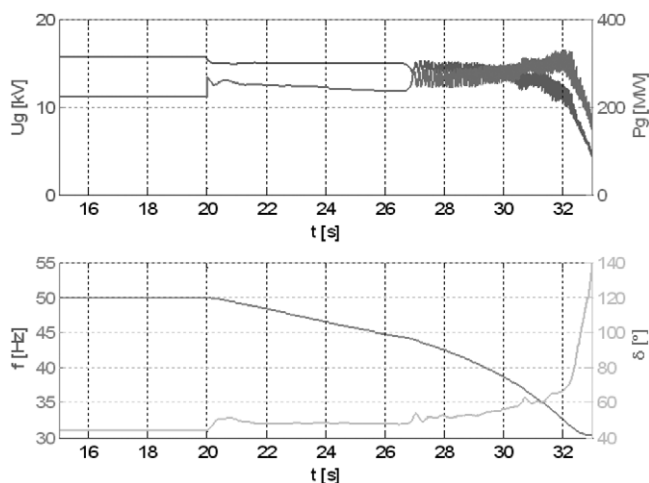


# „Plán obrany“ – systémové opatrenie na zabránenie blackoutom

Prepájanie elektrizačných sústav (ES) viacerých štátov do veľkého systému prepojených ES – Interconnected Power System (IPS) má množstvo výhod od obchodných – trh s elektrinou – až po technické. Medzi technické výhody možno zaradiť zvýšenie stability IPS, presnejšie povedané národná ES má vo veľkom celku podstatne vyššiu rezervu stability ako pri izolovanej (ostrovnej) prevádzke. Zjednodušene sa dá povedať, že ani veľké systémové poruchy v národnej ES nemusia nutne znamenať stratu stability. Napríklad pre ES SR zapojenej do IPS EÚ neznamená narušenie stability výpadok celej elektrárne (800 MW), ale pri izolovanej prevádzke už výpadok výroby 400 MW môže byť kritický. Ako príklad je uvedený simulačný experiment (na počítačovom modeli ES SR), keď pri ostrovnej prevádzke ES SR vypadne blok v jednej jadrovej elektrárni s výkonom 400 MW v čase 20 s. Na obr. 1 sú uvedené priebehy veličín stroja v susednej jadrovej elektrárni. Je vidieť narušenie stability, ktoré sa najskôr prejavuje vo forme oscilácií v čase od 27 s až následné vypadnutie stroja zo synchronizmu a neskôr rozpad celej ES.



Obr.1 Simulačný experiment pri analýze stability ES

Medzi veľké technické výhody IPS patrí aj schopnosť systému tlmiť poruchy. Reguláciu frekvencie na konštantnej úrovni 50 Hz zabezpečujú všetky národné ES, a teda pre národné ES to znamená, že na reguláciu netreba veľmi veľkú rezervu činného výkonu, alebo tiež to, že výpadok výroby v národnej ES v prvom okamihu kryjú všetky stroje, ktoré sú v regulácii v IPS.

Prepojené ES majú aj svoje riziká, ako je možnosť vzniku veľkej systémovej poruchy: black-out, náchylnosť na vznik systémových oscilácií činného výkonu. Systémová porucha black-out môže postihnúť len časť IPS, ale stále je hrozba vzniku black-outu v celom systéme. Pri tejto poruche nastáva beznapäťový stav vo všetkých uzloch, a teda sa preruší dodávka elektriny všetkým odberateľom. Technicko-ekonomické následky takejto poruchy môžu byť výrazné, najmä ak postihne celý systém. Pokiaľ táto systémová porucha vznikne len v menšej časti IPS, možno relatívne rýchlo obnoviť normálnu prevádzku podaním napätia zo susedných štátov.

Narušenie stability ES môže mať niekoľko foriem, veľa príčin a ich scenárov. Z teoretického hľadiska je ES zložitý nelineárny systém a ako taký má viac foriem stability. V konkrétnom prípade ES ide hlavne o frekvenčnú a napäťovú stabilitu a stabilitu záťažových uhlov generátorov.

Na predchádzanie veľkým systémovým poruchám vydáva riadiaci orgán IPS nariadenia a odporúčania pre prevádzkovateľov prenosových sústav vo forme potreby vypracovať rozsiahle štúdie „Plán obrany proti veľkým systémovým poruchám“ (DP) a tiež „Plán po poruche typu black-out“. Prevádzkovateľ Prenosovej sústavy SR (SEPS) venuje spomínaným štúdiám veľkú pozornosť. Posledné výpočty boli realizované v rokoch 2007 – 2009 [1]. V tomto príspevku chceme poukázať na niektoré aspekty pri vypracúvaní spomínanej štúdie.

## Opatrenia proti poklesu a nárastu frekvencie

Ustálený chod elektrizačnej sústavy predpokladá rovnováhu medzi celkovým dodávaným činným výkonom a celkovým činným spotrebovaným výkonom. Každé narušenie tejto rovnováhy má za následok zmenu frekvencie v sieti. Frekvencia sa mení dovtedy, pokiaľ nenastane opätovne rovnováha medzi vyrobeným a spotrebovaným výkonom. Na zabránenie nežiaducej poklesu alebo nárastu frekvencie v IPS sú na úrovni jednotlivých ES použité riadiace stratégie ako:

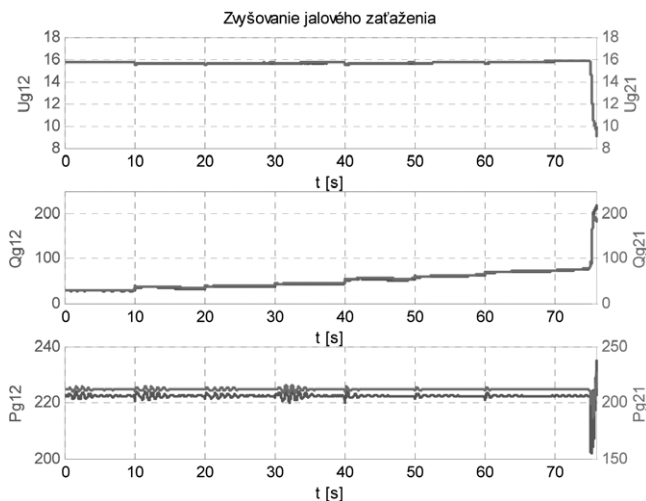
- primárna regulácia frekvencie a výkonu,
- sekundárna regulácia frekvencie a výkonu,
- frekvenčné odľahčovanie.

Primárna regulácia je základným nástrojom pôsobiacim proti odchýlkam frekvencie. Reaguje takpovediac okamžite na zmeny frekvencie zvýšením žiadanej hodnoty výkonu generátora, ktorý je zapojený do primárnej regulácie. Nakoľko reaguje len na zmeny frekvencie, nezávisí od príčin vzniku nerovnováhy medzi výrobou a spotrebou elektrického výkonu.

Výpadky výroby elektrickej energie majú za dôsledok pokles frekvencie. Ak tieto výpadky nie sú veľké, na vyrovnaní výkonu a spotreby zapracuje primárna a neskôr aj sekundárna regulácia výkonu a frekvencie. Ak je však výpadok väčšieho rozsahu, ktorý spôsobí výraznejší pokles frekvencie, musia zareagovať automatické, časovo neoneskorené zariadenia. Tieto zariadenia sú závislé od aktuálnej frekvencie a ich úlohou je odpájanie príslušných záťaží. Súbor opatrení, ktoré majú zamedziť veľkému prepadu alebo nárastu frekvencie, sa nazýva frekvenčný plán. Jeho zmyslom je udržať prevádzku siete s požadovanými parametrami pomocou včasných zásahov do poruchového deja a zabezpečiť čo najrýchlejšie spojenie oddelených častí. Ak sa deficit výkonu nedarí vyrovnať mobilizáciou výrobných rezerv a dôjde k poklesu frekvencie pod 49 Hz, aktivuje sa automatické frekvenčné odľahčovanie. Ak ani súbor týchto opatrení nezastaví klesajúcu frekvenciu a tá poklesne pod hodnotu 48,1 Hz, pristupuje sa k odstávke elektrární na vlastnú spotrebu.

## Opatrenia proti poklesu a nárastu napätia

Napäťová nestabilita sa pri veľkých poruchách prejaví stratou napätí v uzloch prenosovej sústavy (400 kV a 220 kV) a tým aj v uzloch nižších sústav. Strata napätí vzniká ako napäťový kolaps v dôsledku podkritického veľkosti disponibilného jalového výkonu v sieti. Na obr. 2 je simulačný experiment na počítačovom modeli ES, ktorý ukazuje, že nadmerné zvyšovanie jalového zaťaženia v ES môže viesť k napäťovému kolapsu, pri ktorom môže byť vyvolaný black-out rozsiahlej časti IPS najskôr na území národnej ES, kde napäťový kolaps vznikol.



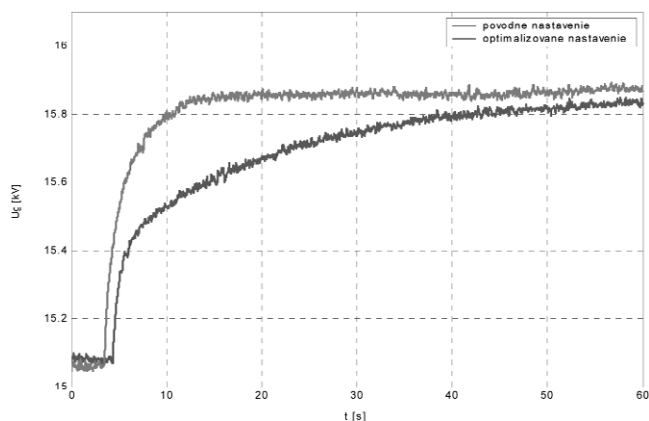
Obr.2 Zvyšovanie jalového zaťaženia a vznik napätového kolapsu

Pri napätových zmenách sa na zabezpečenie disponibilnej rezervy výroby jalového využívajú tieto prostriedky:

- riadiace systémy budenia,
- vypnutie kompenzačných tlmiviek,
- zníženie činného výkonu blokov na uvoľnenie disponibilného jalového výkonu SG (P-Q diagram),
- nábeh vodných elektrární.

Okrem toho na splnenie všetkých uvedených úloh treba zabezpečiť kvalitné nastavenie regulátorov napätia a jalového výkonu. V podmienkach pripojenia zdrojov do ES SR sú tieto parametre na reguláciu napätia stanovené tak, aby bol priebeh regulácie aperiodický (nekmitavý) a doba regulácie pri primárnom regulátore napätia a jalového výkonu do 15 s s preregulovaním do 5 %, pri skupinovom regulátore (SRN) sa odporúča doba regulácie do 2 minút bez preregulovania. Tieto parametre sú kontrolované jednak pri nasadzovaní nových zdrojov alebo pri výmene budiacich systémov. Na obr. 3 sú uvedené reálne (namerané) priebehy statorového napätia získané počas optimalizácie nastavenia parametrov regulátora napätia v EMO (elektrárne Mochovce) po výmene budiaceho systému [2]. Ako vidieť z obr. 3, pri optimalizácii sa podarilo znížiť dobu regulácie z 60 s na 10 s.

Z pohľadu obranného plánu proti šíreniu veľkých porúch v ES je úloha regulácie napätia v zásade podobná ako v bežnej prevádzke. Kvalitná a bezporuchová funkcia všetkých zložiek regulačnej štruktúry môže zamedziť vzniku veľkých porúch v ES, ktoré hrozia z dôvodu vysokého napätia, pri prebytku, ale najmä pri nedostatku disponibilného jalového výkonu. Rovnako je kvalitná napätová regulácia dôležitá pri nábehu činnosti ES po poruchách, prípadne v ostrovej prevádzke časti ES.



Obr.3 Priebehy regulácie svorkového napätia SG EMO bez oscilácií a bez preregulovania s dobou regulácie 10 s (červený), resp. 60 s (modrý)

## Analýza stability ES SR

Posudzovaním statickej stability sa rozumie posudzovanie ustáleného stavu sústavy v danom prevádzkovom stave a či nedôjde pri malých, prevádzkovo bežných zmenách k strate stability elektrizačnej sústavy. Overovanie dynamickej stability možno najefektívnejšie realizovať najmä dynamickými simuláciami. Základným kritériom dynamickej stability je kritický čas trvania trojfázového skratu (CCT). CCT možno počítať konzervatívnou metódou rovnosti plôch pre prevádzkové stavy generátora z pohľadu budenia: maximálne prebudenie, maximálne podbudenie a dodávaný nulový reaktančný výkon do sústavy. Efektívnejšie je CCT určovať na základe dynamických simulácií. Účelné je realizovať dynamické simulácie udalostí „n – 1“, keď sa vypína len jeden prvok sústavy, a dynamické simulácie „n – k“ udalostí – vypnutie celej rozvodne – všetkých vývodov po vzniku prípojnicového skratu v danej rozvodni. Treba realizovať aj dynamické simulácie „n – k“ udalostí – podľa scenárov výpadkov vedení, skratov na vedeniach a zlyhania vypínača, a tiež dynamické simulácie na overenie súčasných rozpadových miest. Na zabezpečenie výpočtov dynamickej stability bol u prevádzkovateľa prenosovej sústavy SR (SEPS) vypracovaný počítačový model, čím sa zavŕšilo mnohoročné úsilie kolektívu pracovníkov z FEL STU, spoločnosti SYPRIN a SEPS-u. Ide o najúplnejší model Elektrizačnej sústavy SR (vrátane susedných štátov), ktorý je vypracovaný v prostredí PSLF od fy General Electric. Model umožňuje realizovať výpočty veľkého množstva scenárov, a tak naplniť úlohy požadované pri výpočte Plánu obrany v ES SR.

## Opatrenia pri práci v ostrovej prevádzke

Medzi nové úlohy riešené v rámci výpočtov DP boli zaradené aj úlohy analýzy ostrovej prevádzky a analýza tlmenia oscilácií. Ostrovná prevádzka ES je stav, na ktorý musí byť schopný systém riadenia správne reagovať v prípade šírenia veľkých systémových porúch v prepojenej ES (IPS). V súčasnosti nie sú riadiace systémy jednotlivých krajín EÚ na túto alternatívu prevádzky úplne pripravené. Tento stav elektrizačnej sústavy nie je abstraktný, čo dokazujú aj udalosti z minulých rokov. Pri zostavovaní národných DP treba pomocou simulačných výpočtov identifikovať problémy pri postupnom prechode, ale aj pri náhlom vytvorení ostrovej prevádzky ES každej zúčastnenej krajiny. Pri postupnom odpájaní cezhraničných vedení ES v IPS sa znižuje rezerva dynamickej stability príslušnej ES. Pri vypínaní skupín cezhraničných vedení podľa národných ES sa narušenie stability prejavuje najmä pri tranzite činného výkonu. Samozrejme, aj pri súčasnom vypnutí všetkých cezhraničných vedení v prípade tranzitu výkonu môže nastať narušenie stability. Ak je tranzit malý, nastáva len zníženie rezervy dynamickej stability.

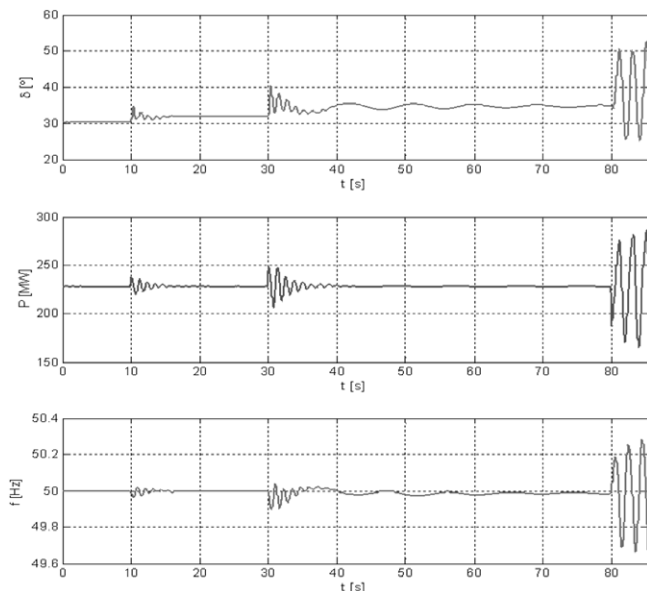
## Tlmenie oscilácií

Oscilácie činného výkonu môžu byť spúšťacím mechanizmom na vznik black-outu, a preto tlmeniu oscilácií venuje značnú pozornosť aj riadiaci orgán IPS. Tlmenie oscilácií činného výkonu v ES významne pomáha pri zabezpečení stability IPS, a preto na zabezpečenie tlmenia lokálnych oscilácií treba zabezpečiť:

- Vhodné nastavenie koeficientov regulátorov budenia synchronných generátorov, aby nezosilňovali oscilácie vyvolané poruchou, ale naopak aby ich utlmovali.
- Zabezpečiť správne nastavenie PSS na všetkých významných zdrojoch ES tak, aby zabezpečili účinné tlmenie lokálnych oscilácií.
- Uvažovať nad aplikáciou UPFC (United Power and Flow Controller) na reguláciu činných a jalových výkonov. Vhodnými algoritmiami riadenia možno súčasne zabezpečiť aj vysoké útlmové vlastnosti ES.

V ES SR je v podmienkach pripojenia pre jednotlivé zdroje nad 50 MW zavedená nutnosť zabezpečiť tlmenie oscilácií činného výkonu, čo musí byť aj overené garančnými meraniami. Najčastejšie sa to realizuje pomocou systémových stabilizátorov (PSS), ktoré sú schopné účinne tlmiť oscilácie činného výkonu generátora. Na obr. 4 sú uvedené

výsledky simulačného experimentu s niekoľkými po sebe idúcimi poruchami v ES SR. Sú tu uvedené priebehy veličín stroja v jadrovej elektrárni. Pri prvej poruche v čase 10 s vznikajú len rýchlotlmené oscilácie s relatívne malou amplitúdou, po druhej poruche v čase 30 s sa zvýšila amplitúda oscilácií činného výkonu a vznikajú aj systémové kmity s malou frekvenciou (menej ako 0,5 Hz), čo má za následok zníženie rezervy stability systému. Pri tretej poruche v čase 80 s vznikajú netlmené kmity, ktoré vedú k narušeniu stability ES.



**Obr.4 Simulačný experiment s následnými poruchami v ES SR**

## Záver

Systémové poruchy môžu znamenať ohrozenie prevádzky ES kontinentálnej Európy a určite netreba dlho uvažovať o tom, že následky celosystémového black-outu by boli priam katastrofické. Ide o takú závažnú poruchu, že treba venovať maximálne úsilie, aby sa jej zabránilo. Súčasný stav, keď sa úspešne bránime vzniku tejto udalosti už od vzniku IPS v Európe, neznamená, že nemôže nastať. Prispievajú k tomu aj nové zdroje elektriny na báze obnoviteľných zdrojov (vietor, slnečná energia), ale tiež nevyspytateľné povetnostné podmienky a nakoniec aj zložitosť samotného IPS a možnosť chybného zásahu ľudskej obsluhy.

## Literatúra

- [1] Murgaš, J. a kol.: Plán obrany proti šíreniu porúch v ES SR. Správa k výpočtom pre SEPS, a. s., Bratislava, 2008.
- [2] Murgaš, J. a kol.: Garančné skúšky dynamiky EMO22 po výmene budiaceho systému. Správa pre ENSECO, a. s., ZoD 03D35, 2003, 93 s.

**prof. Ing. Ján Murgaš, PhD.**

Slovenská technická univerzita  
 Fakulta elektrotechniky a informatiky  
 Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava  
 e-mail: jan.murgas@stuba.sk