

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Pavol Hlaváč

Autoreferát dizertačnej práce

**Analýzy rizika rozpadu ES SR v podmienkach
liberalizácie trhu s elektrickou energiou**

na získanie akademického titulu **Philosophiae Doctor, PhD.**

v doktorandskom študijnom programe **5.2.30 - Elektroenergetika**

Bratislava, 2012

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Pavol Hlaváč
RELKO s.r.o.
Račianska 75, 83008 Bratislava

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

Oponenti: prof. Ing. Rusek Stanislav, CSc.
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
VŠB - TU Ostrava
17. listopadu 15
708 33 Ostrava - Poruba
Česká Republika

Ing. Jozef Kubanyi, CSc.
Úrad jadrového dozoru SR
Okružná 5
918 64 Trnava

Autoreferát bol rozoslaný:

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná o
hodine pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce vo vednom odbore 5.2.30
Elektroenergetika vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie zo dňa
..... na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej
univerzity v Bratislave.**

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

Obsah

	<u>STRANA</u>
Úvod	4
Ciele dizertačnej práce	5
1. Súčasný stav problematiky	5
1.1 Výpočet spoľahlivostných parametrov zariadení	6
2. Dynamická simulácia porúch ES	7
2.1.1 Definície koncových stavov po poruchách	7
2.2 Zhodnotenie dynamickej simulácie stability	8
3. Zber dát pre výpočet spoľahlivostných parametrov pre PSA model	9
3.1 Moduly databázovej aplikácie Datafarm-ES	9
4. Analýza ľudskej spoľahlivosti	10
5. Tvorba PSA modelu	11
5.1 Popis stromov udalostí	11
5.1.1 Všeobecný popis stromov udalostí	12
5.1.2 Ochrany v stromoch udalostí	12
5.1.3 Konštrukcia stromov udalostí	13
5.1.4 Stromy udalostí pre skraty 400 kV rozvodní	15
5.2 Popis stromov porúch	16
5.3 Výsledky PSA modelu	17
5.3.1 Frekvencia koncových stavov	17
5.3.1.1 Príspevok iniciačných udalostí k frekvencii koncového stavu GS4	17
6. Monitor rizika	18
6.1 Strom porúch	19
6.1.1 Tvorba stromu porúch pre monitor rizika	19
6.2 Farby a veľkosť rizika	20
6.3 Monitor rizika pre sledovanie aktuálneho rizika	21
6.4 Monitor rizika pre plánovanie	24
Záver	25
Prínos práce pre prax	27
Zoznam literatúry	28
Publikácie autora so vzťahom ku skúmanej problematike	30

Úvod

Slovenská elektrizačná sústava je neoddeliteľnou súčasťou nadnárodne prepojených a synchronne pracujúcich elektrizačných sústav (EU/UCTE). Je to galvanické prepojenie metalickým vodičom odberateľov a výrobcov elektrickej energie prostredníctvom prenosovej alebo distribučnej sústavy. V tejto nadnárodnej sústave je v zásade spojený každý s každým. Konanie každého pripojeného subjektu má vplyv na každý iný pripojený subjekt. Spôľahlivé a bezpečné riadenie takejto sústavy vyžaduje aplikáciu najnovších poznatkov nielen zo samotnej elektroenergetiky a elektrotechniky, ale aj z iných oblastí vedy a techniky.

Elektrizačná sústava predstavuje rozsiahly, zložitý a v mnohých ohľadoch nelineárny systém. Po poruche sústavy majú javy dynamický charakter a závisia od zapojenia a výkonových tokov v rôznych častiach sústavy. Analýza spoľahlivosti a bezpečnosti ES je teda neľahkou úlohou. Účinky porúch sústavy môžu viesť k čiastočnému alebo úplnému rozpadu sústavy (blackout) a môžu postihnúť milióny ľudí tak, ako to bolo v prípade USA, Talianska a Švédska v auguste a septembri roku 2003 (NERC 2004, UCTE 2004 a Svenska Kraftnät 2003). Podobné následky mali poruchové udalosti ES v rámci EU v roku 2006. Výskyt takýchto udalostí sa nedá úplne vylúčiť ani v ES SR. Rozpad alebo čiastočný rozpad sústavy u nás môže vzniknúť vplyvom porúch v okolitých sústavách a porúch vo vnútri samotnej elektrizačnej sústavy SR. Preto je potrebné vyvíjať a používať také prostriedky, ktoré umožňujú riadenie a minimalizáciu tohto rizika v podmienkach ES SR.

Súčasný, tradičný spôsob plánovania a prevádzky elektrizačnej sústavy zahŕňa deterministické kritérium $n-1$. Elektrizačná sústava sa prevádzkuje tak, že po každej jednotlivkej poruche zostane stabilná a nový prevádzkový stav dosiahne bez preťaženia a straty napätia. Zvyčajne sa neuvažujú pravdepodobnosti rôznych porúch. Rovnako sa narába so všetkými poruchami, ktoré môžu obmedziť kapacitu prenosu. Táto metóda sa dobre uplatňuje v podmienkach konzervatívneho využívania sústavy. Liberalizácia trhu s elektrickou energiou si vyžiadala všestrannejšie využitie ES ako predtým. Prevádzka sa už neuskutočňuje v konzervatívnych podmienkach, znižujú sa bezpečnostné rezervy, zvyšuje sa pravdepodobnosť výskytu čiastočného a úplného rozpadu ES SR. Preto je potrebné účinné zvyšovanie spoľahlivosti a bezpečnosti sústavy. Možno to dosiahnuť využitím pravdepodobnostných metód hodnotenia bezpečnosti (PSA - Probabilistic Safety Assessment). Takáto aplikácia by umožnila:

- kvantifikáciu rizika čiastočného alebo úplného rozpadu ES SR pre rôzne konfigurácie prevádzky a rôzne vplyvy nadnárodne prepojených sústav,
- výpočet povolenej doby nepohotovosti zariadení ES SR,
- periodické hodnotenie rizika za uplynulé obdobie (napr. mesačne),
- plánovanie údržby (hodnotenie rizika budúcich konfigurácií) a havarijné plánovanie,
- cielený investičný a technický rozvoj sústavy smermi, ktoré naznačí PSA.

Zvýšenie bezpečnosti sa dosahuje tým, že monitorovanie rizika umožňuje vyhýbať sa konfiguráciám so zvýšeným rizikom a umožňuje udržať riziko v prijateľných medziach. Odhalia sa aj také bezpečnostné problémy, ktoré unikajú rutinným bezpečnostným kontrolám. Tieto problémy je možné preventívne riešiť cieleným investičným a technickým rozvojom sústavy smermi, ktoré naznačí PSA.

Po úvode, popise cieľov dizertačnej práce a súčasného stavu problematiky je v druhej kapitole popísaná dynamická simulácia stability a využitie jej výsledkov pre určenie rozsahu PSA modelu a následkov udalostí v ES. Tretia časť popisuje databázovú aplikáciu Datafarm-ES vyvinutú pre zber údajov o poruchách a výpočet spoľahlivostných parametrov zariadení ES. Štvrtá kapitola je venovaná analýze spoľahlivosti človeka. V piatej časti je popísaný proces vývoja PSA modelu ES SR použitého pre odhad rizika a jeho vyhodnotenie. Šiesta časť popisuje vývoj a možnosti využitia systému pre monitorovanie rizika. Po šiestej kapitole nasleduje záver.

Ciele dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je aplikácia metódy pravdepodobnostného hodnotenia bezpečnosti (PSA) pri hodnotení rizika rozpadu ES SR. Predmetom práce je vývoj PSA modelu pre 400 kV prenosovú sústavu SR a jeho následné využitie v systéme monitorovania rizika programom EOOS. Práca je teda zameraná na vývoj pravdepodobnostného modelu, deterministická analýza stability, čo je podpornou analýzou modelovania, nie je predmetom riešenia.

Na splnenie definovaných cieľov je potrebné vykonať nasledovné:

1. Tvorba databázy spoľahlivostných parametrov ES pre účely PSA.
2. Vývoj PSA modelu pre ES SR 400 kV v programovom prostredí RISPECTRUM PSA pre iniciačné udalosti havárií:
 - skrat na vedení
 - skrat na elektrickej prípojnici v rozvodni
 - výpadok vedenia
 - výpadok el. prípojnice v rozvodni
 - výpadok zdroja
 - výpadok spotrebiča
3. Na základe PSA modelu vývoj monitora rizika ES v programovom prostredí EOOS.
4. Ukážka aplikácie monitora rizika pri riadení prevádzky ES a plánovaní údržbových činností.

1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

PSA (Probabilistic Safety Assessment) ako nástroj hodnotenia spoľahlivosti a rizika potenciálne nebezpečných technológií sa úspešne využíva v mnohých oblastiach. Prvýkrát sa pravdepodobnostné hodnotenie bezpečnosti využilo v 60-tych rokoch na hodnotenie spoľahlivosti raketových systémov v USA a v kozmonautike. Následne sa PSA metodológia uplatnila pri analýzach a hodnotení bezpečnosti jadrových elektrární a v iných priemyselných odvetviach. V 80-tych rokoch sa PSA metodológia začala uplatňovať aj v Európe.

Podstatou PSA metodológie je zostavenie matematického modelu analyzovanej technológie (jadrová elektráreň, lietadlo, elektrizačná sieť, atď.), ktorý reprezentuje jej správanie v rôznych prevádzkových stavoch. Následne sa riešením PSA modelu pomocou vhodných počítačových programov získavajú informácie o udalostiach a scenároch vedúcich k neželanému stavu – tavenie aktívnej zóny v jadrovej elektrárni, pád raketoplánu, rozpad elektrizačnej siete, atď.

Najviac je PSA pre elektrizačnú sieť rozvinutá v USA, kde sa pomocou tohto prístupu sleduje spoľahlivosť celej sústavy ako aj riziko straty napätia v jednotlivých uzloch sústavy [14]. Rovnako sa analýzou aktuálnej konfigurácie elektrizačnej siete stanovuje možnosť straty napájania vlastnej spotreby jadrových elektrární [10].

V Európe sa PSA prístup najviac využíva v severských krajinách (Fínsko, Švédsko), kde pomocou PSA modelu monitorujú spoľahlivosť prepojených sústav [12,13] a hľadajú slabé miesta sústavy pri rôznych konfiguráciách a výkonových tokoch.

U nás sú rozšírené PSA aplikácie v jadrovej energetike [5,7,8] a v chemickom priemysle. Aplikácia v ES SR ešte nie je zavedená.

1.1 Výpočet spoľahlivostných parametrov zariadení

Vstupné dáta využívané v PSA modeli sú frekvencie výskytu iniciačných udalostí, intenzity porúch prvkov, pravdepodobnosti zlyhania prvkov, testovacie intervaly, atď. Zber údajov pre výpočet spoľahlivostných parametrov zariadení sa vykonáva v súlade s bežnou praxou využívanou aj v iných priemyselných odvetviach [1,4]. Tabuľka 1.1 uvádza modely, parametre a dáta potrebné pre každú udalosť.

Tabuľka 1.1 Typy uvažovaných pravdepodobnostných modelov

Iniciačné udalosti	Poruchy pri štarte alebo pri zmene stavu (2 modely)	Poruchy po štarte alebo pri zachovaní stavu	Doby trvania	Nepohotovosť	
Typická udalosť					
Udalosť sa vyskytne a vyvolá havarijný reťazec	Prvok vo vyčkávacom režime zlyhá pri výzve k činnosti	Prvok zlyhá po výzve alebo počas požadovanej doby prevádzky zmení svoj stav	Stav prvku (systému) trvá určité časové obdobie	Prvok je pri výzve k činnosti nepohotovú vplyvom údržby alebo testu	
Parametre pre odhad					
λ , frekvencia udalosti	Pre poruchu pri výzve k činnosti: p , pravdepodobnosť poruchy pri výzve k činnosti	Pre poruchu vo vyčkávacom režime: λ , intenzita výskytu porúch vo vyčkávacom režime	λ , intenzita porúch po štarte (počas prevádzky)	Parametre predpokladaného rozdelenia pravdepodobnosti doby trvania	q , pomerná časť doby, keď je prvok v stave nepohotovosti
Dáta požadované pre odhad parametrov ^a					
Počet udalostí x za celkovú dobu t	Počet porúch x na celkový počet výziev k činnosti n	Počet porúch x počas celkovej doby vyčkávacieho režimu t	Počet porúch x počas celkovej doby prevádzky t	Dĺžky sledovaných trvaní	Sledované časové úseky, keď bol prvok nepohotovú a celková doba, keď mal byť prevádzkyschopný
^a Tieto dáta sú minimálne požiadavky na odhad parametrov. Pre kontrolu modelových predpokladov sú potrebné ďalšie dáta.					

Použitím vzťahov z metodického návodu na zber a spracovanie dát [4] sme odvodili základné rovnice pre výpočet frekvencií iniciačných udalostí a intenzít porúch, hornej a dolnej medze konfidenčného intervalu, mediánu a faktora chyby pomocou frekvenčného a Bayesovského odhadu. Okrem toho sa popisuje metóda výpočtu nepohotovosti a doby trvania porúch. Analýza spoľahlivosti ľudského činiteľa sa uvádza v 4. kapitole.

2. DYNAMICKÁ SIMULÁCIA PORÚCH ES

Počas normálnej prevádzky ES sú prevádzkové parametre, ako napätie, prenášané činné a jalové výkony, frekvencia, atď., v normálnom stave. Generátory pracujú synchronne a ES je ako celok stabilná. Vplyvom iniciačnej udalosti havária môže dôjsť k narušeniu normálnych podmienok, čo vedie k nestabilite sústavy.

Dynamická simulácia stability sa vykonala pomocou programového balíka, ktorý podrobne modeluje ES. V rámci práce sú využité výsledky APVV projektu č. APVV-0337-07 z rokov 2008 až 2010, kde sa na analýzu dynamickej stability využil program pre dynamickú simuláciu siete PSLF (Positive Sequence Load Flow) [9].

Program modeluje výkonové toky, generátory, transformátory, vedenia 400 kV, 220 kV a 110 kV a elektrické stanice. Zaťaženia, ktoré sú pripojené na úroveň napätia 20 kV a nižšiu, sa modelujú ako sústredené záťaže v uzloch rozvodní 110 kV, aby sa vytvoril správny prípadový výkonový tok. Referenčným rokom pre dynamickú simuláciu stability bol rok 2009.

2.1.1 Definície koncových stavov po poruchách

CIGRE Study Committee 38 spolu s IEEE Power System Dynamic Performances Committee vypracovali definície a klasifikáciu stability elektrizačnej sústavy. Teoreticky je problém stability elektrizačnej sústavy zhodný s problémom stability ľubovoľného dynamického systému. Formálna definícia stability elektrizačnej sústavy je nasledovná: „Stabilita elektrizačnej sústavy je pre dané počiatočné prevádzkové podmienky schopnosť sústavy znovu nadobudnúť rovnovážny stav po pôsobení fyzikálnej poruchy, pričom väčšina premenných sústavy zostane ohraničená tak, že celkovo sústava zostane neporušená“.

Definícia sa týka stability elektrizačnej sústavy ako celku. Často je zaujímavá aj stabilita jedného generátora alebo skupiny generátorov. Generátor môže stratiť stabilitu (synchronizmus) bez toho, aby spôsobil nestabilitu celej sústavy.

Vzhľadom na charakter systému – elektrizačná sústava – sa zaviedli definície stability zložitej multigenerátorovej ES [9].

Definícia 1

Elektrizačná sústava SR je **stabilná**, ak po účinku iniciačnej udalosti (IU) bude súčasne platiť:

- nevypadne žiadny zdroj v ES SR po vzniku IU, iba ak ide o výpadok zdroja po IU – skrat na blokovom vedení,
- nebudú preťažené prenosové vedenia,
- žiadna 400 kV rozvodňa (okrem Č. Váh) nebude bez napájania z ES SR v dôsledku IU,
- nevypadne pasívny prvok výrazne obmedzujúci dodávku elektriny z ES SR.

Definícia 2

Elektrizačná sústava SR je **stabilná s obmedzením**, ak po účinku IU bude súčasne platiť:

- v ES SR nevypadnú zdroje po vzniku IU s celkovým výkonom väčším ako 880 MW,
- viac ako 2 rozvodne 400 kV nebudú bez napájania z ES SR v dôsledku IU (pričom druhá rozvodňa nebude Križovany, Levice alebo V. Dúr) a nebude 400 kV Rz Križovany bez napájania,
- nedôjde k výraznému obmedzeniu dodávky elektriny z ES SR v dôsledku IU.

Definícia 3

Elektrizačná sústava SR je v **stave ohrozenia**, ak po účinku IU bude súčasne platiť:

- v ES SR vypadnú zdroje po vzniku IU s celkovým výkonom väčším ako 880 MW, alebo
- 2 a viac 400 kV rozvodní bude bez napájania z ES SR v dôsledku IU (pričom druhá rozvodňa bude aj Križovany, Levice alebo V. Ďúr) alebo bude len 400 kV Rz Križovany bez napájania, alebo
- dôjde k výraznejšiemu obmedzeniu dodávky elektriny z ES SR v dôsledku IU.

Definícia 4

Elektrizačná sústava SR je **nestabilná**, ak po účinku IU bude súčasne platiť:

- v ES SR vypadnú zdroje po vzniku IU s celkovým výkonom väčším ako 880 MW,
- 2 a viac 400 kV rozvodní bude bez napájania z ES SR v dôsledku IU (pričom druhá rozvodňa bude aj Križovany, Levice alebo V. Ďúr) alebo bude len 400 kV Rz Križovany bez napájania,
- dôjde k výraznejšiemu obmedzeniu dodávky elektriny z ES SR v dôsledku IU.

Definícia 5

Elektrizačná sústava SR je **nestabilná vo veľkom**, ak po účinku IU dôjde k úplnej strate napätia v ES SR (**blackout v ES SR**).

Poznámka: Nie sú uvažované stavy rozpadu ES SR na ostrovné prevádzky alebo prevádzka ES SR vo viacerých od seba galvanicky oddelených elektrizačných sústavách.

Uvedené definície koncových stavov sa pre účely PSA ďalej označujú ako stavy GS1 až GS5.

2.2 Zhodnotenie dynamickej simulácie stability

Výpočty stability ES SR pri pôsobení rôznych typov porúch ukázali, že [9]:

- Poruchy, ktoré môžu narušiť stabilitu sústavy, sú z kategórie skratov s uvažovaním predpokladaných scenárov zlyhania ochrán alebo vypínačov. Sú to najmä skraty na významných vedeniach, ale aj vo významných rozvodniach, ako sú Križovany, Levice a V. Ďúr.
- Poruchy z kategórie výpadkov záťaží sú pre stabilitu sústavy najmenej významné, nakoľko primárna regulácia frekvencie v celom (bývalom) UCTE je „silná“ v porovnaní s veľkosťou záťaží v ES SR.
- Výpadky vedení sú ohrozujúce najmä ak sú to vedenia, cez ktoré sú vyvedené výkony systémových zdrojov.
- Účinky výpadkov zdrojov na stabilitu ES SR sú menej významné vzhľadom na primárnu reguláciu frekvencie a môžu spôsobovať vážnejšie problémy pri zabezpečení sekundárnej regulácie frekvencie a pilotných napätí.

Vzhľadom na uvedené skutočnosti vyplývajúce z dynamickej simulácie stability sú iniciačné udalosti výpadok vedenia, výpadok el. prípojnice v rozvodni, výpadok zdroja a výpadok spotreby z ďalšej analýzy vylúčené. Do PSA modelu budú zahrnuté iniciačné udalosti skrat na vedení a skrat na elektrickej prípojnici v rozvodni.

Rovnako bolo preukázané, že pri žiadnej uvažovanej iniciačnej udalosti nedošlo k výskytu koncového stavu GS5 – nestabilita vo veľkom (blackout). Preto sa tento koncový stav nebude vyskytovať v stromoch udalostí v PSA modeli.

3. ZBER DÁT PRE VÝPOČET SPOĽAHLIVOSTNÝCH PARAMETROV PRE PSA MODEL

Základnými nástrojmi PSA modelu sú stromy porúch a stromy udalostí popísané v 5. kapitole. Pri konštrukcii stromov porúch sa využívajú logické hradlá (OR, AND), ktoré definujú logické väzby medzi zariadeniami technologických systémov [1]. Prvky a zariadenia technologických systémov sú v PSA modeloch reprezentované primárnymi udalosťami modelujúcimi poruchy týchto zariadení. Okrem informácií o technologických zariadeniach vstupujú do PSA modelu aj informácie o činnostiach človeka, ktoré môžu ovplyvniť prevádzku analyzovanej technológie (údržba, identifikácia neželaných stavov, spúšťanie bezpečnostných systémov, atď.).

Jedným z cieľov tejto práce je vývoj databázy spoľahlivostných parametrov zariadení ES SR pre účely PSA a PSA aplikácií. Vhodný systém zberu a spracovania dát premieňa dáta na zdroj informácií, čo umožňuje rozhodovanie v oblasti bezpečnosti a ekonomiky prevádzky ES SR pri znalosti rizika. V tejto oblasti je potrebné spracovať čo najdokonalejšie analýzy, ktoré vyžadujú špecifické dáta vyššej kvality.

Preto je súčasťou tejto práce aj vývoj databázovej aplikácie Datafarm-ES vo formáte MS Access. Aplikácia obsahuje nasledujúce moduly:

1. Modul: Frekvencie IU

- Zber informácií o IU na jednotlivých napäťových úrovniach (400 kV, 220 kV a 110 kV).
- Frekvenčný odhad frekvencií IU na jednotlivých napäťových úrovniach (400 kV, 220 kV a 110 kV).
- Frekvenčný odhad frekvencií skupín IU na jednotlivých napäťových úrovniach (400 kV, 220 kV a 110 kV).
- Bayesovský odhad frekvencií skupín IU na jednotlivých napäťových úrovniach (400 kV, 220 kV a 110 kV).

2. Modul: Spoľahlivostné parametre prvkov

- Zber informácií o poruchách a nepohotovosti prvkov na jednotlivých napäťových úrovniach (400 kV, 220 kV a 110 kV).
- Výpočet intenzity porúch vo vyčkávacom režime a prevádzke pre skupiny prvkov ES SR na jednotlivých napäťových úrovniach (400 kV, 220 kV a 110 kV).
- Výpočet pravdepodobnosti porúch pri výzve k činnosti vo vyčkávacom režime pre skupiny prvkov ES SR na jednotlivých napäťových úrovniach (400 kV, 220 kV a 110 kV).
- Výpočet nepohotovosti vybraných zariadení skupín prvkov pre test a údržbu.

3. Modul: Doby trvania porúch

- Výpočet doby trvania porúch.

4. Modul: Pravdepodobnosť zlyhania dispečera

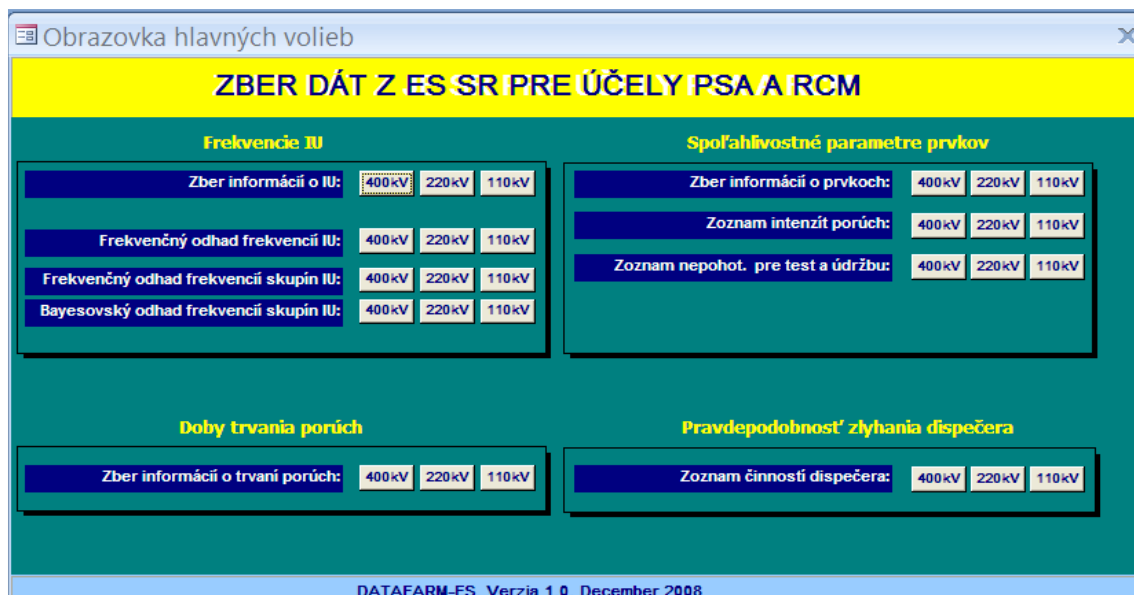
- Výpočet pravdepodobnosti zlyhania dispečera.

3.1 Moduly databázovej aplikácie Datafarm-ES

Všetky údaje potrebné pre výpočet spoľahlivostných parametrov popisovaných v 1. kapitole sa zbierali a následne vyhodnocovali v databázovej aplikácii Datafarm-ES, ktorá bola vyvinutá ako súčasť tejto práce.

Hlavná obrazovka databázovej aplikácie Datafarm-ES je na obr. 3.1. Obsahuje všetky štyri moduly, popísané v úvode 3. kapitoly:

- Frekvencie IU
- Spoľahlivostné parametre prvkov
- Doby trvania porúch
- Pravdepodobnosť zlyhania dispečera



Obr. 3.1 Hlavná obrazovka databázovej aplikácie Datafarm – ES

4. ANALÝZA ĽUDSKEJ SPOĽAHLIVOSTI

Príspevok človeka k bezpečnosti prevádzky ES sa odhaduje a kvantifikuje pomocou metód spoľahlivostnej analýzy ľudského činiteľa. Táto kapitola sa venuje začleneniu spoľahlivostnej analýzy ľudského činiteľa do PSA a výpočtu pravdepodobnosti ľudských hýb. Cieľom je aplikácia metodológie na výpočet spoľahlivosti ľudského činiteľa na základe teórie použitej aj v jadrovej energetike [2,5]. Táto teória sa popisuje nižšie.

Ľudské zásahy ovplyvňujú bezpečnosť PS. Dôležité je ich začlenenie do štruktúry PSA tak, aby bolo možné hodnotiť ich potenciálny vplyv na riziko. Z hľadiska bezpečnosti prevádzky ES je mimoriadne dôležitá spoľahlivosť ľudského činiteľa pri dispečerskom riadení elektrizačnej sústavy. Sústavu na vymedzenom území riadi elektroenergetický dispečing prevádzkovateľa prenosovej sústavy (SED). Dispečer je oprávnený v záujme zachovania bezpečnosti sústavy využiť napr. nasledovné opatrenia: 1) dať príkaz na zníženie alebo zvýšenie výroby, 2) prerušiť práce na vedeniach s cieľom ich zapnutia, 3) upraviť napätie v sústave a 4) nariadiť vypnutie spotreby. Aj ľudské zásahy pri údržbe, oprave a testovaní zariadení môžu významne ovplyvniť spoľahlivosť a bezpečnosť ES.

Sú tri kategórie zásahov, ktoré sú obyčajne zapracované do PSA:

- Kategória A: zásahy, ktoré vyvolajú nepohotovosť zariadení pri výzve k činnosti (ľudské chyby pred haváriou).
- Kategória B: zásahy, ktoré vedú k iniciačným udalostiam havárií.
- Kategória C: zásahy vyskytujúce sa po vzniku iniciačnej udalosti. Tieto zásahy sú požadovane pri vykonávaní bezpečnostných opatrení a modelujú sa v havarijných reťazoch stromov udalostí.

Spôľahlivostná analýza ľudského činiteľa je založená hlavne na metóde THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) a TRC (Time Reliability Correlation) [5].

THERP je metóda vhodná na analýzu spoľahlivosti ľudského činiteľa pred a pri výskyte iniciálnej udalosti. Sú to ľudské zásahy pri údržbe, oprave a testoch a následné činnosti, zamerané na obnovenie pohotovosti zariadení. Zásahy sa vykonávajú rutinne a opakovane a modelujú sa ako potenciálne ľudské chyby v stromoch porúch. Chyby pri kalibrácii sa uvažujú ako zásahy pred iniciálnou udalosťou. Ľudské zásahy, ktoré vedú k uvažovaným chybám, sú vykonané za normálnych podmienok prevádzky a pri strese, čo odpovedá každodennej činnosti. Výpočet pravdepodobnosti ľudskej chyby je založený na predpisoch údržby a testovania, na závislostiach súvisiacich úloh a na administratívnych požiadavkách na obnovenie po opätovnom uvedení zariadení do stavu pohotovosti.

Zásahy po havárii sú reakcie na výskyt iniciálnej udalosti. Sú to úlohy zapracované do havarijných predpisov a reakcie na havarijné varovné signály. Úloha zahŕňa diagnózu, ovládanie a uvedenie systémov do činnosti, lokálne obnovenie činnosti prvkov, atď. Na kvantifikáciu spoľahlivosti zásahov po havárii sa používa metóda TRC v dvoch fázach: triediaca a detailná analýza.

Cieľom triediacej analýzy je identifikovať ľudské chyby po havárii a odhaliť možné závislosti medzi chybami. Pretože stromy porúch a stromy udalostí na modelovanie havarijných reťazcov sú prepojené, nie je možné identifikovať všetky ľudské zásahy pred vytvorením minimálnych kritických rezov reťazca. Pri používaní malých stromov udalostí a veľkých stromov porúch sa ľudské zásahy zamerané na obnovenie činnosti zariadení identifikujú po prvej kvantifikácii modelu v rámci triediacej analýzy. V tomto procese je to prvá príležitosť na kontrolu minimálnych kritických rezov generovaných pre rozpad sústavy. V rámci rezu sú dané všetky informácie o alternatívach obnovenia činnosti a čase, ktorý je k dispozícii na zásah. Alternatívy obnovenia činnosti sú dané havarijnými predpismi, platnými pre daný reťazec. Zásah zahŕňa obnovenie schopnosti prevádzky systému alebo štart alternatívneho systému na potlačenie havárie. Triediaca analýza teda umožňuje identifikovať ľudské chyby, závislosti medzi nimi a predbežne odhadnúť pravdepodobnosti ľudských chýb. Tieto zásahy sú podrobne analyzované v rámci detailnej analýzy.

Všetky identifikované ľudské chyby sú nevykonané zásahy. Od personálu SED sa požaduje správne vykonať zásah v záujme zabezpečenia funkčieschopnosti PS. Ak sa zásah nevykoná, ES sa stáva nefunkčnou.

5. Tvorba PSA modelu

PSA model sa skladá zo stromov udalostí a stromov porúch, ktoré boli vytvorené a analyzované pomocou počítačového programu Risk Spectrum PSA (Relcon AB 2004). Tento softwarový balík stanovuje pravdepodobnosti výskytu havarijných reťazcov a analyzuje miery dôležitosti primárnych udalostí a ich parametrov z hľadiska rizika.

Aby bolo možné vytvoriť PSA model ES SR, musíme mať k dispozícii spoľahlivostné parametre zariadení ES SR (kap. 1), informácie o funkcii, zapojení a závislosti týchto zariadení (prevádzkové predpisy, blokové schémy, atď.) a výsledky dynamickej analýzy stability (kap.2).

5.1 Popis stromov udalostí

Na základe výsledkov analýzy dynamickej stability (kap. 2) boli do PSA modelu zahrnuté len skraty na 400 kV vedeniach a skraty v elektrických staniách Križovany, Levice, Veľký Ďúr,

Varín a Veľké Kapušany (prípojnicové skraty v ostatných 400 kV rozvodniach mali zanedbateľný vplyv).

V tejto časti sa popisujú stromy udalostí 400 kV vedení pre základný stav siete bez zmeny konfigurácie pre údržbu a pre jeden základný výkonový tok.

5.1.1 Všeobecný popis stromov udalostí

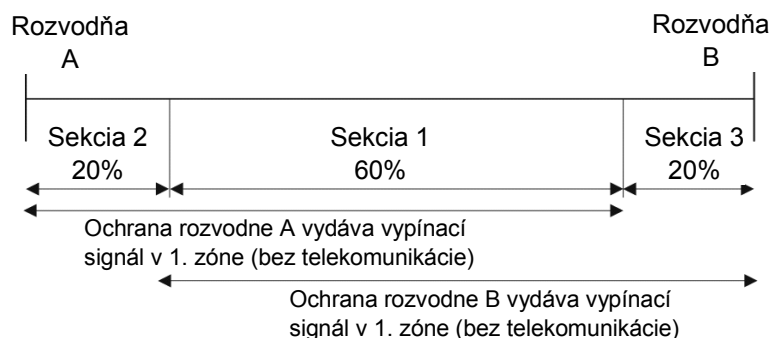
Stromy udalostí slúžia v modeli na analýzu zásahu ochrán a výkonových vypínačov po poruche siete. Každá vetva stromu udalostí má jednu úspešnú a jednu poruchovú vetvu. Pomocou úspešných alebo poruchových vetiev prvkov, umiestnených v záhlaví stromov udalostí, je možné vytvoriť všetky havarijné scenáre po poruche. Stromy porúch sa používajú ako vstupy do záhlaví stromov udalostí. Pomocou stromov porúch sa vypočíta pravdepodobnosť poruchy a úspechu pre jednotlivé vetvy.

Na začiatku stromu udalostí je iniciačná udalosť, potom nasledujú ochranné systémy. Vetvy stromu udalostí sa vytvárajú tak, že ich analýza dáva možné následky, ktoré sú potrebné pre dynamickú analýzu ES. Pri tejto analýze treba poznať miesto poruchy a jej trvanie a reťazec vypnutí výkonových vypínačov. Tento princíp vedie k takej konštrukcii stromu udalostí, že ochranné systémy a výkonové vypínače sa modelujú v oddelených vetvách, pretože následok porúch ochrany a následky nevypnutia výkonového vypínača sú odlišné.

5.1.2 Ochrany v stromoch udalostí

Poruchy na rôznych miestach vedenia si vyžadujú odlišné spracovanie v modeli spoľahlivosti, pretože dištančná ochrana reaguje podľa polohy skratu odlišne. Dištančné ochrany môžu okamžite vypnúť iba poruchy v strednej časti vedenia bez telekomunikačného kanála medzi ochranami na oboch koncoch vedenia. To znamená, že ochranný systém pôsobí odlišnými spôsobmi, podľa polohy skratu pozdĺž vedenia.

Dosah zóny okamžitého vypnutia od dištančnej ochrany (1. zóny) je asi 80% z dĺžky vedenia. Takže 20% vedenia na odľahlom konci nepatrí k ochrane 1. zóny. Okamžité vypnutie úseku odľahlého konca je možné, ak ochrana prijme telekomunikačný signál z ochrany na druhom konci vedenia. Ochrana vypne, ak je nameraný skrat a prijme telekomunikačný signál. Bez telekomunikácie môže dištančná ochrana na oboch koncoch vedenia vypnúť okamžité poruchy v strednej časti (sekcia 1 na obr. 5.1). Zvyšných 40% vedenia sa rozdelí na dve časti. Ochrana v rozvodni B rýchlo vypne skrat v sekcii 2, ak prijme telekomunikačný signál z ochrany v rozvodni A a naopak. Pre každú sekciu vedenia je potrebné zostaviť jeden strom udalostí. Takže pre každé vedenie sú zostavené tri stromy udalostí.



Obr. 5.1 Dištančná ochrana a jej zóny pozdĺž vedenia

Ak je dištančná ochrana v poriadku, ale neprijme telekomunikačný signál kvôli poruche telekomunikačného kanála, ochrana môže vyslať oneskorený vypínací signál v 2. zóne, keď existuje skrat na odľahlom konci vedenia. Stromy udalostí, ktoré reprezentujú konce vedenia, majú doplnkovú vetvu pre oneskorený vypínací signál 2. zóny.

Činnosť dištančnej ochrany pri jedno-, dvoj- a trojfázových skratoch je približne rovnaká. Pri analýze spoľahlivosti je dôležitý predpoklad, že ochrany sú úspešné alebo zlyhajú bez ohľadu na počet zlyhaných fáz. V modeli sa uvažujú iba trojfázové skraty.

Automatika zlyhania vypínača pôsobí vtedy, keď je výkonový vypínač v poruche a po prijatí vypínacieho signálu nevypne. Meria prúd výkonového vypínača, ktorý prijal vypínací signál. Ak sa prúd v danom čase nezastaví (napr. po 200 ms), automatika zlyhania vypínača vypne všetky výkonové vypínače pripojené k rovnakej prípojnici a vyšle vypínací signál na dištančnú ochranu v rozvodni na odľahlom konci zlyhaného vedenia. Po nezapracovaní automatiky zlyhania vypínača zapracujú záložné ochrany a vypínajú ďalšie vedenia v 2. zóne.

5.1.3 Konštrukcia stromov udalostí

V rámci modelovania boli zostavené tri stromy udalostí pre každé 400 kV vedenie v závislosti od miesta skratu na vedení:

1. skrat v strede vedenia – vo vzdialenosti 50% od rozvodní,
2. skrat na jednom konci vedenia – vo vzdialenosti 10% od prvej rozvodne,
3. skrat na druhom konci vedenia – vo vzdialenosti 10% od druhej rozvodne.

Na ilustráciu je popísaný strom udalostí pre skrat v strede vedenia, zostavený pre vedenie V426.

Strom udalostí na obr. 5.2 je zostavený pre skrat v strede vedenia, dištančné ochrany chrániace vedenie registrujú poruchu v prvom pásme. Preto model neobsahuje žiadne telekomunikačné kanály. Uzol 00S-426 predstavuje výskyt iniciačnej udalosti. Vedenie musí byť po výskyte iniciačnej udalosti izolované.

Vrcholové udalosti v záhlaví stromu udalostí po vzniku iniciačnej udalosti sú:

1. Vypínací signál ochrany na vypnutie vypínača v rozvodni Levice. Tomu odpovedá vrcholová udalosť O-LEVICE-426. Ochrana vyšle okamžitý vypínací signál po vzniku iniciačnej udalosti na výkonový vypínač. Ak tento signál zlyhá, ďalšie udalosti sa nevyšetrujú.
2. Vypínací signál ochrany druhého konca vedenia na vypnutie vypínača v rozvodni Rimavská Sobota. Tomu odpovedá vrcholová udalosť O-RSOBOTA-426. Ochrana vyšle okamžitý vypínací signál na výkonový vypínač. Vetva sa ďalej nerozdeľuje ak signál nie je vyslaný, lebo je to závažná porucha.
3. Výkonový spínač v rozvodni Levice vypne. Toto predstavuje vrcholová udalosť VYP-LEVICE-426. Porucha vedie k zásahu automatiky zlyhania vypínača.
4. Automatika zlyhania vypínača vypne príslušné výkonové vypínače pripojené k danej prípojnici, ak zlyhá, strom udalostí sa ďalej nerozvetvuje. To sa modeluje pod vrcholovou udalosťou PVYP-LEVICE-426.
5. Výkonový vypínač druhého konca vedenia v Rimavskej Sobote vypne. Toto predstavuje vrcholová udalosť VYP-RSOBOTA-426. Porucha aktivuje automatiku zlyhania vypínača.
6. Automatika zlyhania vypínača vypne príslušné výkonové vypínače pripojené k danej prípojnici, ak zlyhá, strom udalostí sa ďalej nerozvetvuje. To sa modeluje pod vrcholovou udalosťou PVYP-RSOBOTA-426.
7. Keď je to krátkodobý skrat, zapracuje systém opätovného zapínania v rozvodni Levice a dáva vedenie opäť do prevádzky, čo sa modeluje pod vrcholovou udalosťou OZ-LEVICE-426.
8. Keď je to krátkodobý skrat, zapracuje systém opätovného zapínania v rozvodni Rimavská

Sobota a dáva vedenie opäť do prevádzky, čo sa modeluje pod vrcholovou udalosťou OZ-RSOBOTA-426.

V strome udalostí sú tieto havarijné reťazce:

Reťazec 1: Tento reťazec je úspešný. Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia. Ochrana aj výkonové vypínače sú úspešné. Stabilita siete nie je ohrozená.

Reťazec 2: Tento reťazec je úspešný. Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia, vypínače vypnú. Automatika opätovného zapínania zlyhá v Rimavskej Sobote. Stabilita siete nie je ohrozená.

Reťazec 3: Tento reťazec je úspešný. Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia, vypínače zapracujú za 100 ms. Automatika opätovného zapínania nezpracuje v rozvodni Levice. Je to projektová porucha n-1, napriek tomu, že vedenie zostane po poruche nepripojené, sieť zostáva stabilná.

Reťazec 4: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia. Vypínač v Leviciach vypne vedenie za 100 ms, vypínač v Rimavskej Sobote zlyhá, ale zapracuje automatika zlyhania vypínača, vypne sa rozvodňa v Rimavskej Sobote za 250 ms, čo vedie k následku GS2.

Reťazec 5: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia. Vypínač v Leviciach zapracuje za 100 ms, vypínač v rozvodni R. Sobota zlyhá a súčasne zlyhá aj automatika zlyhania vypínača. Preto pokračuje tok poruchového prúdu na druhom konci vedenia, čo vedie k následku GS4.

Reťazec 6: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia. Vypínač v rozvodni Rimavská Sobota zapracuje za 100 ms, vypínač v rozvodni Levice zlyhá, ale zapracuje automatika zlyhania vypínača a vypne prípojnicu v Leviciach za 250 ms, čo vedie k následku GS3.

Reťazec 7: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia. Vypínače zlyhajú na oboch koncoch, ale zapracuje automatika zlyhania vypínača a dochádza k vypnutiu prípojnice na oboch koncoch vedenia, čo vedie k následku GS3.

Reťazec 8: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia. Vypínače zlyhajú na oboch koncoch, automatika zlyhania vypínača zapracuje v rozvodni Levice, v rozvodni Rimavská Sobota zlyhá, tok poruchového prúdu z druhého konca vedenia preto pokračuje, čo vedie k následku GS4.

Reťazec 9: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov na oboch koncoch vedenia. Nezpracuje vypínač v rozvodni Levice, ani automatika zlyhania vypínača, tok poruchového prúdu pokračuje, čo vedie k následku GS4.

Reťazec 10: Po výskyte skratu sa vygeneruje signál z ochrany na vypnutie vypínača v rozvodni Levice. Signál z ochrany sa nevygeneruje v rozvodni Rimavská Sobota. Tok poruchového prúdu preto pokračuje, čo vedie k následku GS3.

Reťazec 11: Po výskyte skratu sa nevygeneruje signál z ochrany na vypnutie vypínača v rozvodni Levice. Tok poruchového prúdu preto pokračuje, čo vedie k následku GS2.

Definícia vrcholových udalostí v strome udalostí:

O-LEVICE-426 - nie je signál z ochrany na vypnutie vypínača v rozvodni Levice.

O-RSOBOTA-426 - nie je signál z ochrany na vypnutie vypínača v rozvodni R. Sobota.

VYP-LEVICE-426 - nie je vypnutie vypínača v rozvodni Levice.

VYP-RSOBOTA-426 - nie je vypnutie vypínača v rozvodni Rimavská Sobota.

PVYP-LEVICE-426 - nie je vypnutie prípojnice v rozvodni Levice po poruche vypínača.

PVYP-RSOBOTA-426 - nie je vypnutie prípojnice v rozvodni Rimavská Sobota po poruche vypínača,

OZ-LEVICE-426 - nie je opätovné zapínanie vypínača v rozvodni Levice.

OZ-RSOBOTA-426 - nie je opätovné zapínanie vypínača v rozvodni R. Sobota.

Skrat na linke 426 - vo vzdialenosti 50% od rozvodni	Signal z ochrany na vypnutie vypinaca Levice (426)	Signal z ochrany na vypnutie vypinaca Rimavska Sobota (426)	Vypnutie vypinaca Levice (426)	Vypnutie rozvodne Levice po poruche vypinaca (426)	Vypnutie vypinaca Rimavska Sobota (426)	Vypnutie rozvodne Rimavska Sobota po poruche vypinaca (426)	Opatovne zapnutie vypinaca Levice (426)	Opatovne zapnutie vypinaca Rimavska Sobota (426)	P. č.	Následok
00S-426	O-LEVICE-426	O-RSOBOTA-426	VYP-LEVICE-426	PVYP-LEVICE-426	VYP-RSOBOTA-426	PVYP-RSOBOTA-426	OZ-LEVICE-426	OZ-RSOBOTA-426		
									1	OK
									2	OK
									3	OK
									4	GS2
									5	GS4
									6	GS3
									7	GS3
									8	GS4
									9	GS4
									10	GS3
									11	GS2

Obr. 5.2 Strom udalostí pre skrat na vedení V426 Levice – Rimavská Sobota (miesto skratu je v strede vedenia)

5.1.4 Stromy udalostí pre skraty 400 kV rozvodní

Zoznam stromov udalostí, zostavených pre 400 kV rozvodne, sa uvádza v tabuľke 5.1. Rozvodne, ktoré nie sú uvedené v modeli, majú zanedbateľný vplyv na riziko vzniku nežiadúcich stavov ES (výsledky analýzy dynamickej stability).

Tabuľka 5.1 Zoznam stromov udalostí 400 kV rozvodní, modelovaných v PSA modeli

Označenie	Popis
S-KRIZOVANY	Skrat v rozvodni Križovany
S-LEVICE	Skrat v rozvodni Levice
S-VDUR	Skrat v rozvodni Veľký Ďúr
S-VARIN	Skrat v rozvodni Varín
S-VKAPUSANY	Skrat v rozvodni Veľké Kapušany

Na ilustráciu sa na obr. 5.3 uvádza strom udalostí pre skrat na prípojnici 400 kV rozvodne.

Skrat v 400kV rozvodni Levice	Zlyhanie rozdielovej ochrany Levice	Vypnutie vypinaca Levice (490)	Vypnutie vypinaca Levice (491)	Vypnutie vypinaca Levice (426)	Vypnutie vypinaca Levice (449)	P.č.	Následok
00S-LEVICE	ROZD.OCHR-LEVICE	VYP-LEVICE-490	VYP-LEVICE-491	VYP-LEVICE-426	VYP-LEVICE-449		
						1	OK
						2	GS3
						3	GS3
						4	GS4
						5	GS4
						6	GS4

Obr. 5.3 Strom udalostí pre skrat na prípojnici 400 kV rozvodne Levice

V strome udalostí sú tieto havarijné reťazce:

Reťazec 1: Tento reťazec je úspešný. Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z rozdielovej ochrany na vypínačoch všetkých vedení. Stabilita siete nie je ohrozená.

Reťazec 2: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov, zlyhá však vypnutie vypínača vedenia V449 a dochádza k vzniku stavu GS3.

Reťazec 3: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov, zlyhá však vypnutie vypínača vedenia V426 a dochádza k vzniku stavu GS3.

Reťazec 4: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov, zlyhá však vypnutie vypínača vedenia V491 a dochádza k vzniku stavu GS4.

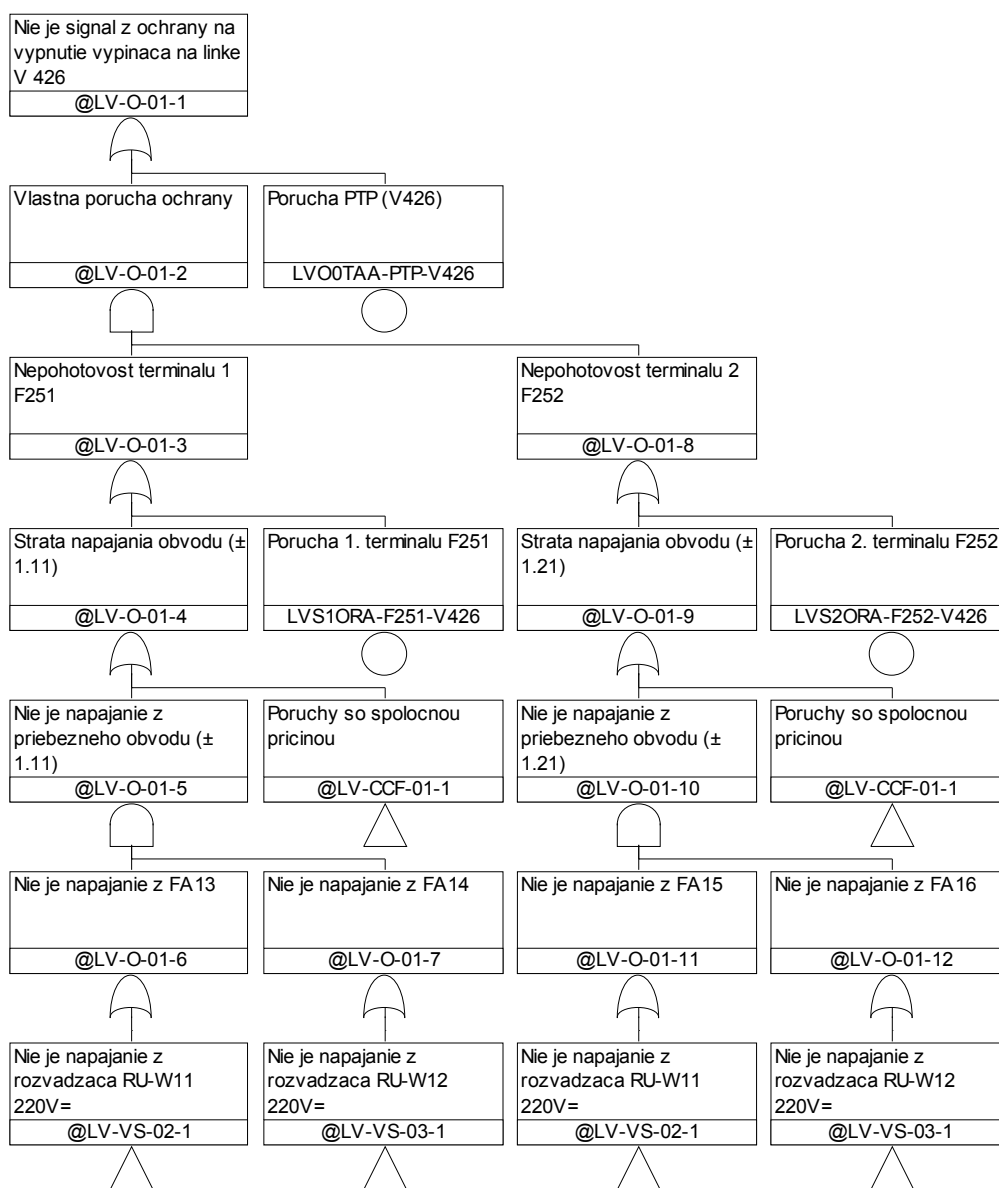
Reťazec 5: Po výskyte skratu sa vygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov, zlyhá však vypnutie vypínača vedenia V490 a dochádza k vzniku stavu GS4.

Reťazec 6: Po výskyte skratu sa nevygenerujú signály z ochrany na vypnutie vypínačov a dochádza k vzniku stavu GS4.

Podobne boli vytvorené stromy udalostí pre skraty na ostatných 400 kV vedeniach a v rozvodniach.

5.2 Popis stromov porúch

V záhlaví stromov udalostí sa nachádzajú stromy porúch, ktoré modelujú spoľahlivosť tvorby signálu ochrán, vypnutia vypínačov a rozvodní. Na obr. 5.4 je uvedený príklad na ilustráciu.



Obr. 5.4 Strom porúch pre tvorbu signálu

5.3 Výsledky PSA modelu

V tejto časti sú prezentované typické výsledky PSA, ktoré zahŕňujú dominantné príspevky k riziku od iniciačných udalostí, kategórií primárnych udalostí, havarijných reťazcov a minimálnych kritických rezov a analýzy neurčitosti, dôležitosti a citlivosti.

5.3.1 Frekvencia koncových stavov

Vypočítaná stredná hodnota frekvencie koncových stavov ES po vzniku IU:

$$GS1 = 1,98E-03/r$$

$$GS2 = 1,68E-03/r$$

$$GS3 = 1,28E-03/r$$

$$GS4 = 6,72E-04/r$$

Minimálne kritické rezy s frekvenciou menšou ako $1,0E-12$ /rok sa pri výpočte nebrali do úvahy.

V nasledujúcej časti je uvedené podrobné vyhodnotenie pre najhorší koncový stav, t.j. stav GS4. Podrobné výsledky pre všetky koncové stavy sú súčasťou PSA modelu.

5.3.1.1 Príspevok iniciačných udalostí k frekvencii koncového stavu GS4

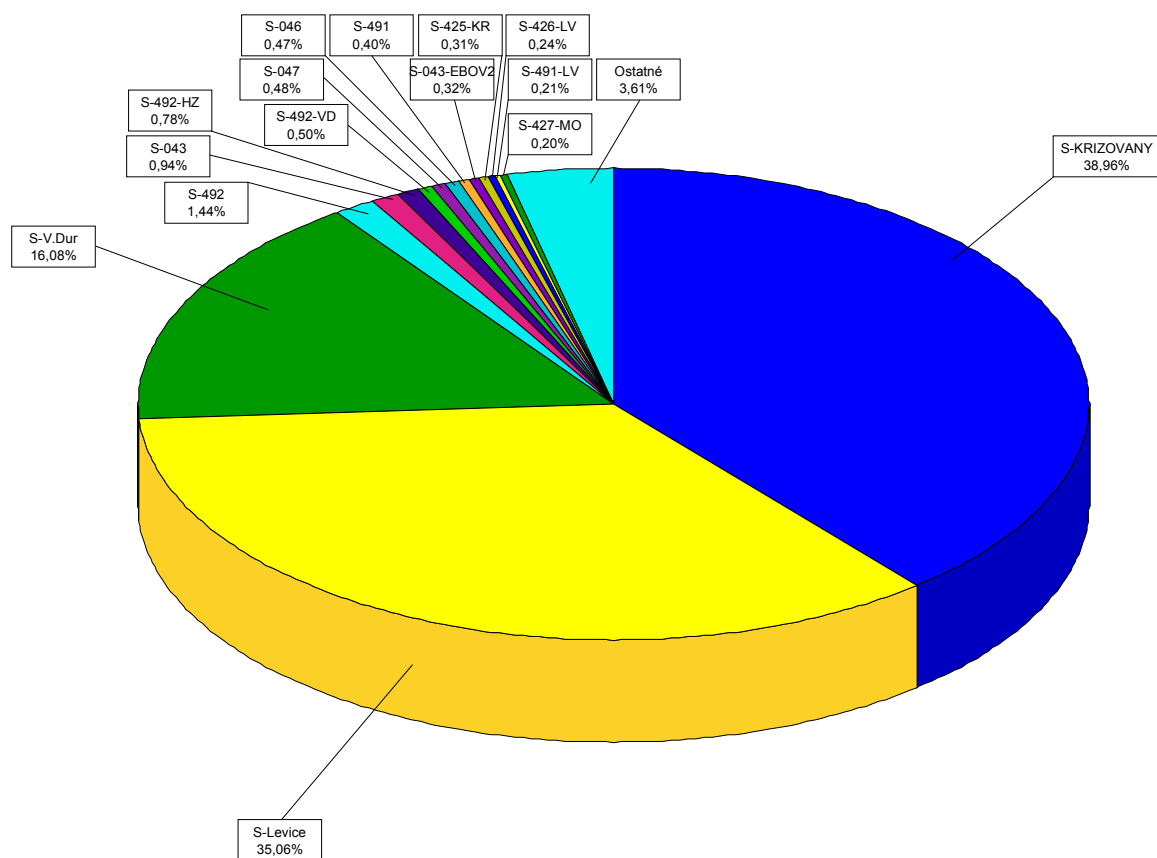
Poradie iniciačných udalostí podľa ich dôležitosti je uvedené v tabuľke 5.2. Uvádza sa frekvencia výskytu iniciačnej udalosti, podmienená pravdepodobnosť výskytu GS4 (frekvencia výskytu stavu za predpokladu, že frekvencia iniciačnej udalosti sa rovná jednej), frekvencia stavu a percentuálny príspevok k celkovej frekvencii rozpadu PS. Grafické znázornenie príspevkov iniciačných udalostí k riziku je na obr. 5.5.

Dominantnou iniciačnou udalosťou je skrat v rozvodni Križovany. Vykazuje 38,96% príspevok k frekvencii vzniku stavu GS4. Potom nasleduje skrat v rozvodni Levice s príspevkom k riziku vzniku GS4 35,06%, skrat v rozvodni Veľký Ďúr s príspevkom k riziku vzniku GS4 16,08%. Príspevok ostatných skratov k riziku GS4 je menší ako 3%.

Tabuľka 5.2 Poradie iniciačných udalostí podľa ich dôležitosti pre koncový stav GS4

Príspevok iniciačných udalostí k frekvencii stavu D4					
Iniciačná udalosť S (IU)	Popis	Frekvencia IU [r^{-1}]	Podmienená pravdepodobnosť	Frekvencia výskytu [r^{-1}]	% z celkovej frekvencie
S-KRIZOVANY	Skrat v rozvodni Križovany	4,89E-02	5,35E-03	2,62E-04	38,96
S-LEVICE	Skrat v rozvodni Levice	4,89E-02	4,81E-03	2,35E-04	35,06
S-V.DUR	Skrat v rozvodni Veľký Ďúr	4,89E-02	2,21E-03	1,08E-04	16,08
S-492	Skrat na linke 492 - vo vzdialenosti 50% od rozvodní	4,58E-03	2,12E-03	9,69E-06	1,44
S-043	Skrat na linke 043 - vo vzdialenosti 50% od rozvodní	2,99E-03	2,10E-03	6,28E-06	0,94
S-492-HZ	Skrat na linke 492 - vo vzdialenosti 10% od rozvodne Horná Ždaňa	1,53E-03	3,43E-03	5,23E-06	0,78
S-492-VD	Skrat na linke 492 - vo vzdialenosti 10% od rozvodne Veľký Ďúr	1,53E-03	2,20E-03	3,35E-06	0,50
S-047	Skrat na linke 047 - vo vzdialenosti 50% od rozvodní	5,10E-04	6,29E-03	3,21E-06	0,48
S-046	Skrat na linke 046 - vo vzdialenosti 50% od rozvodní	5,03E-04	6,28E-03	3,16E-06	0,47
S-491	Skrat na linke 491 - vo vzdialenosti 50% od rozvodní	1,25E-03	2,12E-03	2,65E-06	0,40
S-043-EBOV2	Skrat na linke 043 - vo vzdialenosti 10% od rozvodne EBO V2	9,97E-04	2,17E-03	2,16E-06	0,32

Príspevok iníciačných udalostí k frekvencii stavu D4					
Iničiačná udalosť S (IU)	Popis	Frekvencia IU [r ⁻¹]	Podmienená pravdepodobnosť	Frekvencia výskytu [r ⁻¹]	% z celkovej frekvencie
S-425-KR	Skrat na linke 425 - vo vzdialenosti 10% od rozvodne Križovany	1,56E-03	1,34E-03	2,08E-06	0,31
S-426-LV	Skrat na linke 426 - vo vzdialenosti 10% od rozvodne Levice	2,83E-03	5,80E-04	1,64E-06	0,24
S-491-LV	Skrat na linke 491 - vo vzdialenosti 10% od rozvodne Levice	4,17E-04	3,44E-03	1,43E-06	0,21
S-427-MO	Skrat na linke 427 - vo vzdialenosti 10% od rozvodne Moldava	2,28E-03	5,84E-04	1,33E-06	0,20
	Ostatné			2,43E-05	3,61
Celkom				6,72E-04	100,00%



Obr. 5.5 Príspevok iníciačných udalostí k rozpadu ES pre koncový stav GS4

6. Monitor rizika

Monitor rizika je aplikácia PSA na monitorovanie rizika využitím programu EOOS v programovom prostredí Microsoft Windows. Služi na monitorovanie rizika potenciálne nebezpečných technológií a odhaľuje súvislosti medzi rizikom, ekonomikou prevádzky a pohotovosťou zariadení systémov. EOOS pre ES je vyvinutý analogicky, ako v prípade JE [3,7].

EOOS je navrhnutý pre dva typy užívateľov, pre každého s rozdielnou sadou nástrojov. Prvý užívateľ sa zaoberá aktuálnou konfiguráciou ES (napr. dispečer SED). Druhý užívateľ sa zaoberá plánovaním budúcich odstávok zariadení – plánovač, príprava prevádzky.

Aj keď je EOOS určený špecificky pre tieto dva typy užívateľov môžu ho využívať aj ostatní pracovníci SEPS.

EOOS je napísaný v programe Microsoft Visual Basic. Využíva programové knižnice dostupné v rámci združenia EPRI „Risk and Reliability Analysis Workstation“. Má podobné vlastnosti ako ostatné EPRI programy, slúžiace na analýzu spoľahlivosti systémov. Pre využívanie EOOS nie sú potrebné predchádzajúce skúsenosti s inými EPRI programami (napr. CAFTA), sú však výhodou pre užívateľa.

EOOS je nápomocný hlavne pri dosahovaní týchto prevádzkových cieľov:

- zvýšenie bezpečnosti prevádzky,
- prezentácia úrovne rizika pre dozorné orgány a zainteresovaných pozorovateľov,
- znižovanie rizika plánovaním opravárenských činností na báze kvantifikácie rizika a úspory nákladov na údržbu.

Zvýšenie bezpečnosti sa dosahuje tým, že monitor umožňuje vyhýbať sa konfiguráciám ES s významným rizikom.

EOOS znižuje možnosť výskytu chýb pri plánovaní údržby. Odhalí také bezpečnostné problémy, ktoré rutinne unikajú bezpečnostným kontrolám. Na druhej strane však znižuje náklady na tieto kontroly. Poskytuje spoľahlivé, na riziko orientované podklady, ktoré eliminujú zbytočne konzervatívne požiadavky plánovania.

6.1 Strom porúch

EOOS sprostredkuje informácie použitím stromu porúch a minimálnych kritických rezov - základných nástrojov spoľahlivostného inžinierstva a PSA. Vytvára vhodné užívateľské rozhranie aj pre tých pracovníkov, ktorí nie sú expertmi PSA. Stromy porúch predstavujú logické hradlá, primárne udalosti, atď., ale EOOS komunikuje v jazyku svojho užívateľa a používa terminológiu známu z prevádzky.

Program EOOS vykonáva tri funkcie:

- upravuje vstupné dáta stromu porúch,
- analyzuje strom porúch,
- upravuje výsledky analýzy stromu porúch.

6.1.1 Tvorba stromu porúch pre monitor rizika

Strom porúch vhodný pre účely monitorovania rizika v programe EOOS sa vytvoril transformáciou PSA modelu popísaného v 5. kapitole, vytvoreného v programe Riskspectrum. Samotná transformácia spočíva v importovaní databázových súborov modelu do prostredia programu EOOS.

PSA model popísaný v 5. kapitole obsahoval stromy udalostí a stromy porúch pre základný stav ES SR popísaný v 2. kapitole. V základnom zapojení pracuje prenosová sústava približne 1/4 časového fondu roka. Vo zvyšnom čase sa môžu vykonávať údržbové práce, pričom dochádza k zníženiu spoľahlivosti prenosu elektriny.

Za účelom odhadu vplyvu údržby na riziko boli do základného PSA modelu domodelované stromy udalostí a stromy porúch pre týchto 10 údržbových stavov:

1. Vypnuté vedenie V495 za prevádzky obidvoch reaktorov EBO V2.
2. Vypnuté vedenie V495, Rz 400 kV Križovany prevádzkovaná na jednej prípojnici (s uvažovaním prevádzky obidvoch reaktorov EBO V2).
3. Prevádzka rozvodne 400 kV Križovany na jednej prípojnici s uvažovaním prevádzky obidvoch reaktorov EBO V2. Vypnuté vedenia V404, V497.
4. Prevádzka rozvodne 400 kV Križovany na jednej prípojnici s uvažovaním prevádzky obidvoch reaktorov EBO V2.
5. Vypnuté vedenie V407 pri plánovane vypnutých vedeniach V477 a V478.
6. Vypnuté vedenie V426 pri plánovane vypnutých vedeniach V477 a V478.
7. Vypnuté vedenie V495, nutnosť vypnutia T401 Križovany.
8. Vypnuté vedenie V449 pri plánovane vypnutom vedení V448.
9. Vypnuté vedenie V404 pri plánovane vypnutých vedeniach V477 a V478.
10. Vypnuté vedenie V407, nutnosť vypnutia V492.

Pre každý z uvedených údržbových stavov boli zostavené samostatné stromy udalostí. Na rozlíšenie jednotlivých údržbových stavov bolo do PSA modelu dobudovaných 11 logických prepínačov: S0, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10. Udalosť S0 aktivuje stromy udalostí pre základný stav ES SR, kedy sa nevykonáva údržba zariadení. Udalosti S1 až S10 aktivujú stromy udalostí pre jednotlivé údržbové stavy 1 až 10. Stromy udalostí sa aktivujú za účelom výpočtu frekvencie následkov (GS1 až GS4).

6.2 Farby a veľkosť rizika

EOOS prezentuje výsledky v číselnej forme ako ukazovateľ rizika a v grafickej forme na farebne rozlíšenom paneli skutočného stavu ES SR formou diagramov a zoznamu dôležitých, z hľadiska rizika významných prvkov a aktivít.

EOOS intenzívne využíva farebne kódované obrazovky. Význam farieb závisí od stavby logiky stromu porúch. Pre niektoré aplikácie je postačujúci jednoduchý dvojfarebný systém (logické ÁNO = červená, logické NIE = zelená). Príklad a interpretácie farieb môžu byť:

Indikácia pohotovosti prvku X:

- červená = prvok X je nepohotový
- zelená = prvok X je pohotový

Viacfarebný systém pružne informuje o stave ES. Príklad aplikácie štvorfarebného systému:

Indikácia rizika:

- zelená: normálna úroveň rizika,
- žltá: malé zvýšenie rizika,
- oranžová: výrazné zvýšenie rizika,
- červená: kritická úroveň rizika.

Pri definovaní hraníc pre zmenu farby rizika sa vychádza zo základných hodnôt rizika. V prípade monitora rizika ES SR sa ako základné hodnoty rizík brali frekvencie výskytu koncových stavov GS1 až GS4 v základnom stave prenosovej sústavy, t.j. bez údržbových činností – S0. Hranice zmeny rizika sú odvodené od nasledujúcich hodnôt koncových stavov (rizík):

$$00GS1 = 1,98E-03$$

$$00GS2 = 1,68E-03$$

00GS3 = 1,28E-03

00GS4 = 6,72E-03

Ak sa zvýši hodnota koncového stavu dvojnásobne, ukazovateľ rizika sa zmení zo zelenej farby na žltú. Ak sa zvýši hodnota koncového stavu 5-násobne, ukazovateľ rizika sa zmení zo zelenej farby na oranžovú. Pri 10-násobnom zvýšení hodnoty koncového stavu sa ukazovateľ rizika vyfarbí červenou farbou.

6.3 Monitor rizika pre sledovanie aktuálneho rizika

Počas reálnej prevádzky sa zariadenia dávajú do skúšky a údržby. Ďalej sa môže na krátky čas vyradiť časť prvkov zo stavu pohotovosti, aby mal personál v prípade potreby bezpečný prístup k zariadeniam, atď. Všetky tieto zásahy ovplyvňujú bezpečnosť ES. Administratívne opatrenia bránia vykonať príliš veľa zásahov a vyvolať nepohotovosť veľkého počtu zariadení. V súlade s obmedzeniami sa využívajú hlavne znalosti o systémoch ES pri rozhodovaní o tom, ktoré kombinácie údržbových činností sa môžu vykonávať naraz.

Práca dispečera je navyše skomplikovaná nutnosťou prispôbovať sa neplánovaným udalostiam. Zariadenia mávajú poruchu, čo vyvolá zmenu konfigurácie ES. Plánované činnosti neprebiehajú podľa plánu (skončia skôr alebo neskôr). Pri kombináciách plánovaných a neplánovaných udalostí dispečer neustále prehodnocuje bezpečnosť ES.

Ďalším faktorom, ktorý ovplyvňuje prácu dispečera, je požiadavka prevádzkovateľa prenášať veľké výkonové toky, preto chce mať vedenia v odstavenom stave čo najkratšie. Prevádzkové ciele často vedú k vzájomným konfliktom. Na jednej strane chce prevádzkovateľ dosiahnuť maximálnu pohotovosť zariadení počas normálnej prevádzky, na druhej strane treba minimalizovať dĺžku trvania plánovaných odstávok z ekonomických dôvodov.

EOOS pomáha dispečerovi SED riešiť všetky tieto problémy a pritom sa zameriavať hlavne na bezpečnosť. Kombinácia viacerých súčasne vykonávaných činností môže mať neočakávaný vplyv na bezpečnosť. EOOS vyhodnocuje tieto vplyvy a dáva pohotovo informácie.

Dispečer komunikuje s programom EOOS pomocou obrazovky (na ilustráciu sa uvádza obrazovka dispečera, obr. 7.1), ktorá monitoruje stav ES a poskytuje aktuálnu informáciu o vplyve zmeny konfigurácie na celkové riziko. Túto obrazovku využívajú aj iní užívatelia, je však navrhnutá predovšetkým pre dispečera, ktorý sleduje aktuálny stav ES a riadi ho.

Obrazovka poskytuje tieto informácie:

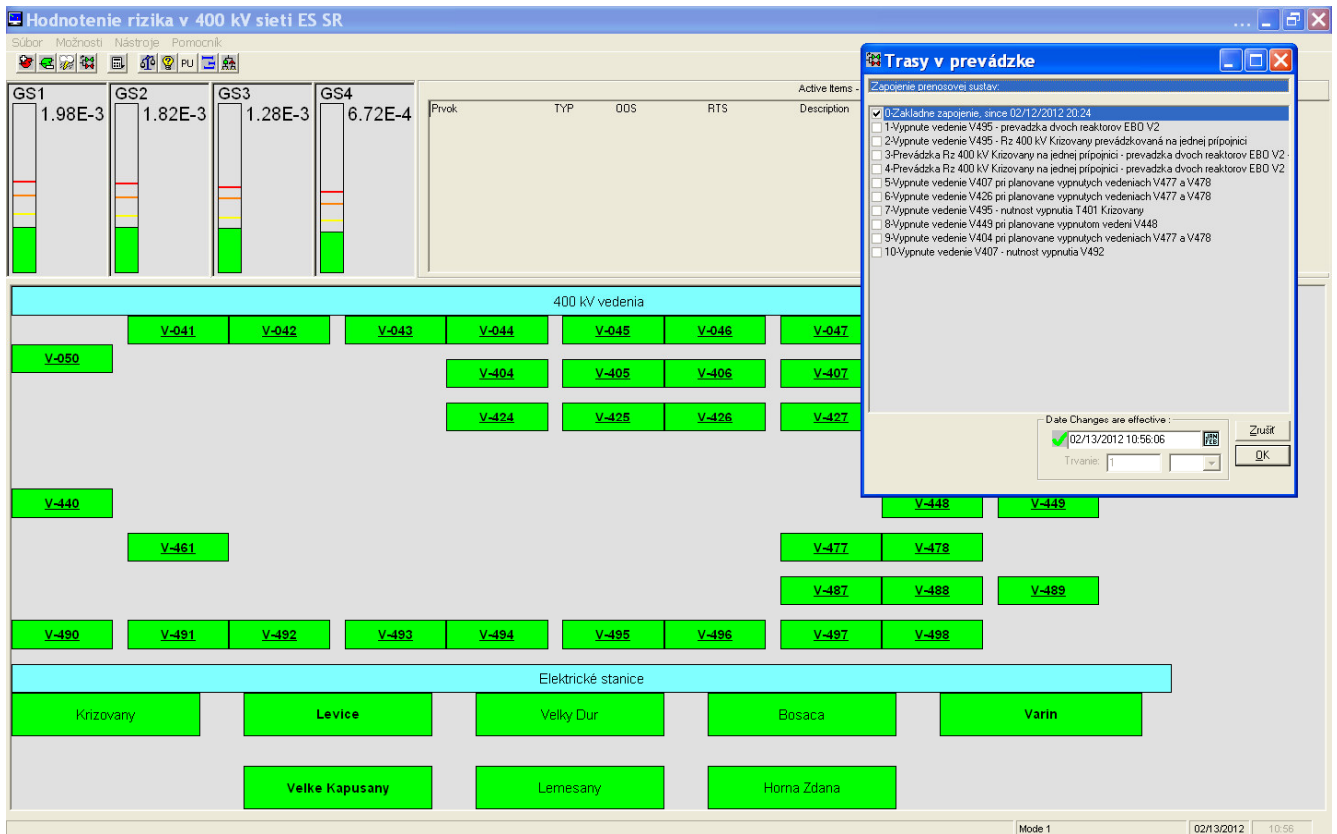
- farebná a číselná indikácia rizika (GS1-GS4),
- stav systémov,
- aktuálny zoznam nepohotových prvkov,
- dôležitosť pohotových a nepohotových prvkov z hľadiska rizika,
- výsledky rýchleho prepočtu ukazovateľov rizika pri analýze rôznych scenárov typu „čo ak?“.

Na obr. 6.1 je zobrazené aj dialógové okno pre voľbu aktuálnej konfigurácie ES SR. Dispečer môže navoliť základný stav bez údržbových činností (S0), alebo zvoliť jeden z nadefinovaných údržbových stavov S1 - S10.

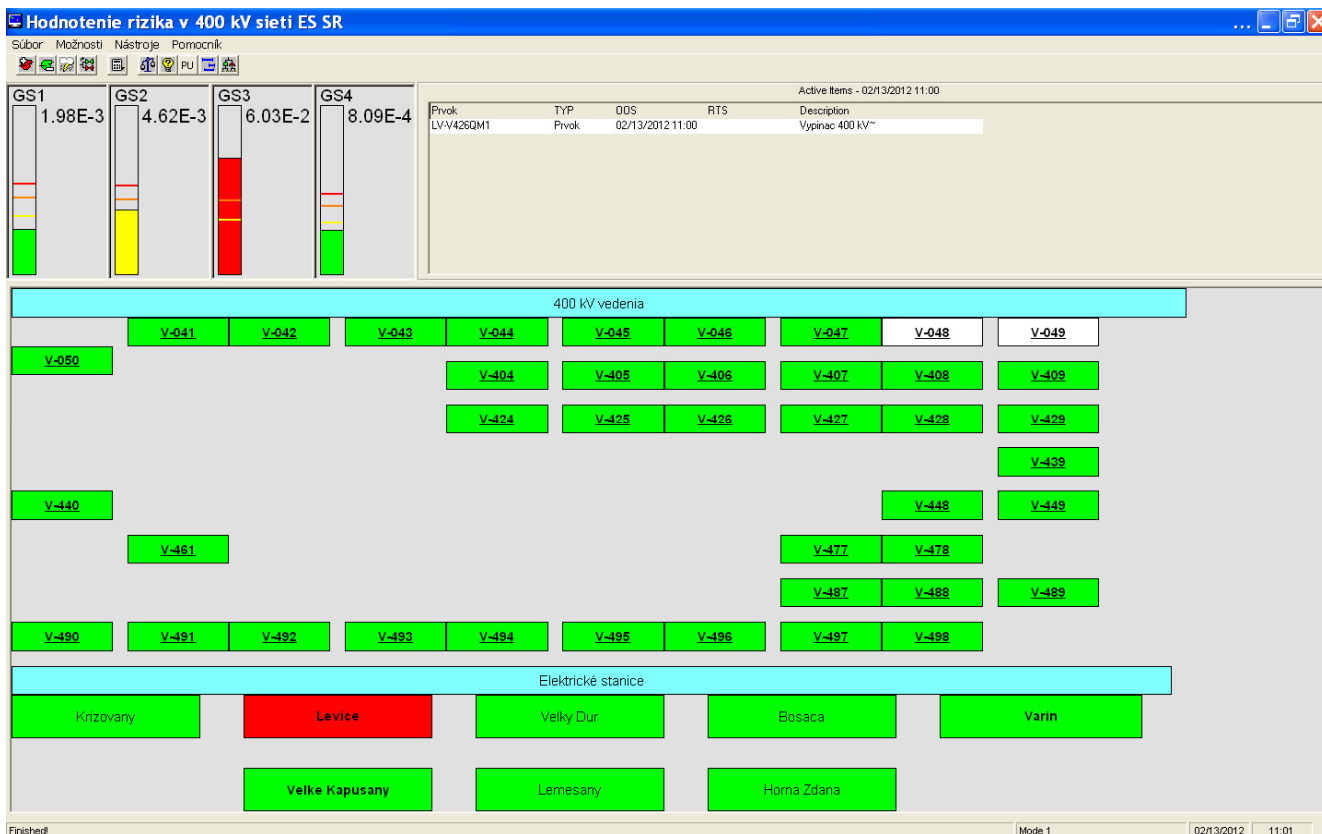
V ľubovoľnej konfigurácii môže podľa potreby vyradovať aj ďalšie zariadenia ES SR pomocou zoznamov zariadení, alebo priamo z technologických schém ES SR. Po každej zmene konfigurácie ES získava dispečer okamžitú informáciu o stave rizika.

Príklad znázornený na obr. 6.2 predstavuje riziko pre nepohotovú vypínač vedenia V426 v rozvodni Levice (vypínač v prípade potreby nevypína). V takomto stave dochádza k dvojnásobnému (žltá farba) nárastu rizika vzniku stavu **GS2 - ES SR je stabilná s obmedzením** a až desaťnásobnému (červená farba) nárastu rizika vzniku stavu **GS3 - ES SR je v stave ohrozenia**. Preto musí dispečer prijať opatrenia na návrat rizika v ES SR na prijateľnú úroveň.

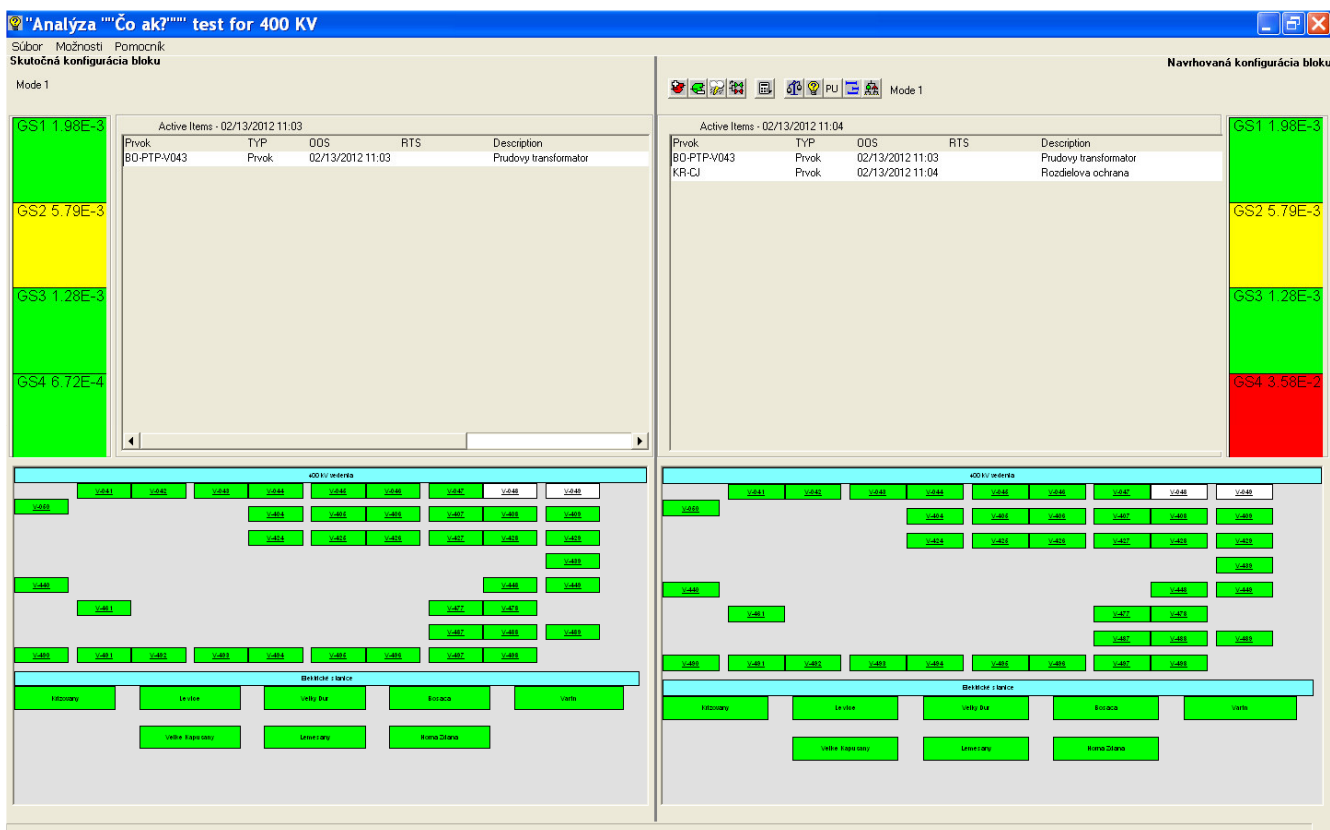
Na obr. 6.3 je zobrazená situácia pri použití hypotetického módu „Čo ak?“. Tento mód sa využíva v prípadoch, keď je pri ustálenej konfigurácii ES SR potrebné vykonať činnosti spojené s nepohotovosťou ďalších zariadení. Vľavo na obrazovke je zobrazená aktuálna konfigurácia siete s nepohotovým prúdovým transformátorom a vpravo je obrazovka znázorňujúca ako by sa zmenilo riziko pri vyradení ďalšieho zariadenia – rozdielovej ochrany v rozvodni Križovany. V takejto konfigurácii siete by sa výrazne zvýšilo riziko (viac ako 10 krát) vzniku stavu **GS4 – ES SR je nestabilná**, a teda dispečer sa bude snažiť predísť vzniku takejto situácie prijatím príslušných opatrení.



Obr. 6.1 Základná obrazovka dispečera v monitore rizika



Obr. 6.2 Stav rizika v ES SR pri nepohotovom vypinaci vedenia V426 v rozvodni Levice



Obr. 6.3 Použitie hypotetického módu „Čo ak?“ v monitore rizika ES SR

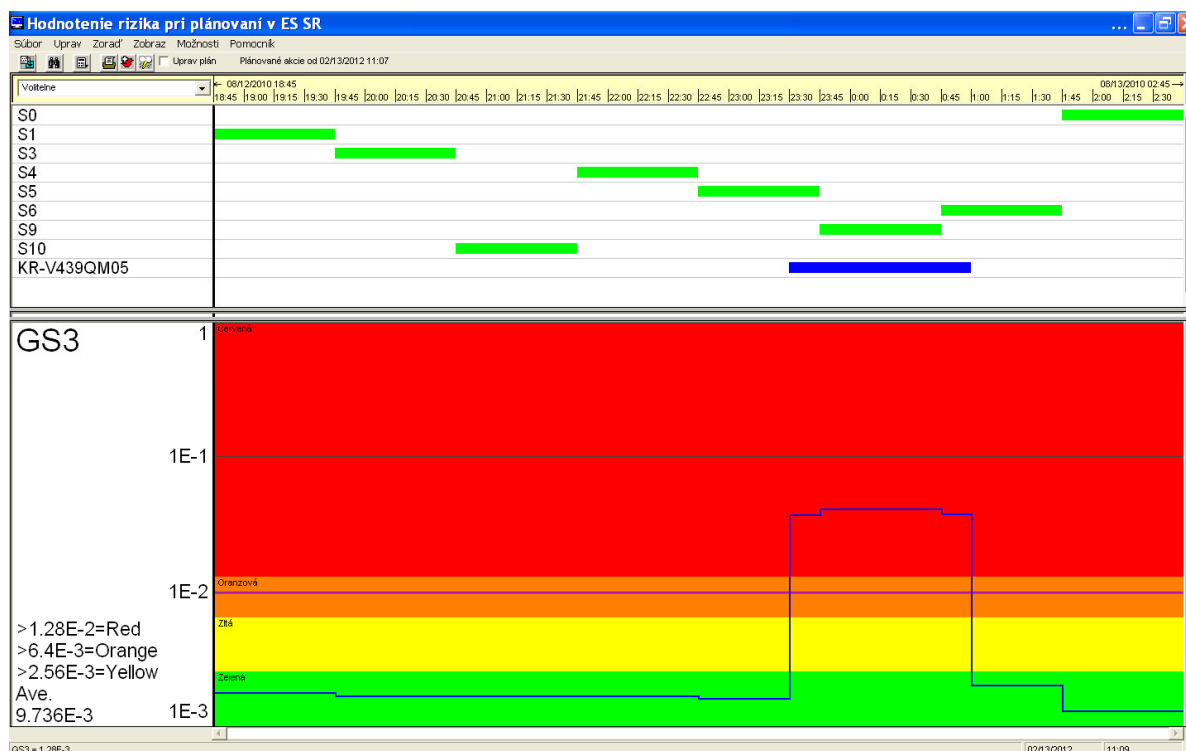
6.4 Monitor rizika pre plánovanie

Obrazovka EOOS pre plánovanie zobrazuje ako môže plánovaná údržba (budúce konfigurácie PS) ovplyvniť bezpečnosť v sledovanom období. Hodnotenie rizika budúcich konfigurácií má zabrániť tomu, aby sa ES dostala do stavu s neprijateľným rizikom.

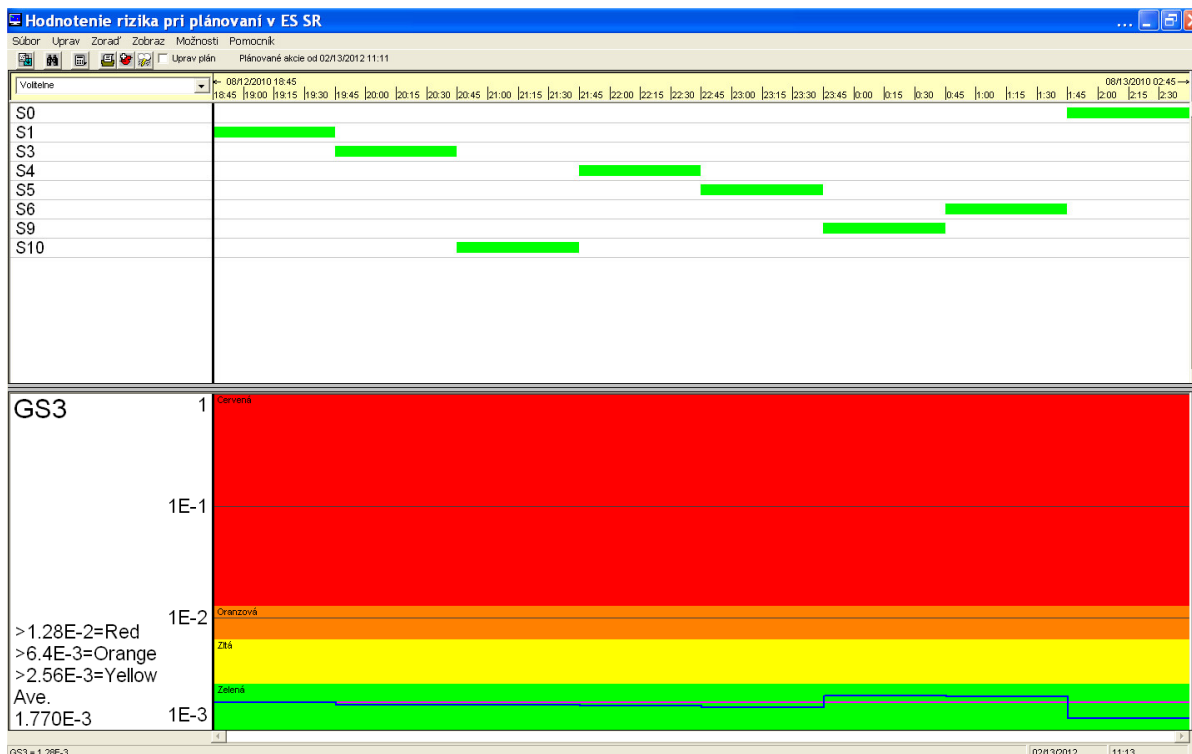
Práca plánovača v prostredí monitora rizika (EOOS) je veľmi podobná ako v prípade dispečera. Rozdiel je v tom, že pokým dispečer analyzuje aktuálnu konfiguráciu ES SR, t.j. v danom časovom okamihu, plánovač môže do monitora rizika zadať činnosti idúce v časovom slede po sebe. Tým získa informáciu o riziku (profil rizika) pre plánované, resp. vykonané činnosti spojené napr. s údržbou zariadení v určitom časovom období (týždeň, mesiac). V prostredí plánovača je možné vyhodnocovať budúce, plánované činnosti, aj činnosti vykonané za uplynulé obdobie.

Pri svojej práci využíva plánovač rovnaké nástroje ako dispečer, tzn., že môže navoliť plánovanú konfiguráciu ES SR pomocou preddefinovaných údržbových stavov a vyradením zariadení zo zoznamov zariadení alebo technologických schém. Jediný rozdiel pri práci plánovača je ten, že na obrazovke plánovača je možné vidieť profil rizika len pre jeden koncový stav GS1 až GS4. Samozrejme, plánovač si postupne môže zobraziť profil rizika pre každý koncový stav.

Obrazovka plánovača je na obr. 6.4 pre koncový stav GS3. Horné okno znázorňuje plánované činnosti v závislosti od času. Sú to časové intervaly nepohotovosti zariadení (plánovací diagram). Dolné okno uvádza profil rizika, ktorý sa dá meniť vhodnou voľbou nepohotovosti zariadení. Obr. 6.4 znázorňuje nepovolený a neakceptovateľný profil rizika. Je potrebné zmeniť plánované nepohotovosti tak, aby bolo riziko prijateľné (obr. 6.5).



Obr. 6.4 Obrazovka plánovača s profilom rizika pre koncový stav GS3



Obr. 6.5 Obrazovka plánovača s profilom rizika pre koncový stav GS3

Záver

V práci je popísané využitie pravdepodobnostného prístupu pri hodnotení rizika rozpadu elektrizačnej sústavy SR v podmienkach liberalizácie trhu s elektrickou energiou. Cieľom práce bola aplikácia metódy pravdepodobnostného hodnotenia bezpečnosti pri hodnotení rizík v ES SR. Cieľ sa dosiahol zostavením matematického modelu (PSA modelu) pre 400 kV prenosovú sústavu SR a vývojom systému monitorovania rizika.

Práca poskytuje aj návod na analýzu spoľahlivosti ľudského činiteľa pre PSA PS. Takáto analýza je štúdiou interakcií personálu (dispečer a personál údržby) a systému ako aj snahou predpovedať vplyv takýchto interakcií na spoľahlivosť a bezpečnosť PS. Pre zložité systémy, akým je aj PS, ktoré zahŕňajú veľké množstvo ľudských zásahov, sa analýza ľudskej spoľahlivosti stáva dôležitou súčasťou PSA, zaisťujúcou realistické hodnotenie bezpečnosti. Analytici modelujú a kvantifikujú ľudské zásahy, ktoré sa potom začlenia ako primárne udalosti do stromov udalostí a stromov porúch. Potom sa PSA modelom vyhodnotí príspevok jednotlivých typov ľudských zásahov k frekvencii úplného a čiastočného rozpadu PS. Na základe výsledkov sa prijímajú opatrenia. V rámci vývoja PSA modelu, ktorý je popisovaný v tejto práci, sa vplyv ľudského činiteľa posudzoval pri analýze príčin vzniku skratov na vedeniach a v elektrických staniách. Ľudské zásahy po výskyte iniciačnej udalosti sa nebrali do úvahy pre nedostatok času na zásah.

Pri vývoji PSA modelu boli vytvorené stromy udalostí a stromy porúch, ktorými je reprezentovaná modelovaná technológia – 400 kV ES SR. Vstupy stromov porúch tvoria pravdepodobnosti porúch zariadení. V rámci práce sa vyhodnotila poruchovosť zariadení za sledované obdobie 10 rokov a vypočítali sa príslušné spoľahlivostné parametre. Pre tento účel bola vyvinutá databázová aplikácia Datafarm-ES. Je to silný analytický nástroj pre zber údajov o poruchách zariadení a výpočet ich spoľahlivostných parametrov.

Pre správne zostavenie stromov udalostí boli potrebné výsledky analýz dynamickej stability ES

pri rôznych poruchách. Na základe výsledkov tejto analýzy boli v PSA modeli zostrojené stro-
my udalostí pre skrat na 41 vedeniach 400 kV a v piatich dôležitých elektrických staniach.

Výpočty stability ES SR pri pôsobení rôznych typov porúch ukázali, že:

- Poruchy, ktoré môžu narušiť stabilitu sústavy, sú z kategórie skratov s uvažovaním predpo-
kladných scenárov zlyhania ochrán alebo vypínačov. Sú to najmä skraty na významných
vedeniach, ale aj vo významných rozvodniach, ako sú Križovany, Levice a V. Ďúr.
- Poruchy z kategórie výpadkov záťaží sú pre stabilitu sústavy najmenej významné, nakoľko
primárna regulácia frekvencie v celom (bývalom) UCTE je „silná“ v porovnaní s veľkosťou
záťaží v ES SR.
- Výpadky vedení sú ohrozujúce najmä ak sú to vedenia, cez ktoré sú vyvedené výkony sys-
témových zdrojov.
- Účinky výpadkov zdrojov na stabilitu ES SR sú menej významné vzhľadom na primárnu
reguláciu frekvencie a môžu spôsobovať vážnejšie problémy pri zabezpečení sekundárnej
regulácie frekvencie a pilotných napätí.
- Preventívnou údržbou zariadení sa mení konfigurácia ES, čo môže mať významný vplyv na
spoľahlivosť a bezpečnosť prevádzky.
- Výkonové toky ES tiež významne prispievajú k vzniku nežiadúcich stavov sústavy. Čím
väčšie sú výkonové toky, tým väčšia je pravdepodobnosť úplného alebo čiastočného rozpadu
sústavy.

Kvantifikáciou PSA modelu sme získali základnú informáciu o riziku. Vypočítala sa frekvencia
výskytu nežiadúcich stavov GS1-GS4 z hľadiska stability ES v základnom stave ES, t.j. bez
údržbových činností, ako aj v desiatich vybraných údržbových stavoch. (GS1 = $1,98E-03/r$,
GS2 = $1,68E-03/r$, GS3 = $1,28E-04/r$, GS4 = $6,72E-04/r$ – hodnoty pre základný stav ES SR bez
údržbových činností). Identifikovali sa dominantné iniciačné udalosti havárie (skraty na vede-
niach a prípojniciach PS) a dominantné poruchy prvkov pre výskyt týchto stavov. Týmto postu-
pom sa potvrdila možnosť využitia pravdepodobnostného prístupu pre ES SR.

Vypočítané frekvencie svedčia o vysokej spoľahlivosti a bezpečnosti siete. Treba však uviesť,
že výpočty boli vykonané len pre obmedzený počet konfigurácií (11) a len pre jedno výkonové
zaťaženie. Keď sa ďalšie zariadenia dávajú do údržby, alebo sa mení veľkosť výkonových to-
kov, môže sa frekvencia týchto stavov zvýšiť a prekročiť určitá, vopred definovaná hranica pri-
jateľného rizika. Z tohto dôvodu je potrebné existujúci model neustále aktualizovať a rozširo-
vať.

Na základe PSA modelu bol vyvinutý monitor rizika v ES SR v programe EOOS. Monitor rizi-
ka umožňuje pružne meniť konfiguráciu PSA modelu podľa reálnej situácie v ES SR a následne
rýchlym výpočtom získať informáciu o riziku. Umožňuje sledovanie profilu rizika rôznych kon-
figurácií s údržbou zariadení a tak pomáha pri rozhodovaní o povoľovaní ďalších činností spo-
jených s údržbou. Jeho hlavnou výhodou je skutočnosť, že ho môžu využívať aj pracovníci bez
podrobných znalostí z oblasti spoľahlivostného inžinierstva, pretože pri práci s monitorom rizi-
ka prichádza užívateľ do styku s reálnymi označeniami zariadení a schémami, ktoré pozná zo
svojej praxe.

Keďže základom monitora rizika je PSA model, ktorý sa opiera o výsledky dynamickej stability
siete pre 11 rôznych konfigurácií, pre jeho vyššiu presnosť, flexibilitu a univerzálnosť sú po-
trebné ďalšie výpočty dynamickej stability iných údržbových stavov, ktoré môžu nastať pri rôz-
nych výkonových tokoch. Tieto výpočty povedú k vývoju tzv. plnorozsahového monitora rizika.
Model vyvinutý v tejto práci je dobrým základom pre vývoj tohto plnorozsahového monitora
rizika ES SR. Vývoj plnorozsahového monitora rizika ES SR môže byť predmetom výskumné-
ho projektu, výsledkom ktorého môže byť jeho uplatnenie v praxi, kde sa môže využívať ako
pomocný nástroj pri riadení, plánovaní a rozvoji ES SR. Možnosť rozhodovania sa na báze rizi-
ka môže v budúcnosti účinne pomôcť pri prevádzkovaní ES SR.

Prínos práce pre prax

Hlavným prínosom práce je komplexné rozpracovanie problematiky pravdepodobnostného hodnotenia bezpečnosti (PSA) a jej aplikácia pre ES SR. Hlavné ciele práce, t.j. tvorba databázového nástroja pre zber a výpočet spoľahlivostných parametrov, vytvorenie PSA modelu ES SR a jeho následná aplikácia do podoby monitora rizika potvrdili vysokú spoľahlivosť ES SR a poukázali na alternatívny spôsob ďalšieho zvyšovania spoľahlivosti a bezpečnosti pomocou pravdepodobnostného prístupu.

Popisovaný PSA model môže slúžiť ako dobrý základ pre ďalší výskum a vývoj tzv. plnorozsahového monitora rizika, ktorý by vďaka svojmu rozsahu mohol byť vhodným doplnkom k aktuálnemu - deterministickému prístupu pri riadení, plánovaní a rozvoji ES SR.

Pravdepodobnostné hodnotenie bezpečnosti a PSA model sa môžu ďalej využívať aj v tzv. PSA aplikáciách. Jednou z nich je spoľahlivostne orientovaná údržba – RCM (Reliability Centred Maintenance), ktorá sa úspešne vyžíva vo svete aj na Slovensku (jadrové elektrárne).

Spoľahlivostne orientovaná údržba na úrovni sústavy nie je možná bez modelu na úrovni sústavy, ako je napr. model vyvinutý metódou PSA, v opačnom prípade je iba na úrovni prvkov. Metóda PSA umožňuje uvedomiť si riziko, pretože poskytuje prepojenia medzi rizikom rozpadu sústavy, poruchami siete a jednotlivých prvkov. Do analýzy spoľahlivosti prináša kvantitatívny člen a pomáha roztriediť prvky v rôznych rozvodniach podľa vplyvu na bezpečnosť sústavy.

Práca prezentuje metódu PSA pre poruchy vedení a prípojnic. Poruchy prípojnic sú menej časté, môžu mať ale ťažšie následky.

Keď sa frekvencie porúch a typické charakteristiky výkonových tokov menia z jedného ročného obdobia na druhé, analýza by sa mala opakovať s použitím príslušných frekvencií porúch a charakterov tokov pre každé ročné obdobie. Model má odhadnúť ako často končí sieť v rôznych stavoch pri danom výkonovom toku a prepojení, pri frekvenciách iniciačných udalostí a poveternostných podmienkach (napr. pri pravdepodobnosti bleskov, vonkajšej teplote). Takáto analýza môže byť užitočná, napr. počas plánovania odstávky vedenia alebo prípojnice. Riziko rozpadu sústavy počas rôznych výkonových tokov možno porovnať.

Metódu možno použiť pre plánovanie rozvoja sústavy. Rôzne umiestnenia rozvodní, usporiadania prípojnic a ochranné systémy možno porovnávať z hľadiska spoľahlivosti. To pomáha pri porovnávaní alternatívnych investičných plánov.

Model je platný aj pre dlhšie trvajúce havarijné reťazce a ťažšie poruchy. Systematická analýza môže najmä pri veľkých prepojených sieťach odhaliť nezreteľné kombinácie údržbových odstávok a porúch.

Európsky právny rámec vyžaduje, aby prevádzkovatelia prenosových sústav sprístupňovali účastníkom trhu maximálnu prenosovú kapacitu pre cezhraničné toky. Táto požiadavka ale predpokladá, že bezpečná prevádzka sietí sa bude zachovávať. PSA možno použiť na analýzu bezpečnosti sústavy pred a po maximalizácii prenosovej kapacity kvôli preukázaniu, že bezpečnosť sústavy bude zachovaná.

Prenosové siete sa musia v budúcnosti prispôbiť variabilnejšej výrobe so zvýšenými výkonovými tokmi. V sieti bude pôsobiť viac účastníkov. Táto zmena bude vyžadovať pokročilý nástroj pre analýzu spoľahlivosti. PSA môže byť nástrojom pre porovnávanie spoľahlivosti rôznych alternatív pre prenosovú sieť budúcnosti.

Zoznam literatúry

- [1] HLAVÁČ, P., Analýza rizika rozpadu ES SR v podmienkach liberalizácie trhu s elektrickou energiou, písomná práca k dizertačnej skúške, Máj 2010, Bratislava
- [2] Standard for PRA for NPP Applications, ASME, American National Standard, 2002
- [3] EOOS V3.2, A Tool for Risk Awareness, User's Manual, DS&S, Los Altos, California, February 2003
- [4] Zber a spracovanie dát JE SR pre analýzy spoľahlivosti systémov a zariadení dôležitých pre bezpečnosť a prevádzku, Správa RELKO, č. správy 1R0104, Máj 2004, Bratislava
- [5] Pravdepodobnostné hodnotenie bezpečnosti prevádzky prvej úrovne pre plný výkon reaktora 3. bloku JE V2 Jaslovské Bohunice po modernizácii, Správa RELKO, číslo správy 1R0407, Júl 2007, Bratislava
- [6] Spoľahlivosť ES, učebný text pre kurz: Riadenie ES SR, Správa RELKO, číslo správy 1K0101, September 2006, Bratislava
- [7] Monitor rizika 1. úrovne 4. bloku JE V2 v programe EOOS po zvýšení výkonu na 107%, Správa RELKO, číslo správy 42R0707, Marec 2008, Bratislava
- [8] KOVÁCS, Z., RÝDZI, S., HLAVÁČ, P., Analýzy rizika rozpadu ES SR v podmienkach prepojených elektrizačných sústav, metodický návod projektu, Správa RELKO, číslo správy 1R1008, November 2008, Bratislava
- [9] MURGAŠ, J., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž., Analýzy rizika rozpadu ES SR v podmienkach prepojených elektrizačných sústav, výpočty stability ES SR, Správa RELKO, číslo správy 4R1008, Október 2009, Bratislava
- [10] Method to Monitor Nuclear Power Plant Risk from Transmission Grid Conditions, EPRI, Palo Alto, CA, and U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2004. 1009662
- [11] NUREG-1784, Operating Experience Assessment – Effects of Grid Events on Nuclear Power Plant Performance, December 2003
- [12] HAARLA, L., KOSKINEN, M., HIRVONEN, R., LABEAU, P.E., Transmission Grid Security - A PSA Approach, Springer 2011, ISBN 978-0-85729-144-8
- [13] POTTONEN, L., A Method for the Probabilistic Security Analysis of Transmission Grids, Doctoral Dissertation, April 2005, ISBN 951-22-7591-0
- [14] GONEN, T., Electric Power Distribution System Engineering, California State University, Sacramento 1986, ISBN 0-07-023707-7
- [15] REVÁKOVÁ, D., ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A. Prechodné javy v elektrizačných sústavách. Bratislava: STU v Bratislave, 2008. 180 s. ISBN 978 80 227 2868 3
- [16] REVÁKOVÁ, D., BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž. Prenos a rozvod elektrickej energie. Bratislava: STU v Bratislave, 2004. 191 s. ISBN 80 227 2118 2

- [17] HLAVÁČ, P., KOVÁCS, Z., KOVÁČOVÁ, R., Analýzy rizika rozpadu ES SR v podmienkach prepojených elektrizačných sústav, spoľahlivostná databáza, Správa RELKO, číslo správy 2R1008, December 2008, Bratislava
- [18] KOVÁCS, Z., RÝDZI, S., HLAVÁČ, P., SOPIRA, V., Analýzy rizika rozpadu ES SR v podmienkach prepojených elektrizačných sústav, analýza spoľahlivosti ľudského činiteľa, Správa RELKO, číslo správy 3R1008, Marec 2009, Bratislava
- [19] KOVÁČOVÁ, R., ŠTOFEJ, M., SPENLINGER, R., HLAVÁČ, P., KOVÁCS, Z., Analýzy rizika rozpadu ES SR v podmienkach prepojených elektrizačných sústav, PSA model ES SR, Správa RELKO, číslo správy 5R1008, Marec 2009, Bratislava
- [20] KOVÁČOVÁ, R., ŠTOFEJ, M., SPENLINGER, R., HLAVÁČ, P., KOVÁCS, Z., Analýzy rizika rozpadu ES SR v podmienkach prepojených elektrizačných sústav, Zjednodušený monitor rizika ES SR, Správa RELKO, číslo správy 6R1008, August 2010, Bratislava
- [21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Human Reliability Analysis in Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants: A Safety Practice, Safety Series No. 50-P-10, IAEA, Vienna (1996)
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Applications of Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1200, IAEA, Vienna (2001)
- [23] ASME/ANS: Standard for Level1/ LERF Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications, ASME, RA-S-2008, NY, April 9, 2008
- [24] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, A Framework for a Quality Assurance Programme for PSA, IAEA-TECDOC-1101, IAEA, Vienna (1999)
- [25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Defining Initiating Events for Purpose of Probabilistic Safety Assessment, IAEA-TECDOC-719, IAEA, Vienna (1993)
- [26] THE AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, External Events in PRA Methodology, American Nuclear Society Standard ANSI/ANS-58.21-2003, ANS (2003)
- [27] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Guidelines on Modelling CCFs in PSA, NUREG/CR-5485 prepared by A. Mosleh, D. M. Rasmuson and F. M. Marshall for USNRC, USNRC, Washington, DC (1998)
- [28] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, NUREG/CR-1278, USNRC, Washington, DC (1983)
- [29] US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Technical Basis and Implementation Guidelines for a Technique for Human Event Analysis (ATHEANA), Revision 1, NUREG-1624, USNRC, Washington, DC (1999)

Publikácie autora so vzťahom ku skúmanej problematike

- [1] HLAVÁČ, P., KOVÁCS, Z., KOVÁČOVÁ, R., JANÍČEK, F.: Full scope risk monitor for the transmission grid. In: Proceedings of the 10th International Conference ENERGY-ECOLOGY-ECONOMY. Tatranské Matliare, June 2011.
- [2] KOVÁCS, Z., HLAVÁČ, P., JANÍČEK, F.: Full scope PSA for the transmission grid. In: Proceedings of the 10th International Conference ENERGY-ECOLOGY-ECONOMY. Tatranské Matliare, June 2011.
- [3] KOVÁCS, Z., NOVÁKOVÁ, H., HLAVÁČ, P., JANÍČEK, F.: Spôľahlivostne orientovaná údržba zariadení jadrových elektrární. Jaderná energie 57, 2011, číslo 1/2, s. 5-16.
- [4] HLAVÁČ, P., KOVÁCS, Z., RÝDZI, S., JANÍČEK, F.: Risk monitor for the 400 kV grid. In: Proceedings of the 9th International Conference ENERGY-ECOLOGY-ECONOMY. Tatranské Matliare, May 2010.
- [5] HLAVÁČ, P., KOVÁČOVÁ, R., JANÍČEK, F.: PSA for the 400 kV grid. In: Proceedings of the 9th International Conference ENERGY-ECOLOGY-ECONOMY. Tatranské Matliare, May 2010.
- [6] HLAVÁČ, P., POLJOVKA, P., DARUĽA, I.: Probabilistic approach to analysis of power system reliability. In: Proceedings of the 8th International Conference ENERGY-ECOLOGY-ECONOMY. Nový Smokovec, May 2009.
- [7] JANÍČEK, F., HLAVÁČ, P., KRONDIK, E.: Risk monitoring to reduce the transmission grid vulnerability. In: Proceedings of the 8th International Conference ENERGY-ECOLOGY-ECONOMY. Nový Smokovec, May 2009.
- [8] KOVÁCS, Z., HLAVÁČ, P., NOVÁKOVÁ H.: Optimalizácie preventívnej údržby JE na základe spoľahlivostne orientovaného prístupu, Jadrová energetika - východisko energetickej bezpečnosti SR, Národná konferencia, MH SR, Bratislava, 4. mája 2006
- [9] KOVÁCS, Z., HLAVÁČ, P., NOVÁKOVÁ, H., BOHÁČ, M.: Aplikácia PSA pre elektrizačnú prenosovú sústavu. Medzinárodná konferencia, SES 2006, Bezpečná dodávka energie, 26 - 29.09.2006, hotel Crowne Plaza, Bratislava
- [10] HLAVÁČ, P.: RCM analysis performed for the diesel generator of the J.Bohunice V2 NPP. In: Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants. Seoul, Korea, May 2005.
- [11] HLAVÁČ, P., KOVÁCS, Z., GABČO, P.: Monitor rizika 3. bloku JE V2 J. Bohunice pre plný výkon a odstavený reaktor. Jaderná energie 47, 2001, číslo 7/8, s. 236-246.
- [12] KOVÁCS, Z., NOVÁKOVÁ, H., HLAVÁČ, P.: Level 1 low power and shutdown PSA of the J.Bohunice V2 NPP, The 13th Pacific Basin Nuclear Conference, Shenzhen, China, October 21-25, 2002.
- [13] HLAVÁČ, P.: Level 1 & 2 PSA activities in Slovak Republic. In: Proceedings of the 5th International Information Exchange Forum on Safety Analysis for Nuclear Plants of VVER and RBMK Types, Obninsk, Russian Federation, October 2000.

