umožňujú monitorovať stav elektrizačnej sústavy a zároveň nájsť vhodné nápravné opatrenia v prípade vzniknutých problémov. Charakter elektrizačnej sústavy sa postupne mení, čo je spôsobené hlavne kvôli otvorenému trhu s elektrickou energiou a taktiež aj pripájaním obnoviteľných zdrojov do elektrizačnej sústavy. To prináša otázky a problémy v oblasti ako napr. stabilita elektrizačnej sústavy, plnenie N-1 kritéria, nastavovanie elektrických ochrán, preťažovanie vedení a pod. Jedným z javov, ktorý trápi v súčasnosti prevádzkovateľov prenosových sústav a zároveň aj akademickú obec, čo dokumentuje množstvo článkov každoročne venovaných tejto problematike, predstavuje napäťová stabilita. Ak nenastane včasná detekcia problémov spojených s napäťovou nestabilitou, tak môže nastať kolaps sústavy alebo v najhoršom prípade rozpad sústavy a obmedzenie dodávky elektrickej energie. Tieto fakty sa stali motiváciou pre predkladanú prácu, ktorej hlavným cieľom bola analýza napäťovej stability. Dizertačná práca sa konkrétne zameriava na metódy a postupy slúžiace na hodnotenie napäťovej stability elektrizačnej sústavy a zároveň ich aplikáciu na modeli elektrizačnej sústavy so zámerom zistiť relevantnosť výsledkov. Hoci sú použité metódy známe v oblasti elektroenergetiky, mali sme pocit, že chýbala rozsiahlejšia interpretácia výsledkov a bližšie fyzikálne vysvetlenie. Výsledky získané z modálnej analýzy boli doplnené o výsledky PU kriviek, ktoré poskytli napäťové profily jednotlivých uzlov a zároveň sme sa pozreli na toky výkonu po vedeniach a straty jalového výkonu a ich súvis s danými metodikami. Ako už bolo viackrát spomínané, výsledky hodnotenia napäťovej stability boli doplnené o výsledky, ktoré hodnotia stav sústavy na základe prúdového kritéria. Hoci sú metódy založené na iných princípoch, ich kombináciou sa môže získať účinný prostriedok na hodnotenie stavu elektrizačnej sústavy.

Prvá kapitola je zameraná na základné pojmy a definície súvisiacich s napäťovou stabilitou. Sú tu načrtnuté hlavné rozdiely, výhody ale aj nevýhody statických metód a dynamických simulácií. Hoci sú statické metódy dobre známe, stále sú atraktívne z hľadiska menšej náročnosti na výpočtovú techniku a pomerne dobrú interpretáciu získaných výsledkov. V ďalšej časti kapitoly sa nachádza vysvetlený vznik napäťovej nestability, ktorý je dôležitý z hľadiska pochopenia mechanizmu a fyzikálnej interpretácie vzniku nestability. Záverečná časť kapitoly je venovaná vybraným napäťovým kolapsom, ktoré sa odohrali vo svete za posledné tri desaťročia.

Druhá kapitola je zameraná na rešerš vybraných statických metód, ktoré sa používajú na hodnotenie napäťovej stability elektrizačnej sústavy. Cieľom tejto kapitoly bolo teoretické vysvetlenie a matematické odvodenie daných metód. Z kapitoly 2 potom vychádzala praktická časť práce, ktorej sa venovala nasledovná kapitola.

Použitie modálnej analýzy a PU kriviek na hodnotenie napäťovej stability bolo nosnou časťou praktickej časti, ktorá je opísaná v tretej kapitole. V jej úvode je opísaný model elektrizačnej sústavy na ktorom boli obe metódy testované a zároveň je načrtnutá štruktúra vytvorenej softvérovej aplikácie, v ktorej je implementovaný algoritmus modálnej analýzy. Obe vyššie uvedené metodiky boli doplnené a porovnané s metodikou založenou na hodnotení stavu sústavy na základe prúdového kritéria. Dané metodiky sa aplikovali pre rôzne prevádzkové stavy ako zvyšovanie zaťaženia, zvyšovanie tranzitu cez sledovanú oblasť, rekonfigurácie a plánované vypnutia. Na všetky tieto stavy sa aplikovali vyššie uvedené metódy s cieľom identifikovať globálny stav sústavy z hľadiska napäťovej stability pomocou vlastných čísel a zároveň nájsť prvky resp. miesta v sústave, ktoré sú za tento stav najviac zodpovedné. Na základe získaných výsledkov vyplýva, že najmenšie vlastné číslo určuje mieru napäťovej stability daného stavu elektrizačnej sústavy a možno ho teda pokladať za akýsi globálny hodnotiaci index. Nedá sa však použiť ako číslo, ktoré určuje presnú vzdialenosť do bodu, v ktorom nastane nestabilita sústavy. Identifikácia problémových prvkov na základe participačného faktora uzlov môže byť problémová, keď sa jedná o tzv. nelokalizovaný mód. Na identifikáciu mäkkých uzlov boli využité PU krivky, pomocou ktorých je možné zistiť napäťový profil jednotlivých uzlov pri vybranom spôsobe degradácie systému.

Okrem toho poskytujú PU krivky informáciu o maximálnom zaťažení sústavy a tým pádom identifikujú vzdialenosť aktuálneho stavu sústavy od bodu nestability. V daných priebehoch je možné zachytiť aj dosiahnutie hranice jalového výkonu v generátorových uzloch, keď nastane zlom v daných priebehoch. To vlastne svedčí o vyčerpávaní rezerv jalového výkonu dôležitého z hľadiska udržiavania napätia v uzloch. Ako dobrý index na hodnotenie sa ukázal participačný faktor vedení, ktorý i v prípade nelokalizovaného módu dokázal výraznejšie separovať problémové prvky pre daný analyzovaný stav. Výsledky týchto metodík ukazovali lepšiu previazanosť s metódou založenou na N-1 kritériu v stavoch, keď bola sústava výraznejšie namáhaná. Tento fakt je spôsobený tým, že pri zvýšenom namáhaní sústavy rastie aj prúdové zaťaženie (dôležitý faktor pri N-1 kritériu). To vedie k vyšším úbytkom napätia a stratám jalového výkonu, čo je dôležité z hľadiska hodnotenia napäťovej stability.

Záverečná kapitola bola venovaná definovaniu rizikových faktorov z hľadiska vzniku napäťovej nestability. Na základe týchto faktorov a analýze napäťových kolapsov boli zosumarizované opatrenia, ktoré slúžia na obmedzenie resp. prevenciu proti napäťovej nestabilite.

Použitá literatúra

[1] VAN CUTSEM, T. Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods. In *Proceedings of the IEEE*, 2000, vol. 88, no. 2, pp. 208-227.

[2] SACULESCU, S. *Real-Time Stability in Power Systems.* New York : Springer, 2006. 320 s.

[3] VOURNAS, C., VAN CUTSEM, T. *Voltage Stability of Electric Power Systems.* New York: Springer, 1998. 378 s.

[4] LEI, X., RETZMANN, D. Static and dynamic approaches for analyzing voltage stability. In. *European Transactions on Electrical Power*. ISSN 1546-3109, 2006, vol. 16, no. 3, pp. 277-296.

[5] WARLAND, L. A *Voltage Instability Predictor Using Local Area Measurements VIP++*. Dizertačná práca. Trondheim: The Norwegian University of Science and Technology, 2002. 163 s.

[6] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 s. ISBN 007035958

[7] CROW, M. *Computational Methods for Electric Power Systems*. New York: CRC Press. 2009. s. 305. ISBN 142008660.

[8] ARISTIDOU, P. et al. Power System Simulation Chalanges. In *8th IntelliCIS Workshop*. Aachen, Germany. Aachen: *RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center*, 2013

[9] LOUD, L., et al. A time-scale decomposition-based simulation tool for voltage stability analysis. In *Power Tech Proceedings*. Porto, 2001

[10] AJJARAPU, V. *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*. New York: Springer, 2007. 250 s.. ISBN 0387260803

[11] CANIZARES, C. A. *Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools*. IEEE PES, 2002. 300 s. ISBN 0780378695

[12] LARSSON, M. *Coordinated Voltage Control in Electric Power Systems.* Dizertačná práca. Lund : Lund University, 2000. 203 s.

[13] GAO, B., MORISON, G. K., KUNDUR, P. Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis. In *IEEE Transactions on Power Systems,* ISSN 0885-8950, 1992, vol. 7, no. 4, pp. 1529-1542

[14] CHAKRABARTI, S. Notes on Power System Voltage Stability. Kanpru: Indian Institute of Technology, 16 s.

[15] ELLITHY, K. Voltage Stability Analysis of Muscat Power System During Summer Weather Conditions. In *Science and technology,* no. 5, pp. 35-45

[16] MANSOUR, Y. SVC placement using critical modes of voltage instability . In *Power Apparatus and Systems,* ISSN 0885-8950, 1994, vol. 9, no. 2, pp. 757-763

[17] EKWUE, A. O. et al. Singular value decomposition method for voltage stability analysis on the National Grid system (NGC). In *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 1999, vol. 21, no. 6, pp. 425-432

[18] SHARMA, C., GANNESS, M.G. Determination of Power System Voltage Stability Using Modal Analysis. In *Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. POWERENG 2007. International Conference on* , vol., no., pp.381,387, 12-14 April 2007

[19] CINTULA, B. Nové kritériá a postupy pre hodnotenie prevádzkových stavov elektrizačných sústav. Dizertačná práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. 130 s.

[20] POJZL, I. Program pre posúdenie stability elektrizačnej sústavy na základe vlastnosotí Jacobiho matice. Diplomová práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015. 51 s.

Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce

Práce publikované na domácich vedeckých konferenciách

[1] ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., KOVÁČ, M., LIŠKA, M., KÓSA, K. Analysis of the Voltage Stability of Slovak Transmission System, Impact of the Equipment Maintenance. In *Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013*. Košice : Technical University of Košice, 2013, s.52-55. ISBN 978-80-553-1441-9.

[2] KOVÁČ, M., ELESCHOVÁ, Ž., HERETÍK, P., VOLČKO, V.. Voltage stability analysis using PU curves, SVD method and modal analysis. In *Power Engineering 2014. Control of Power Systems 2014 : Proceedings of the 11th International Scientific Conference CPS 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; 20-22 May 2014*. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 95-100. ISBN 978-80-89402-71-7.

[3] KOVÁČ, M. – CERMAN, A., HERETÍK, P., VOLČKO, V., ELESCHOVÁ, Ž. Methods for analysis of voltage stability in power systems. In *ELITECH´14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 June 2014.* Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2014, s. 6. ISBN 978-80-227-4171-2.

[4] KOVÁČ, M., ELESCHOVÁ, Ž., POJZL, I., - VOLČKO, V., HERETÍK, P., IVANIČ, M. Evalutation of Voltage Stability of a Power System using Modal Analysis. In *Elektroenergetika 2015 : 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 16-18, 2015*. Košice : Technical University of Košice, 2015, s. 504-507, ISBN 978-80-553-2187-5

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

[5] CINTULA, B., ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., VOLČKO, V., KONÍČEK, M., KOVÁČ, M. Impact of fault location on transient stability of synchronous generator. In *Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014*. 1. vydanie. Brno : Brno University of Technology, 2014, s. 17-21. ISBN 978-1-4799-3806-3.

Zoznam ostatných vybraných publikácií autora

[1] HERETÍK, P., KOVÁČ, M.- SMITKOVÁ, M., BELÁŇ, A., VOLČKO, V., HERETÍK, P. Research on Transformer Interaction Caused by Inrush Current and Parametric Study of this Phenomenon. In *International Journal of Energy*. Vol. 7, Iss. 3 (2013), s.72-81. ISSN 1998-4316.

[2] HERETÍK, P., KOVÁČ, M.- BELÁŇ, A., VOLČKO, V., KONÍČEK, M. Analytical analysis of transformer interaction caused by inrush current. In *Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014*. 1. vydanie. Brno : Brno University of Technology, 2014, s. 23-27. ISBN 978-1-4799-3806-3.

[3] KOVÁČ, M.- ELESCHOVÁ, Ž., HERETÍK, P., KONÍČEK, M. Analysis and mitigation of ferroresonant oscillations in power system. In *Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014*. 1. vydanie. Brno : Brno University of Technology, 2014, s. 211-215. ISBN 978-1-4799-3806-3.

[4] KOVÁČ, M.- HERETÍK, P., ELESCHOVÁ, Ž. Analysis of Ferroresonance. In *Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013*. Košice : Technical University of Košice, 2013, s.48-51. ISBN 978-80-553-1441-9.

[5] KOVÁČ, M.- HERETÍK, P., VOLČKO, V., ELESCHOVÁ, Ž. Ferroresonant Oscillations in Electrical Power System. In *ELITECH´13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral*

Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-3947-4.

[6] KOVÁČ, M., HERETÍK, P., VIGLAŠ, Dominik. Smart Metering in Europe. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.199-204. ISBN 978-80-89402-64-9.

[7] HERETÍK, P., KOVÁČ, M.- SMITKOVÁ, M., BELÁŇ, A., VOLČKO, V. Analysis of Selected System Factors on Sympathetic Inrush Current of Shunt Wound Transformers. In *Vol. 22. Recent Researches in Electric Power and Energy Systems : Proceedings of the 13th International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER ´13); 1st International Conference on Power and Energy Systems (POES ´13); Crete Island, Greece, 27-29 August 2013*. [s.l.] : WSEAS Press, 2013, s.332-337. ISBN 978-960-474-328-5.

[8] HERETÍK, P., BELÁŇ, A., KOVÁČ, M.- VOLČKO, V. Protecting of PV Power Plant / Model of Current Transformer. In *Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013*. Košice : Technical University of Košice, 2013, s.488-491. ISBN 978-80-553-1441-9.

[9] VOLČKO, V., GREJTÁK, F., JANIGA, P., ELESCHOVÁ, Ž., KOVÁČ, M. The Measurement of Power UQality in Off-grid System of a Passive House. In *Elektroenergetika 2015 : 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 16-18, 2015*. Košice : Technical University of Košice, 2015, s. 512-515, ISBN 978-80-553-2187-5

[10] KOVÁČ, M., HERETÍK, P. Modeling and Simulation of PV Cell Using Matlab/Simulink. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.391-396. ISBN 978-80-89402-64-9.

[11] HERETÍK, P., BELÁŇ, A., KOVÁČ, M.- VOLČKO, V. Proposal of Current Transformers for Rapid Protection Relay. In *ELITECH´13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-227-3947-4.

[12] HERETÍK, P., KOVÁČ, M., BELÁŇ, A., VOLČKO, V., KONÍČEK, M. Controlled switching methodology for reducing of transformer inrush currents. In *Power Engineering 2014. Control of Power Systems 2014 : Proceedings of the 11th International Scientific Conference CPS 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; 20-22 May 2014*. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 9-13. ISBN 978-80-89402-71-7.

[13] VIGLAŠ, D., CINTULA, B., HERETÍK, P., KOVÁČ, M. The Possibilities for Reducing Impact of PVE on Voltage in the Distribution System. In *Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013, s.471-477. ISBN 978-80-89402-64-9.

[14] VOLČKO, V., ELESCHOVÁ, Ž., KOVÁČ, M.- HERETÍK, P. The Influence of Transformer Impedance on Short Circuit Current. In *ELITECH´13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, [3] s. ISBN 978-80-227-3947-4.

[15] VOLČKO, V., BELÁŇ, A., HERETÍK, P., KOVÁČ, M.- KONÍČEK, M. Smart metering, the meaning of popular words. In *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014 : Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 135-139. ISBN 978-80-89402-73-1.