

Ing. Vladimír Volčko

Autoreferát dizertačnej práce

**SMART GRID – VPLYV NA PREVÁDZKU, BEZPEČNOSŤ A STABILITU ELEKTRIZAČNEJ
SÚSTAVY**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore 5.2.30 elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava 30.10.2015

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

Ing. Vladimír Volčko

Autoreferát dizertačnej práce

**SMART GRID – VPLYV NA PREVÁDZKU, BEZPEČNOSŤ A STABILITU ELEKTRIZAČNEJ
SÚSTAVY**

na získanie akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore 5.2.30 elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 30.10.2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

Doktorand: **Ing. Vladimír Volčko**
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: **doc. Ing. Jiří Drápela, PhD.**
Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky
Technická 12, 616 00 Brno

Ing. Martin Horák, PhD.
Západoslovenská distribučná, a.s.
Čulenova 6, 816 47 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 16.12.2015 o 10:00 hod.

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, miestnosť C-417, blok C, 4. poschodie

prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
dekan fakulty

Obsah

Tézy dizertačnej práce	4
Úvod.....	4
1 Súčasný stav problematiky	5
1.1 Pilotné projekty	5
1.2 Požiadavky kladené na Smart Grid	6
1.3 Systém iNES.....	6
2 Metódy riešenia a výsledky dizertačnej práce.....	7
2.1 Vplyv Smart Grid na distribučnú sústavu	7
2.2 Vplyvy Smart Grid na prenosovú sústavu.....	11
2.3 Vplyv Smart Grid na odberateľov	16
Prínos pre prax	19
Záver	20
Zoznam použitej literatúry	22
Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce	23
Príspevky publikované v zahraničných časopisoch.....	23
Príspevky publikované na zahraničných konferenciách	23
Príspevky publikované na domácich konferenciách.....	23
Príspevky publikované v domácich časopisoch.....	24

Tézy dizertačnej práce

- 1) Analýza problémov početných Smart Regiónov z pohľadu prevádzky existujúcej elektrizačnej sústavy.
- 2) Definovanie rizikových faktorov pre prevádzku prenosovej a distribučnej sústavy pri zvýšenej penetrácii distribuovanej výroby v distribučných sieťach.
- 3) Definovanie rizikových faktorov pre odberateľov z pohľadu kvality a spoľahlivosti dodávky elektriny zo zdrojov distribuovanej výroby.

Úvod

Prívlastok „Smart“ je v súčasnosti veľmi populárny. Zvyčajne označuje rôzne produkty s vyšším stupňom informatizácie. Smart produkty ako mobilné telefóny „Smart Phone“, alebo televízory „Smart TV“ sú veľmi obľúbené. Informatizácia sa postupom času viac a viac dotýka aj elektrizačnej sústavy. Na popularite tak postupne nabera aj nový pojem „Smart Grid“.

Napriek vysokej popularite tohto pojmu nie je vždy zjavné, čo sa za pomenovaním „Smart Grid“ skrýva. Často je sieť Smart Grid označovaná ako sieť budúcnosti, sieť schopná zabezpečiť vysoký podiel distribuovanej výroby, alebo inteligentná sieť. Smart Grid postupom času získal takmer až prívlastok akého čarovného prútika schopného riešiť všetky problémy súvisiace s obnoviteľnými zdrojmi energie pripájanými do distribučných sietí a zároveň redukovať konečnú cenu elektriny pre odberateľov. Sioshansi to zhrnul vo vyjadrení „Smart Grid je to najlepšie, čo môže byť, ale nevieme čo to vlastne je“.[14]

Predložená dizertačná práca sa preto v teoretickej časti zaoberá definíciou siete Smart Grid z pohľadu riadenia elektrizačnej sústavy. Podrobne sú popísané príčiny zavádzania inteligentných sietí „Smart Grid“, ako aj benefity vyplývajúce z ich zavedenia. Zároveň sa predložená práca zaoberá definíciou technológií súvisiacich s technológiou Smart Grid, alebo technológií, ktoré sú súčasťou siete Smart Grid. Tieto technológie formujú konečnú podobu tzv. siete budúcnosti. Vzhľadom na to, že sa jedná o vyvíjanú a zatiaľ v plnej miere nenasadenú technológiu, v práci sú analyzované niektoré pilotné projekty realizované v zahraničí.

Ďalej sú v teoretickej časti práce analyzované požiadavky kladené na inteligentné meracie systémy a siete Smart Grid. Samostatne sú popísané legislatívne požiadavky a samostatne sú popísané normatívne požiadavky. Legislatívne požiadavky vyplývajú predovšetkým z európskej a národnej legislatívy. V práci je uvedené porovnanie so zahraničnou legislatívou. Normatívne požiadavky vyplývajú predovšetkým z európskej normalizácie. V praktickej časti práce sú následne analyzované možné dopady rozšírenia technológie Smart Grid na elektrizačnú sústavu.

Vplyvy Smart Grid na elektrizačnú sústavu sú rozdelené do troch častí, a to vplyvy na distribučnú sústavu, vplyvy na prenosovú sústavu a vplyvy na koncových odberateľov. V rámci vplyvov na distribučnú sústavu je analýza zameraná na koncepciu chránenia a bezpečnosť prác počas údržby. V časti vplyvov Smart Grid na prenosovú sústavu sú postupne analyzované vplyvy na objemy systémových a podporných služieb, na napäťovú stabilitu, skratové pomery, statickú a dynamickú stabilitu. V poslednej časti sú analyzované hlavne vplyvy na kvalitu elektrickej energie pre koncových odberateľov.

1 Súčasný stav problematiky

Téma Smart Grid je veľmi populárna a venuje sa jej množstvo publikácií, ako aj zahraničných, či domácich konferencií. Napriek veľkej popularite (alebo práve vďaka tejto popularite) existuje veľká nejednotnosť v definícií pojmu Smart Grid. Napriek mnohým odlišnostiam je Smart Grid (často označovaná aj ako sieť budúcnosti[1, 6, 16]) považovaná za sieť schopnú využiť väčšie množstvo obnoviteľných zdrojov energie a distribuovanej výroby, ako súčasná sieť.

Za hlavný rozdiel medzi súčasnou sieťou a sieťou Smart Grid sa považuje reverzibilita prenosu elektrickej energie. Súčasná sieť umožňuje prenos elektrickej energie len jedným smerom, teda z miesta centralizovanej výroby do miesta spotreby. Sieť Smart Grid umožní výrobu v mieste spotreby do takej miery, že bude dochádzať k zmene smeru toku elektrickej energie. Bude dochádzať k stavu, keď elektrická energia vyrobená v jednom regióne bude spotrebovaná v inom regióne.

Takto fungujúca sústava si však vyžaduje zavedenie a rozšírenie viacerých technológií, či už tieto technológie považujeme za súčasť Smart Grid, alebo len za príbuzné technológie:

- Smart Metering a pokročilá meracia infraštruktúra – zabezpečuje nie len pravidelný automatický odpočet údajov z inteligentných meracích systémov, ale aj obojsmernú komunikáciu potrebnú pre zabezpečenie dynamických taríf, prípadne pre odpájanie zát'aže.
- Systémy Smart Home – umožňujú automatickú reakciu niektorých spotrebičov na zmenu tarify v závislosti na potrebách spotrebiteľa. Zároveň tieto systémy sprístupňujú spotrebiteľovi on-line údaje o jeho spotrebe energií. V prípade úpravy zmluvných vzťahov medzi spotrebiteľom a prevádzkovateľom distribučnej siete, ako aj vhodného technického prepojenia medzi systémom Smart Home a riadiacim systémom distribučnej siete je možné zabezpečiť priame riadenie vybraných spotrebičov v rámci domácnosti.
- Distribuovaná výroba – nepredstavuje nevyhnutnú súčasť siete Smart Grid, patrí však medzi faktory vedúce k potrebe vytvorenia Smart Grid. Veľké objemy distribuovaných, prevažne obnoviteľných zdrojov pripájaných do distribučných sietí má za následok vznik mnohých problémov. Od Smart Grid a riadenia distribučnej sústavy na úrovni VN a NN sa očakáva riešenie týchto problémov.
- Elektromobilita - podobne ako distribuovaná výroba, nepredstavuje nevyhnutnú súčasť siete Smart Grid, napriek tomu tieto pojmy navzájom úzko súvisia. Rovnako ako v prípade distribuovanej výroby platí, že súčasná sieť nebude schopná plniť svoju funkciu po rozsiahlom rozšírení elektromobilov. Od Smart Grid sa očakáva, že umožní nie len efektívne postupné dobíjanie elektromobilov, ale aj umožní využitie časti kapacity batérií pripojených elektromobilov pre potreby siete.

1.1 Pilotné projekty

Pretvorenie v súčasnosti fungujúcej siete na koncept Smart Grid bude finančne veľmi nákladné. Ide o dlhodobý proces, ktorý viaže kapitál v priebehu mnohých rokov. Vyžaduje preto veľké odhodlanie od všetkých zúčastnených strán. Navyše stále nie je úplne overené, ako budú jednotlivé technológie v rámci Smart Grid spolupracovať. Tento proces prestavby už však beží a mnohé krajiny rozbiehajú rôzne pilotné projekty, ktoré majú demonštrovať realizovateľnosť a výhodnosť tejto technológie.

Spojené štáty napríklad prijali už v roku 2009 program pre rozvoj Smart Grid, v rámci ktorého je realizovaných 99 projektov v celkovom objeme \$ 7,8 MLD, pričom \$ 3,4 MLD je z rozpočtu federálnej vlády. Do týchto investícií sú zahrnuté všetky projekty určené na zvýšenia informatizácie elektrizačnej sústavy (od inštalácií inteligentných meracích systémov v distribučných sieťach až po meranie fázorov napätí v prenosovej sústave). Projekty sú rozdelené do šiestich kategórií, zjednodušene sa však dajú investície rozdeliť do štyroch oblastí a to na rozvoj prenosovej sústavy (približne 7 %), rozvoj distribučnej sústavy (približne 25 %), na pokročilú meraciu infraštruktúru (približne 51 %) a na zákaznicky systém (približne 17 %).

Kanada je typická hlavne veľkým množstvom malých ostrovných sietí. Väčšina pilotných projektov sa preto v Kanade zameriava práve na také riadenie ostrovných distribučných sietí, ktoré umožní efektívnejšie využitie dostupných obnoviteľných zdrojov.

V oblasti zavádzania technológie Smart Grid ani Európa za zvyškom sveta nezaostáva. V Európe síce neexistuje jednotný postup no Európska komisia tlačí na jednotlivé vlády, aby vytvorili vlastné politiky zavádzania tejto inovatívnej technológie. Nám najbližší pilotný projekt je Smart Región Vrchlabí na severe Českej republiky[9]. V rámci pilotného projektu majú byť do Smart Regiónu zapojené a testované technológie ako je elektromobilita, Smart Metering, vysoká penetrácia distribuovanej výroby (či už na úrovni VN, alebo NN) vo forme nových obnoviteľných zdrojov energie a kombinovanej výroby elektrickej energie a tepla. Cieľom pilotného projektu je dosiahnuť autonómnu ostrovnú prevádzku časti Smart Regiónu.

1.2 Požiadavky kladené na Smart Grid

Vo všeobecnosti je požiadavky možné rozdeliť na legislatívne požiadavky a normatívne požiadavky. Legislatívne požiadavky na samotné siete Smart Grid a ich časti vychádzajú zo Smernice Európskeho parlamentu a rady a Rady 2009/72 o spoločných pravidlách pre vnútorný trh s elektrinou. Členské štáty Európskej únie by podľa nej mali podporovať modernizáciu distribučných sústav, napr. prostredníctvom zavádzania inteligentných sústav Smart Grids, ktoré by mali budovať tak, aby podporovali decentralizovanú výrobu a zabezpečovali energetickú účinnosť. Siete Smart Grids tak majú vytvoriť prostriedok na optimalizáciu využívania elektriny. Legislatívne požiadavky jednotlivých členských štátov sa v súčasnosti zameriavajú na stanovenie minimálnych požiadaviek pre inteligentné meracie systémy a pokročilú meraciu infraštruktúru. V predloženej dizertačnej práci sú samostatne analyzované legislatívne požiadavky Rakúska, Veľkej Británie a Slovenska a sú porovnané s odporúčaniami Európskej komisie.

Z hľadiska normatívnych požiadaviek je významná hlavne aktivita európskych normalizačných organizácií CEN, CENELEC a ETSI. Na základe mandátu Európskej komisie vydali tieto európske organizácie pre normalizáciu First Set of Standards obsahujúce Smart Grid Reference Architecture. Smart Grid podľa tejto architektúry [3] nepredstavuje jeden systém, ale pozostáva z množstva systémov spájajúcich zariadenia prevádzkované rôznymi účastníkmi trhu, pracujúce spoločne a tvoriace elektrizačnú sústavu. Na prevádzku takého to súboru systémov Smart Grid s využitím požadovaných služieb a funkčnosti je potrebná interoperabilita jednotlivých zariadení a zapojených procesov. Zabezpečenie tejto interoperability má v prípade siete Smart Grid najvyššiu prioritu. Smart Grid Reference Architecture tak predstavuje trojrozmerný model. Prvý rozmer tohto modelu zahŕňa domény Smart Grid: centralizovanú výrobu, prenos, distribúciu, distribuovanú výrobu a koncový odber elektriny. Druhý rozmer predstavuje zóny Smart Grid, teda úroveň manažmentu spomenutých domén: proces, pole, stanicu, prevádzku, podnik a trh. Posledný tretí rozmer tvoria hladiny interoperability: fyzická, komunikačná, informačná, funkčná a obchodná vrstva. Všetky systémy použité v Smart Grid (ako napr. pokročilá meracia infraštruktúra, systémy SCADA, WAMS, alebo obchodné systémy) majú svoje miesto v trojrozmernom Smart Grid Architecture Model a je potrebné zabezpečiť ich vzájomnú interoperabilitu na jednotlivých vrstvách interoperability.

1.3 Systém iNES

Systém iNES [11, 12, 13, 15] (intelligente OrtsNEtzStation - inteligentná transformátorová stanica NN) je systém vyvinutý v spolupráci Univerzity vo Wuppertale spolu so spoločnosťami SAG GmbH a Bilfinger Manuel GmbH. Systém iNES je určený na sledovanie a vyhodnocovanie on-line stavu NN siete a na riadenie tejto siete tak, aby nedochádzalo k nebezpečným stavom v sieti (prepätie, podpätie, preťaženia vedení). Pri návrhu samotného výpočtu napätových pomerov v sledovanej NN sieti boli zohľadnené viaceré špecifiká NN sietí, ako napríklad zanedbateľnosť dielektrických strát v kábloch a vzdušných vedeniach NN. Ďalším zjednodušením bolo uvažovanie prúdov ako vstupných parametrov (nie výkonov), čo umožnilo vynechať iteračný proces výpočtu. Na rozdiel od sietí VVN a ZVN nie je možné v prípade sietí NN zanedbať prúdovú nesymetriu. Výpočet teda musí prebiehať pre všetky tri fázy distribučnej siete. Vzhľadom na rozsiahlosť distribučných sietí z ekonomických

dôvodov nie je možné zabezpečiť meranie napätia a prúdu v každom bode siete. Monitorovací algoritmus je preto navrhnutý tak, aby na základe merania vo vybraných uzloch bol schopný s určitou presnosťou dopočítať napäťové a prúdové pomery v celej sieti. Okrem toho sa v distribučnej sieti NN nachádza množstvo spínacích prvkov bez diaľkovej identifikácie stavu. Systém iNES má preto vyvinutý algoritmus na zistenie stavu spínacích prvkov pomocou prúdových pomerov v sieti.

V rámci riadenia distribučnej siete NN sú systémom iNES využívané 3 stupne regulácie napätia. Ako prvý stupeň je vždy (ak to umožňujú napäťové pomery v sieti, teda ak nedochádza k súčasnému porušeniu oboch hraníc povoleného napätia) využívaná regulácia napätia odbočkami transformátora VN/NN. Po vyčerpaní možnosti, alebo pri nedostupnosti tohto typu regulácie prichádza na rad regulácia jalového výkonu. Riadiaca jednotka systému iNES (Smart RTU) dá v takomto prípade striedacu distribuovaného zdroja, alebo usmerňovaču dobíjacej stanice pokyn na zmenu účinníka dodávaného, alebo odoberaného prúdu. Ako posledná možnosť na reguláciu napätia v sústave je k dispozícii zníženie výkonu, alebo úplné odpojenie decentralizovaného zdroja.

Celý tento systém je decentralizovaný, teda celý monitorovací a riadiaci proces prebieha automaticky bez väzby na centrálny riadiaci systém, alebo dispečing. Ako spätná väzba na systém GIS bol preto vyvinutý kapacitný semafor, ktorým iNES poskytuje informácie o aktuálnom stave sledovanej distribučnej siete a o dostupnosti regulačných prostriedkov.

2 Metódy riešenia a výsledky dizertačnej práce

Nech už konečná podoba Smart Grid bude akákoľvek, určite bude predstavovať významnú zmenu pre elektrizačnú sústavu. Výrazný vplyv budúcich sebestačných Smart Regiónov na ES sa dá očakávať hlavne vplyvom presunu značnej časti výrobných kapacít z centralizovaných veľkých zdrojov do rozptýlených distribuovaných OZE. Samostatne sú preto v práci analyzované vplyvy Smart Grid na distribučnú sústavu, na prenosovú sústavu a na koncových odberateľov.

2.1 Vplyv Smart Grid na distribučnú sústavu

Smart Grid predstavuje koncepčnú zmenu fungovania distribučných sietí. S touto zmenou konceptu distribúcie elektrickej energie prichádza aj množstvo nových, doposiaľ nevýznamných a zanedbateľných vplyvov. Smart Grid sa dotkne nie len samotnej prevádzky, ale aj systému chránenia, či prác počas údržby.

2.1.1 Lokálne vplyvy Smart Grid na prevádzku distribučných sietí

Lokálne vplyvy na prevádzku distribučnej siete súvisiace so zmenou napäťových a výkonových pomerov v sústave. Dá sa povedať, že v súčasnosti tieto vplyvy predstavujú hlavnú oblasť záujmu odbornej verejnosti. Pre obmedzenie lokálnych vplyvov distribuovanej výroby na prevádzku DS vydali jednotliví prevádzkovatelia DS podmienky pripojiteľnosti zdrojov do DS. V rámci posudzovania pripojiteľnosti zdroja do distribučnej siete sa bežne vyhodnocuje:

- krátkodobé a dlhodobé poklesy a prerušenia výroby,
- flicker,
- dočasné a prechodné prepätia,
- emisie medziharmonických a harmonických zložiek prúdu (ovplyvňujúce medziharmonické a harmonické zložky napätia v distribučnej sústave),
- dovoľená zmena napätia v uzle pripojenia počas ustáleného stavu,
- dovoľená zmena napätia v uzle pripojenia pri spínaní,
- ovplyvňovanie HDO.

2.1.2 Vplyvy Smart Grid na bezpečnosť prác počas údržby

V posledných rokoch dochádza k popularizácii rôznych hybridných typov zdrojov. Tieto hybridné zdroje obsahujú isté akumulčné prostriedky (batérie) a hybridný striedač schopný nie len pracovať paralelne s distribučnou sieťou, ale aj ostrovnej prevádzky. Pri prevádzka takéhoto zdroja je

potrebné dostatočne zabezpečiť, aby nedošlo k pripojeniu ostrovného systému k distribučnej sieti počas údržby distribučnej siete. Napriek tomu jednotliví odberatelia, ktorí sa rozhodnú inštalovať si elektrický zdroj na pokrytie vlastnej spotreby a prebytky dodávať do elektrizačnej sústavy, chcú tento elektrický zdroj využívať aj počas výpadku napájania zo strany distribučnej siete. Preto sú hybridné systémy perspektívne a nie je žiaduce brániť ich rozvoju.

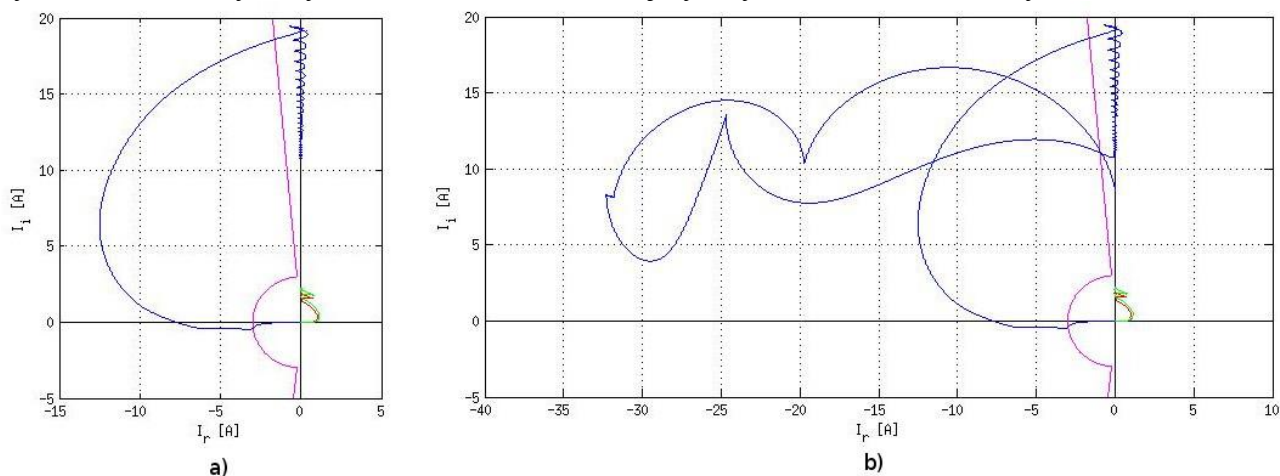
Vzhľadom na to, že ochrana zdravia a životov pracovníkov pri prácach na zariadeniach je prvoradá bola na UEAE vypracovaná štúdia, v ktorej boli modelované situácie, kedy došlo k zavlečeniu napätia z FVE do NN siete a boli určené maximálne dĺžky úsekov kmeňových vedení, ktoré je potrebné skratovať za podmienky aby dovolené dotykové napätie nepresiahlo 50 V. Simulácie boli realizované pre striedače s výkonom od 5 do 75 kW a pre 6 rôznych druhov káblov a 4 vzdušné vedenia. Bezpečné vzdialenosti sa pohybovali od 1 m (pre AlFe110/22 a 75 kW) do 1300 m (pre AYKY 4x16 a 5 kW). Vzhľadom na krátkosť niektorých výsledných bezpečných vzdialeností je možné povedať, že použitie jednej skratovacej súpravy v hlavnom napájacom bode je nedostačujúce. Z toho vyplývajú nasledujúce odporúčania pre práce na vedeniach v oblasti s rozšírenou distribuovanou výrobou:

- vedenie, na ktorom budú prebiehať práce, musí byť zabezpečené niekoľkými skratovaním súpravami (na každej odbočke),
- alebo dané vedenie musí byť pred začatím prác overené a zistené, kde sa presne nachádzajú FVE a zabezpečiť ich vypnutie počas celého trvania prác.

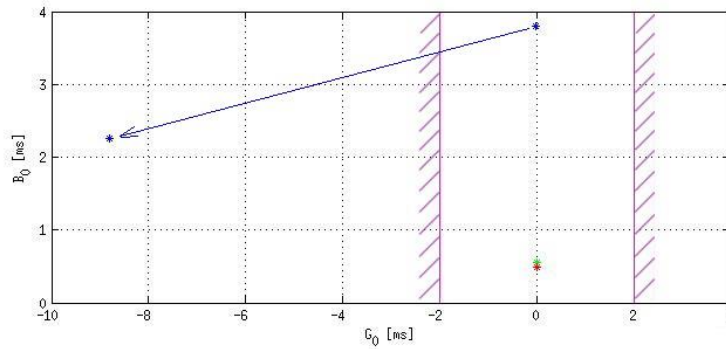
2.1.3 Vplyvy Smart Grid na koncepciu chránenia

Smart Grid prináša do distribučných sietí nové prvky zlepšujúce koncept chránenia a zabezpečujúce presnejšie identifikovanie miesta poruchy a tým menší počet odberateľov postihnutých výpadkom a rýchlejšie odstránenie poruchy. Medzi tieto prvky patria autoreclosery a inteligentné úsekové odpínače.[7]

Zároveň však Smart Grid prináša do distribučných sietí vyšší podiel distribuovaných zdrojov, pričom v krajnom prípade sa uvažuje až s ostrovnou prevádzkou Smart Regiónu (distribučnej siete). Napriek tomu, že v súvislosti so Smart Grid sa často hovorí o zabezpečení riadenia bilancie výroby a spotreby v rámci regiónu a o zabezpečení kvality počas ostrovej prevádzky, je zrejmé, že takýto koncept prevádzky distribučnej siete sa významne dotkne aj chránenia danej siete. V rámci dizertačnej práce je preto navrhnutý model distribučnej siete 22 kV lúčovej topológie s rozšírenou distribuovanou výrobou v rámci jedného z vývodov. Lúčová topológia je zvolená preto, že je to najpoužívanejšia topológia VN siete v našej ES (a to hlavne pre jednoduchosť jej chránenia). V rámci analýzy boli modelované rôzne poruchy v rôznych miestach siete, pričom porovnávané boli priebehy v poškodených vývodoch, v zdravých vývodoch bez distribuovanej výroby a s distribuovanou výrobou.



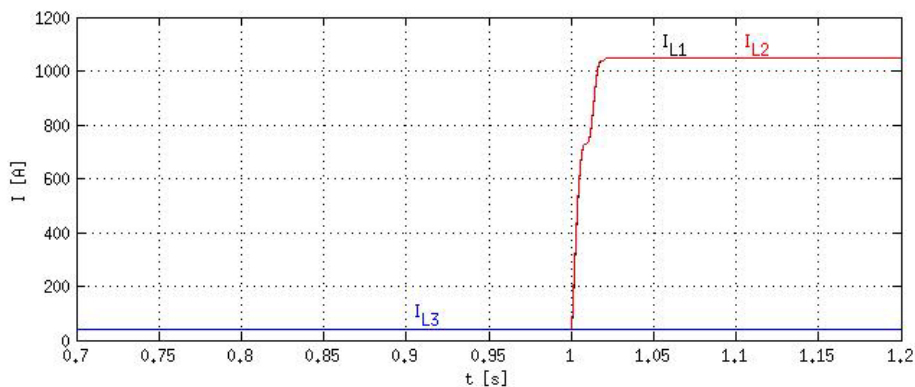
Obr. 1 Pohyb fázorov prúdov pri zemnom spojení a) bez zemného odporu b) so zemným odporom



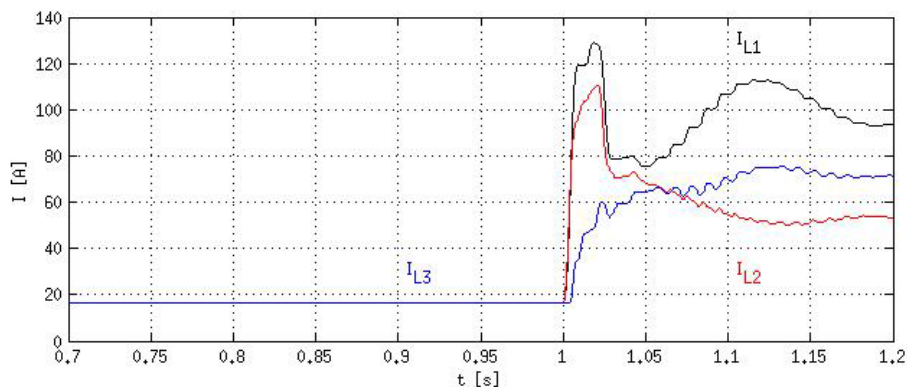
Obr. 2 Pohyb vektora admitancie pri zemnom spojení po pripojení odporníka

Prvým analyzovaným poruchovým stavom bolo zemné spojenie. Na Obr. 1a) je zobrazený pohyb fázorov netočivých zložiek prúdov v komplexnej rovine pred zaradením odporu do uzla transformátora a na Obr. 1b) je zobrazený pohyb fázorov netočivých zložiek prúdov po pripojení odporu do uzla transformátora.

Je vidieť, že ako jediný prechádza cez oblasť pôsobenia ochrany práve fázor netočivého prúdu poškodeného vývodu (zobrazený modrou farbou). Vzhľadom na rýchlosť prechodného deja a časové oneskorenie pôsobenia ochrany nemusí dôjsť k pôsobeniu ochrany a preto v čase 1,5 s dochádza k pripnutiu odborníka medzi uzol transformátora a uzemnenie, čím sa fázor netočivej zložky prúdu poškodeného vývodu dostane hlboko do pásma pôsobenia zemnej ochrany. Zároveň platí, že ani jeden z dvoch sledovaných zdravých vývodov (zobrazených červenou a zelenou) počas celej simulácie nezasiahol do pásma pôsobenia citlivej zemnej ochrany. Rovnako v prípade použitia konduktančnej ochrany (Obr. 2) platí, že po pripojení odporníka do uzla transformátora sa vektor admitancie poškodeného vývodu presune hlboko do pásma pôsobenia ochrany, zatiaľ čo zdravé vývody (s distribuovanou výrobou, aj bez nej) ostávajú v povolenom pásme (odporník neovplyvní meranú netočivú admitanciu). Distribuovaná výroba preto neovplyvní systémy identifikácie miesta vzniku zemného spojenia.



Obr. 3 Priebeh efektívnych hodnôt prúdov poškodeného vývodu



Obr. 4 Priebeh efektívnych hodnôt prúdov vývodu A

Ďalším analyzovaným poruchovým stavom bol dvojfázový skrat. Na Obr. 3 je zobrazený priebeh prúdu poškodeného vývodu a na Obr. 4 priebeh prúdu zdravého vývodu s rozšírenou distribuovanou výrobou. V čase vzniku skratu (1 s) dochádza k náhlemu, niekoľko násobnému nárastu prúdu v oboch vývodoch. Veľkosť prúdu zdravého vývodu s rozšírenou distribuovanou výrobou je závislá od množstva, charakteru a rozloženie distribuovaných zdrojov. Tento nárast môže za istých okolností spôsobiť chybné pôsobenie ochrán tohto vývodu. Tomuto chybnému pôsobeniu je možné zabrániť nastavením rozbehového prúdu ochrán vyšším, ako je najvyšší možný príspevok distribuovanej výroby k skratovému prúdu, alebo použitím smerových ochrán. Použitie prvého spomenutého spôsobu nie je veľmi vhodné, vzhľadom na to, že každý nový zapojený zdroj do distribučnej siete by si vyžiadal analýzu vplyvu na nastavenie ochrán. Odporúča sa preto v prípade rozšírenia distribuovanej výroby použitie smerových ochrán.

Následne bola v práci vypracovaná analýza vplyvu distribuovanej výroby na výpočet vzdialenosti miesta vzniku poruchy pomocou skratovej reaktancie. Pri dvojfázovom skratoe uvažovanom vo vývode s rozšírenou distribuovanou výrobou predstavovala chyba vypočítanej vzdialenosti skratu v porovnaní so skutočnou vzdialenosťou 12,8% (vypočítaná vzdialenosť 9,82 km, skutočná vzdialenosť 9,82 km). Ako posledné boli v práci skúmané priebehy poruchových prúdov distribuovaných zdrojov počas dvojfázového skratu na začiatku susedného vývodu (bez distribuovanej výroby). Súčasná koncepcia chránenia distribuovaných zdrojov vychádza z požiadavky aby distribuovaný zdroj bol odpojený od siete vždy keď dôjde k strate napájania siete zo strany distribučnej sústavy. Neexistuje žiadna požiadavka pre zabezpečenie blokovania ochrán pri vzdialených ochrán, alebo pre zabezpečenie selektivity, či koordinácie medzi ochranami distribučnej siete a distribuovaných zdrojov.

Tab. 1 Veľkosti poruchových prúdov distribuovaných zdrojov počas skratu na začiatku vývodu B

	PV1	PV2	PV3	PV4	KGJ
I_N [A]	72,1	72,1	72,1	72,1	360
I_{KL1} / I_N [-]	1,248	1,248	1,249	1,248	2,583
I_p / I_N [-]	2,929	3,032	3,213	3,651	7,628

Fotovoltaické elektrárne sú bežne chránené frekvenčnými, podpäťovými, prepäťovými a nadprúdovými ochranami. V práci bol analyzovaná možnosť pôsobenia nadprúdových ochrán. Uvažované bolo nastavenie okamžite pôsobiacej nadprúdovej ochrany po prekročení 1,2 násobku nominálnej hodnoty prúdu striedača. Ako je vidieť v Tab. 1, pri poruche v 10% dĺžky kmeňového vedenia vývodu B (susedného vedenia bez distribuovanej výroby) môže dôjsť k prekročeniu tejto prahovej hodnoty vo všetkých sledovaných fotovoltaických elektrárnach a k pôsobeniu ich ochrán. Preto ak má v budúcnosti

distribuovaná výroba tvoriť značnú časť výroby elektrickej energie, bude potrebné zabezpečiť aj koordináciu medzi ochranami distribučnej siete a ochranami distribuovaných zdrojov.

2.1.4 Rizikové faktory pre distribučnú sústavu

Zvýšená penetrácia distribuovanej výroby významne ovplyvní prevádzku distribučných sietí z pohľadu riadenia sústavy, regulácie napätia a zabezpečenia kvality dodávky. Aj keď sa v súčasnosti tejto problematike venuje veľká pozornosť, analýzy pripojiteľnosti sa budú musieť meniť. K distribuovaným zdrojom bude potrebné pristupovať nie ako k rušivým elementom pre kvalitu dodávky, ale ako k aktívnym prvkom zlepšujúcim možnosti riadenia sústavy, či zabezpečenia kvality.

Analýzou bolo preukázané, že rozšírená distribuovaná výroba ovplyvní aj bezpečnosť prác počas údržby. Dôležité preto bude zabezpečiť distribuované zdroje tak, aby nedošlo k ich pripojeniu k distribučnej sieti počas údržby. Náhodné pripojenie distribuovaného zdroja do siete počas údržby môže ohroziť pracovníkov pri vykonávaní prác na zariadení. Bude preto potrebná zmena pracovných postupov a použitie viacerých skratkovačích súprav, alebo vykonávanie prác pod napätím.

Zvýšená penetrácia distribuovanej výroby ovplyvní aj koncepciu chránenia distribučných sietí. V zásade je možné povedať, že chránenie distribučnej siete Smart Grid bude musieť byť zložitejšie ako

chránenie súčasnej distribučnej siete. Distribučná sieť s rozšírenou distribuovanou výrobou si vyžaduje použitie smerových ochrán, pričom na správne nastavenie smeru je potrebné klásť veľký dôraz. Za rovnako dôležité je možné považovať nastavenie koordinácie ochrán distribuovaných zdrojov s ochranami distribučnej siete. Bude preto potrebné zabezpečiť vhodnú selektivitu chránenia aj z pohľadu ochrán distribuovaných zdrojov.

2.2 Vplyvy Smart Grid na prenosovú sústavu

Napriek tomu, že sa Smart Grid zdanlivo netýka prenosovej sústavy, má na prenosovú sústavu značný vplyv. Z principiálneho hľadiska sa za najväčší vplyv Smart Grid na prenosovú sústavu dá považovať v súčasnosti otvorená otázka úlohy prenosovej sústavy pri fungujúcich sieťach Smart Grid.

Od siete Smart Grid sa v budúcnosti očakáva zabezpečenie riadenia výroby (a spotreby) na úrovni distribučnej siete, zabezpečenie bilancie výroby a spotreby, prípadne zabezpečenie autonómnej ostrovej prevádzky distribučnej siete. To je v súčasnej dobe úloha prevádzkovateľa prenosovej sústavy a je otázne, či budú odberatelia zapojení v sebestačných (alebo ostrovných) Smart Regiónoch ochotní platiť poplatok za prenos. Je preto otáznym nie len spôsob financovania poskytovania systémových a podporných služieb, ale aj spôsob financovania prevádzky, údržby a rozvoja prenosovej sústavy. Určite sa nedá predpokladať, že by bola prenosová sústava nepotrebná. Určite budú existovať veľkí odberatelia, či výrobcovia elektriny, ako aj potreba medzinárodného tranzitu. Dokonca aj zástancovia ostrovných Smart Regiónov hovoria o možnosti vzájomnej výpomoci a obchode jednotlivých Smart Regiónov v prípade nedostatku energetických zdrojov v jednom regióne a prebytku v inom regióne, prípadne o pripojení k nadradenej sústave v prípade problémov so zabezpečením výkonovej bilancie.

Rozvoj systémov Smart Grid a s tým spojený presun výroby z veľkých zdrojov do distribučných sietí môže ovplyvniť napríklad aj systémové služby dvoma spôsobmi – zmenou potreby podporných služieb (zvýši, alebo zníži potrebný objem podporných služieb na zabezpečenie systémovej služby) a zmenou dostupnosti podporných služieb.

2.2.1 Vplyvy Smart Grid na napät'ovú stabilitu prenosovej sústavy

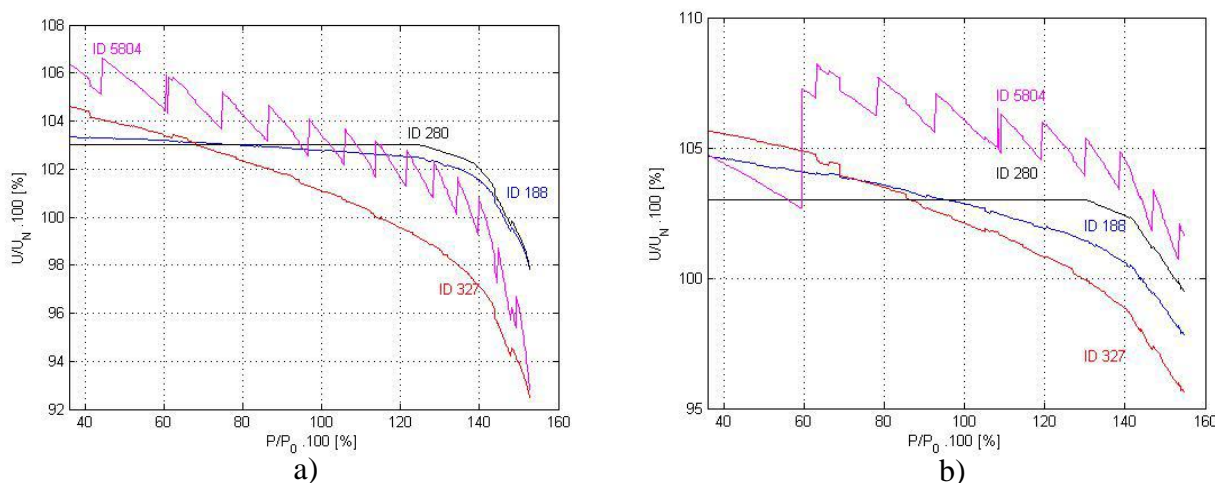
Pre analýzu napät'ovej stability je v práci zvolená metóda P-U kriviek. Táto metóda spočíva v postupnom výpočte ustáleného stavu s uvažovaným postupným navyšovaním spotreby vo vybraných uzloch. Za hranicu napät'ovej stability je potom možné označiť bod s maximálnym zaťažením a prislúchajúce napätie je označované ako kritické napätie. Vzhľadom na to, že v blízkosti hranice napät'ovej stability dochádza k divergencii iteračných metód (Gauss-Seidlova metóda, Newton-Raphsonova metóda) v rámci analýzy nebolo možné jednoznačne vypočítať hranicu napät'ovej stability. Preto vo výsledkoch sú zobrazené len stabilné časti charakteristiky (nad úrovňou kritického napätia). Za hranicu napät'ovej stability je tak uvažovaný bod s najvyšším vypočítaným zaťažením.

Analýza vplyvu Smart Grid na napät'ovú stabilitu je vykonaná na simulačnom modeli vytvorenom v prostredí NEPLAN. Analyzovaná elektrická sieť (prenosová sústava), ktorej vlastnosti boli sledované pri zmenách súvisiacich s postupným rozširovaním sebestačných regiónov (Smart Regiónov), bola modelovaná spolu s jej elektricky blízkym okolím. Blízke elektrické okolie bolo nemenné a všetky úpravy boli vykonávané výhradne v analyzovanej časti siete. Modelované elektrické okolie tvorí spolu 32 uzlov s napät'ovou hladinou 400 kV a 3 uzly s napät'ovou hladinou 220 kV. Celkový inštalovaný výkon 5500 MW je tvorený 22 generátormi s výkonom 250 MW. Rozložením spotreby je dosiahnutý tranzit cez analyzovanú sieť 600 MW. Samotná analyzovaná prenosová sústava je okrem elektrického okolia priamo prepojená s veľkými elektrickými zdrojmi a s distribučnými sústavami, pričom ju tvorí 26 uzlov s napät'ovou hladinou 400 kV a 10 uzlov s napät'ovou hladinou 220 kV. Distribučné siete sú modelované na napät'ových hladinách 110 kV a 22 kV. Celkovo je modelovaných 18 distribučných sietí 110 kV, ktoré spolu zahŕňajú 253 uzlov 110 kV. Každá z týchto distribučných sietí má jedinečnú topológiu a je napájaná z jedného, resp. dvoch uzlov analyzovanej prenosovej sústavy. 80 uzlov 110 kV ďalej napája distribučné siete 22 kV. Spolu je teda modelovaných 80 distribučných sietí 22 kV, ktoré spolu zahŕňajú 11680 uzlov. Každá z týchto distribučných sietí je tvorená rovnakou lúčovou schémou. V základnom stave som uvažoval s vyvedením časti zdrojov do prenosovej sústavy (celkovo

2820 MW) a s vyvedením časti zdrojov do distribučných sietí 110 kV (567,5 MW). Celková spotreba bola 3546,5 MW, čím bol dosiahnutý import z elektricky blízkeho okolia 159 MW. Spotreba bola rozdelená do jednotlivých uzlov distribučných sietí (110 kV a 22 kV). Pre analýzu vplyvov početných Smart Regiónov na prenosovú sústavu boli postupne v štyroch krokoch odpájané zdroje 252,2 MW, ktoré boli nahrádzané početnými zdrojmi 250 kW pripájanými do distribučných sietí 22 kV. Takýmto procesom boli postupne vytvorené nasledujúce stavy:

- základný stav (bez distribuovanej výroby na hladine 22 kV),
- 20 Smart Regiónov (1000 distribuovaných zdrojov s výkonom 250 kW na hladine 22 kV),
- 40 Smart Regiónov (2000 distribuovaných zdrojov s výkonom 250 kW na hladine 22 kV),
- 60 Smart Regiónov (3000 distribuovaných zdrojov s výkonom 250 kW na hladine 22 kV),
- 80 Smart Regiónov (4000 distribuovaných zdrojov s výkonom 250 kW na hladine 22 kV).

PU krivky boli vypočítané postupným zvyšovaním spotreby v distribučných sieťach analyzovanej časti siete, pričom chýbajúci činný výkon bol dodaný z elektrického okolia (navýšením importu). Počas výpočtu bola povolená regulácia (prepínanie odbočiek) prenosových transformátorov.



Obr. 5 P-U krivky pre a) základný stav b) stav s 80 Smart Regiónmi

Na Obr. 5 sú zobrazené PU krivky pre vybraný pilotný uzol (ID 241), elektricky blízky uzol (ID 188), elektricky vzdialený uzol (ID 327) a pre distribučný uzol 110 kV (ID 5804) v 2 rôznych stavoch. Z ich priebehov vyplýva že rozšírenie Smart Regiónov nemusí mať výrazný vplyv na veľkosť kritickej spotreby a zaťaženia sústavy. Počas analýzy nebola zaznamenaná zmena maximálneho vypočítaného zaťaženia sústavy vplyvom presunu výroby z prenosovej sústavy do distribučných sústav. Rozšírenie distribuovanej výroby však malo výrazný vplyv na zmenu minimálneho kritického napätia. V prípade analyzovanej siete s rozšírenou distribuovanou výrobou (pri 1000 MW podiele distribuovanej výroby) tak došlo k napät'ovému kolapsu pri napätí elektricky vzdialeného uzla 95,63 % (383 kV), zatiaľ čo v prípade základného stavu to bolo až pri napätí 92% (369 kV). Dôležité je, že minimálne kritické napätie sústavy sa tak dostalo nad úroveň 380 kV, čo je povolená hodnota napätia na napät'ovej hladine 400 kV. Tento nárast kritického napätia je významný, keďže prevádzkovateľovi prenosovej sústavy tak môže chýbať informácia o potenciálnom nebezpečenstve napät'ového kolapsu sústavy aj napriek tomu, že všetky hodnoty napätí v jednotlivých uzloch sú v povolených medziach.

2.2.2 Vplyvy Smart Grid na skratové pomery

Veľkosť skratového prúdu je veľmi dôležitý parameter v prenosovej sústave. Ovplyvňuje nie len chránenie sústavy (z hľadiska nastavenia ochrán, ale aj z hľadiska skratovej odolnosti) ale má vplyv aj na stabilitu sústavy. Veľkosť skratového výkonu predstavuje akúsi tvrdosť samotnej siete. Tvrdosť siete úzko súvisí s bezpečnosťou a spoľahlivosťou prevádzky. Na tvrdosti siete závisí jej odolnosť voči rôznym rušivým vplyvom, prechodným dejom, či poruchám. V zásade platí, že tvrdšia sieť je stabilnejšia a odolnejšia.

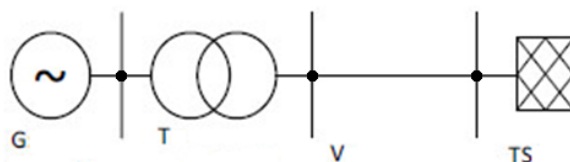
Tab. 2 Príspevky jednotlivých zdrojov k skratovým prúdom

Typ zdroja	P_n [MW]	ID (Uzol)	U_n [kV] (Uzol)	I_k [kA]
Jadrová elektrárňa	235	280	400	1,209
Tepelná elektrárňa	110	2466	220	1,121
Vodná elektrárňa	90	312	400	0,870
Smart Grid	150	318	400	0,330

V súčasnosti sú výhradnými zdrojmi skratového výkonu veľké synchronne generátory vyvedené do prenosovej sústavy. V Tab. 2 sú zobrazené príspevkov rôznych typov zdrojov. Príspevky generátorov sú počítané v uzle prenosovej sústavy, kde je generátor vyvedený (na strane vyššieho napätia blokového transformátora). Ako príspevok Smart Grid je počítaný príspevok v uzle na primárnej strane výkonového transformátora napájajúceho radiálnu sieť 110 kV s 12 Smart Regiónmi s celkovým inštalovaným výkonom 150 MW. Najvyšší príspevok k skratovému prúdu má generátor jadrového bloku a oblasť s rozšírenými sieťami Smart Grid má omnoho nižší príspevok ako ktorýkoľvek iný porovnávaný generátor. Dá sa preto konštatovať, že ak v budúcnosti bude dochádzať k postupnému presunu výroby z veľkých zdrojov do distribučných sietí nie len v jednej ohraničenej oblasti, ale v celej prepojenej sústave, bude to mať za následok pokles predpokladaného skratového výkonu v jednotlivých uzloch. Sieť s rozšírenými Smart Regiónmi tak bude mäkkšia ako je dnes.

2.2.3 Vplyvy Smart Grid na statickú stabilitu veľkých synchronných generátorov

Existuje viacero faktorov ovplyvňujúcich statickú stabilitu synchronne pracujúcich strojov. Najdôležitejším z nich je samotná prevádzka synchronného stroja z pohľadu budenia. Preto regulátor budenia každého synchronného generátora obsahuje strážcu medze podbudenia s nastavenou hodnotou minimálneho budiaceho prúdu, ktorá nespôsobí stratu statickej stability synchronného generátora. V práci je preto vykonaný výpočet dovolenej medze podbudenia pre rôzne hodnoty skratového výkonu v mieste vyvedenia výkonu do prenosovej sústavy. Výpočet je realizovaný pre zjednodušený model generátor – tvrdá sieť (Obr. 6).



Obr. 6 Zjednodušený model generátor – tvrdá sieť

Pre analýzu spätných vplyvov početných Smart Regiónov na statickú stabilitu veľkých zdrojov boli vybrané 2 bežné turbogenerátory jadrového bloku - prvý s výkonom 235 MW a druhý s výkonom 1200 MW.

Tab. 3 Závislosť minimálneho jalového výkonu od skratového prúdu pre generátor 235 MW

I_k'' [kA]	$U_{TS} = 420$ kV	$U_{TS} = 400$ kV	$U_{TS} = 380$ kV
	Q_{min} [MVar]		
7	-49,2	-34,6	-20,7
10	-50,6	-35,9	-21,9
15	-51,8	-37,0	-22,9
20	-52,4	-37,5	-23,3
25	-52,7	-37,8	-23,6

Pri výpočte maximálneho podbudenia sa v práci uvažuje s hraničnou hodnotou koeficientu výkonovej rezervy 10 %. Táto hodnota je závislá hlavne od rýchlosti použitých regulátorov a v praxi sa môže pohybovať vyššie, ale môže byť aj blízka nule. Hodnota minimálneho jalového výkonu sa pri napätí 420 kV (zaujímavom hlavne pre to, že sa pri nízkych hodnotách napätia neuvažuje

s podbudenou prevádzkou generátorov) pohybovala v rozsahu od -49,2 MVar (pre 7 kA) po -52,7 MVar (pre 25 kA). Je preto možné povedať, že aj napriek tomu, že hodnota napätia tvrdej site mala vplyv na veľkosť minimálneho jalového výkonu, veľkosť skratového výkonu v mieste vyvedenia výkonu nemá významný vplyv na dovolené podbudenie synchronného generátora a teda ani na jeho statickú stabilitu.

Tab. 4 Závislosť minimálneho jalového výkonu od skratového prúdu pre generátor 1200 MW

I_k'' [kA]	$U_{TS} = 420$ kV	$U_{TS} = 400$ kV	$U_{TS} = 380$ kV
	Q_{min} [MVar]		
7	-225	-153	-84,5
10	-262	-187	-115
15	-294	-215	-141
20	-310	-230	-154
25	-321	-240	-162

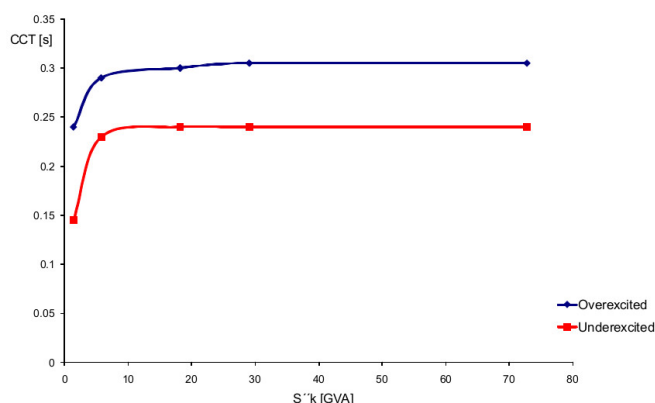
V prípade výpočtu generátora s výkonom 1200 MW (Tab. 4) sa táto hodnota pohybovala v rozsahu od -225 MVar do -321 MVar. Je preto možné konštatovať, že pokles skratového prúdu a teda zmenšenie tvrdosti sústavy má v tomto prípade významný vplyv na statickú stabilitu tohto generátora.

2.2.4 Vplyvy Smart Grid na dynamickú stabilitu sústavy

Dynamická stabilita sústavy je definovaná ako schopnosť elektrizačnej sústavy odolávať rýchlym zmenám a schopnosť vrátiť sa do ustáleného stavu po odznení prechodného deja. Úvahy o dynamickej stabilite sústavy vychádzajú z úvah o dynamickej stabilite generátorov a teda o stabilite uhla rotora synchronného generátora. V prípade, ak nedôjde k pripájaniu nových kompenzačných tlmiviek do sústavy, generátory budú musieť byť prevádzkované pobudené. Vykonal som preto sériu simulácií pre overenie vplyvu rozšírenia Smart Grid na dynamickú stabilitu sústavy. Základným kritériom dynamickej stability synchronného stroja je CCT – kritický čas trvania skratu. K určení tohto času je potrebné poznať časový priebeh uhla medzi rotorom a statorom δ a k tomu je potrebné riešiť pohybovú diferenciálnu rovnicu synchronného stroja.

Analyzované boli faktory ovplyvňujúce dĺžku trvania CCT:

- veľkosť napätia v uzle vyvedenia výkonu,
- veľkosť skratového výkonu v uzle vyvedenia výkonu,
- podbudenie/ prebudenie generátora.



Obr. 7 Vplyv veľkosti skratového výkonu na dĺžku CCT

Na Obr. 7 je zobrazená závislosť dĺžky kritického trvania skratu od veľkosti skratového výkonu v uzle vyvedenia synchronného generátora. Závislosti sú opäť zobrazené pre prebudený a podbudený generátor. Rovnako aj tieto simulácie potvrdili vplyv veľkosti budenia na dynamickú stabilitu synchronného generátora. Veľkosť skratového výkonu má významný vplyv na dĺžku CCT len pri nízkych hodnotách skratového výkonu. Pre daný typ generátora je možné na základe tohto priebehu

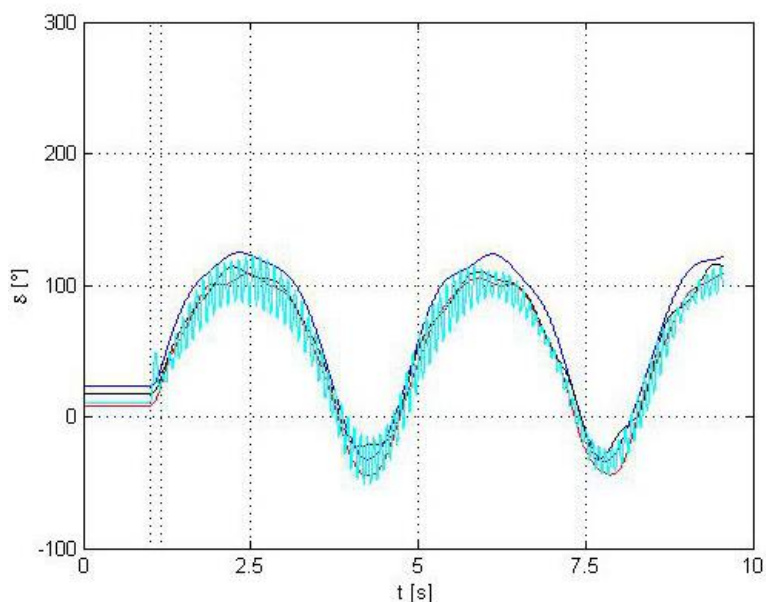
povedať, že skratový výkon v mieste vyvedenia generátora má významný vplyv na dynamickú stabilitu synchrónneho generátora len od určitej hodnoty.

Dynamická stabilita sústavy je tvorená dynamickou stabilitu veľkých synchrónnych strojov. Zásadný vplyv na dynamickú stabilitu synchrónneho stroja má práve hmotnosť a teda zotrvačnosť rotujúcich častí celého ústrojenstva synchrónny generátor – turbína. V rámci modelu popísanom v 2.2.1 sa uvažuje s generátormi s knižničnými hodnotami koeficientov zotrvačnosti rotorov. Hodnoty týchto koeficientov spolu s vypočítanými hodnotami CCT pre jednotlivé typy použitých generátorov sú uvedené v Tab. 5.

Tab. 5 Parametre sledovaných generátorov

ID	Typ	P_N [MW]	H [s]	CCT [s]
578	Turbogenerátor (JE)	235	4,945	0,215
36099	Turbogenerátor (TE)	110	3,525	0,180
1248	Hydrogenerátor	90	2,880	0,170
13876	Kogeneračná jednotka	0,25	0,1753	0,035

Z výpočtu kritického času trvania skratu (Tab. 5) vyplýva, že malé generátory (ako kogeneračné jednotky) pripájané do distribučných sietí majú výrazne horšiu dynamickú stabilitu, ako veľké synchrónne generátory pripájané do prenosovej sústavy.



Obr. 8 Priebehy uhlov rotorov pri skrate trvajúcom 162 ms

Táto nízka zotrvačnosť malých distribuovaných zdrojov sa prejaví aj pri skrate v prenosovej sústave vo forme rýchleho kývania malých generátorov. Na obr. 8 je zobrazený priebeh časový uhlov rotorov vybraných generátorov (modrou je zobrazený priebeh rotorového uhla generátora jadrového bloku ID 578, červenou je zobrazený priebeh rotorového uhla generátora vodnej elektrárne ID 1248, zelenou priebeh generátora tepelného bloku ID 1248).

Napriek krátkosti CCT malých kogeneračných jednotiek nemožno očakávať že by ohrozili dynamickú stabilitu celej prenosovej sústavy. Faktom však je, že podporou obnoviteľných zdrojov energie a dekarbonizáciou hospodárstva dochádza v prvom rade k odpájaniu jadrových a tepelných elektrární (napr. Energiewende v Nemecku), ktoré predstavujú dynamicky najstabilnejšie zdroje prenosovej sústavy. Navyše otázne ostáva zabezpečenie dynamickej stability Smart Regiónov založených na malých kogeneračných jednotkách a fotovoltaických elektrárnach.

2.2.5 Rizikové faktory pre prenosovú sústavu

Smart Grid ako koncepcná zmena prenosu a distribúcie elektriny sa pri širokom zavedení dotkne aj prenosovej sústavy. Otázna ostáva nie len úloha prenosovej sústavy v súvislosti so Smart Grid, ale aj financovanie chodu a rozvoja prenosovej sústavy. Dôležité taktiež bude zabezpečenie systémových a podporných služieb. Rozšírená distribuovaná výroba (napr. fotovoltická) môže spôsobiť navýšenie požadovaného regulačného výkonu. Naopak pokles inštalovaného výkonu v konvenčných elektrárnach s určitosťou spôsobí pokles dostupnosti tohto regulačného výkonu.

Analýzou bolo ďalej preukázané, že zavedenie početných Smart Regiónov do sústavy môže ovplyvniť napäťovú stabilitu sústavy. Ako najnebezpečnejšia sa z tohto pohľadu ukázala identifikácia hroziaceho napäťového kolapsu. Na základe analýzy výsledkov simulácií a zostrojených PU kriviek, nemal presun výroby do distribučných sietí vplyv na kritické zaťaženie sústavy, resp. na jej zaťažiteľnosť, ale kritické napätie pri kritickom zaťažení bolo vyššie (v rámci dovolených hodnôt napätia).

Preukázané bolo tiež, že Smart Región má výrazne nižší príspevok k skratovým prúdom ako akýkoľvek veľký generátor vyvedený do prenosovej sústavy. V prípade výrazného rozšírenia Smart Regiónov v širokom okolí je možné očakávať pokles skratového výkonu v prenosovej sústave. Následne bolo preukázané, že pokles skratového výkonu môže súvisieť so zhoršením statickej stability veľkých synchronných generátorov. Zároveň pokles skratového výkonu ovplyvní a ohrozí dynamickú stabilitu veľkých generátorov a tým aj celej sústavy.

Zvýšená penetrácia distribuovaných zdrojov spolu s odstavením veľkých systémových blokov v prenosovej sústave spôsobí odľahčenie prenosovej sústavy. Preto bude zrejme potrebné zabezpečiť kompenzáciu reaktančného výkonu inštalovaním tlmiviek.

2.3 Vplyv Smart Grid na odberateľov

Prebiehajúce zmeny v elektrizačnej sústave, zvyšovanie podielu obnoviteľných a distribuovaných zdrojov energie, ako aj požiadavky na zvýšenie energetickej efektívnosti celej elektrizačnej sústavy ako komplexného systému si vyžadujú aktívne zapojenie koncových odberateľov do tvorby a optimalizácie denného diagramu zaťaženia. Smart Grid ako koncepcná zmena fungovania distribučných sietí tak zásadne ovplyvní fungovanie koncových odberateľov. Od koncových odberateľov sa očakáva zmena zmýšľania a prispôbenie vlastných požiadaviek podmienkam a možnostiam sústavy. Od tejto zmeny zmýšľania koncových odberateľov závisí úspech, alebo neúspech zavedenia Smart Grid. Z tohto pohľadu bude vplyv Smart Grid pravdepodobne najvýraznejší práve na spotrebiteľov.

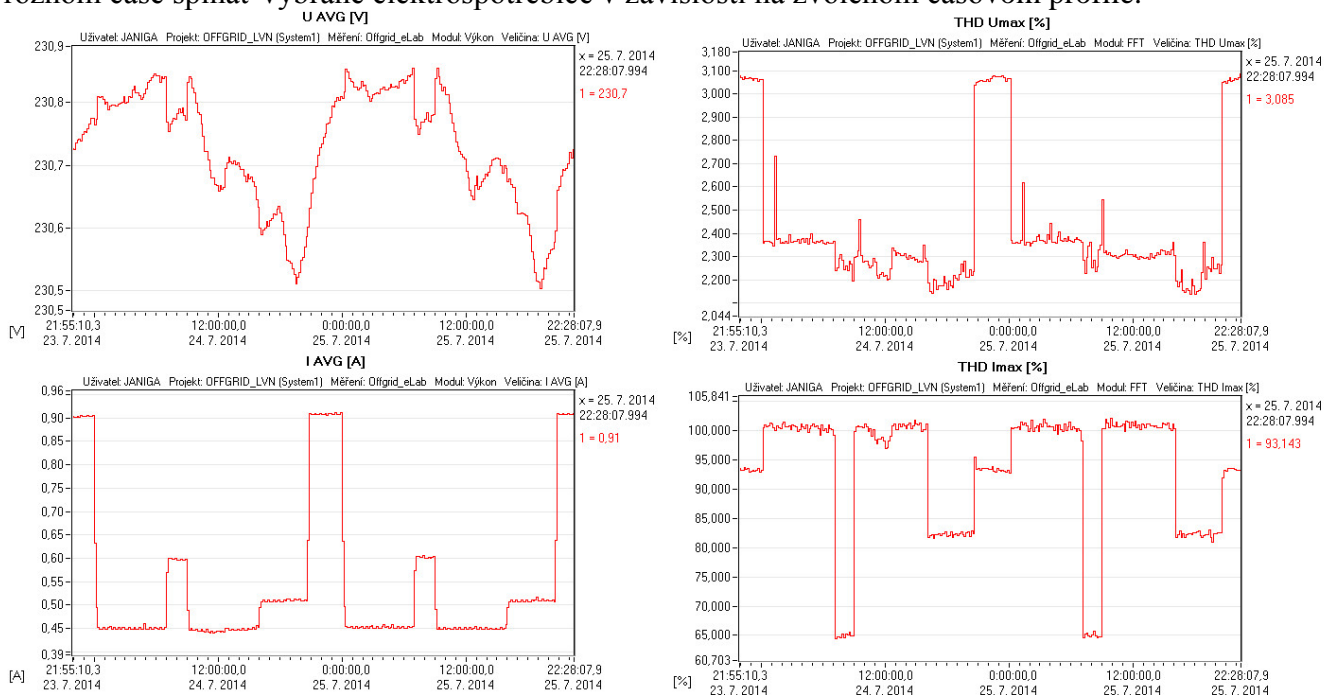
Smart Grid bude mať určite ekonomický dopad na spotrebiteľa. Miera tohto dopadu a to, či bude pozitívny, alebo negatívny závisí od konkrétnej podoby danej siete Smart Grid a od miery zapojenia koncového odberateľa do tvorby diagramu zaťaženia. Existuje množstvo rozsiahlych publikácií, ktoré sa zaoberajú dopadom Smart Grid na pohodlie a cenu elektriny pre koncových odberateľov.

Z technického hľadiska pri posudzovaní vplyvov Smart Grid na spotrebiteľov je potrebné hľadiť na kvalitu napätia, resp. na zmenu kvality napätia. Špeciálny prípad, s ktorým sa v budúcnosti uvažuje, je ostrovná prevádzka časti distribučnej siete, teda ostrovná prevádzka sebestačného regiónu. Ostrovná prevádzka má k dispozícii len obmedzené množstvo energetických zdrojov, ako aj obmedzený skratový výkon. Prechodom siete do ostrovnej prevádzky sa tak významne menia nie len prevádzkové parametre dotknutej siete, ale aj poruchové charakteristiky siete (priebehy a veľkosti skratových prúdov, priebehy napätí pri poruchách a pod). Pre posúdenie prevádzkových parametrov siete je dôležité posúdenie kvality napätia. Pre analýzu možných vplyvov Smart Grid na spotrebiteľov elektriny sú v dizertačnej práci analyzované merania dvoch ostrovných prevádzok.

2.3.1 Ostrovný systém v laboratóriu Slovenskej technickej univerzity

Laboratórny ostrovný systém je inštalovaný na Ústave elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky STU. Systém pozostáva z fotovoltických panelov s celkovým maximálnym výkonom 1 kW, akumuláčného systému (batérií) s kapacitou 14 kWh a z ostrovného striedača s výkonom 3 kW. Systém je navrhnutý pre optimálnu dennú spotrebu v rozmedzí 1 – 5 kWh denne a maximálnu dennú

výrobu 6 kWh denne. Pre analýzu správania tohto solárneho ostrovného systému v rôznych prevádzkových podmienkach bol vytvorený systém riadenia spotreby umožňujúci simulovať rôzne prevádzkové profily spotreby. Riadiaci systém je vytvorený v prostredí LabVIEW a jeho úlohou je v rôznom čase spínať vybrané elektrospotrebiče v závislosti na zvolenom časovom profile.

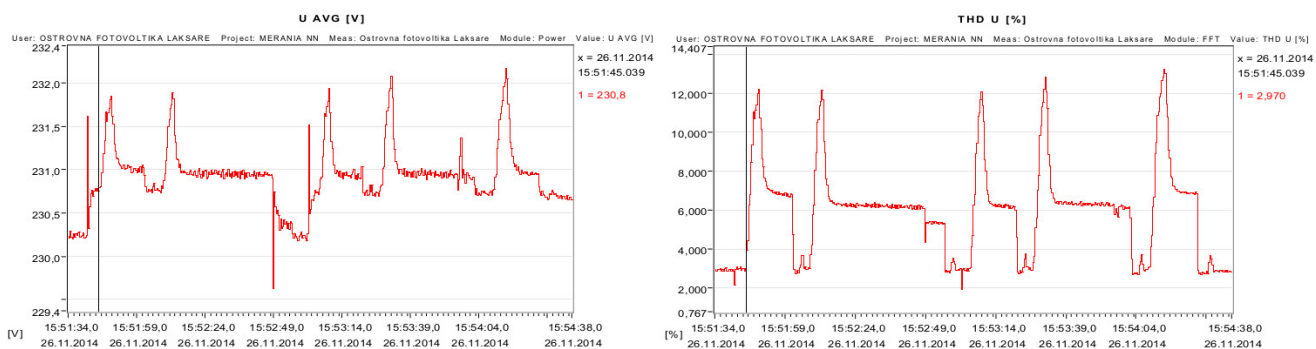


Obr. 9 Výstupné napätie a prúd a celkové harmonické skreslenie napätia a prúdu

Namerané priebehy (obr. 9) naznačujú veľmi dobrú napätovú stabilitu (schopnosť udržať svorkové napätie v požadovaných medziach) na výstupe zo striedača. Zmena napätia síce kopíruje zmenu zaťaženia, je však minimálna a rozsah napätia počas celého priebehu merania neprekročil rozsah 222 – 233 V. Použité elektrické spotrebiče spôsobili výrazné harmonické skreslenie priebehu prúdu, pričom celkové harmonické skreslenie prúdu počas celého merania nekleslo pod hodnotu 60%. Napriek tomu sa to výrazne neprejavilo na harmonickom skreslení napätia, keďže celkové harmonické skreslenie napätia neprekročilo hodnotu 3,7%.

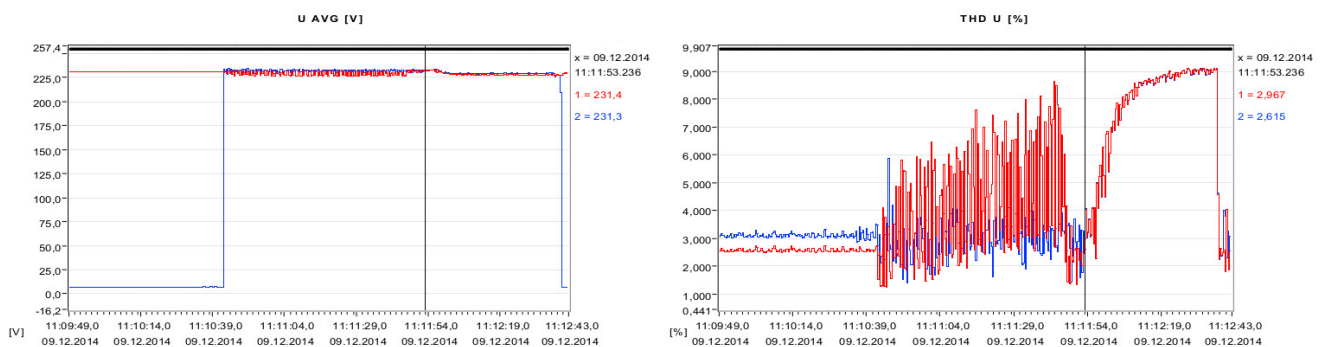
2.3.2 Ostrovný systém rodinného domu

Ostrovný solárny systém rodinného domu je navrhnutý a dimenzovaný pre úplne autonómnu a pasívnu prevádzku rodinného domu. Ostrovný systém pozostáva z 12 fotovoltických panelov, každý so špičkovým výkonom 235 W (spolu 2820W), gélových akumulátorových batérií s kapacitou 15 kWh a zo striedača s maximálnym trvalým výkonom 5000 W (krátkodobo do 6500 W). Okrem tohto systému je pre prípad dlhodobého nepriaznivého počasia k dispozícii benzínová elektrocentrála s elektrickým výkonom 3200 W.



Obr. 10 Výstupné napätie a celkové harmonické skreslenie napätia

Počas merania tohto ostrovného systému rodinného domu dochádzalo k výraznejším odchýlkam efektívnych hodnôt a harmonického skreslenia ako v prípade laboratórneho ostrovného systému. Napríklad počas merania elektronickej záťaže (frekvenčného meniča) dochádzalo k opakovanému prekročeniu hodnoty celkového harmonického skreslenia napätia 12 %.



Obr. 11 Celkové harmonické skreslenie napätia počas paralelnej prevádzky

Problematická bola paralelná prevádzka ostrovného striedača so synchronným generátorom (obr. 11). Obidva zdroje samostatne (pred fázovaním) dodávali napätie s celkovým harmonickým skreslením približne 3%. V priebehu je vidieť, že postupným zaťažovaním generátora elektrocentrály narastalo harmonické skreslenie napätia ostrovnej siete až na úroveň 9%.

2.3.3 Rizikových faktorov pre odberateľov

Smart Grid teda významne ovplyvní aj odberateľov. Očakáva sa zapojenie spotrebiteľov do tvorby bilancie výroby a spotreby. Rizikové je preto zabezpečenie spoľahlivosti dodávky pre napĺňanie všetkých požiadaviek odberateľov.

Z pohľadu kvality dodávky je možné za najrizikovejšiu označiť prevádzku ostrovného Smart Regiónu. V takom prípade je potrebné zabezpečiť, aby vzájomná interakcia zdrojov nemala za následok zhoršenie kvality.

Prínos pre prax

V práci bolo preukázané, že zavádzanie Smart Grid sa dotkne všetkých účastníkov trhu s elektrinou od veľkých výrobcov, cez prevádzkovateľa prenosovej sústavy, distribučných sústav až po koncových odberateľov. Na implementácii technológie Smart Grid sa preto musia podieľať všetci títo účastníci trhu s elektrinou. Je potrebné, aby na základe konkrétnej podoby Smart Grid, vyhodnotili jednotlivé zúčastnené strany konkrétne vplyvy a prípadne prijali nápravné opatrenia. Táto dizertačná práca dáva základ pre tvorbu štúdií a analýz realizovateľnosti konkrétnych koncepcií Smart Grid.

Za hlavný prínos práce je možné považovať definovanie rizikových faktorov:

1. Pre prevádzku distribučnej sústavy z pohľadu:
 - prevádzky - lokálne vplyvy na prevádzku a riadenie sústavy,
 - chránenia - zložitejšie chránenie distribučných sietí a potreba selektivity chránenia distribučnej siete a distribuovaných zdrojov,
 - údržby - nebezpečenstvo zavlčenia napätia počas údržby zariadení distribučných sietí.
2. Pre prevádzku prenosovej sústavy z pohľadu:
 - systémových a podporných služieb - objemy a dostupnosť,
 - napät'ovej stability - rozoznateľnosť blížiaceho sa kolapsu,
 - skratových pomerov - pokles skratového výkonu a s tým súvisiace zníženie "tvrdosti" sústavy,
 - statickej stability - obmedzenie oblasti pobudenia veľkých generátorov,
 - dynamickej stability - zmenšenie CCT veľkých generátorov a stabilita Smart Regiónu v ostrovnej prevádzke.
3. Pre odberateľov z pohľadu spoľahlivosti dodávky a kvality napätia

Z práce vyplývajú nasledujúce odporúčania:

- Je potrebné, aby sa štúdie v budúcnosti zameriavali nie len na lokálne vplyvy na prevádzku distribučnej sústavy, ale aby riešili prevádzku elektrizačnej sústavy ako celku.
- Je potrebné, aby v rámci Smart Grid došlo k zmene (a do istej miery k sprísneniu) požiadaviek posudzovania pripojiteľnosti distribuovaných zdrojov. Distribuované zdroje nemajú byť vnímané ako niečo, čo môže byť pripájané len do tej miery, kým nespôsobia zhoršenie kvality dodávky. Distribuované zdroje majú byť nástrojom na zabezpečenie kvality.
- Prevádzkovatelia distribučných sietí by mali zmene fungovania distribučných sietí podriadiť aj bezpečnostné postupy týkajúce sa údržby prvkov distribučných sietí. Distribučný transformátor nebude jediným prvkom v Smart Grid, ktorý môže zavliecť životu nebezpečné napätie do miesta údržby.
- Koncept chránenia distribučných sietí bude v Smart Grid zložitejší, je potrebné preto využívať smerovanie ochrán a zahrňať distribuované zdroje ako aktívne zdroje skratového výkonu. Za zváženie stojí zmena topológie, keďže lúčová sieť stratí výhodu jednoduchosti chránenia.
- Pre prenosovú sústavu bude Smart Grid znamenať hlavne pokles skratového výkonu a odľahčenie sústavy. Na základe konkrétneho vývoja by mal prevádzkovateľ prenosovej sústavy zvoliť vhodné nápravné opatrenia pre zabezpečenie bezpečnosti a stability prevádzky.
- Celý koncept Smart Grid by mal byť budovaný tak, aby benefity plynúce z jeho vytvorenia prevážili náklady a obmedzenia s ním spojené.

Záver

V tejto práci boli popísané príčiny zavádzania inteligentných sietí Smart Grid, ako aj prínosy a obmedzenia vyplývajúce z ich rozšírenia. Ako bolo uvedené, politika Európskej únie založená na podpore obnoviteľných zdrojov energie si vyžiada budovanie inteligentných sietí Smart Grid, alebo robustných sietí Super Grid. Rovnako podpora elektromobility si vyžaduje vytvorenie Smart Grid. Dá sa preto očakávať budúci rozvoj práve technológie Smart Grid.

Ako bolo uvedené, Smart Grid môže predstavovať prostriedok na riešenie problémov súvisiacich s distribuovanou výrobou, obnoviteľnými zdrojmi energie a elektromobilitou. Základným nástrojom môže byť cenotvorba a dynamická tarifa. S cenou elektrickej energie môže následne súvisieť riadenie spotreby, výroby a prípadne akumulácie (napr. prostredníctvom batérií elektromobilov). Dá sa preto očakávať, že Smart Grid zabezpečí fungujúci otvorený trhový systém v oblasti elektroenergetiky. Je však potrebné pamätať na všetky špecifiká odvetvia elektroenergetiky a na všetky riziká, ktoré môže so sebou zavádzanie Smart Grid priniesť. Smart Grid ako koncepčná zmena fungovania elektrizačnej sústavy pri širokom zavedení prinesie riziká nie len pre distribučnú sústavu, ale aj pre prenosovú sústavu a v konečnom dôsledku aj pre konečného odberateľa.

Sieť Smart Grid predstavuje zmenu spôsobu riadenia elektrizačnej sústavy. Predstavuje nevyhnutný prostriedok na dosiahnutie vytýčených cieľov. Avšak pred zmenou konceptu fungovania elektrizačnej sústavy je potrebné si položiť otázku, či sieť Smart Grid bude schopná zabezpečiť rovnakú spoľahlivosť dodávky ako súčasný model siete založený na veľkých centralizovaných zdrojoch elektrickej energie. Je potrebné v rámci siete Smart Grid zabezpečiť dostatočný objem podporných služieb na zabezpečenie bezpečnosti a spoľahlivosti elektrizačnej sústavy.

Zavádzanie technológie Smart Grid do elektrizačnej sústavy môže mať vplyv na prevádzku a stabilitu elektrizačnej sústavy ako celku. Technológie Smart Grid v prvom rade ovplyvnia prevádzkovateľov distribučných sústav. Smart Grid predstavuje zmenu konceptu distribúcie elektrickej energie. S tým súvisí nie len zmena riadenia distribučných sietí počas normálnej prevádzky, ale aj zmena postupov počas údržby, prípade zmena konceptu chránenia. Bolo preukázané, že neúmyselné pripojenie distribuovaného zdroja prevádzkovaného v ostrovej prevádzky do distribučnej siete počas údržby môže ohroziť pracovníkov pri vykonávaní prác na zariadení distribučnej siete. Ďalej bolo preukázané, že zvýšený podiel distribuovanej výroby v distribučných sieťach vplýva na koncept chránenia týchto sietí. Paradoxne práve distribuovaná výroba často uvádzaná ako príčina zavádzania Smart Grid môže ovplyvniť a dokonca obmedziť benefity plynúce zo zavádzania niektorých Smart systémov, ako sú inteligentné úsekové odpínače. Ďalej bol v práci analyzovaný vplyv porúch v distribučnej sieti na koncept chránenia samotnej distribuovanej výroby. Bolo preukázané, že aj porucha v jednom z vývodov distribučnej siete môže spôsobiť výpadok výroby v iných vývodoch danej siete.

Zvýšený počet sebestačných Smart Regiónov môže ovplyvniť nielen prevádzku dotknutých distribučných sústav s vysokou penetráciou distribuovanej výroby, ale aj prevádzku nadradenej prenosovej sústavy. Nárast distribuovanej výroby pri zvýšenej účinnosti spotreby má a bude mať za dôsledok pokles dopytu po veľkých zdrojoch. Veľké zdroje nezabezpečujú len výrobu silovej elektriny, ale čo je dôležité, poskytujú podporné služby a nie všetky podporné služby sa dajú zabezpečiť prostredníctvom Smart Grid. Veľmi dobrým príkladom takej podpornej služby je regulácia napätia a jalového výkonu. Dodávka jalového výkonu sa nedá zabezpečiť z distribučných sietí a odľahčenie prenosovej sústavy spôsobí prebytok kapacitného nabíjacieho výkonu vedení. Pri menšom počte veľkých zdrojov to znamená podbudenú prevádzku generátorov a vyššiu potrebu kompenzačných tlmiviek. Veľké zdroje taktiež tvoria „tvrdosť“ prenosovej sústavy. Bolo preukázané, že príspevok týchto zdrojov k skratovému výkonu je výrazne vyšší ako príspevok Smart Regiónov. V práci bolo preukázané, že pokles skratového výkonu ovplyvní statickú stabilitu veľkých generátorov a môže tak spôsobiť posun dovolenej hranice podbudenia, čo môže mať ešte významnejší dopad na potrebu inštalácie nových kompenzačných tlmiviek.

V práci je taktiež vypracovaná analýza vplyvu Smart Grid na napäťovú stabilitu sústavy. Analýzou nebola preukázaná zmena kritického výkonu analyzovanej sústavy. Rozšírenie distribuovanej výroby v modelovanej sústave však spôsobilo nárast kritického napätia nad spodnú hranicu povolenú

hodnoty, čo by v reálnej prevádzke malo veľmi negatívny vplyv na možnosti identifikácie hroziaceho napät'ového kolapsu.

Zavádzanie technológie Smart Grid môže okrem prenosovej sústavy, distribučnej sústavy a veľkých výrobcov ovplyvniť aj spotrebiteľov. V závislosti na konkrétnom riešení regulácie spotreby ovplyvní Smart Grid nie len ekonomiku, ale aj komfort odberateľov.

Veľmi dôležitá z pohľadu spotrebiteľa je aj kvalita elektrickej energie. Tá má dopad na správny chod a životnosť zariadení spotrebiteľa. Preto som vypracoval niekoľko meraní kvality napätia v ostrovných systémoch. Meraním som overil správanie sa ostrovných systémov počas prevádzky bežných spotrebičov a pri skrate. Zaujímavým z tohto pohľadu je meranie ostrovného systému počas paralelnej prevádzky benzínovej elektrocentrály a striedača. Napriek tomu, že obidva zdroje samostatne nemajú problém s dodržaním kvality napätia spolu generovali veľmi deformovaný priebeh napätia, ktorý sa prejavil aj na chode niektorých zapojených spotrebičov.

Zoznam použitej literatúry

- [1] BIRKNER, P., et al. Integrated Smart Grid Concept - Experience in a German Distribution Grid; In 22nd International Conference on Electricity Distribution CIRED, ISBN: 978-1-84919-732-8, Stockholm 2013
- [2] BORLASE, S. Smart Grids: Infrastructure, Technology and Solutions; CRC Press, 2013. 607 s. ISBN 978-1-4398-2905-9
- [3] CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, First Set of Standards. November 2012
- [4] EL-SAADAWI, M., M., KADDAH, S., S., OSMAN, M., G., ABDEL-WAHAB, M., N. Impact of wind farms on contingent power system voltage stability; In 12th International Middle-East Power System Conference, ISBN: 978-1-4244-1934-0, MEPCON 2008.
- [5] FELTES, J., W., GEMMELL, B., D., RETZMANN, D. From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources; In Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. San Diego 24-29.7.2011. s. 1-6. ISSN 1944-9925
- [6] GELLINGS, C. Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid: A Preliminary Estimate of the Investments Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid; EPRI, 2011
- [7] HORÁK, M. Systémy chránenia a automatizácie distribučných elektrických sietí 22 kV; PRO, s.r.o. 2011. 124 s. ISBN 978-80-89057-37-5
- [8] LI, D., HU, B. Advanced Metering Standard Infrastructure For Smart Grid; In China International Conference on Electricity Distribution; Shanghai 2012, pp. 1-4 ISSN 2161-7481
- [9] MACHEK, M. Vývoj pilotního projektu Smart Region, navrhovaná Evropská legislativa v oblasti Smart Grids In Konference CK CIRED 2011. Tábor 8. a 9.11.2011. s. 1-8 ISBN 978-80-905014-0-9
- [10] MUSIRIN, I., RAHMAN, T., K., A. On-line voltage stability based contingency ranking using fast voltage stability index (FVSI); In IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition, ISBN 0-7803-7525-4, 2002
- [11] NEUSEL-LANGE, N., et al. Sichere Betriebsführung von Niederspannungsnetzen durch dezentrale Netzautomatisierung; In Tagungsband ETG Konferenz 2011, Würzburg, November 2011
- [12] NEUSEL-LANGE, N., OERTER, C., ZDRALLEK, M. State Identification and Automatic Control of Smart Low Voltage Grids; In 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), ISBN: 978-1-4673-2597-4, Berlin 2012
- [13] OERTER, C., et al. Experience with First Smart, Autonomous LV-Grid in Germany; In 22nd International Conference on Electricity Distribution CIRED, ISBN: 978-1-84919-732-8, Stockholm 2013
- [14] SIOSHANSI, F., P. et al. Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed & Efficient Energy; Academic Press, 2011. 510 s. ISBN 978-0-12-386452-4
- [15] UHLIG, R., et al. Integrating of E-Mobility into Distribution Grids via Innovative Charging Strategies; In CIRED Workshop 2014, Rome 2014
- [16] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Smart Grid Investments Improve Grid Reliability, Resilience, and Storm Response; 2014. 25 s.
- [17] VRANA, T., K., TORRES-OLGUIN, R., E., HAILESELASSIE, T., M. The North Sea Super Grid - a technical perspective; In AC and DC Power Transmission, 2010. ACDC. 9th IET International Conference on. London 19.-21.10.2010.s. 174-178. ISBN 978-1-61782-379-4
- [18] Vyhláška Ministerstva hospodárstva Slovenskej republiky c. 358/2013 ktorou sa ustanovuje postup a podmienky v oblasti zavádzania a prevádzky inteligentných meracích systémov v elektroenergetike
- [19] WATTS, D. Smart Grid Initiatives: Advanced Distribution System Project In Customer Conference 2011

Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce

Príspevky publikované v zahraničných časopisoch

- [1] JANÍČEK, František - VOLČKO, Vladimír - ELESCHOVÁ, Žaneta - VIGLAŠ, Dominik - HERETÍK, Pavol - LENDÁK, Fedor. Reference architecture model of a smart grid. In *Energetika*. Roč. 64, č. 4 (2014), s. 198-201. ISSN 0375-8842
- [2] JANIGA, Peter - LIŠKA, Martin - BELÁŇ, Anton - VOLČKO, Vladimír - IVANIČ, Marián. Power Quality Measurement of Small Solar off-Grid System. In *WSEAS Transactions on Environment and Development* (2015), s. 49-56. ISSN 2224-3496. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-84935014062
- [3] VOLČKO, Vladimír - ELESCHOVÁ, Žaneta - LIŠKA, Martin - SMITKOVÁ, Miroslava. Loss of Distributed Generation in Case of Fault in Distributing Net. In *Universal Journal of Engineering Science*. Vol. 1, No. 4 (2013), s.133-138. ISSN 2331-6624
- [4] VOLČKO, Vladimír - LIŠKA, Martin - ELESCHOVÁ, Žaneta - JANIGA, Peter. Smart grid systém pre siete nízkeho napätia - "iNES". In *Energetika*. Vol. 65, č. 8-9 (2015), s. 435-8. ISSN 0375-8842.

Príspevky publikované na zahraničných konferenciách

- [1] JANIGA, P., LIŠKA, M., BELÁN, A., VOLCKO, V., IVANIC, M. Power quality measurement in low power solar off-grid system with load control simulator. In *Advances in Environmental and Agricultural Science. Dubai, February 22-24, 2015*. [S.l.] : WSEAS Press, 2015, S. 322-326. ISBN 978-1-61804-270-5
- [2] JANIGA, Peter - LIŠKA, Martin - BELÁŇ, Anton - VOLČKO, Vladimír - IVANIČ, Marián. Home appliances simulator for smart home systems testing. In *Advances in Environmental and Agricultural Science. Dubai, February 22-24, 2015*. [S.l.] : WSEAS Press, 2015, S. 322-326. ISBN 978-1-61804-270-5
- [3] JANIGA, Peter - LIŠKA, Martin - VOLČKO, Vladimír - PILÁT, Branislav. Testing system for smart meters. In *Electric power engineering. Kouty nad Desnou, Czech Republic. May 20-22, 2015*. Ostrava : VSB - Technical University of Ostrava, 2015, S. 519-522. ISBN 978-1-4673-6787-5.
- [4] LIŠKA, Martin - IVANIČ, Marián - VOLČKO, Vladimír - JANIGA, Peter. Research on smart home energy management system. In *Electric power engineering 2015; Kouty nad Desnou, Czech Republic. May 20-22, 2015*, S. 459-463. ISBN 978-1-4673-6787-5

Príspevky publikované na domácich konferenciách

- [1] GREJTÁK, František - VOLČKO, Vladimír - ELESCHOVÁ, Žaneta. Návrh a realizácia ostrovných fotovoltických systémov. In *ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2015. Trenčín, Slovakia. 13. – 15. október 2015*. Bratislava : Nakladateľstvo STU v Bratislave, 2015, CD-ROM, S. 87-91. ISBN 978-80-227-4437-9.
- [2] JANIGA, Peter - LIŠKA, Martin - VOLČKO, Vladimír. Measuring system for smart meter testing. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 2014 : Proceedings of the 12th International Scientific Conference EEE 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, USB kľúč, [4] s. ISBN 978-80-89402-69-4
- [3] KONÍČEK, Michal - BELÁŇ, Anton - HERETÍK, Pavol - VOLČKO, Vladimír. Connection of distributed resources to the distribution system and their impact on the power system. In *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014; Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1.vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 95-99. ISBN 978-80-89402-73-1
- [4] KOVÁČ, Matúš - ELESCHOVÁ, Žaneta - HERETÍK, Pavol - VOLČKO, Vladimír. Voltage stability analysis using PU curves, SVD method and modal analysis. In *Power Engineering*

2014. *Control of Power Systems 2014; Tatranské Matliare, Slovakia; 20-22 May 2014.* Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 95-100. ISBN 978-80-89402-71-7

- [5] LIŠKA, Martin - JANÍČEK, František - CHRAPČIAK, Igor - JANIGA, Peter - VOLČKO, Vladimír. Activities of excellence laboratory of smart grids. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*. Roč. 20, mimoriadne číslo (2014), CD-ROM, s. 194-198. ISSN 1335-2547.
- [6] LIŠKA, Martin - VOLČKO, Vladimír - JANIGA, Peter - CINTULA, Boris - JANÍČEK, František. Excellence laboratory of smart grids. In *Power Engineering 2014. Energy - Ecology - Economy 201; Tatranské Matliare, Slovakia; May 20-22, 2014*. 1. vyd. ISBN 978-80-89402-69-4
- [7] VOLČKO, Vladimír - BELÁŇ, Anton - HERETÍK, Pavol - KOVÁČ, Matúš - KONÍČEK, Michal. Smart metering - the meaning of popular words. In *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014; Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1.vyd. s. 135-139. ISBN 978-80-89402-73-1
- [8] VOLČKO, Vladimír - GREJTÁK, František - JANIGA, Peter - ELESCHOVÁ, Žaneta. Power quality in low voltage off-grid system. In *ELITECH'15 [elektronický zdroj] : 17th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovak Republic, May 25, 2015*. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2015, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4358-7.
- [9] VOLČKO, Vladimír - GREJTÁK, František - JANIGA, Peter - ELESCHOVÁ, Žaneta - KOVÁČ, Matúš. The measurement of power quality in off-grid system of a passive house. In *Elektroenergetika 2015 [elektronický zdroj] : 8th International scientific symposium on electrical power engineering. Stará Lesná, Slovakia. September 16-18, 2015*. Košice : Technical University of Košice, 2015, CD-ROM, S. 512-515. ISBN 978-80-553-2187-5.

Príspevky publikované v domácich časopisoch

- [1] JANÍČEK, František - VOLČKO, Vladimír - CERMAN, Anton - CINTULA, Boris. Súčasný stav zavádzania Smart Grid vo svete a postavenie SR v tejto problematike. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*. Roč. 19, č. 1 (2013), s.17-18. ISSN 1335-2547.
- [2] JANÍČEK, František - BELÁŇ, Anton - VOLČKO, Vladimír - CINTULA, Boris. Vybrané odporúčania a požiadavky na zavádzanie inteligentných meracích systémov a vybrané pilotné projekty v niektorých členských štátoch Európskej únie. In *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*. Roč. 19, č. 1 (2013), s.13-16. ISSN 1335-2547.