

Ing. Boris Cintula

Autoreferát dizertačnej práce

**NOVÉ KRITÉRIÁ A POSTUPY PRE HODNOTENIE
PREVÁDZKOVÝCH STAVOV ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAV**

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

v doktorandskom študijnom programe:
v študijnom odbore

Elektroenergetika
5.2.30 Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava,30.06.2014

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Boris Cintula

Autoreferát dizertačnej práce

**NOVÉ KRITÉRIÁ A POSTUPY PRE HODNOTENIE
PREVÁDZKOVÝCH STAVOV ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAV**

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

v doktorandskom študijnom programe:
Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 30.06.2014

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. Boris Cintula
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

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

Oponenti: Ing. Karol Kósa, PhD.
Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s.
Mlynské nivy 59/A
824 84 Bratislava 26
Slovenská republika

Doc. Ing. Petr Toman, PhD.
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
Ústav elektroenergetiky
61600 Brno – Poruba Technická 3082/12, Královo Pole
Česká republika

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 21.8.2014 o 9:00 hod.

Na Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Ilkovičova 3, miestnosť C-417, blok C, 4. poschodie.

.....
Prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan fakulty

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 4 |
| ÚVOD | 5 |
| CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE | 6 |
| 1 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY | 7 |
| 1.1 PREVÁDZKOVÁ BEZPEČNOSŤ..... | 7 |
| 1.2 PREVÁDZKOVÁ SPOLEHLIVOSŤ..... | 7 |
| 1.3 BEZPEČNOSTNÉ KRITÉRIUM N-1..... | 8 |
| 1.3.1 Požiadavky a postupy pre výpočty kritéria N-1..... | 8 |
| 2 NÁVRH METODIKY PRE HODNOTENIE PREVÁDZKOVÝCH STAVOV ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY | 9 |
| 2.1 DETERMINISTICKÝ PRÍSTUP..... | 9 |
| 2.1.1 Metodika hodnotenia stavu prevádzky s využitím deterministického prístupu - globálne hodnotenie..... | 9 |
| 2.1.2 Metodika hodnotenia stavu prevádzky s využitím deterministického prístupu - lokálne hodnotenie..... | 12 |
| 2.2 PRÍSTUP HODNOTENIA DYNAMICKEJ STABILITY..... | 14 |
| 2.2.1 Dynamické simulácie..... | 14 |
| 2.2.2 Analýza dynamickej stability elektrizačnej sústavy..... | 15 |
| 2.3 PRAVDEPODOBNOSTNÝ PRÍSTUP..... | 15 |
| 3 VERIFIKÁCIA NAVRHNUTEJ METODIKY | 17 |
| 3.1 POROVNANIE VYBRANÝCH PREVÁDZKOVÝCH STAVOV – GLOBÁLNE HODNOTENIE..... | 17 |
| 3.1.1 Zvyšovanie tranzitu..... | 17 |
| 3.1.2 Plánované vypnutia..... | 18 |
| 3.1.3 Rekonfigurácie..... | 19 |
| 3.1.4 Rozvoj elektrizačnej sústavy..... | 20 |
| 3.2 POROVNANIE VYBRANÝCH PREVÁDZKOVÝCH STAVOV – LOKÁLNE HODNOTENIE..... | 21 |
| 3.2.1 Zvyšovanie tranzitu..... | 21 |
| 3.2.2 Plánované vypnutia..... | 22 |
| 3.2.3 Rekonfigurácie..... | 22 |
| 3.2.4 Rozvoj elektrizačnej sústavy..... | 23 |
| 4 PRÍNOS PRÁCE PRE PRAX | 24 |
| 4.1 APLIKÁCIA METODIKY V DISPEČERSKOM RIADENÍ..... | 25 |
| 4.1.1 Príprava prevádzky..... | 25 |
| 4.1.2 Operatívne riadenie..... | 25 |
| 4.2 APLIKÁCIA METODIKY PRE PRÍPRAVU PLÁNOV OBRANY..... | 26 |
| 4.3 APLIKÁCIA METODIKY PRE PRÍPRAVU PLÁNOV ROZVOJA..... | 26 |
| 5 ZÁVER | 27 |
| POUŽITÁ LITERATÚRA | 29 |
| ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ AUTORA SÚVISIACICH S PROBLEMATIKOU DIZERTAČNEJ PRÁCE | 31 |

Úvod

Energetika je súčasťou hospodárstva jednotlivých štátov a vychádza z energetickej politiky, ktorá určuje základné ciele a rámce rozvoja energetiky v dlhodobom časovom horizonte a podmienkach trvalo udržateľného rozvoja. Cieľom energetickej politiky je zabezpečenie dostatočného množstva energie pri jej efektívnom využívaní, bezpečná a spoľahlivá dodávka energie, zvýšenie úspor na strane spotreby a primeraná ochrana životného prostredia. [1]

Energetická politika predstavuje východisko okrem iných smerov rozvoja aj pre elektroenergetiku. V elektroenergetike podporil myšlienku riešenia energetickej bezpečnosti príchod liberalizácie trhu s elektrinou, ktorej primárnym prínosom malo byť zníženie ceny elektriny. V skutočnosti sa táto myšlienka naplnila znížením cien silovej elektriny, ale na druhej strane prišlo k zvýšeniu nákladov na dosiahnutie plynulých dodávok elektriny spolu so zvýšením bezpečnosti týchto dodávok, t.j. potreba zvýšenia bezpečnosti elektrizačných sústav. V širšom pohľade ide o opatrenia na území jednotlivých štátov a medzinárodných spoločností, ktoré majú zabezpečiť stabilné dodávky elektriny pri prijateľných a stabilizovaných cenách, ako aj garanciu ochrany kritickej energetickej infraštruktúry a preukázať pripravenosť na efektívne reakcie v prípade krízových situácií. [1][2]

Liberalizáciu trhu s elektrinou prinieslo až prijatie tzv. „Tretieho energetickeho balíčka“, ktorý tvorilo niekoľko smerníc a nariadení, čo pre členské štáty EÚ znamenalo jeho implementáciu do národnej legislatívy. Z pohľadu energetickej infraštruktúry sa základné opatrenia liberalizačného balíčka okrem iného týkali vytvorenia mechanizmov pre prevádzkovateľov prenosových sústav na zlepšenie koordinácie sieťových operácií a bezpečnosti siete, zvýšenia operácií na energetickom trhu a posilnenie bezpečnosti dodávok z pohľadu solidarity a súdržnosti medzi členskými štátmi. [2]

V súčasnosti sú prevádzkovatelia prenosových sústav na území EÚ združení v asociácií ENTSO-E, ktorá definuje spoločné pravidlá a prístupy pre bezpečnú prevádzku prepojenej sústavy. Tieto pravidlá sú doplnené národnými predpismi a postupmi vzhľadom na jedinečnosť elektrizačných sústav jednotlivých členských štátov. Požiadavky na zvýšenie bezpečnosti a spoľahlivosti dodávky elektriny boli vyvolané mnohými faktormi ovplyvňujúcimi bezpečnosť prevádzky v rámci prepojenej sústavy, najviac však vysokými tranzitmi výkonu cez národné sústavy v uplynulom období. Tieto faktory môžu viesť v prípade vzniku rôznych porúch k ohrozeniu bezpečnosti regiónu ako aj celej prepojenej sústavy. Vzhľadom na tieto skutočnosti je nutné monitorovať stav prevádzky sústavy, predvídať postupnosť prípadných scenárov zhoršenia stavu prevádzky a v neposlednom rade sa v prípade nepredvídateľných udalostí spoľahlivo vyhýbať ohrozujúcim stavom prevádzky sústavy.

Dizertačná práca sa v teoretickej časti zameriava na spracovanie témy bezpečnej, spoľahlivej a stabilnej prevádzky elektrizačnej sústavy s ohľadom na analýzu samostatného významu prevádzkovej bezpečnosti a prevádzkovej spoľahlivosti, ktoré sa v praxi častokrát neoddeľujú. Stabilite elektrizačnej sústavy je venovaná samostatná kapitola vzhľadom na rozsiahlosť tejto problematiky. Bezpečnosť prevádzky sústavy je užšie spracovaná v nadväznosti na požiadavky a postupy pre výpočty bezpečnostného kritéria N-1 ako základného kritéria pre identifikáciu a hodnotenie vplyvu nepredvídateľných udalostí na oblasť zodpovednosti. V práci je pozornosť zameraná tiež na informačné systémy, ktoré sú v súčasnosti využívané v rámci prepojenej sústavy pre včasnú identifikáciu potenciálne nebezpečných stavov spolu s klasifikáciou týchto prevádzkových stavov.

Praktickou časťou dizertačnej práce je návrh metodiky pre hodnotenie prevádzkových stavov s využitím bezpečnostného kritéria N-1 na základe viacerých prístupov v zmysle komplexnejšieho pohľadu na hodnotenie stavu prevádzky v porovnaní so súčasnými metódami a postupmi. Návrh metodiky je následne doplnený o možnosti jeho implementácie v reálnej prevádzke na úrovni dispečerského riadenia, operatívneho riadenia, prípravy plánov obrany a rozvoja elektrizačnej sústavy.

Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je spracovanie problematiky bezpečnej, spoľahlivej a stabilnej prevádzky elektrizačnej sústavy s užším zameraním na analýzu, monitorovanie a hodnotenie bezpečnej prevádzky pri využití bezpečnostného kritéria N-1.

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodiky pre hodnotenie prevádzkových stavov elektrizačnej sústavy s využitím bezpečnostného kritéria N-1 na základe viacerých prístupov. Posúdenie týchto stavov zodpovedá komplexnejšiemu pohľadu na využitie bezpečnostného kritéria N-1 v porovnaní so súčasnými metódami a postupmi.

Pre dosiahnutie hlavného cieľa dizertačnej práce bol stanovený postup riešenia podľa nasledovných téz dizertačnej práce:

- 1) Návrh postupu hodnotenia stavu elektrizačnej sústavy z pohľadu bezpečnosti a stability s využitím základného kritéria N-1.
- 2) Verifikácia navrhnutého postupu hodnotenia prevádzkového stavu sústavy s využitím simulačného modelu elektrizačnej sústavy.
- 3) Analýza možnosti aplikovania navrhnutého postupu v riadení elektrizačnej sústavy v reálnom čase a v príprave prevádzky elektrizačnej sústavy.
- 4) Návrh implementácie navrhnutého postupu hodnotenia bezpečnosti a stability do Plánu obrany elektrizačnej sústavy.

1 Súčasný stav riešenej problematiky

Súčasná situácia v elektroenergetike z pohľadu riadenia a prevádzky elektrizačných sústav v rámci prepojenej sústavy je charakteristická viacerými zmenami v porovnaní s predchádzajúcimi dekadami. Najvýznamnejší rozdiel predstavujú zmeny technologickkej štruktúry zdrojov elektriny s prioritou obnoviteľných zdrojov elektriny, najmä masívny nárast inštalovaného výkonu veterných a fotovoltických elektrární a neustále sa zvyšujúce objemy tranzitných tokov resp. prenosy elektriny na veľké vzdialenosti v rámci prepojenej sústavy bez významného rozširovania prenosových kapacít s dopadom na vnútornú stabilitu a spoľahlivosť národných prenosových sústav. Tieto faktory v kombinácii s nepredvídateľnými poruchami predstavujú zvýšené riziko prevádzky elektrizačnej sústavy, ktoré môžu mať v negatívnych prípadoch dopad aj mimo hraníc národných regulačných oblastí, čo môže ohroziť bezpečnú a spoľahlivú prevádzku nadnárodne prepojenej sústavy.

Na základe toho je možné konštatovať, že rozvoj elektrizačnej sústavy vo väzbe na technické postupy, riešenia a opatrenia z pohľadu potrieb prevádzky elektrizačnej sústavy musí byť vo všeobecnosti zameraný na zabezpečenie optimálneho trvalo udržateľného rozvoja plnením zásadných kritérií bezpečnosti, spoľahlivosti, stability a ochrany životného prostredia.

1.1 Prevádzková bezpečnosť

V prepojenej sústave existuje početné množstvo závislostí vzhľadom na široké využívanie systému mnohými účastníkmi trhu s elektrinou, kde vplyvom liberalizácie nie sú povolené PPS intervencie do trhových mechanizmov, pokiaľ nedochádza k ohrozeniu bezpečnej prevádzky sústavy. V zmysle spoločných technických zásad definovaných združením PPS je preto prioritným cieľom prevádzková bezpečnosť synchrónne prepojenej sústavy. [3]

Súčinnosť prevádzky synchrónne prepojenej sústavy je založená na zásade zodpovednosti každého PPS za vlastnú regulačnú oblasť a riadi sa štandardmi a pravidlami dohodnutými a záväznými na medzinárodnej úrovni v rámci ENTSO-E. Tu sú presne definované metódy spolupráce PPS počas prevádzkových stavov, kedy faktory mimo regulačnej oblasti príslušného PPS môžu znížiť schopnosť prevádzkovať jeho systém v rámci prevádzkových limitov. Tieto metódy sú v súčasnosti neustálym predmetom činnosti ENTSO-E s ohľadom na regionálnu úroveň príslušných PPS s cieľom adaptovať tieto metódy pre prepojenú sústavu. [3]

Za prevádzkovú bezpečnosť svojich elektrizačných sústav zodpovedajú jednotliví PPS na princípe podriadenosti, pričom najdôležitejšie pravidlá bezpečnej prevádzky prepojenej sústavy sa vzťahujú na medzinárodné prepojenia. Na týchto prepojeniach PPS postupne prispôbujú spoločné pravidlá platné pre hranice ich regulačných oblastí (a tiež hranice krajín) s cieľom vytvoriť vhodné podmienky pre cezhraničnú výmenu elektriny bez ohrozenia prevádzkovej bezpečnosti. Koordinácia v rámci prepojenej sústavy predstavuje medzi jednotlivými PPS veľmi dôležitý faktor, ktorý prispieva k zvýšeniu vzájomnej solidarity z pohľadu zvládnutia rizík, zabránenia šírenia porúch, poskytovania pomoci s cieľom znížiť prípadné dôsledky týchto porúch a vytvárať stratégie obnovenia po kolapse. [3]

Prevádzková bezpečnosť elektrizačnej sústavy môže byť definovaná ako schopnosť odolať náhlym udalostiam (skraty) alebo nepredvídateľným udalostiam (neočakávané straty prvkov sústavy), ktoré by mohli viesť k inému ako normálnemu stavu prevádzky sústavy. Preto je možné konštatovať, že cieľom prevádzkovej bezpečnosti je zabezpečiť normálnu prevádzku elektrizačnej sústavy.[4][5]

1.2 Prevádzková spoľahlivosť

Prevádzková spoľahlivosť môže byť definovaná viacerými spôsobmi v závislosti od hľadiska jej posudzovania, avšak v princípe sa spoľahlivosťou rozumie vlastnosť systému zaistiť plnenie predpísaných funkcií. Podľa [6],[8] je možné spoľahlivosť definovať ako schopnosť zabezpečiť normálnu prevádzku elektrizačnej sústavy, eliminovať počet udalostí s cieľom predísť významnej udalosti a eliminovať dôsledky významných udalostí v ľubovoľnom čase ich vzniku. Táto definícia predstavuje implikáciu pre aktívny prístup k trvalému zvyšovaniu spoľahlivosti z pohľadu identifikácie iniciačných udalostí, definovania neprípustných dôsledkov udalostí, definície opatrení znižujúcich riziko.

Vo všeobecnosti platí, že jedným z ukazovateľov kvality zariadenia je jeho spoľahlivosť, kde požiadavky na spoľahlivosť sú určované bezpečnostnými ako aj ekonomickými aspektmi. Spoľahlivosť prevádzky elektrizačnej sústavy je závislá od spoľahlivosti technických zariadení ako aj funkčnej spoľahlivosti človeka. Základom teórie spoľahlivosti je preto matematická štatistika a teória pravdepodobnosti. [9]

Bezpečnosť a spoľahlivosť rôznych technológií alebo systémov vychádza z jedného metodologického základu, pričom v elektroenergetike sa bezpečná a spoľahlivá prevádzka elektrizačnej sústavy analyzuje s cieľom znížiť pravdepodobnosť rizika ľubovoľnej nepredvídateľnej udalosti ako prevencie prevádzky systému v inom ako normálnom stave (napr. núdzovom stave).

1.3 Bezpečnostné kritérium N-1

Pre zabezpečenie prevádzkovej bezpečnosti elektrizačnej sústavy je nevyhnutnou podmienkou plnenie základného bezpečnostného kritéria N-1. Plnenie bezpečnostného kritéria N-1 je vyjadrením bezpečnej prevádzky elektrizačnej sústavy alebo prevádzky synchronne prepojenej sústavy, kedy žiadna udalosť zo zoznamu nepredvídateľných udalostí (normálna a mimoriadna udalosť) nesmie ohroziť túto bezpečnosť. Prevádzkové podmienky v rámci regulačnej oblasti príslušného PPS po niektorej z definovaných nepredvídateľných udalostí nesmú viesť k nekontrolovanému kaskádovému vypínaniu v rámci tejto regulačnej oblasti alebo k prenášanju vplyvu udalosti mimo hraníc príslušnej regulačnej oblasti. [3][11][12]

Plnenie bezpečnostného kritéria N-1 po nepredvídateľnej udalosti je charakterizované schopnosťou ostávajúcich prvkov v sústave prijať režim prechodnej nestability, t.j. strata žiadneho prvku v sústave nesmie spôsobiť dlhodobé prúdové preťaženie nad nominálne hodnoty, odchýlku napätia a frekvencie mimo prípustné hodnoty.

1.3.1 Požiadavky a postupy pre výpočty kritéria N-1

Plnenie kritéria N-1 je prevenciou pred kaskádovým efektom s dopadom na zahraničie. Simulačné overovanie plnenia N-1 poskytuje PPS informácie o dôsledkoch udalostí a zároveň poskytuje možnosť pre prípravu adekvátnych nápravných opatrení s cieľom zabrániť prevádzkovým obmedzeniam (pre jednoduché a mimoriadne typy nepredvídateľných udalostí) alebo kaskádovému efektu, kde sa riziko vzťahuje na mimoriadne nepredvídateľné udalosti.

V zmysle medzinárodných štandardov a tiež štandardov na regionálnej úrovni je každý PPS povinný v synchronne prepojenej sústave simulačne overovať plnenie N-1 a to pre všetky fázy prevádzky elektrizačnej sústavy.

Realizácia rozsahu simulačných výpočtov overovania plnenia N-1 vo fáze prípravy prevádzky elektrizačnej sústavy je pre každého PPS povinná pre rôzne prevádzkové podmienky (zmena v nasadení výroby, zmena spotreby, plánované údržby a pod.) s ohľadom na zoznam všetkých nepredvídateľných udalostí. [3][6]

Realizácia on-line simulačných výpočtov overovania plnenia N-1 v rámci dispečerského riadenia prevádzky je pre každého PPS podobne ako v prípade fázy prípravy prevádzky povinná, pričom priority sú nasledovné:

- povinnosť vykonávať automatické simulačné výpočty N-1 pre jednoduché typy nepredvídateľných udalostí a definované mimoriadne nepredvídateľné udalosti na základe rizika s periodicitou najmenej 15 minút,
 - vykonávať manuálne simulačné výpočty N-1 s cieľom doplniť výpočty pre diagnostiku účinnosti nápravných opatrení v rámci prípravy prevádzky s ohľadom na zmenu topológie sústavy a doplniť výpočty pre mimoriadne udalosti založené na vopred definovaných udalostiach ako rozšírenie povinných automatických simulačných výpočtov N-1,
- vykonávať manuálne simulačné výpočty N-1 po výskyte prvej udalosti:
 - tieto výpočty sa realizujú v prípade výskytu ďalšej udalosti, ku vzniku ktorej príde po dosiahnutí nového stavu po prvej udalosti, t.j. po uplatnení N-1 a následných nápravných opatreniach, kedy je cieľom identifikovať nové obmedzenia,
 - PPS je povinný tieto simulačné výpočty realizovať pre mimoriadne nepredvídateľné udalosti on-line a tiež pre prípravu prevádzky, aby mohol zabezpečiť príslušné nápravné opatrenia (a v prípade potreby ich koordinovať so susedným PPS).

2 Návrh metodiky pre hodnotenie prevádzkových stavov elektrizačnej sústavy

V tejto kapitole je opísaný celkový postup návrhu metodiky pre hodnotenie prevádzkových stavov elektrizačnej sústavy pri využití bezpečnostného kritéria N-1.

2.1 Deterministický prístup

Deterministický prístup je možné vo všeobecnosti definovať ako princíp, kedy je možné úplne a rozhodne určiť účinky každého druhu. Predmetom deterministického prístupu klasifikácie prevádzkového stavu elektrizačnej sústavy je hodnotenie dôsledkov po N-1 udalostiach na základe vopred determinovaných ohraničení a kritérií.

2.1.1 Metodika hodnotenia stavu prevádzky s využitím deterministického prístupu - globálne hodnotenie

Navrhovaná metodika pre hodnotenie prevádzkového stavu elektrizačnej sústavy s využitím deterministického prístupu vychádza z nasledovného postupu:

Krok 1.

Simulačný výpočet s využitím bezpečnostného kritéria N-1, t.j. opakovaný výpočet východiskového ustáleného stavu pre výpadok každého vedenia v prenosovej sústave. Cieľom výpočtu je získať hodnoty zaťaženia vedení v stave N a v stave po N-1 udalosti všetkých vedení v oblasti zodpovednosti.

Krok 2.

Na základe výsledkov simulačného výpočtu všetkých N-1 udalostí v oblasti zodpovednosti sú následne vypočítané hodnoty faktora ODF (z angl. „*Outage Distribution Factor*“). Hodnota faktora ODF vyjadruje prerozdelenie výkonu vypnutého vedenia na ostatné vedenia v oblasti zodpovednosti [32].

V dizertačnej práci je faktor ODF vypočítaný podľa nasledovného vzťahu:

$$ODF_{V_x}^{V_y} = \left(\frac{P_{n-1}^{V_y} - P_n^{V_y}}{P_n^{V_x}} \cdot 100 \right) \quad (2.1)$$

kde $P_{n-1}^{V_y}$ je zaťaženie hodnoteného vedenia "Vy" po výpadku vedenia "Vx",
 $P_n^{V_y}$ – zaťaženie hodnoteného vedenia "Vy" v čase bez vypnutých vedení (stav N),
 $P_n^{V_x}$ – zaťaženie vedenia "Vx" v čase bez vypnutých vedení (stav N).

Je potrebné doplniť, že do zoznamu N-1 udalostí sú zaradené všetky vedenia v oblasti zodpovednosti, pričom výpočet ODF faktorov je realizovaný iba pre zmeny zaťaženia systémových vedení. Zmeny zaťaženia radiálnych vedení (blokové vedenia, radiálne vedenia k spotrebe) nie sú uvažované v tomto vyhodnotení z dôvodu vplyvu na skreslenie výsledkov.

Krok 3.

Do hodnotenia ďalej vstupujú iba kladné zmeny zaťaženia, kde je potrebné odlišiť významné zmeny zaťaženia od menej významných zmien aplikáciou filtra týchto údajov.

Filter zmien zvýšeného zaťaženia je definovaný súčasným plnením nižšie uvedených podmienok, kde (2.2) definuje minimálnu zmenu zaťaženia vedenia po N-1 udalosti voči stavu N a (2.3) minimálnu hodnotu zaťaženia daného vedenia v stave po výpočte N-1 vzhľadom na nominálne zaťaženie.

$$\frac{P_V^{N-1}}{P_V^N} \geq 5\% \quad (2.2)$$

$$I_V^{N-1} \geq 0,3 \cdot I_{n,V} \quad (2.3)$$

Krok 4.

Celkové hodnotenie stavu prevádzky elektrizačnej sústavy vychádza z dvoch pohľadov definujúcich štyri váhové faktory:

- pohľad na zaťaženie vedení,

- a) VF1 je určený pomernou hodnotou najviac zaťaženého vedenia v ustálenom stave (stav N) vzťahnutou na nominálne zaťaženie, t.j. platí

$$\max\left(\frac{I_{ij}^N}{I_N}\right) \Rightarrow VF1 \quad (2.4)$$

- b) VF2 je určený pomernou hodnotou najviac zaťaženého vedenia po výpočte všetkých N-1 udalostí v oblasti zodpovednosti vzťahnutou na nominálne zaťaženie, t.j. platí

$$\max\left(\frac{I_{ij}^{N-1}}{I_N}\right) \Rightarrow VF2 \quad (2.5)$$

kde i je pomerná hodnota zaťaženia,
 V_i – systémové vedenia v oblasti zodpovednosti,
 V_j – všetky vedenia v oblasti zodpovednosti,
 N – stav N,
 $N-1$ – stav po výpočte N-1 udalostí.

- systémový pohľad na počet najviac ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení,

- c) VF3 je určený pomernou hodnotou počtu ovplyvnených vedení po výpočte všetkých N-1 udalostí vzťahnutou na počet systémových vedení, t.j. platí

$$\frac{n_{V_POVP}}{n_{V_CPSV}} \Rightarrow VF3 \quad (2.6)$$

kde n_{V_POVP} je počet ovplyvnených vedení, kde za ovplyvnené vedenie je považované vedenie s minimálne jednou významnou kladnou zmenou zaťaženia pri ľubovoľnej N-1 udalosti, n_{V_CPSV} – celkový počet systémových vedení.

- d) VF4 je určený pomernou hodnotou počtu ovplyvňujúcich vedení po výpočte všetkých N-1 udalostí vzťahnutou na celkový počet vedení, t.j. platí

$$\frac{n_{V_PVPL}}{n_{V_CPV}} \Rightarrow VF4 \quad (2.7)$$

kde n_{V_PVPL} je počet ovplyvňujúcich vedení, kde za ovplyvňujúce vedenie je považované vedenie, ktorého výpadok spôsobí minimálne jednu významnú kladnú zmenu zaťaženia ľubovoľného hodnoteného vedenia, n_{V_CPV} – celkový počet vedení.

Vyššie opísaným pomerným hodnotám sú v rámci ich príslušných intervalov priradené veľkosti váhových faktorov a tým sú následne priradené farebné označenia. Tieto vyjadrujú stupne vážnosti určených pomerných hodnôt. Definícia stupňov vážnosti zohľadňuje v prípade zaťaženia vedení neurčitost' matematických modelov (presnosť modelu, uvažované zaťaženie a pod.) a v prípade systémového pohľadu sa vychádza z analýzy rozsiahleho súboru výsledkov realizovaných simulačných výpočtov ustálených stavov.

Navrhnuté stupne váhových faktorov môžu byť prispôbené vzhľadom na účel hodnotenia ako napr. príprava prevádzky elektrizačnej sústavy, operatívne riadenie pre on-line monitorovanie prevádzky sústavy, plán obrany alebo rozvoj sústavy.

Krok 5.

Ohraničenie stupňov váhových faktorov je prehodnotené na základe citlivostnej analýzy, ktorej cieľom je zohľadnenie miery vážnosti jednotlivých váhových faktorov. Na základe citlivostnej analýzy výsledkov niekoľkých ustálených stavov sú intervaly VF prehodnotené a sú zadefinované medzistupne, ktoré sú vyjadrením priblíženia pomerných hodnôt od hranice najbližšieho horšieho stupňa váhových faktorov. Výsledkom uplatnenia citlivostnej analýzy je presnejšie čiastkové ako aj celkové posúdenie stavu prevádzky elektrizačnej sústavy. Týmto je možné predísť označeniu menej vážneho stavu za vážny a jednoznačne tak diferencovať vážnejší stav od ostatných stavov. Veľkosti váhových faktorov s uvážením výsledkov ustálených stavov sú uvedené v tab.2.1, tab.2.2 a tab.2.3.

tab.2.1 Veľkosti váhového faktora VF1 vyjadrujúceho zaťaženie vedení v stave N s uvážením citlivostnej analýzy

| Citlivostná analýza | |
|---|-----|
| Intervaly pomerného zaťaženia vedenia v stave N | VF1 |
| < 1 ; ∞) | 1 |
| < 0.9 ; 1) | 0.9 |
| < 0.8 ; 0.9) | 0.8 |
| < 0.7 ; 0.8) | 0.7 |
| < 0.6 ; 0.7) | 0.6 |
| < 0.5 ; 0.6) | 0.5 |
| < 0 ; 0.5) | 0.4 |

tab.2.2 Veľkosti a stupne vážnosti váhového faktora VF2 vyjadrujúceho zaťaženie vedení v stave po N-1 udalosti s uvážením citlivostnej analýzy

| Citlivostná analýza | | |
|---|-----|-----|
| Intervaly pomerného zaťaženia vedenia v stave po N-1 udalosti | VF2 | |
| < 1 ; ∞) | 1* | 1** |
| < 0.9 ; 1) | 0.9 | |
| < 0.8 ; 0.9) | 0.7 | |
| < 0.7 ; 0.8) | 0.5 | |
| < 0 ; 0.7) | 0.4 | |

Poznámka:
* - nespĺnené kritérium N-1 pre 1 vedenie
** - nespĺnené kritérium N-1 pre aspoň 2 vedenia

tab.2.3 Veľkosti a stupne vážnosti váhových faktorov VF3, VF4 vyjadrujúce systémový pohľad na počet ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení s uvážením citlivostnej analýzy

| Citlivostná analýza | |
|---|----------|
| Intervaly pomernej hodnoty počtu ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení | VF3, VF4 |
| < 0.75 ; 1 > | 1 |
| < 0.7 ; 0.75) | 0.9 |
| < 0.65 ; 0.7) | 0.8 |
| < 0.6 ; 0.65) | 0.7 |
| < 0.5 ; 0.6) | 0.6 |
| < 0.4 ; 0.5) | 0.5 |
| < 0 ; 0.4) | 0.4 |

Krok 6.

Celkové hodnotenie prevádzkového stavu elektrizačnej sústavy sa určí na základe súčiny všetkých váhových faktorov. Príslušné intervaly veľkosti súčiny všetkých váhových faktorov, na základe ktorých je definovaná klasifikácia celkového hodnotenia stavu prevádzky elektrizačnej sústavy, sú uvedené v

tab.2.4. K priamemu určeniu celkového stavu prevádzky elektrizačnej sústavy definovaného ako „ohrozenie“ dochádza v prípade platnosti niektorej z nasledujúcich podmienok:

- ak je hodnota zaťaženia najviac zaťaženého vedenia v stave N vyššia ako 100 %,
- ak sú aspoň dva VF rovné 1, potom celkový stav prevádzky určený veľkosťou súčiny všetkých VF je o jeden stav horší.

tab.2.4 Klasifikácia celkového globálneho hodnotenia stavu prevádzky elektrizačnej sústavy

| Hodnotenie celkového stavu prevádzky elektrizačnej sústavy | Intervaly veľkosti súčiny všetkých VF určujúce celkové hodnotenie stavu prevádzky elektrizačnej sústavy | Farbné označenie |
|--|---|------------------|
| normálny stav | < 0.0256 ; 0.05 > | |
| alarm | (0.05 ; 0.2058 > | |
| núdzový stav | (0.2058 ; 0.5832 > | |
| ohrozenie | (0.5832 ; 1 > | |

2.1.2 Metodika hodnotenia stavu prevádzky s využitím deterministického prístupu - lokálne hodnotenie

Lokálne hodnotenie je možné definovať ako princíp hodnotenia prevádzkového stavu jednotlivých vedení v oblasti zodpovednosti s využitím deterministického prístupu.

Predmetom lokálneho hodnotenia prevádzkového stavu jednotlivých vedení je posúdenie:

- veľkosti a rozsahu ovplyvnenia systémových vedení po simulačných výpočtoch N-1 udalostí,
- veľkosti a rozsahu vplyvu každého vedenia v oblasti zodpovednosti na prevádzkový stav systémových vedení po simulačných výpočtoch N-1 udalostí, t.j. pohľad na ovplyvňujúce vedenia.

Prvým krokom lokálneho hodnotenia je identifikácia a určenie ovplyvnených vedení po simulačných výpočtoch N-1 udalostí a v druhom kroku ovplyvňujúcich vedení. Identifikácia úzkych miest spolu s rozsahom vážnosti ovplyvňovania je určená na základe vopred determinovaných ohraničení a kritérií. Navrhovaná metodika lokálneho hodnotenia s využitím deterministického prístupu vychádza z rovnakých výsledkov ako globálne hodnotenie, pričom sa posudzuje a vyhodnocuje odlišný pohľad na prevádzku sústavy „Krok 1.“ a „Krok 2.“ sú preto rovnaké ako v globálnom hodnotení.

Krok 3.

Lokálne hodnotenie prevádzkových stavov vedení diferencuje dve kategórie hodnotenia: ovplyvňované a ovplyvňujúce vedenia.

Celkové hodnotenie prevádzkového stavu **ovplyvnených** vedení vychádza z definície troch lokálnych váhových faktorov:

- hodnotenie vedenia s ohľadom na zaťaženie,

- a) VF_{L1} je určený pomernou hodnotou najvyššieho zaťaženia hodnoteného (systémového) vedenia po výpočte všetkých N-1 udalostí v oblasti zodpovednosti vzťahnutou na nominálne zaťaženie, t.j. platí

$$\max \left(n^V \right)_{N-1} \Rightarrow VF_{L1} \quad (2.8)$$

kde n^V je pomerná hodnota zaťaženia,
 V_i – systémové vedenia v oblasti zodpovednosti,
 V_j – všetky vedenia v oblasti zodpovednosti,
N-1 – stav po výpočte N-1 udalostí.

- hodnotenie vedenia s ohľadom na počet jeho ovplyvnení po výpočte všetkých N-1 udalostí,

- b) VF_{L2} je určený počtom významných kladných zmien zaťaženia hodnoteného (systémového) vedenia po výpočte všetkých N-1 udalostí, t.j. platí

$$\left(n^V \right)_{N-1} \Rightarrow VF_{L2} \quad (2.9)$$

kde n je počet významných kladných zmien zaťaženia (ovplyvnenia) systémového (ovplyvneného) vedenia po výpočte všetkých N-1 udalostí,
N-1 – stav po výpočte N-1 udalostí.

- hodnotenie vedenia s ohľadom na veľkosť zmeny zaťaženia vedenia po výpočte všetkých N-1 udalostí,

- c) VF_{L3} je určený maximálnou hodnotou ODF faktora hodnoteného (systémového) vedenia, t.j. platí

$$\max \left(\frac{P_{N-1}^V - P_N^V}{P_N^V} \right)_{N-1} \Rightarrow VF_{L3} \quad (2.10)$$

kde P_{N-1}^V – zaťaženie systémového vedenia V_i v stave po N-1 udalosti – vypnutia vedenia V_j ,
 P_N^V je zaťaženie hodnoteného vedenia V_i v stave N,
 P_N^V je zaťaženie vedenia V_j v stave N.

Celkové hodnotenie prevádzkového stavu **ovplyvňujúcich** vedení vychádza z definície troch lokálnych váhových faktorov:

- hodnotenie vedenia s ohľadom na zmenu zaťaženia systémových vedení po jeho vypnutí.

- a) VF_{L1} je určený maximálnou pomernou hodnotou zaťaženia systémového vedenia, ktoré je ovplyvnené vypnutím hodnoteného (ovplyvňujúceho) vedenia vztiahnutou na nominálne zaťaženie, t.j. vyhodnocuje sa maximálny vplyv vypnutého vedenia na systémové vedenie, t.j. platí

$$\max(i_{vj})_{N-1}^{vj} \Rightarrow VF_{L1} \quad (2.11)$$

- hodnotenie vedenia s ohľadom na počet ovplyvnených vedení po jeho vypnutí.

- b) VF_{L2} je počet systémových vedení, ktoré sú ovplyvnené výpadkom hodnoteného (ovplyvňujúceho) vedenia, t.j. platí

$$(n_{vj})_{N-1}^{vj} \Rightarrow VF_{L2} \quad (2.12)$$

- hodnotenie vedenia s ohľadom na veľkosť zmeny zaťaženia systémových vedení po jeho vypnutí.

- c) VF_{L3} je určený maximálnou hodnotou ODF faktora systémových vedení v oblasti zodpovednosti, ktoré sú ovplyvnené výpadkom hodnoteného (ovplyvňujúceho) vedenia, t.j. platí

$$\max\left(\frac{P_{N-1}^{vj} - P_N^{vj}}{P_N^{vj}}\right)^{vj} \Rightarrow VF_{L3} \quad (2.13)$$

Vyššie opísaným hodnotám sú v rámci ich príslušných intervalov priradené veľkosti váhových faktorov lokálneho hodnotenia tak, ako je to uvedené v

tab.2.5, tab.2.6 a tab.2.7. V uvedených tabuľkách sú veľkostiam váhových faktorov lokálneho prístupu ďalej priradené farebné označenia, ktoré vyjadrujú stupne vážnosti určených hodnôt. Definícia stupňov vážnosti zohľadňuje v prípade zaťaženia vedení neurčitost' matematických modelov, pričom v prípade ohľadu na rozsah vplyvu a veľkosť zmeny zaťaženia sa vychádza z analýzy rozsiahleho súboru výsledkov realizovaných simulačných výpočtov ustálených stavov.

Navrhnuté stupne váhových faktorov môžu byť prispôbené vzhľadom na účel hodnotenia ako napr. dispečerské riadenie elektrizačnej sústavy (príprava prevádzky a on-line monitorovanie), plán obrany alebo rozvoj sústavy.

tab.2.5 Veľkosti a stupne vážnosti váhového faktora lokálneho prístupu VF_{L1} vyjadrujúceho zaťaženie vedení v stave po výpočte N-1 udalostí

| Intervaly pomerného zaťaženia vedení v stave po N-1 udalosti | VF _{L1} |
|--|------------------|
| < 1 ; ∞) | 1 |
| < 0.9 ; 1) | 0.8 |
| < 0.8 ; 0.9) | 0.6 |
| < 0 ; 0.8) | 0.4 |

tab.2.6 Veľkosti a stupne vážnosti váhového faktora lokálneho prístupu VF_{L2} vyjadrujúceho ovplyvnenie vedení (ovplyvnené vedenia), resp. vplyv na ostané vedenia (ovplyvňujúce vedenia) v oblasti zodpovednosti po výpočte N-1 udalostí

| Intervaly počtu ovplyvnených resp. počtu ovplyvňujúcich vedení | VF _{L2} |
|--|------------------|
| < 10 ; 51 > | 1 |
| < 7 ; 9 > | 0.8 |
| < 4 ; 6 > | 0.6 |
| < 0 ; 3 > | 0.4 |

tab.2.7 Veľkosti a stupne vážnosti váhového faktora lokálneho prístupu VF_{L3} vyjadrujúceho veľkosť zmeny zaťaženia vedenia po výpočte N-1 udalostí

| Intervaly max. pomernej hodnoty ODF faktora vedenia | VF _{L3} |
|---|------------------|
| < 0.9 ; ∞) | 0.5 |
| < 0.7 ; 0.9) | 0.4 |
| < 0.5 ; 0.7) | 0.3 |
| < 0 ; 0.5) | 0.2 |

Krok 4.

Celkové lokálne hodnotenie prevádzkového stavu vedení elektrizačnej sústavy s využitím deterministického prístupu sa určí na základe súčiny všetkých váhových faktorov lokálneho hodnotenia. Intervaly veľkosti súčiny všetkých váhových faktorov lokálneho prístupu, na základe ktorých je definovaná klasifikácia celkového hodnotenia stavu prevádzky vedení, sú uvedené v tab.2.8.

K priamemu určeniu hodnotenia ovplyvnenia a ovplyvňovania vedení definovaného ako „významný“ dochádza v prípade platnosti nasledujúcej podmienky:

- ak je hodnota zaťaženia najviac zaťaženého vedenia v stave po N-1 vyššia ako 100 %.

tab.2.8 Klasifikácia celkového hodnotenia prevádzkového stavu ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení

| Celkové hodnotenie ovplyvnenia a ovplyvňovania vedení | Intervaly veľkosti súčiny všetkých VF _i | Farebné označenie |
|---|--|-------------------|
| nevýznamný | < 0.032 ; 0.072) | zelená |
| mierny | < 0.072 ; 0.128) | žltá |
| vážny | < 0.128 ; 0.32) | oranžová |
| významný | < 0.32 ; 0.5 > | červená |

2.2 Prístup hodnotenia dynamickej stability

Tento prístup je možné definovať ako princíp hodnotenia vplyvu výpadku ovplyvňujúcich vedení (definovaných v lokálnom hodnotení) na dynamickú stabilitu sústavy.

Predmetom prístupu hodnotenia dynamickej stability je rozšírenie metodiky lokálneho hodnotenia ovplyvňujúcich vedení o hodnotenie vychádzajúce z výsledkov simulačných experimentov dynamických simulácií plnenia bezpečnostného kritéria N-1 (výpadok vedenia vypnutím, výpadok vedenia vypnutím po skrate na vedení) a N-k udalostí (zlyhanie ochrany, zlyhanie výkonového vypínača

2.2.1 Dynamické simulácie

Dynamické simulácie boli realizované na dynamickom modeli elektrizačnej sústavy a ich cieľom bola identifikácia konkrétnych udalostí a scenárov s najväčším dopadom na dynamickú stabilitu sústavy. Týmto spôsobom je možné určiť tie udalosti, ktoré najviac prispievajú ku kritickej situácii.

Uvažovanou inicializačnou udalosťou v simulačných experimentoch bol 3-fázový skrat na vedeniach na napäťových hladinách 220 kV a 400 kV, pričom jeho vznik sa uvažoval v troch miestach dĺžky vedenia: 10%, 50 % a 90 %. Uvažovanie skratu v dĺžke 10% a 90% vedenia bolo zvolené z dôvodu vypínania poruchy mimo dosahu 1. zóny dištančnej ochrany.

Na základe analýzy výsledkov simulačných experimentov je možné konštatovať, že vážnejší dopad na ohrozenie dynamickej stability sústavy majú scenáre N-k udalostí, t.j. dochádza k strate viacerých prvkov sústavy. Medzi takéto scenáre patrí zlyhanie elektrických ochrán a zlyhanie výkonového vypínača. Ostatné scenáre, t.j. vypínanie skratu v rýchlych časoch, majú zanedbateľný vplyv na dynamickú stabilitu.

Pre hodnotenie stavu elektrizačnej sústavy po vzniku inicializačnej udalosti – skrat na vedení s uvažovaním daného scenára boli navrhnuté definície [34][35]:

D1 - elektrizačná sústava je stabilná,

D2 - elektrizačná sústava je stabilná s obmedzením

D3 - elektrizačná sústava je v stave ohrozenia

D4 - Elektrizačná sústava je nestabilná

D5 - elektrizačná sústava je nestabilná vo veľkom a po účinku IU dôjde k úplnej strate napätia v prenosovej sústave (blackout).

2.2.2 Analýza dynamickej stability elektrizačnej sústavy

Celkové vyhodnotenie počtu koncových stavov po vzniku IU - skrat na vedení s uvažovaním jednotlivých scenárov je podrobne uvedené v dizertačnej práci v *Prilohe 1*).

Na základe uvedených výsledkov je možné konštatovať, že najväčší podiel koncových stavov má hodnotenie D3 (46 %), t.j. po vzniku IU – skrat na vedení s uvažovaním daných scenárov je elektrizačná sústava v stave ohrozenia. Podiel koncového stavu D4 je podľa výsledkov 2,7 %, čo predstavuje malý podiel, avšak na druhej strane tento koncový stav už predstavuje vážne ohrozenie elektrizačnej sústavy, kedy je väčšia časť sústavy v beznapätovom stave, t.j. dochádza k výraznej strate výkonu vo výrobe ako aj v spotrebe. Koncový stav D5 na základe dosiahnutých výsledkov nenastal ani v jednom prípade, t.j. elektrizačná sústava by sa nedostala do nestabilného stavu vo veľkom, t.j. nedošlo by ani k úplnej strate napätia.

Celkovo je možné konštatovať, že stavy hodnotené ako D1 a D2 nepredstavujú ohrozenie elektrizačnej sústavy a ich celkový podiel z realizovaných simulačných experimentov je 51,3 %. Stavy hodnotené ako D3 a D4 môžu byť definované ako vážne koncové stavy elektrizačnej sústavy, pričom ich celkový podiel z realizovaných simulačných experimentov je 48,7 %.

Z výsledkov simulačných experimentov sú spracované početnosti koncových stavov prislúchajúce jednotlivým vedeniam pre vznik IU – skrat na vedení s uvažovaním jednotlivých scenárov. Na základe váženého priemeru (2.14) početnosti k definovaným koncovým stavom je spracované rozdelenie vedení z pohľadu ich vplyvu na dynamickú stabilitu.

$$VP_{vj} = \frac{\sum_{i=1}^n n_{D_i} \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (2.14)$$

kde VP_{vj} je vážený priemer pre prislúšné vedenie,

n_{D_i} – váha prislúchajúca koncovému stavu elektrizačnej sústavy po IU,

x_i – počet koncových stavov elektrizačnej sústavy po IU prislúchajúci výpadku konkrétneho vedenia.

Hodnotenie prevádzkového stavu elektrizačnej sústavy z pohľadu dynamickej stability sa určí v zmysle nasledovného postupu:

- zostavenie zoznamu prvých desiatich najviac ovplyvňujúcich vedení podľa lokálneho hodnotenia s využitím deterministického prístupu ,
- posúdenie vplyvu ovplyvňujúcich vedení na dynamickú stabilitu podľa početnosti koncových stavov po vzniku IU,
- určenie celkového stavu prevádzky elektrizačnej sústavy z pohľadu dynamickej stability.

Ak v zozname prvých desiatich najviac ovplyvňujúcich vedení určených podľa lokálneho hodnotenia budú aj vedenia s veľkým vplyvom na dynamickú stabilitu ES, bude hodnotenie ES z pohľadu dynamickej stability klasifikované ako „vážny stav“. Ak v danom zozname budú prevládať vedenia so zanedbateľným vplyvom na stabilitu, bude hodnotenie ES z pohľadu dynamickej stability klasifikované ako „stav bez ohrozenia stability ES“.

Je však potrebné uviesť, že súčasný návrh hodnotenia prevádzky ES z pohľadu stability predstavuje len základ a dáva priestor pre ďalšie riešenie v danej oblasti s cieľom podrobnejšieho spracovania metodiky hodnotenia prevádzky elektrizačnej sústavy.

2.3 Pravdepodobnostný prístup

Pravdepodobnostný prístup je možné definovať ako princíp hodnotenia rizika v elektrizačnej sústave na základe pravdepodobnosti výpadku ovplyvňujúcich vedení (definovaných v lokálnom hodnotení).

Návrh metodiky vychádza z výpočtu intenzity poruchovosti vedení v oblasti zodpovednosti, kedy je potrebné poznať pre každé vedenie počet udalostí za celkový sledovaný čas. To je možné matematicky vyjadriť odhadovanou frekvenciou inicializačnej udalosti podľa nasledovného vzťahu:

$$\lambda = \frac{x}{t} \quad (2.15)$$

kde λ je frekvencia výpadku vedenia,

x – počet výpadkov vedenia,

t – sledovaný čas resp. obdobie.

Vstupné údaje pre výpočet frekvencie výpadku vedení vychádzajú z ukazovateľov spoľahlivosti, konkrétne z databázy porúch, ktorú je PPS povinný v zmysle príslušnej legislatívy evidovať.

Vstupnými hodnotami pre pravdepodobnostný prístup môžu byť tiež ďalšie spoľahlivostné ukazovatele ako napr. stredná doba medzi poruchami alebo pravdepodobnosť poruchy, kedy je už potrebné vykonávať a analyzovať výpočty na základe pravdepodobnostných modelov.

Pri výpočtoch realizovaných na základe pravdepodobnostných modelov je nutná podrobná charakteristika inicializačnej udalosti, t.j. potreba kategorizácie inicializačnej udalosti s ohľadom na spôsob jej náhodného vzniku v čase. Príkladom príčin vzniku rôznych udalostí môžu byť napr. prevádzková porucha, znečistenie, poveternostné vplyvy, ľudský činiteľ a i.

Návrh metodiky pre pravdepodobnostný prístup v dizertačnej práci neuvažuje so selekciou príčin vzniku výpadku vedenia, t.j. nerozlišuje medzi príčinami, ale hodnotí dôsledok, t.j. výpadok vedenia.

Na základe posúdenia pravdepodobnosti výpadku vedení sú vedenia rozdelené do dvoch skupín: s nízkou poruchovosťou a s vysokou poruchovosťou.

Hodnotenie prevádzkového stavu elektrizačnej sústavy s využitím pravdepodobnostného prístupu sa určí v zmysle nasledovného postupu:

- zostavenie zoznamu prvých desiatich najviac ovplyvňujúcich vedení podľa lokálneho hodnotenia s využitím deterministického prístupu,
- posúdenie pravdepodobnosti výpadku ovplyvňujúcich vedení,
- určenie miery vzniku rizika celkového stavu prevádzky elektrizačnej sústavy z pohľadu pravdepodobnosti vychádzajúcej z údajov o poruchovosti ovplyvňujúcich vedení.

Ak v zozname prvých desiatich najviac ovplyvňujúcich vedení určených podľa lokálneho hodnotenia budú aj vedenia s veľkou pravdepodobnosťou výpadku (s vysokou poruchovosťou), bude hodnotenie ES z pohľadu pravdepodobnosti vzniku udalosti klasifikované ako „vysoká pravdepodobnosť vzniku rizika“. Ak v danom zozname budú prevládať vedenia s malou pravdepodobnosťou výpadku (s nízkou poruchovosťou), bude hodnotenie ES klasifikované ako „žiadna, resp. nízka pravdepodobnosť vzniku rizika“.

Je opäť potrebné uviesť, že súčasný návrh hodnotenia prevádzky ES z pohľadu pravdepodobnosti vzniku udalosti (výpadku vedenia) predstavuje len základ a dáva priestor pre ďalšie riešenie v danej oblasti s cieľom podrobnejšieho spracovania metodiky hodnotenia prevádzky elektrizačnej sústavy.

3 Verifikácia navrhutej metodiky

Cieľom tejto kapitoly dizertačnej práce je verifikovať metodiku pre hodnotenie prevádzkového stavu elektrizačnej sústavy s využitím deterministického prístupu na vybraných namodelovaných ustálených stavoch. Namodelované ustálené stavy sú vybrané s dôrazom na odlišné prevádzkové podmienky tak, aby bolo možné preukázať správnosť a univerzálnosť navrhutej metodiky.

3.1 Porovnanie vybraných prevádzkových stavov – globálne hodnotenie

V dizertačnej práci je verifikácia metodiky hodnotenia prevádzky elektrizačnej sústavy realizovaná pre vyššie uvedené vybrané ustálené stavy, ktoré sú charakteristické odlišnými prevádzkovými podmienkami z pohľadu veľkosti tranzitu, zaťaženia a topológie sústavy.

3.1.1 Zvyšovanie tranzitu

Simulačné výpočty ustáleného stavu a N-1 udalostí sú realizované pre východiskový ustálený stav s uvažovaným zvyšovaním tranzitu cez oblasť zodpovednosti. Namodelované stavy pre simuláciu zvyšovania tranzitu cez oblasť zodpovednosti nemajú rovnaký trend, t.j. zvyšovanie toku výkonu z okolitých susedných regulačných oblastí je namodelované nerovnomerne pre jednotlivé stavy, aby bolo možné preukázať správnosť a univerzálnosť metodiky pri odlišnom prerozdelení tokov výkonu cez oblasť zodpovednosti.

Simulácie zvyšovania tranzitu cez oblasť zodpovednosti sú realizované v intervale hodnôt tranzitu $P_{\text{tranzit_min}}=772$ MW až $P_{\text{tranzit_max}}=3423$ MW pri nezmenených podmienkach výroby a spotreby v oblasti zodpovednosti. Výsledky spolu s celkovým hodnotením stavov prevádzky ES pre zvýšené hodnoty tranzitu cez oblasť zodpovednosti v súlade s navrhnutou metodikou s využitím deterministického prístupu sú uvedené v tab.3.1.

Z uvedených výsledkov je možné vo všeobecnosti konštatovať, že zvýšený tranzit cez oblasť zodpovednosti pri nezmenenej výrobe a spotrebe má negatívny dopad na stav prevádzky elektrizačnej sústavy. Na druhej strane je potrebné dodať, že zvýšený tranzit nemusí vždy predstavovať ohrozenie, čo potvrdzujú výsledky niektorých simulovaných ustálených stavov.

Z uvedených výsledkov je zaujímavé porovnanie stavov hodnotenia prevádzky sústavy ES označených ako „*núdzový stav*“ pre tranzit $P_{\text{tranzit}}=1866$ MW a $P_{\text{tranzit}}=1993$ MW oproti stavu pri tranzite $P_{\text{tranzit}}=2042$ MW označený ako „*alarm*“. V prípade nižšieho tranzitu ($P_{\text{tranzit}}=1866$ MW a $P_{\text{tranzit}}=1993$ MW) cez oblasť zodpovednosti je stav prevádzky ES klasifikovaný ako „*núdzový stav*“, a preto predstavuje významné riziko z pohľadu bezpečnej a spoľahlivej prevádzky elektrizačnej sústavy v porovnaní s ustáleným stavom pri vyššom tranzite (2042 MW), kedy je stav klasifikovaný ako „*alarm*“. Hlavnými rozdielmi medzi uvedenými ustálenými stavmi sú veľkosti a stupne vážnosti váhových faktorov VF2 a VF4. V prípade nižšieho tranzitu ($P_{\text{tranzit}}=1993$ MW) dochádza k neplneniu bezpečnostného kritéria N-1 na jednom vedení (vplyv na hodnotu VF2) a navyše dochádza k zvýšeniu počtu ovplyvňujúcich vedení (hodnota VF4).

Vyššie uvedené skutočnosti potvrdzujú univerzálnosť navrhutej metodiky, dôkazom čoho je schopnosť správne klasifikovať stav ES s ohľadom na iné rozdelenie veľkosti tranzitných tokov po jednotlivých profiloch cez oblasť zodpovednosti

tab.3.1 Porovnanie globálneho hodnotenia stavu prevádzky elektrizačnej sústavy pre varianty zvyšovania tranzitu

| Variant | | VF1 | VF2 | VF3 | VF4 | Celkový stav prevádzky | súčin VF |
|---|---------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|----------|
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_772_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 0.374 | 0.464 | 0.225 | 0.333 | normálny stav | 0.013* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | | 0.026 |
| | citlivostná analýza | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | | |
| Východiskový ustálený stav (Pg_4241_Tr_1329_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 0.488 | 0.605 | 0.450 | 0.529 | normálny stav | 0.07* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | | 0.048 |
| | citlivostná analýza | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | | |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_1732_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 0.584 | 0.843 | 0.475 | 0.608 | alarm | 0.142* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.7 | | 0.123 |
| | citlivostná analýza | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.7 | | |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_1866_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 0.660 | 0.937 | 0.500 | 0.667 | núdzový stav | 0.206* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.6 | 0.9 | 0.6 | 0.8 | | 0.259 |
| | citlivostná analýza | 0.6 | 0.9 | 0.6 | 0.8 | | |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_1993_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 0.729 | 1.023 | 0.525 | 0.667 | núdzový stav | 0.261* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.7 | 1 | 0.6 | 0.8 | | 0.336 |
| | citlivostná analýza | 0.7 | 1 | 0.6 | 0.8 | | |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_2042_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 0.627 | 0.841 | 0.550 | 0.627 | alarm | 0.182* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | | 0.176 |
| | citlivostná analýza | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | | |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_2771_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 1.076 | 1.503 | 0.750 | 0.706 | ohrozenie | 0.856* |
| | hodnoty váhových faktorov | 1 | 1 | 1 | 0.9 | | 0.900 |
| | citlivostná analýza | 1 | 1 | 1 | 0.9 | | |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčtu má informatívny charakter</i> | | | | | | | |

3.1.2 Plánované vypnutia

Simulačné výpočty ustálených stavov a N-1 udalostí sú realizované pre niektoré ustálené stavy s uvažovaním vybraných plánovaných vypnutí vedení s cieľom ich porovnania. Týmto spôsobom je možná identifikácia najmenej vhodných kombinácií údržbových stavov vedení s ohľadom na riziko ohrozenia bezpečnej a spoľahlivej prevádzky elektrizačnej sústavy.

Pre východiskový ustálený stav pri hodnote tranzitu $P_{tranzit}=1329$ MW boli namodelované štyri varianty plánovaných vypnutí vedení: plánované vypnutie vedení V34, V24, plánované vypnutie vedení V34, V49, plánované vypnutie vedení V44, V34, plánované vypnutie vedení V39, V50, V51.

Výsledky spolu s celkovým hodnotením prevádzkových stavov pre príslušné varianty plánovaných vypnutí sú uvedené v tab.3.2. Na základe týchto výsledkov je možné konštatovať, že všetky varianty plánovaných vypnutí predstavujú riziko pre bezpečnú a spoľahlivú prevádzku sústavy v porovnaní s východiskovým ustáleným stavom, ktorý je hodnotený ako „normálny stav“.

Najvyššie riziko ohrozenia bezpečnej a spoľahlivej prevádzky predstavuje plánovaný výpadok vedení V39, V50, V51, ktorý je označený ako „núdzový stav“, kedy dochádza k neplneniu bezpečnostného kritéria N-1 pre jedno vedenie.

Celkový prevádzkový stav ostatných plánovaných vypnutí je hodnotený ako „alarm“, t.j. nižšie riziko ohrozenia bezpečnej a spoľahlivej prevádzky. Hoci sú tieto stavy plánovaných vypnutí hodnotené rovnakým celkovým stavom prevádzky, je ich možné porovnať na základe súčtu váhových faktorov.

tab.3.2 Porovnanie globálneho hodnotenia prevádzkových stavov pre východiskový ustálený stav (PTranzit=1329 MW) s variantmi plánovaných vypnutí vedení

| Variant | | VF1 | VF2 | VF3 | VF4 | Celkový stav prevádzky | súčín VF |
|---|---------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|----------|
| Východiskový ustálený stav (Pg_4241_Tr_1329_Ps_4577) | pomerné hodnoty | 0.477 | 0.589 | 0.400 | 0.529 | normálny stav | 0.059* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | | 0.048 |
| | citlivostná analýza | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | | 0.083* |
| Plánované vypnutie (V34, V24) | pomerné hodnoty | 0.490 | 0.616 | 0.500 | 0.551 | alarm | 0.058 |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | | 0.083* |
| | citlivostná analýza | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | | 0.075 |
| Plánované vypnutie (V34, V49) | pomerné hodnoty | 0.520 | 0.701 | 0.447 | 0.510 | alarm | 0.107* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | | 0.090 |
| | citlivostná analýza | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | | 0.322* |
| Plánované vypnutie (V44, V34) | pomerné hodnoty | 0.600 | 0.715 | 0.421 | 0.592 | alarm | 0.090 |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | | 0.343 |
| | citlivostná analýza | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | | |
| Plánované vypnutie (V39, V50, V51) | pomerné hodnoty | 0.716 | 1.146 | 0.649 | 0.604 | núdzový stav | 0.343 |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.7 | 1 | 0.7 | 0.7 | | |
| | citlivostná analýza | 0.7 | 1 | 0.7 | 0.7 | | |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčtinu má informatívny charakter</i> | | | | | | | |

3.1.3 Rekonfigurácie

Jedným z opatrení pre účely obnovenia plnenia bezpečnostného kritéria N-1 a obmedzenia výkonových tokov na preťažovaných vedeniach, resp. profiloch sa v prenosovej sústave využívajú tzv. rekonfigurácie. [37]

Cieľom tejto podkapitoly je verifikácia metodiky pre zmeny topológie prenosovej sústavy (rekonfigurácie) a ich vzájomné porovnanie s ustáleným stavom pred rekonfiguráciou. Simulačné výpočty ustáleného stavu a N-1 udalostí pre všetky rekonfigurácie sú realizované na matematickom modeli elektrizačnej sústavy podľa nasledovných zapojení: rekonfigurácia v Rz18, rekonfigurácia v Rz6_1, rekonfigurácia v Rz6_2.

Výsledky spolu s celkovým hodnotením prevádzkových stavov pre príslušné rekonfigurácie sú uvedené v tab.3.3. Hodnotenie stavu prevádzky elektrizačnej sústavy pred a po jednotlivých rekonfiguráciách je klasifikované na základe súčtin veľkosti všetkých váhových faktorov ako „núdzový stav“. Primárnym cieľom rekonfigurácie je zabezpečenie opätovného plnenia bezpečnostného kritéria N-1. Z výsledkov vyplýva, že tento cieľ nie je splnený pre rekonfiguráciu v Rz6_1, kedy dochádza k preťaženiu jedného vedenia po N-1 udalosti, konkrétne vedenie V49 (103 %) pri výpadku vedenia V48.

Pri ostatných rekonfiguráciách dochádza k opätovnému plneniu bezpečnostného kritéria N-1. V zmysle súčasných platných pravidiel riadenia elektrizačnej sústavy by bola prevádzka sústavy po opätovnom plnení N-1 považovaná za bezpečnú. Táto úvaha však nemusí byť správna, čo potvrdzujú výsledky hodnotenia stavu prevádzky ES podľa navrhutej metodiky. Po analýze všetkých váhových faktorov pre jednotlivé rekonfigurácie je možné konštatovať, že vo všetkých namodelovaných prípadoch dochádza k navýšeniu hodnôt váhových faktorov VF3 a VF4, t.j. dochádza k značnému zvýšeniu počtu ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení. To znamená, že elektrizačná sústava je podstatne „zraniteľnejšia“ napr. v prípade vzniku ďalšej udalosti, ktorá by mohla viesť k stavu „ohrozenie“. Túto skutočnosť potvrdzujú tiež súčiny váhových faktorov, ktorý je v prípade uvedených rekonfigurácií vyšší v porovnaní s ustáleným stavom pred rekonfiguráciou.

To znamená, že hoci po rekonfigurácii bude opätovne plnené N-1, v skutočnosti ide o horší celkový stav ako pred rekonfiguráciou.

Na záver je možné zhrnúť, že výsledky získané aplikovaním metodiky hodnotenia stavu prevádzky ES s využitím deterministického prístupu nevedie iba k určeniu celkového stavu prevádzky, ale poskytuje komplexný pohľad na prevádzku elektrizačnej sústavy vyjadrený hodnotami váhových faktorov.

tab.3.3 Porovnanie globálneho hodnotenia stavu prevádzky pre ustálený stav pred rekonfiguráciou s variantmi rekonfigurácií v rôznych uzloch elektrizačnej sústavy

| Variant | | VF1 | VF2 | VF3 | VF4 | Celkový stav prevádzky | súčin VF |
|---|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|---------------|
| Ustálený stav pred rekonfiguráciou (Pg_4241_Tr_2044_Ps_4577) | pomerne hodnoty | 0.707 | 1.016 | 0.525 | 0.588 | núdzový stav | 0.222* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.7 | 1 | 0.6 | 0.6 | | 0.252 |
| | citlivostná analýza | 0.7 | 1 | 0.6 | 0.6 | | |
| Rekonfigurácia v rozvodni Rz18 | pomerne hodnoty | 0.686 | 0.921 | 0.675 | 0.686 | núdzový stav | 0.293* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.6 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | | 0.346 |
| | citlivostná analýza | 0.6 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | | |
| Rekonfigurácia v rozvodni Rz6_1 | pomerne hodnoty | 0.740 | 1.030 | 0.575 | | núdzový stav | 0.292* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.7 | 1 | 0.6 | 0.8 | | 0.336 |
| | citlivostná analýza | 0.7 | 1 | 0.6 | 0.8 | | |
| Rekonfigurácia v rozvodni Rz6_2 | pomerne hodnoty | 0.637 | 0.931 | 0.625 | 0.667 | núdzový stav | 0.247* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.6 | 0.9 | 0.7 | 0.8 | | 0.302 |
| | citlivostná analýza | 0.6 | 0.9 | 0.7 | 0.8 | | |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčinnu má informatívny charakter</i> | | | | | | | |

3.1.4 Rozvoj elektrizačnej sústavy

Navrhnutá metodika je aplikovaná tiež pre hodnotenie variantov rozvoja ES. Cieľom je hodnotenie prevádzkových stavov ES pri uvažovaní rozšírenia sústavy napr. o ďalšie zdroje, vedenia v rámci oblasti zodpovednosti a medzinárodné vedenia. Týmto spôsobom je možné posúdiť vplyv zvýšeného objemu výroby na prevádzku sústavy, ako aj posúdiť potrebu alebo opodstatnenosť výstavby nových vedení.

Východiskovým stavom je ustálený stav s tranzitom $P_{tranzit}=1329$ MW, ktorý je rozšírený o nasledovné varianty rozšírenia sústavy: pripojenie výroby G2 (+1020 MW), pripojenie vedení V52, V53 v rámci oblasti zodpovednosti, pripojenie medzinárodných vedení V54, V55, V56.

Výsledky spolu s celkovým hodnotením prevádzkových stavov pre príslušné varianty rozvoja sústavy sú uvedené v tab.3.4.

tab.3.4 Porovnanie globálneho hodnotenia prevádzkových stavov pre východiskový ustálený stav ($P_{tranzit}=1329$ MW) s variantmi rozvoja elektrizačnej sústavy

| Variant | | VF1 | VF2 | VF3 | VF4 | Celkový stav prevádzky | súčin VF |
|--|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|---------------|
| Východiskový ustálený stav (Pg_4241_Tr_1329_Ps_4577) | pomerne hodnoty | 0.477 | 0.589 | 0.400 | 0.529 | normálny stav | 0.059* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | | 0.048 |
| | citlivostná analýza | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | | |
| Pripojenie výroby G2 (+1020 MW) (Pg_5261_Tr_1013_Ps_4577) | pomerne hodnoty | 0.495 | 0.748 | 0.475 | 0.549 | alarm | 0.097* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | | 0.060 |
| | citlivostná analýza | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | | |
| Pripojenie vedení V52, V53 (Pg_5261_Tr_1071_Ps_4577) | pomerne hodnoty | 0.548 | 0.754 | 0.310 | 0.472 | normálny stav | 0.06* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | | 0.050 |
| | citlivostná analýza | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.5 | | |
| Pripojenie medzinárodných vedení V54, V55, V56 (Pg_5261_Tr_1160_Ps_4577) | pomerne hodnoty | 0.378 | 0.610 | 0.311 | 0.500 | normálny stav | 0.036* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | | 0.038 |
| | citlivostná analýza | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | | |
| Pripojenie medzinárodných vedení V54, V55, V56 (Pg_5261_Tr_2133_Ps_4577) | pomerne hodnoty | 0.596 | 0.793 | 0.533 | 0.696 | alarm | 0.176* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | | 0.120 |
| | citlivostná analýza | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | | |
| Pripojenie medzinárodných vedení V54, V55, V56 (Pg_5261_Tr_2930_Ps_4577) | pomerne hodnoty | 0.819 | 1.073 | 0.778 | 0.786 | ohrozenie | 0.537* |
| | hodnoty váhových faktorov | 0.8 | 1 | 1 | 1 | | 0.800 |
| | citlivostná analýza | 0.8 | 1 | 1 | 1 | | |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčinnu má informatívny charakter</i> | | | | | | | |

Na základe výsledkov hodnotenia prevádzkových stavov ES je možné konštatovať, že pripojením výroby s výkonom $P_{G2}=1020$ MW sa sústava dostáva do stavu hodnoteného ako „alarm“. Porovnaním s východiskovým ustáleným stavom, dochádza k zvýšeniu hodnoty váhového faktora VF2, t.j. zvýši sa hodnota najviac zaťaženého vedenia po N-1.

Následne je model ES rozšírený o vedenia V52, V53 v oblasti zodpovednosti a stav prevádzky sústavy je hodnotený ako „normálny stav“. Ďalej sú do modelu pripojené tri medzinárodné vedenia V54, V55, V56 a prevádzkový stav je klasifikovaný ako „normálny stav“, kde sa navyše porovnaním súčinnu váhových faktorov potvrdzuje predpoklad zlepšenia prevádzkového stavu pripojením týchto vedení v porovnaní s predošlým stavom. Tým môže byť potvrdená opodstatnenosť pripojenia nových vedení do elektrizačnej sústavy, kedy dochádza k zvýšeniu bezpečnej a spoľahlivej prevádzky.

Model ES s novými medzinárodnými vedeniami (V54, V55, V56) je ďalej analyzovaný pre zvyšovanie tranzitu. Pre prípad zvýšenia tranzitu na $P_{tranzit}=2133$ MW je prevádzkový stav hodnotený ako „alarm“, čo je spôsobené zvýšením bezpečnostného kritéria N-1 pre jedno vedenie (hodnota VF2) a navyše počet ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení.

Pre prípad zvýšenia hodnoty tranzitu na $P_{tranzit}=2930$ MW je prevádzkový stav hodnotený ako „ohrozenie“, kedy je sústava v nepripustnom stave z pohľadu bezpečnosti a spoľahlivosti. Tento stav je charakterizovaný neplnením bezpečnostného kritéria N-1 pre jedno vedenie (hodnota VF2) a navyše elektrizačná sústava je výrazne zraniteľná z pohľadu počtu ovplyvnených (hodnota VF3) a ovplyvňujúcich vedení (hodnota VF4).

Na záver je možné zhrnúť, že navrhnutá metodika hodnotenia prevádzkových stavov má aplikačné využitie aj pre posudzovanie rozvoja sústavy. Verifikácia metodiky pre zmeny topológie sústavy pri uvažovaní variantov rozvoja sústavy dokázala správnosť predpokladov v zmysle stanovenia celkových prevádzkových stavov pre vybrané zmeny, čo tiež dokazuje univerzálnosť jej využitia.

3.2 Porovnanie vybraných prevádzkových stavov – lokálne hodnotenie

3.2.1 Zvyšovanie tranzitu

Z uvedených výsledkov lokálneho hodnotenia vyplýva, že zvýšený tranzit cez oblasť zodpovednosti pri nezmenenej výrobe a spotrebe má negatívny dopad na stav bezpečnej a spoľahlivej prevádzky elektrizačnej sústavy z pohľadu početnosti ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení a vážnosti ovplyvnenia, resp. vplyvu. To znamená, že so zvyšovaním tranzitu narastá počet ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení, príp. dochádza k zhoršeniu prevádzkových stavov jednotlivých vedení.

Túto skutočnosť dokazuje porovnanie výsledkov lokálneho (tab.3.5) a globálneho hodnotenia (tab.3.1) s využitím deterministického prístupu, kedy možno poukázať na ich vzájomnú previazanosť, pričom lokálne hodnotenie dopĺňa globálne o podrobnejší prehľad o prevádzkovom stave jednotlivých vedení.

tab.3.5 Celkové lokálne hodnotenie prevádzkového stavu vedení pre varianty zvyšovania hodnoty tranzitu

| Variant | Celkový rozsah vážnosti ovplyvnenia a ovplyvňovania | ne významný | | mierny | | významný | | významný | | Celkový počet vedení |
|---|---|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| | | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | |
| Východiskový ustálený stav (Pg_4241_Tr_1329_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 35 | 87,5 | 5 | 12,5 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 46 | 90,2 | 5 | 9,8 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 51 |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_1462_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 34 | 85,0 | 6 | 15,0 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 43 | 84,3 | 8 | 15,7 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 51 |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_1732_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 30 | 75,0 | 9 | 22,5 | 1 | 2,5 | 0 | 0,0 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 42 | 82,4 | 9 | 17,6 | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 51 |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_2122_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 29 | 72,5 | 9 | 22,5 | 1 | 2,5 | 1 | 2,5 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 37 | 72,5 | 13 | 25,5 | 0 | 0,0 | 1 | 2,0 | 51 |
| Ustálený stav (Pg_4241_Tr_2771_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 24 | 60,0 | 10 | 25,0 | 3 | 7,5 | 3 | 7,5 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 20 | 39,2 | 13 | 25,5 | 2 | 3,9 | 16 | 31,4 | 51 |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčinnu má informatívny charakter</i> | | | | | | | | | | |

3.2.2 Plánované vypnutia

Porovnanie výsledkov lokálneho hodnotenia prevádzkových stavov vedení s využitím deterministického prístupu pre plánované vypnutia je uvedené v tab.3.6.

Z uvedených výsledkov lokálneho hodnotenia vyplýva, že s uvažovaním plánovaných vypnutí vedení dochádza k zvýšeniu početnosti ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení a vážnosti vplyvu, čo môže mať negatívny dopad na bezpečnosť prevádzky sústavy.

Výsledky navrhutej metodiky lokálneho hodnotenia sú aj v tomto prípade previazané a korešponujú s výsledkami metodiky globálneho hodnotenia (tab.3.2).

tab.3.6 Celkové lokálne hodnotenie prevádzkového stavu vedení pre varianty plánovaných vypnutí

| Variant | Celkový rozsah vážnosti ovplyvnenia a ovplyvňovania | nevážnamý | | mierny | | vážny | | významný | | Celkový počet vedení |
|--|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| | | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | |
| Východiskový ustálený stav (Pg_4241_Tr_1329_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 35 | 87.5 | 5 | 12.5 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 46 | 90.2 | 5 | 9.8 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 51 |
| Plánované vypnutie (V34, V49) | Ovplyvnené vedenia | 33 | 86.8 | 5 | 13.2 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 38 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 46 | 93.9 | 3 | 6.1 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 49 |
| Plánované vypnutie (V44, V34) | Ovplyvnené vedenia | 33 | 86.8 | 3 | 7.9 | 2 | 5.3 | 0 | 0.0 | 38 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 46 | 93.9 | 3 | 6.1 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 49 |
| Plánované vypnutie (V39, V50, V51) | Ovplyvnené vedenia | 29 | 78.4 | 3 | 8.1 | 4 | 10.8 | 1 | 2.7 | 37 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 35 | 72.9 | 12 | 25.0 | 0 | 0.0 | 1 | 2.1 | 48 |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčtu má informatívny charakter</i> | | | | | | | | | | |

3.2.3 Rekonfigurácie

Porovnanie výsledkov lokálneho hodnotenia prevádzkových stavov vedení s využitím deterministického prístupu pre rekonfigurácie je uvedené v tab.3.7. Z uvedených výsledkov lokálneho hodnotenia vyplýva, že zmenou topológie sústavy (rekonfiguráciou) môže dôjsť k zvýšeniu početnosti ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení a vážnosti vplyvu oproti stavu pred rekonfiguráciou.

Porovnaním rekonfigurácií v rozvodni Rz18 a Rz6_1 z pohľadu počtu ovplyvnených vedení je zrejme, že rekonfigurácia v rozvodni Rz18 predstavuje väčšie riziko pre bezpečnú prevádzku sústavy. To je spôsobené vyšším počtom ovplyvnených vedení, ale najmä vyšším počtom vedení, ktorých rozsah ovplyvnenia je klasifikovaný ako „vážny“, hoci pre rekonfiguráciu v rozvodni Rz6_1 je rozsah ovplyvnenia pre jedno vedenie klasifikovaný ako „významný“. Túto skutočnosť potvrdzujú tiež hodnoty váhových faktorov VF3 v globálnom hodnotení (tab.3.3).

tab.3.7 Celkové lokálne hodnotenie prevádzkového stavu vedení pre varianty rekonfigurácií

| Variant | Celkový rozsah vážnosti ovplyvnenia a ovplyvňovania | nevážnamý | | mierny | | vážny | | významný | | Celkový počet vedení |
|---|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|
| | | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | |
| Ustálený stav pred rekonfiguráciou (Tr_2044) | Ovplyvnené vedenia | 30 | 75.0 | 8 | 20.0 | 1 | 2.5 | 1 | 2.5 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 39 | 76.5 | 11 | 21.6 | 0 | 0.0 | 1 | 2.0 | 51 |
| Rekonfigurácia v rozvodni Rz18 | Ovplyvnené vedenia | 28 | 70.0 | 6 | 15.0 | 6 | 15.0 | 0 | 0.0 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 40 | 78.4 | 9 | 17.6 | 2 | 3.9 | 0 | 0.0 | 51 |
| Rekonfigurácia v rozvodni Rz6_1 | Ovplyvnené vedenia | 28 | 70.0 | 10 | 25.0 | 1 | 2.5 | 1 | 2.5 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 37 | 72.5 | 13 | 25.5 | 0 | 0.0 | 1 | 2.0 | 51 |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčtu má informatívny charakter</i> | | | | | | | | | | |

Z pohľadu počtu ovplyvňujúcich vedení predstavuje väčšie riziko pre bezpečnú prevádzku sústavy rekonfigurácia v rozvodni Rz6_1, čo spôsobuje vplyv jedného vedenia, ktorého rozsah vplyvu na ostatné vedenia je klasifikovaný ako „významný“. Výpadok tohto vedenia by spôsobil neplnenie bezpečnostného kritéria N-1.

Výsledky navrhutej metodiky lokálneho hodnotenia pre rekonfigurácie sú previazané a tiež korešponujú s výsledkami metodiky globálneho hodnotenia.

3.2.4 Rozvoj elektrizačnej sústavy

Porovnanie výsledkov lokálneho hodnotenia prevádzkových stavov vedení pre varianty rozvoja elektrizačnej sústavy je uvedené v tab.3.8.

V nadväznosti na predchádzajúce porovnanie navrhutej metodiky lokálneho hodnotenia prevádzkového stavu vedení je možné konštatovať, že všetky výsledky sú previazané a tiež korešpondujú s výsledkami globálneho hodnotenia (tab.3.4) prevádzkových stavov s využitím deterministického prístupu.

tab.3.8 Celkové lokálne hodnotenie prevádzkového stavu vedení pre varianty rozvoja elektrizačnej sústavy

| Variant | Celkový rozsah vážnosti ovplyvnenia a ovplyvňovania | nevýznamný | | mierny | | vážny | | významný | | Celkový počet vedení |
|--|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------|
| | | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | počet [-] | počet [%] | |
| Východiskový ustálený stav (Pg_4241_Tr_1329_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 35 | 87.5 | 5 | 12.5 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 46 | 90.2 | 5 | 9.8 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 51 |
| Pripojenie výroby G2 (1020 MW) (Pg_5261_Tr_1013_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 35 | 87.5 | 3 | 7.5 | 2 | 5.0 | 0 | 0.0 | 40 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 46 | 90.2 | 5 | 9.8 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 51 |
| Pripojenie vedení V52, V53 (Pg_5261_Tr_1071_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 39 | 92.9 | 3 | 7.1 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 42 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 50 | 94.3 | 3 | 5.7 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 53 |
| Pripojenie medzinárodných vedení V54, V55, V56 (Pg_5261_Tr_1160_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 41 | 91.1 | 4 | 8.9 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 45 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 53 | 94.6 | 3 | 5.4 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 56 |
| Pripojenie medzinárodných vedení V54, V55, V56 (Pg_5261_Tr_2133_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 37 | 82.2 | 7 | 15.6 | 1 | 2.2 | 0 | 0.0 | 45 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 49 | 87.5 | 7 | 12.5 | 0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 56 |
| Pripojenie medzinárodných vedení V54, V55, V56 (Pg_5261_Tr_2930_Ps_4577) | Ovplyvnené vedenia | 28 | 62.2 | 10 | 22.2 | 6 | 13.3 | 1 | 2.2 | 45 |
| | Ovplyvňujúce vedenia | 27 | 48.2 | 23 | 41.1 | 5 | 8.9 | 1 | 1.8 | 56 |
| <i>Poznámka:</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Pg - výroba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Tr - tranzit cez oblasť zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>Ps - spotreba v oblasti zodpovednosti</i> | | | | | | | | | | |
| <i>* - výsledok súčtinnu má informatívny charakter</i> | | | | | | | | | | |

4 Prínos práce pre prax

Plnenie bezpečnostného kritéria N-1 sa považuje za nutnú podmienku pre zabezpečenie prevádzkovej bezpečnosti elektrizačnej sústavy a zároveň je prevenciou pred efektom kaskádového vypínania vedení s dopadom mimo oblastí zodpovednosti daného PPS. Simulačné overovanie plnenia N-1 poskytuje informácie o dôsledkoch po vzniku N-1 udalosti na ES, čím zároveň umožňuje prípravu adekvátnych nápravných opatrení s cieľom zabrániť prevádzkovým obmedzeniam alebo efektu kaskádového vypínania prvkov ES.

V rámci synchronne prepojenej sústavy sa v súčasnosti využíva pre výmenu on-line informácií výstražný systém EAS, ktorý okrem iných prevádzkových veličín vyhodnocuje tiež analýzu bezpečnostného kritéria N-1. Na základe monitorovaných prevádzkových veličín sa rozlišuje niekoľko kategórií stavov definovaných pomocou semafora. V súvislosti s plnením bezpečnostného kritéria N-1 ako jedného zo vstupných ukazovateľov pre stanovenie celkového stavu prevádzky sústavy je toto kritérium vyhodnocované „binárne“, t.j. „*podmienka plnenia kritéria N-1 je splnená*“ alebo „*podmienka plnenia kritéria N-1 nie je splnená*“.

Cieľom dizertačnej práce bolo nájsť komplexnejší pohľad na prevádzkový stav ES a definovať postup pre hodnotenie stavu ES založeného na výsledkoch výpočtu ustáleného stavu, t.j. hodnotenie určené deterministickým prístupom.

V dizertačnej práci je spracovaný návrh metodiky hodnotenia prevádzkových stavov ES s využitím troch prístupov, pričom podrobne je spracovaný návrh deterministického prístupu s globálnym a lokálnym hodnotením prevádzky elektrizačnej sústavy. Obe hodnotenia sú založené na deterministickom prístupe klasifikácie prevádzkových stavov elektrizačnej sústavy s cieľom určenia dôsledkov po vzniku N-1 udalosti, určené na základe vopred determinovaných ohraničení a kritérií vychádzajúcich z výsledkov a analýz simulačných experimentov N-1 udalostí.

Ďalšími naznačenými prístupmi hodnotenia prevádzkových stavov je prístup hodnotenia dynamickej stability sústavy po vzniku IU s uvažovaním daných scenárov a pravdepodobnostný prístup vzniku N-1 udalosti. Oba prístupy vychádzajú z výsledkov lokálneho hodnotenia ES, výsledkom ktorého je stanovenie zoznamu najviac ovplyvňujúcich vedení. Návrh týchto prístupov tvorí iba základnú myšlienku nových hodnotení, ktoré je potrebné ďalej analyzovať a doplniť podrobnejším spracovaním. Riešenie uvedenej problematiky môže byť predmetom ďalších dizertačných prác s cieľom návrhu plnohodnotných nástrojov hodnotenia prevádzkových stavov.

V dizertačnej práci je podrobne rozpracovaná metodika hodnotenia prevádzkových stavov elektrizačnej sústavy založená na simulačných výpočtoch bezpečnostného kritéria N-1. Posúdenie prevádzkových stavov je založené na komplexnejšom využití výsledkov bezpečnostného kritéria N-1. Navrhovaná metodika nedáva len odpoveď, či kritérium N-1 je splnené, ale aj ako je kritérium plnené, resp. neplnené. Na základe výsledkov sa dajú odlišiť a porovnať stavy ES, pri ktorých je N-1 nesplnené a povedať, ktorý „zlý“ stav je horší, alebo opačne porovnať stavy, kedy je N-1 splnené a povedať, ktorý „dobrý“ stav je lepší.

Silnou stránkou navrhutej metodiky s využitím deterministického prístupu je univerzálnosť potvrdená verifikáciou rozsiahleho súboru namodelovaných prevádzkových stavov uvedených v dizertačnej práci. Spoločným menovateľom globálneho a lokálneho hodnotenia je definícia váhových faktorov, na základe ktorých sú klasifikované celkové hodnotenia prevádzkových stavov. Zároveň je potrebné uviesť, že veľkosti a hodnoty váhových faktorov je potrebné prispôsobiť danej regulačnej oblasti, pre ktorú by sa metodika implementovala. Váhové faktory je potrebné určiť na základe citlivostnej analýzy výsledkov veľkého počtu ustálených stavov tak, ako je to realizované v tejto dizertačnej práci. Táto skutočnosť vyplýva z jedinečnosti každej elektrizačnej sústavy, ktorú môže charakterizovať napr. rozsiahlosť, geografická poloha, zdrojová základňa a i.

Vzhľadom na univerzálnosť navrhovanej metodiky hodnotenia stavu ES s využitím deterministického prístupu môže mať v praxi široké uplatnenie, a to konkrétne v dispečerskom riadení, operatívnom riadení elektrizačnej sústavy, príprave plánov obrany, rovnako však aj pri návrhu plánov rozvoja sústavy.

Výhodou navrhnujetej metodiky je možnosť jej optimalizácie na základe veľkosti váhových faktorov vzhľadom na rôzne úrovne dispečerského riadenia. To znamená, že pre prípravu prevádzky, plán obrany a rozvoj elektrizačnej sústavy je možné uvažovať konzervatívnejšie hodnotenie, s prísnejšou úpravou intervalov jednotlivých váhových faktorov a to najmä z dôvodu rezervy pre neurčitú matematických modelov. V prípade operatívneho riadenia je možné uvažovať s jemnejšou úpravou hraníc jednotlivých váhových faktorov, nakoľko dispečer by mal byť informovaný o výstražnom stave iba v prípade vyššieho rizika ohrozenia prevádzky sústavy.

4.1 Aplikácia metodiky v dispečerskom riadení

Dispečerské riadenie v sebe zahŕňa okrem iného najmä prípravu prevádzky a operatívne riadenie prevádzky elektrizačnej sústavy.

Verifikácia navrhnujetej metodiky je realizovaná na modelovaných ustálených stavoch pre rôzne konfigurácie elektrizačnej sústavy, vybrané plánované vypnutia zariadení a vybrané rekonfigurácie.

4.1.1 Príprava prevádzky

Na úrovni prípravy prevádzky, ktorej cieľom je vytvorenie podmienok na bezpečnú, spoľahlivú a hospodárnu prevádzku elektrizačnej sústavy, môže mať navrhnutá metodika prínos pri hľadaní optimálnych konfigurácií pre plánované vypnutia.

Výsledky uvedené v dizertačnej práci ukazujú, že podľa navrhnujetej metodiky je možné ohodnotiť vplyv plánovaných vypnutí prvkov ES (údržbových stavov) na prevádzkový stav ES. Preto v rámci prípravy prevádzky môže mať navrhnutá metodika prínos predovšetkým pri plánovaní a koordinácii plánovaných vypínaní silových zariadení v elektrizačnej sústave. Konkrétny prínos metodiky súvisí s analýzou a definíciou zoznamu vhodného resp. nevhodného vypínania jednotlivých silových zariadení alebo rôznych kombinácií návrhu údržby prvkov.

Z pohľadu stanovenia dobrého prevádzkového stavu a garancie potrebnej úrovne bezpečnosti a spoľahlivosti sústavy pre plánovacie horizonty odstavok silových zariadení v koordinácii s odstavkou zariadení na výrobu elektriny môže mať navrhnutá metodika prínos pri identifikácii neprípustných kombinácií týchto odstavok za účelom zaistenia efektívnej prevádzky sústavy a zvýšenia koordinovaného prevádzkového plánovania v rámci synchronne prepojenej sústavy.

4.1.2 Operatívne riadenie

Na úrovni operatívneho riadenia prevádzky je cieľom zabezpečenie nepretržitého riadenia prevádzky elektrizačnej sústavy podľa zámerov dennej prípravy prevádzky so súčasným riešením vplyvov nepredvídateľných udalostí v zmysle prevádzkovej bezpečnosti sústavy.

Prínos navrhnujetej metodiky v operatívnom riadení je v možnosti on-line vyhodnocovania prevádzkového stavu sústavy, kde v zmysle povinnosti vykonávať automatické simulačné výpočty bezpečnostného kritéria N-1 pre jednoduché typy nepredvídateľných udalostí a definované mimoriadne nepredvídateľné udalosti s periodicitou najmenej 15 minút, môže byť hodnotený aktuálny stav prevádzky nielen z pohľadu plnenie alebo neplnenia N-1, ale aj kvantifikovania ako je bezpečnostné kritérium N-1 plnené, resp. neplnené.

Táto možnosť využitia môže byť doplnená o manuálne výpočty v off-line režime s cieľom zmiernenia nepredvídateľných udalostí, naplánovania protipatrení a diagnostiky účinnosti nápravných opatrení.

Návrh metodiky hodnotenia prevádzkových stavov spracovaný v dizertačnej práci vychádza zo simulačných výpočtov N-1 udalostí. Pre on-line vyhodnocovanie prevádzkových stavov sústavy je však potrebné zohľadniť väčší počet aspektov, nakoľko bezpečnú a stabilnú prevádzku sústavy nie je možné posúdiť iba na základe zaťaženia jednotlivých prvkov. Z tohto dôvodu by mala byť navrhnutá metodika pre on-line hodnotenie ES doplnená o ďalšie prevádzkové ukazovatele, ktorých hodnoty sú prevádzkovateľmi sústav monitorované, konkrétne hodnoty napätí v jednotlivých uzloch sústavy, rezerva reaktančného výkonu, dostupnosť PpS.

4.2 Aplikácia metodiky pre prípravu plánov obrany

Plán obrany predstavuje systém preventívnych opatrení na zabránenie vzniku systémových porúch, ich ďalšieho šírenia a zvládnutie kritických stavov v elektrizačnej sústave, kedy v prípade kritického stavu je potrebné udržať elektrizačnú sústavu v stabilnej prevádzke.

Na úrovni plánov obrany, ktorých cieľom je vytvorenie podmienok pre riešenie problematiky prevencie a eliminácie závažných systémových porúch, môže mať navrhnutá metodika prínos pri identifikácii nepredvídateľných porúch a hodnotení ich dopadov na prevádzku elektrizačnej sústavy.

Na základe výsledkov je možné následne definovať jednotlivé nepredvídateľné udalosti, príp. ich kombinácie, s významným rizikom ohrozenia a dopadom na prevádzkovú bezpečnosť elektrizačnej sústavy. Takto určené nepredvídateľné udalosti, príp. ich kombinácie, môžu byť potom doplnené do zoznamu nepredvídateľných udalostí, ktorý musí byť aktualizovaný minimálne raz ročne.

Prínos navrhnutej metodiky v plánoch obrany je tiež v možnosti definovania opatrení pre zabránenie a pre zníženie preťaženia jednotlivých prvkov v elektrizačnej sústave.

4.3 Aplikácia metodiky pre prípravu plánov rozvoja

Aplikačné využitie navrhnutej metodiky je možné tiež pre hodnotenie prevádzkových stavov a vplyv na prevádzkovú bezpečnosť, spoľahlivosť a stabilitu pri uvažovaní rozšírenia sústavy napr. o ďalšie zdroje, vedenia v rámci oblasti zodpovednosti a medzinárodné vedenia, kedy je možné posúdiť vplyv zmien vo výrobe alebo spotrebe na prevádzku sústavy, upozorniť na potrebu resp. preukázať opodstatnenosť rozšírenia sústavy o nové prvky v elektrizačnej sústave.

5 Záver

V súčasnosti sa v riadení elektrizačnej sústavy sústreďuje veľká pozornosť na zvyšovanie bezpečnosti prevádzky elektrizačnej sústavy. Opodstatnenosť a potrebu rozvíjania tejto filozofie potvrdzujú viaceré rozsiahle systémové poruchy, ktoré nastali v uplynulých dekádoch na celom svete. Príkladom sú systémové poruchy typu blackout v USA, Taliansku alebo rozpad do ostrovných prevádzok v synchrónne prepojenej sústave v Európe. Príčinou vzniku týchto porúch bol prienik viacerých udalostí, avšak vo všetkých prípadoch bol jedným spoločným nedodrzaným ukazovateľom neplnenie bezpečnostného kritéria N-1.

V úvode dizertačnej práce, v opise súčasného stavu riešenej problematiky je pozornosť zameraná na spracovanie opisu spoločného cieľa všetkých PPS v prepojenej sústave, ktorým je definovanie spoločných štandardov a pravidiel pri riešení iných ako normálnych prevádzkových stavov, čo znamená zameranie pozornosti na zvyšovanie bezpečnosti a spoľahlivosti elektrizačnej sústavy. Dizertačná práca v teoretickej časti komplexne spracúva analýzu prevádzkovej bezpečnosti a spoľahlivosti s podrobnejším pohľadom na diferenciu významu pojmov bezpečnosť a spoľahlivosť, ktorých význam sa častokrát unifikuje alebo zamieňa. Opis tejto problematiky vychádza zo štandardov a pravidiel dohodnutých na medzinárodnej úrovni v rámci ENTSO-E asociovanými s národnými predpismi slovenského prevádzkovateľa prenosovej sústavy SEPS, a.s.

V teoretickej časti je ďalej spracovaná problematika bezpečnostného kritéria N-1, ktoré je v dispečerskom a operatívnom riadení prevádzky sústavy považované za nevyhnutnú podmienku pre zabezpečenie prevádzkovej bezpečnosti elektrizačnej sústavy. Dizertačná práca analyzuje bezpečnostné kritérium z pohľadu požiadaviek, postupov a hodnotenia výpočtov tohto kritéria. Pri analýzach prevádzky elektrizačnej sústavy sa častokrát uvádzajú v súvislosti s výpočtami a simuláciami plnenia bezpečnostného kritéria N-1 pojmy – nepredvídateľné udalosti. V nadväznosti na nepredvídateľné udalosti sú zhodnotené postupy pre identifikáciu obmedzení a postupy pre hodnotenie vplyvu externých nepredvídateľných udalostí na oblasť zodpovednosti vyplývajúcej z medzinárodných odporúčaní asociácie ENTSO-E schválených v prevádzkovej príručke pre kontinentálnu Európu.

V dizertačnej práci je uvedený aktuálne využívaný postup hodnotenia stavu ES v prepojenej európskej sústave pomocou informačného nástroja pre výmenu on-line informácií, vďaka ktorým môžu PPS včas identifikovať a hodnotiť potenciálne nebezpečné prevádzkové stavy. V tejto kapitole sú tiež podrobne uvedené kategórie prevádzkových stavov, ktoré PPS rozlišujú pri ich hodnotení.

Problematika stability elektrizačnej sústavy je v dizertačnej práci analyzovaná najmä v spojení s rôznymi formami nestability (stabilita uhla, napäťová stabilita, frekvenčná stabilita). Posúdenie stability ES v sebe zahŕňa určenie charakteru nestability, významnosť poruchy a tiež časový rámeč. Simulačné experimenty a ich hodnotenie, ktoré sú náplňou praktickej časti dizertačnej práce, vychádzajú z navrhutej metodiky pre hodnotenie prevádzkových stavov elektrizačnej sústavy. Návrh metodiky je založený na analýze výsledkov simulačných výpočtov N-1 udalostí s využitím rôznych prístupov s cieľom získať komplexnejší pohľad na využitie bezpečnostného kritéria N-1 v porovnaní so súčasnými metódami a postupmi v praxi.

Návrh metodiky hodnotenia prevádzkových stavov definuje tri odlišné prístupy, pričom v dizertačnej práci je podrobne spracovaný deterministický prístup vychádzajúci z výpočtov ustálených stavov s globálnym a lokálnym hodnotením prevádzky elektrizačnej sústavy. Obe hodnotenia sú založené na deterministickom prístupe, t.j. na určení dôsledkov po výpočte N-1 udalostí na základe vopred determinovaných ohraničení a kritérií vychádzajúcich z výsledkov a analýz simulačných experimentov. Globálne hodnotenie posudzuje celkový stav prevádzky elektrizačnej sústavy komplexne, pričom lokálne hodnotenie určuje rozsah vážnosti ovplyvnenia a ovplyvňovania jednotlivých vedení.

Ďalšími návrhmi hodnotenia prevádzkových stavov sú prístup hodnotenia dynamickej stability sústavy a pravdepodobnostný prístup. Oba prístupy vychádzajú z výsledkov lokálneho hodnotenia - stanovenia zoznamu ovplyvňujúcich vedení. Prístup hodnotenia dynamickej stability posudzuje hodnotenie vplyvu výpadku ovplyvňujúcich vedení na dynamickú stabilitu sústavy vychádzajúc z výsledkov simulačných experimentov dynamických simulácií pre IU skrat na vedení s uvažovaním daných scenárov. Pravdepodobnostný prístup posudzuje hodnotenie vzniku rizika v sústave na základe pravdepodobnosti výpadku ovplyvňujúcich vedení vychádzajúc z výpočtu intenzity poruchovosti vedení v oblasti zodpovednosti za celkový sledovaný čas. Návrh týchto prístupov tvorí iba základnú myšlienku nových hodnotení, ktoré je potrebné ďalej analyzovať a doplniť podrobnejším spracovaním.

Navrhnutá metodika deterministického prístupu s globálnym a lokálnym hodnotením ES je verifikovaná pre rôzne ustálené stavy s ohľadom na zmeny tranzitných tokov, plánované vypnutia (údržbové stavy), zmeny zaťaženia, zmeny topológie a rozvoj elektrizačnej sústavy.

Na základe porovnania výsledkov globálneho hodnotenia ES pre zmeny veľkosti tranzitných tokov je možné konštatovať, že zvýšený tranzit cez oblasť zodpovednosti pri nezmenenej výrobe a spotrebe má negatívny dopad na stav prevádzky elektrizačnej sústavy. Na druhej strane, zvýšený tranzit nemusí vždy predstavovať vyššie riziko ohrozenia prevádzky. To znamená, že posudzovaný prevádzkový stav môže byť charakteristický odlišným prerozdelením zaťaženia na medzinárodných vedeniach, čo potvrdzujú aj výsledky niektorých simulovaných ustálených stavov.

Z analýzy výsledkov globálneho hodnotenia pre plánované vypnutia je možné konštatovať, že všetky modelované varianty plánovaných vypnutí predstavujú vyššie riziko ohrozenia bezpečnej prevádzky sústavy. V rámci prípravy prevádzky ES môže mať navrhnutá metodika prínos predovšetkým pri plánovaní a koordinácii plánovaných vypínaní silových zariadení v elektrizačnej sústave, pretože je možné pomocou globálneho hodnotenia vyhodnotiť vplyv zmien v topológii v ES na jej bezpečnosť.

Porovnaním výsledkov globálneho hodnotenia pre zmeny topológie (rekonfigurácie) je možné konštatovať, že navrhnutá metodika identifikovala vhodnosť a úspešnosť modelovaných rekonfigurácií s ohľadom na opätovnú platnosť kritéria N-1. Pridanou hodnotou metodiky je poskytnutie komplexnejšej informácie o hodnotenom prevádzkovom stave po rekonfiguráciách, kedy prišlo k opätovnému plneniu bezpečnostného kritéria N-1. V niektorých prípadoch bol celkový stav hodnotený horšie. V zmysle súčasných platných pravidiel riadenia elektrizačnej sústavy by bola prevádzka sústavy po opätovnom plnení N-1 považovaná za bezpečnú. Táto úvaha však nemusí byť správna, čo potvrdzujú výsledky hodnotenia podľa navrhnutej metodiky. Po analýze výsledkov jednotlivých rekonfigurácií je možné konštatovať, že vo všetkých namodelovaných prípadoch dochádza k značnému zvýšeniu počtu ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení. To znamená, že elektrizačná sústava je podstatne „zraniteľnejšia“ napr. v prípade ďalšej udalosti. To znamená, že hoci po rekonfigurácii bude opätovne plnené N-1, v skutočnosti ide o horší celkový stav ako pred rekonfiguráciou.

Aplikácia navrhnutej metodiky je realizovaná tiež pre simulačné výpočty zmien v topológii s uvažovaním rozvoja elektrizačnej sústavy. Výsledky globálneho hodnotenia prevádzkových stavov pre rozvoj sústavy potvrdili predpoklady pre vybrané zmeny v topológii ES, konkrétne zvýšenie rizika ohrozenia sústavy pri výraznom navýšení výroby a naopak postupné znižovanie rizika pri pripojení vedení vo vnútri regulačnej oblasti a po pripojení medzinárodných vedení.

Lokálne hodnotenie prevádzkového stavu vedení v elektrizačnej sústave je založené na identifikácia úzkych miest spolu s rozsahom vážnosti ovplyvňovania, určeného na základe vopred determinovaných ohraňení a kritérií. Výsledky metodiky lokálneho hodnotenia sú v dizertačnej práci doplnené o porovnanie výsledkov získaných využitím globálneho hodnotenia s cieľom preukázať previazanosť navrhnutých prístupov.

Na základe porovnania výsledkov globálneho a lokálneho hodnotenia je možné konštatovať, že výsledky lokálneho hodnotenia, pre zmeny tranzitných tokov výkonu, plánované vypnutia, zmeny zaťaženia, zmeny topológie a rozvoj elektrizačnej sústavy korešpondujú s výsledkami globálneho hodnotenia z pohľadu zvýšeného zaťaženia, rozsahu (početnosti) a vážnosti ovplyvnených a ovplyvňujúcich vedení.

Analýzou možností implementácie navrhnutej metodiky v reálnej prevádzke elektrizačnej sústavy je v dizertačnej práci spracovaný prínos a návrh aplikačného využitia tejto metodiky v praxi.

Použitá literatúra

- [1] *Energetická politika SR*. [online]. Bratislava : Ministerstvo hospodárstva SR, Dec. 2010 [cit. 2014.04.18.]. Dostupné na internete: <<http://www.economy.gov.sk/energeticka-politika-sr-5925/127610s>>.
- [2] *Návrh stratégie energetickej bezpečnosti SR*. [online]. Bratislava : Ministerstvo hospodárstva SR, Dec. 2010 [cit. 2014.04.18.]. Dostupné na internete: <<http://www.rokovania.sk/Rokovanie.aspx/BodRokovaniaDetail?idMaterial=14372>>.
- [3] *Continental Europe Operation Handbook : Operational Security* [online]. Brussel - Belgium : ENTSO-E, 19/3 2009. [cit. 2014.04.21]. Dostupné na internete: <<https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/>>.
- [4] KUNDUR, P. at al. Definition and classification of power system stability. In *IEEE transactions on power systems : Vol. 19, No. 3. - : IEEE Power & Energy Society*, 2004. ISSN 0885-8950, p. 1387-1401.
- [5] LI, H., ROSENWALD, G.W., JUNG, J., CHEN-CHING, L. Strategic Power Infrastructure Defense. *Proceedings of the IEEE* - Issue 5, Vol. 93, 2005, p. 918 – 933. ISSN 0018-9219.
- [6] *Continental Europe Operation Handbook : Appendix 3: Operational Security* [online]. Brussel - Belgium : ENTSO-E, 19/3 2009. [cit. 2014.04.22]. Dostupné na internete: <<https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/>>.
- [7] *Network Code on Operational Security* [online]. Brussel - Belgium : ENTSO-E, 24/9 2013. [cit. 2014.04.22]. Dostupné na internete: <<http://networkcodes.entsoe.eu/operational-codes/operational-security/>>.
- [8] *Memento of Power System Reliability*. Paris : RTE French Transmission System Operator, 2006. 272 s.
- [9] SLUGEŇ, V., KOVÁCS, Z., HINCA. R. *Bezpečnosť a spoľahlivosť jadrových elektrární*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1996. 145 s. ISBN 80-227-0841-0.
- [10] JANÍČEK, F., KOVÁCS, Z. *Spoľahlivosť v elektroenergetike*. Bratislava : Renesans, s.r.o., 2009. 146 s. ISBN 978-80-89402-12-0.
- [11] *Pravidlá prevádzkovania prenosovej sústavy : Technické podmienky prístupu a pripojenia, pravidiel prevádzkovania prenosovej sústavy*. [online]. Bratislava : SEPS, a.s., Január 2014. [cit. 2014.04.22.]. Dostupné na internete: <http://sepsas.sk/seps/Dokumenty/TechnickePodmienky/2013/10/28/TP-C_2013.pdf>.
- [12] HAARLA, L., KOSKINEN, M., HIRVONEN, R., LABEAU, P.-E. *Transmission Grid Security : A PSA Approach*. New York : Springer, 2011, 179 p, ISBN 978-0-85729-144-8.
- [13] *Supporting Document for the Network Code on Operational Security, 2nd Edition Final* [online]. Brussel - Belgium : ENTSO-E, 24/9 2013. [cit. 2014.04.22]. Dostupné na internete: <<http://networkcodes.entsoe.eu/operational-codes/operational-security/>>.
- [14] *Transmission System Operator Security Cooperation : The initiative to enhance the security of the electrical system in Europe*, [online]. Participating TSOs, 30/1 2013. [cit. 2014.04.22]. Dostupné na internete: <<http://www.tso-security-cooperation.net/en/index.htm>>.
- [15] GREGA, M., JEDINÁK, M., JANÍČEK, F. European Awareness System. In: *Power Engineering 2014. Control of Power Systems 2014 [elektronický zdroj] : 11th International Scientific Conference CPS 2014*. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014. - ISBN 978-80-89402-72-4.
- [16] *Continental Europe Operation Handbook : Appendix – Policy 5: Emergency Operations* [online]. Brussel - Belgium : ENTSO-E, Aug. 2010. [cit. 2014.04.22.]. Dostupné na internete: <<https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/>>.
- [17] ABD-ELFATAH HOBALLAH, A. A-R. *Power System Stability Assessment and Enhancement using Computational Intelligence* : dissertation thesis. Duisburg: Universität Duisburg-Essen, 2011. 191 s.
- [18] MACHOWSKI, J., BIALEK, J. W., BUMBY, J. R. *Power System Dynamics : Stability and Control*. Chippenham : Antony Rowe Ltd., 2008, 629 p, ISBN 978-80-227-2868-3.
- [19] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. USA : EPRI, 1994, 1176 p.
- [20] DAS, J. C. *Power System Analysis, Short Circuit, Load Flow and Harmonics*. New York : Marcel Dekker, Inc., 2002, ISBN 0-8247-0737-0.
- [21] MEIER, A. *Electric Power Systems : A Conceptual Introduction*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2006, ISBN 978-0-471-17859-0.
- [22] SHENKMAN, A. L. *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook*. New York : Springer, 2005, 570 p, ISBN 978-0-387-28799-7.
- [23] ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A. The power system steady-state stability analysis. *EnergySpectrum - Issue 2, Vol. 4, 2009*. ISSN 1214-7044.
- [24] ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., SMITKOVÁ, M., GRAMBLIČKA, M., KÓSA, K. Steady-state Stability Analysis of Power System of the Slovak Republic. In 10th International Scientific Conference : *Energy-Ecology-Economy*. Tatranské Matliare High Tatras : FEI STU, 2011.

- [25] ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A. Factors affecting the length of critical clearing time. In 9th International Conference : Control of Power Systems. Tatranské Matliare High Tatras : FEI STU, 2010. p. 1-7.
- [26] ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A. CCT – Basic Criteria of Power System Transient Stability. In: Electric Power Engineering 2010 : Proceedings of the 11th International Scientific Conference. Brno, Czech Republic, 4.-6.5.2010. - Brno : University of Technology, 2010. - ISBN 978-80-214-4094-4. - S. 157-161.
- [27] REVÁKOVÁ, D., ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A. *Prechodné javy v elektrizačných sústavách*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2008. 180 s. ISBN 978-80-227-2868.
- [28] KULKARNI, S. S.: The Frequency Instability in Large Power Systems : An Emergency State Analysis. In TENCON '91 - IEEE Region 10 International Conference on EC3-Energy, Computer, Communication and Control Systems. - : IEEE, 1991, ISBN 0-7803-0538-8.
- [29] *Continental Europe Operation Handbook* : Policy 5: Emergency Operations [online]. Brussel - Belgium : ENTSO-E, Aug. 2010. [cit. 2014.04.22.]. Dostupné na internete: <<https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/>>.
- [30] ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., KOVÁČ, M., LIŠKA, M., KÓSA, K. Analysis of the voltage stability - influence of selected power system 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. - ISBN 978-80-553-1441-9. - S. 52-55.
- [31] VAN CUTSEM, T., VOURNAS, C. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. New York : Springer, 2008. 378 s. ISBN 978-0-7923-8139-6.
- [32] MÁSLA, K., VRBA, M., ŠVEJNAR, P., a kol. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha : Asociace energetických manažerů, 2013. 272 s. ISBN 978-80-260-44671-17-5.
- [33] JANIČEK, F., CHLADNÝ, V., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž. *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2004. 360 s. ISBN 80-227-2135-2.
- [34] HLAVÁČ, P., KOVÁCS, Z., KUBALA, M., ŠPOK, M., CERMAN, A. Full Scope Risk Monitor for the Transmission Grid. In: Electric Power Engineering 2014 : Proceedings of the 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, 12.-14. May 2014. - : Brno University of Technology, 2014. - ISBN 978-1-4799-3806-3. - S. 63-68.
- [35] STRAKA, M. Rekonfigurácia prenosovej sústavy Slovenskej republiky. In: Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013. - Košice : Technical University of Košice, 2013. - ISBN 978-80-553-1441-9. - S. 101-104.
- [36] JANIČEK, F., JEDINÁK, M. The Impact of the Topology Changes Implementation to Synchronization Options in the Transmission System. In: Electric Power Engineering 2014 : Proceedings of the 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, 12.-14. May 2014. - : Brno University of Technology, 2014. - ISBN 978-1-4799-3806-3. - S. 7-10.
- [37] *Analýza rizika rozpadu ES SR v podmienkach nadnárodne prepojených elektrizačných sústav. Záverečná správa o riešení projektu APVV-0337-07*, Bratislava.
- [38] *Rozšírenie PSA modelu pre tvorbu plnorozsahového monitora rizika*. Výskumná správa pre SEPS a.s., č. 4R0410, 4. etapa riešenia, Január 2013, Bratislava.

Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [1] Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton - Cintula, Boris - Smitková, Miroslava: Initialization Events for Power System Collapse Risk. In: Electric Power Engineering 2012 : Proceedings of the 13th International Scientific Conference. Brno, Czech Republic, 23.-25.5.2012. - Brno : University of Technology, 2012. - ISBN 978-80-214-4514-7. - S. 273-279.
- [2] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton - Liška, Martin: Transient Stability of Synchronous Generator for Selected Events. In: Advances in Power and Energy Systems : Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines (POWER '12). Prague, Czech Republic, September 24-26, 2012. - : WSEAS Press, 2012. - ISBN 978-1-61804-128-9. - S. 47-52.
- [3] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton: 3-phase Short Circuit Impact in Various Length of Power Line on Transient Stability of Synchronous Generator. In: Recent Advances in Energy, Environment and Economics : 3rd International Conference on Development, Energy, Environment, Economics (DEEE'12). Paris, France December 2-4, 2012. - [S.l.] : WSEAS Press, 2012. - ISBN 978-1-61804-139-5. - S. 422-427.
- [4] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton: Impact of N-k Events in Selected Substation Type on the Dynamic Stability of Synchronous Generator. In: Energy, Environmental and Structural Engineering Series. - : WSEAS Press. - ISSN 2227-4359. - Vol. 19. Recent Advances in Energy Planning and Environment : Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Energy Planning, Energy Saving, Environmental Education (EPESE'13); Paris, France, 29-31 October 2013. - [s.l.] : WSEAS Press, 2013, s. 44-49.
- [5] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton - Volčko, Vladimír - Koníček, Michal - Kováč, Matúš: Impact of Fault Location on Transient Stability of Synchronous Generator. In: Electric Power Engineering 2014 : Proceedings of the 15th International Scientific Conference. Brno, Czech Republic, 12.-14.5.2014. - Brno : University of Technology, 2014. - ISBN 978-1-4799-3806-3. - S. 17-21.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [1] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton: Analýza dynamickej stability synchronného generátora. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, mimoriadne č. : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011 (2011), s. 103-107.
- [2] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton: Analýza dynamickej stability synchronného generátora. In: Zvyšovanie energetickej bezpečnosti Slovenskej republiky 2012 : Zborník z vedeckej konferencie; Demänová, 25.-27.1.2012. - Trnava : VUJE, 2012. - ISBN 978-80-89402-46-5. - S. 17-21.
- [3] Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton - Cintula, Boris - Smitková, Miroslava: Analysis of Power System Collapse Risk. In: Power Engineering 2012. Energy - Ecology - Economy 2012 [elektronický zdroj] : 11th International Scientific Conference EEE 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-49-6. - S. 51-52.
- [4] Cintula, Boris - Viglaš, Dominik - Beniuga, Constantine-Razvan: Power System Security Operation in Applying The N-1 Criterion. In: ELITECH '12 [elektronický zdroj] : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22 May 2012. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012. - ISBN 978-80-227-3705-0. - CD-ROM, [6] s.
- [5] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton - Viglaš, Dominik: Comparison of Selected Failures on Dynamic Stability During Power System Operation. In: ELITECH '13 [elektronický zdroj] : 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 5 June 2013. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013. - ISBN 978-80-227-3947-4. - CD-ROM, [6] s.
- [6] Cintula, Boris - Beláň, Anton - Eleschová, Žaneta - Viglaš, Dominik - Volčko, Vladimír: Impact of Automatic Reclosing on the Dynamic Stability of Synchronous Generator. In: Elektroenergetika 2013 : 7th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. Stará Lesná, Slovakia, September 18-20, 2013. - Košice : Technical University of Košice, 2013. - ISBN 978-80-553-1441-9. - S. 525-530.
- [7] Cintula, Boris - Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton: Transient Stability Assessment of Synchronous Generator Connected to Breaker-and-a-Half Substation Configuration. In: ELITECH '14 [elektronický zdroj] : 16th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 4 June 2014. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2014. (prijatý na konferenciu).