

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

Ing. Martin Liška

Autoreferát dizertačnej práce

**Pripojiteľnosť obnoviteľných zdrojov elektrickej energie do
elektrizačnej sústavy**

na získanie akademického titulu doktor (**philosophiae doctor, PhD.**)
v doktorandskom študijnom programe: **5.2.30 Elektroenergetika**

Miesto a dátum: **Bratislava, 2013**

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Oddelení elektroenergetiky ÚEAE FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Martin Liška**
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

Konzultant: **Assoc. Prof. Alberto Borghetti**
Università di Bologna, Via Zamboni, 33 - 40126 Bologna, Italy,
Department of Electrical Engineering
Viale Risorgimento , 2 – 40136 Bologna
Taliansko

Oponenti: **Prof. Ing. Altus Juraj, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Elektrotechnická fakulta
Univerzitná 1
010 26 Žilina
Slovenská republika

Prof. Ing. Pavel Santarius, CSc.
VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
17. listopadu 15, NK 429
708 33 Ostrava – Poruba
Česká republika

Autoreferát bol rozoslaný: 22.4.2013

Obhajoba dizertačnej práce sa koná 15.5.2013 o 10:30 hod. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce vo vednom odbore 5.2.30 Elektroenergetika, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

.....

**Dekan FEI
Prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.**

Tézy dizertačnej práce	1
1. Úvod	1
2. Súčasný stav problematiky	1
2.1 Systémový vplyv NOZE na elektrizačnú sústavu - vplyv NOZE na podporné služby	2
2.2 Lokálny vplyv NOZE na elektrizačnú sústavu - technické podmienky pripojenia zdrojov do distribučnej sústavy	2
2.2.1 Dovolená zmena napätia v ustálenom stave	3
2.2.2 Dovolená zmena napätia pri spínaní zdroja	3
2.2.3 Dovolené hodnoty harmonických prúdov	4
3. Metódy riešenia a výsledky dizertačnej práce	4
3.1 Simulácia synergického efektu	4
3.2 Analýza kritéria pre výpočet zmeny napätia v ustálenom stave	5
3.2.1 Návrh korekčného činiteľa	6
3.2.2 Analýza nepresností korekčného činiteľa	7
3.2.3 Vplyv umiestnenia bilančného uzla v modeli na výpočet ustáleného stavu	8
3.3 Analýza kritéria pre výpočet zmeny napätia pri spínaní	9
3.4 Návrh metodiky hodnotenia vplyvu zdroja na DS vzhľadom na dovolené zmeny napätia	11
3.5 Analýza kritéria pre výpočet dovolených hodnôt harmonických prúdov	12
3.5.1 Pripojenie fotovoltaickej elektrárne do sústavy bez harmonicky skresleného napätia	13
3.5.2 Pripojenie fotovoltaickej elektrárne do sústavy s harmonicky skresleným napätím	14
3.6 Návrh metodiky stanovenia hraničného výkonu OZE pripojiteľného do ES	14
Záver	17
Prínosy pre prax	17
Stručný zoznam použitej literatúry	19
Zoznam vybraných publikácií autora	20

Tézy dizertačnej práce

- 1) Definovanie a analýza globálnych a lokálnych vplyvov nepredikovateľných obnoviteľných zdrojov energie na prevádzku elektrizačnej sústavy.
- 2) Analýza súčasných ukazovateľov pre posúdenie pripojiteľnosti nepredikovateľných obnoviteľných zdrojov energie do distribučnej a prenosovej sústavy.
- 3) Vytvorenie matematických modelov pre verifikáciu ukazovateľov pre posúdenie pripojiteľnosti nepredikovateľných obnoviteľných zdrojov energie do distribučnej a prenosovej sústavy.
- 4) Návrh metodiky pre posudzovanie vplyvov nepredikovateľných obnoviteľných zdrojov energie na prevádzku distribučnej a prenosovej sústavy.
- 5) Návrh a verifikácia nových ukazovateľov pre posúdenie pripojiteľnosti nepredikovateľných obnoviteľných zdrojov energie do distribučnej a prenosovej sústavy.

1. Úvod

Nárast inštalovaného výkonu v obnoviteľných zdrojov energie (OZE) v uplynulých rokoch poukázal na nedostatočnú energetickú infraštruktúru a skutočnosť, že dopady OZE na elektrizačnú sústavu neboli vopred dostatočne analyzované. Preto, aj na základe údajov z reálnej prevádzky, boli opatrenia na obmedzenie negatívnych vplyvov OZE prijaté až následne. Jedná sa predovšetkým o opatrenia vzhľadom na systémové vplyvy veterných a fotovoltických elektrární a lokálne vplyvy distribuovanej výroby v distribučnej sústave. V súvislosti s výstavbou fotovoltických elektrární prevádzkovateľ prenosovej sústavy na Slovensku prijal opatrenia na zvýšenie potrebného objemu podporných služieb zohľadňujúce výrobu vo fotovoltických a vetrených elektrárnach. Výpočet potrebného objemu podporných služieb sa zakladá na historických a štatistických údajoch z prevádzky týchto zdrojov. Tento výpočet však nezohľadňuje synergický efekt medzi spotrebou a výrobou, ako jeden z pozitívnych efektov nepredvídateľného kolísania výroby a spotreby. V prípade pripojenia zdroja do distribučnej sústavy, je každý zdroj posudzovaný vzhľadom na jeho dovolené lokálne vplyvy. Pripojenie zdroja podlieha technickým podmienkam pripojenia, ktoré stanovuje prevádzkovateľ distribučnej sústavy. Súčasťou týchto podmienok sú kritéria, resp. ukazovatele pripojiteľnosti zdroja, ktoré sa posudzujú v rámci štúdie pripojiteľnosti. Týmito kritériami je dovolená zmena napätia v ustálenom stave a pri spínaní v mieste pripojenia zdroja, flicker a harmonické skreslenie. Podľa technických podmienok je možné pomocou jednoduchých vzťahov tieto dovolené hodnoty vopred vypočítať. Vzhľadom na možnú rozsiahlosť a zložitosť distribučných sústav sa uprednostňuje komplexné posúdenie vplyvu zdrojov s využitím matematických modelov a počítačových simulácií. Výsledky štúdie pripojiteľnosti rozhodujú o možnosti pripojenia zdroja a preto je dôležité, akým spôsobom sa k vytvoreniu simulačného modelu pristupuje. V dizertačnej práci sú analyzované vybrané kritéria pripojiteľnosti a na základe výsledkov analýz navrhnuté odporúčania pre vykonávanie štúdií pripojiteľnosti. Súčasťou práce je aj návrh metodiky hodnotenia pripojiteľnosti zdroja vzhľadom na dovolenú zmenu napätia a metodiky stanovenia hraničného výkonu OZE pripojiteľného do elektrizačnej sústavy.

2. Súčasný stav problematiky

Pripojenie zdroja do prenosovej a distribučnej sústavy je možné len po splnení technických a obchodných podmienok pripojenia. Štúdia pripojiteľnosti zdroja do sústavy má za cieľ určiť možné negatívne spätné vplyvy zdroja. Pri posudzovaní nepredikovateľných OZE (NOZE)

a ich vplyvu na podporné služby (PpS) sa berie do úvahy celkový inštalovaný výkon v týchto zdrojoch a ich závislosť na aktuálnom počasí. Pri analýze lokálnych vplyvov zdroja na distribučnú sústavu sa posudzuje zdroj samostatne vzhľadom na technické podmienky pripojenia a na požiadavky paralelnej spolupráce zdrojov s distribučnou sústavou. Tieto požiadavky stanovuje prevádzkovateľ distribučnej sústavy.

2.1 Systémový vplyv NOZE na elektrizačnú sústavu - vplyv NOZE na podporné služby

Analýza vplyvu NOZE na potrebný objem podporných služieb bola už v minulosti prepracovaná na podmienky SR a súčasne technické podmienky zahŕňajú vo výpočte aj zložky zohľadňujúce vplyv týchto zdrojov na podporné služby. V sekundárnej regulácii je to zložka SRV_{OZE} , ktorá sa určí:

$$SRV_{OZE} = k_{OBD} * k_{VP} * P_{inštOZE} \quad (1)$$

k_{OBD} - koeficient obdobia zohľadňujúci ročné obdobie pri predpokladanej výrobe OZE, získava sa z historických údajov (5 rokov),

k_{VP} - koeficient vplyvu žiarenia na výkon OZE, udáva sa ako poznatok zo štatistických záznamov z minulých rokov,

$P_{inštOZE}$ - inštalovaný výkon v obnoviteľných zdrojoch.

V terciárnej regulácii je potrebné mať k dispozícii objem PpS s rýchlou aktiváciou na vykrývanie rýchlych zmien výroby. Úlohou desaťminútovej terciárnej regulácie výkonu TRV10+ a TRV10-, je reagovať na náhle zmeny vo výrobe OZE, najmä vo výrobe fotovoltických elektrární:

$$TRV10min_{\pm} = 0,5 * TRV_{OZE} \quad (2)$$

$$TRV_{OZE} = P_{INST} * k_{np} * k_{súdob} \quad (3)$$

P_{INST} - inštalovaný výkon na obnoviteľných zdrojoch,

k_{np} - koeficient nepresnosti predpovede, ktorý sa vypočítava zo štatistických záznamov pre jednotlivé mesiace,

$k_{súdob}$ - koeficient zohľadňujúci rozmiestnenie zdrojov OZE. Čím menej koncentrované do jednej oblasti, tým je koeficient nižší.

Takýto pohľad na podporné služby nezohľadňuje skutočnosť, že okrem nepredvídateľných zmien vo výrobe v OZE voči predikcii existuje aj nepredvídateľná zmena zaťaženia voči predikcii. V celkovej výkonovej bilancii nastávajú okamihy, kedy odchýlka vo výrobe a odchýlka v spotrebe sa navzájom negujú. Takýto synergický efekt je pozitívny jav a jeho veľkosť môže pozitívne ovplyvniť výpočte PpS. Nakoľko sa jedná o náhodný jav, možno ho kvantifikovať na základe historických údajov.

2.2 Lokálny vplyv NOZE na elektrizačnú sústavu - technické podmienky pripojenia zdrojov do distribučnej sústavy

Prevádzkovatelia distribučných sústav (PDS) definujú technické podmienky pripojenia zdroja a stanovujú kritéria, resp. dovoľené hodnoty spätných vplyvov zdrojov na distribučnú sústavu (DS). V rámci Slovenska a Českej republiky sú požiadavky na paralelnú spoluprácu zdrojov medzi PDS zhodné a sú to predovšetkým tieto kritériá:

- dovoľená zmena napätia v ustálenom stave,
- dovoľená zmena napätia pri spínaní zdroja,

- flicker,
- harmonické prúdy,
- vplyv zdroja na HDO.

V práci sú analyzované 3 kritéria, a to dovoľená zmena napätia v ustálenom stave a pri spínaní a kritérium dovoľených harmonických prúdov.

2.2.1 Dovolená zmena napätia v ustálenom stave

Zvýšenie napätia Δu vyvolané prevádzkou pripojených výrobní nesmie v mieste pripojenia zdroja prekročiť 2% pre pripojenie výrobne s prípojným miestom v sieti VN a 110 kV v porovnaní s napätím bez ich pripojenia. Maximálny výkon zdroja, ktorý je možné vzhľadom na túto podmienku pripojiť, sa vypočíta podľa vzťahu

$$S_{Amax} \leq \frac{2\% \cdot S_{kv}}{|\cos(\Psi_{kv} - \varphi)|} = \frac{S_{kv}}{50 \cdot |\cos(\Psi_{kv} - \varphi)|} \quad (4)$$

φ - fázový uhol medzi prúdom a napätím výrobne pri maximálnom zdanlivom výkone S_{Amax} ,

Ψ_{kv} - uhol skratovej impedancie v mieste pripojenia zdroja,

S_{kv} -skratový výkon v prípojnom bode.

Pre relatívnu zmenu napätia platí

$$\Delta u = \frac{S_{Amax} \cdot \cos(\Psi_{kv} - \varphi)}{S_{kv}} \quad (5)$$

V prepojených sieťach, v sieťach 110 kV a/alebo pri prevádzke viacerých rozptýlených výrobní v sieti je potrebné určovať zvýšenie napätia pomocou komplexného chodu siete. Prítom musí byť dodržaná podmienka pre Δu v najnepriaznivejšom prípojnom bode.

Na výpočet ustáleného stavu v zložitejších sústavách sa používajú rôzne matematické metódy, najčastejšie iteračné metódy. Pri každej metóde sa vyžaduje definovať bilančný uzol. Bilančný uzol (BU) je matematický pojem a v teoretickom výpočte reprezentuje ideálny napäťový zdroj. V realnej sústave ho možno interpretovať ako miesto sústavy s veľkým skratovým výkonom a konštantným napätím. Vzťah pre určenie zmeny (resp. zvýšenia) napätia v mieste pripojenia zdroja neobsahuje informáciu o bilančnom uzle. To znamená, že zmena napätia vypočítaná podľa vzťahu (4) a zmena napätia toho istého zdroja daná výpočtom ustáleného stavu sa rovnajú iba za určitých podmienok. Tieto podmienky sú dané výberom umiestnenia BU v modeli. V praxi sa často pri modelovaní 22 kV vývodu nahrádza 110 kV sústava tvrdou sieťou s príslušným skratovým výkonom. Zjednodušovanie modelu a umiestnenie BU v modeli ovplyvňuje výpočet ustáleného stavu a tým aj rozhodnutie o pripojení alebo zamietnutí pripojenia zdroja do DS.

2.2.2 Dovolená zmena napätia pri spínaní zdroja

Zmeny napätia v spoločnom napájacom bode, spôsobené pripojovaním a odpojovaním jednotlivých generátorov alebo zariadení, nevyvolávajú neprípustné spätné vplyvy, pokiaľ najväčšia zmena napätia pre výrobne s odovzdávacím miestom v sieti NN a VN neprekročí 3%. Tak ako aj pri ustálenom stave, aj v tomto prípade možno zmenu napätia vypočítať podľa vzťahu:

$$\Delta u_{max} = k_{imax} \frac{S_{NE} \cdot \cos(\Psi_{kv} - \varphi)}{S_{kv}} \quad (6)$$

Pre maximálny výkon zdroja vzhľadom na dovoľenú zmenu napätia platí

$$S_{Amax} \leq \frac{S_{kv}}{33 * |\cos(\Psi_{kv} - \varphi)| * k_{imax}} \quad (7)$$

k_{imax} - najväčší spínací ráz. Udáva pomer najväčšieho prúdu, ktorý sa vyskytuje v priebehu spínacieho pochodu (napr. zapínací ráz I_a) k menovitému prúdu generátora alebo zariadenia I_G .

Pre spínanie u veterných elektrárníach sa uvádza v protokole o skúškach koeficient spínacieho prúdu k_{ψ} , ktorý sa udáva pre rôzne uhly impedancie siete ψ . Jeho hodnota pri odpojení sa rovná 1 pre každú technológiu výroby. Pri pripojení zdroja hodnota koeficientu k_{imax} závisí od použitej technológie výroby.

2.2.3 Dovoľené hodnoty harmonických prúdov

Pre iba jediné odovzdávacie miesto v sieti VN možno určiť celkové, v tomto bode prípustné harmonické prúdy v spoločnom napájacom bode podľa vzťahu

$$I_{vp\phi} = i_{vp\phi} * S_{kv} \quad (8)$$

$I_{vp\phi}$ – prípustný harmonický prúd
 $i_{vp\phi}$ – prípustný vzťažný prúd harmonických, udáva tabuľka v TP PDS (A/MVA)
 S_{kv} - skratový výkon v mieste pripojenia (MVA)

Každá harmonická je definovaná svojou veľkosťou, frekvenciou a fázou. Kritérium pre harmonické prúdy definuje len maximálne dovoľené efektívne hodnoty harmonických prúdov. Nezohľadňuje ich fázový posun. Veľkosť fázového posunu môže mať vplyv na harmonické skreslenie napätia v mieste pripojenia zdroja. Aj efektívne hodnoty harmonických prúdov vyhovujúce požiadavkám dovoľenej veľkosti v skutočnosti vplyvom ich fázového posunu môžu vyvolať neprípustné skreslenie napätia v mieste pripojenia zdroja.

3. Metódy riešenia a výsledky dizertačnej práce

V práci sú analyzované jednotlivé kritéria samostatne. Na základe reálnych údajov z prevádzky rôznych OZE a reálnych údajoch o časti distribučnej sústavy, boli vytvorené simulačné a matematické modely pre analýzu jednotlivých kritérií. Na základe týchto výsledkov boli prijaté návrhy a odporúčania pre prax.

3.1 Simulácia synergického efektu

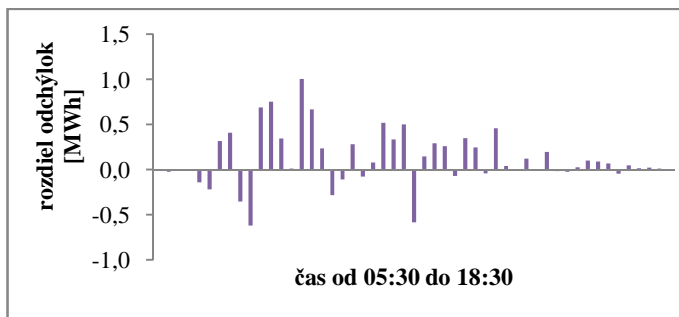
Výroba vo veternej elektrárni (VtE) alebo fotovoltaickej elektrárni (FvE) spôsobuje pomerne veľké odchýlky medzi plánovanými a skutočnými hodnotami. Pretože odchýlka vzniká aj na strane spotreby, vznikajú tak prípady, kedy sa tieto odchýlky navzájom eliminujú. Výsledkom je synergický efekt, pri ktorom je v celkovej bilancii menšia odchýlka. Pri simulácii synergického efektu medzi výrobou a spotrebou bol vyhodnotený dopad prevádzky FvE na odchýlku prevádzkovateľa distribučnej sústavy. Pri simulácii synergického efektu sa vychádzalo z reálnych údajov a výroby vo FvE a reálnych údajoch o dohodnutých a skutočných výkonoch bilančnej skupiny. Odchýlka PDS spolu s prevádzkou FvE v rámci bilančnej skupiny je definovaná:

$$\text{odchýlka} = (P_{skut} + P_{skutFvE}) - [P_{zodb} - (P_{zdod} + P_{zdodFvE} + P_{reg})] \quad (9)$$

P_{skut} - skutočná dodávka bez FtE,
 $P_{skutFvE}$ - skutočná dodávka s FvE,
 P_{zodb} - zmluvný odber,

$P_{z\text{dod}}$	-zmluvná dodávka bez FvE,
$P_{z\text{dodFvE}}$	-zmluvná dodávka s FvE,
P_{reg}	-regulačná elektrina.

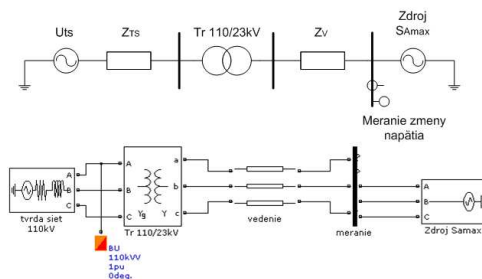
Pri výrobe vo FvE nastáva situácia, kedy prostredníctvom synergického efektu medzi záťažou a výrobou dochádza v niektorých 15 minútových intervaloch k zníženiu odchýlky. Tento efekt nastáva vtedy, ak skutočný odber je väčší ako zmluvný a zároveň výroba elektriny z FvE je vyššia ako zmluvné hodnoty výroby. To spôsobí, že v celkovej bilancii sú zmluvné hodnoty v danej štvrthodine dodržané s vyššou presnosťou. Nasledujúci obrázok (obr. 1) zobrazuje rozdiel absolútnych odchýlok s prevádzkou FvE v rámci bilančnej skupiny a bez nej (odchýlka s prevádzkou FvE - odchýlka bez FvE). Záporné hodnoty na obrázku predstavujú stav, kedy v danej štvrthodine došlo k zníženiu celkovej odchýlky bilančnej skupiny vplyvom synergického efektu.



Obr. 1 Rozdiel odchýlok – synergický efekt

3.2 Analýza kritéria pre výpočet zmeny napätia v ustálenom stave

Zmena napätia v ustálenom stave bola simulovaná na zjednodušenom modeli 22kV vývodu, ktorý pozostáva z transformátora VVN/VN, vzdušného symetrického vedenia a samotného zdroja pripojeného na konci vedenia. Sústava 110 kV bola nahradená tvrdou sieťou (TS) s definovaným skratovým výkonom a ako bilančný uzol bola zvolená VVN strana transformátora (obr.2).



Obr. 2 Zjednodušená schéma modelu

Na modeli bolo simulovaných niekoľko ustálených stavov pre meniace sa parametre prvkov v modeli a výkonu zdroja. Pre rôzne kombinácie impedancie TS a dĺžky vedenia bol vypočítaný

maximálny výkon zdroja S_{Amax} podľa vzťahu (4). Teoreticky, podľa vzťahu (5), by mala byť zmena napätia v mieste pripojenia zdroja rovná hodnote 2%. Z výsledkov výpočtu ustáleného stavu vyplýva, že zmena napätia nebola vždy rovná 2%. Najväčšia odchýlka od hodnoty danej vzťahom (5) bola v prípadoch, kedy bol zdroj pripojený v blízkosti transformátora VVN/VN a skratový výkon TS bol najmenší (191 MVA). Z výsledkov výpočtu ustálených stavov taktiež vyplýva, že zdroj spôsobil zmenu napätia rovnú 2% iba v tých prípadoch, kedy sa pre výpočet skratového výkonu v mieste pripojenia neuvažovalo s impedanciou TS. Pri umiestnení BU na VVN stranu transformátora tá časť skratovej impedancie, ktorá sa nachádza pred miestom BU, nevyplýva na zmenu napätia určenú výpočtom ustáleného stavu. V tomto prípade je to celá skratová impedancia TS. Aby sa zmena napätia vypočítaná podľa vzťahu (5) rovnala zmene napätia určenej výpočtom ustáleného stavu, je potrebné zaviesť „korekčný činiteľ“ zohľadňujúci vplyv BU.

3.2.1 Návrh korekčného činiteľa

Veľkosť zmeny skratového výkonu v mieste pripojenia môže byť vyjadrená ako:

$$\frac{S_{kvbezTS}}{S_{kvsTS}} = \frac{\frac{U_n^2}{|\bar{Z}_{kbezTS}|}}{\frac{U_n^2}{|\bar{Z}_{ksTS}|}} = \frac{\frac{U_n^2}{|\bar{Z}_{kbezTS}|}}{\frac{U_n^2}{|\bar{Z}_{kbezTS} + \bar{Z}_{TS}|}} = \frac{U_n^2 * (|\bar{Z}_{kbezTS} + \bar{Z}_{TS}|)}{U_n^2 * |\bar{Z}_{kbezTS}|} = \frac{|\bar{Z}_k|}{|\bar{Z}_k - \bar{Z}_{TS}|} \quad (10)$$

- $S_{kvbezTS}$ - skratový výkon v mieste pripojenia bez uvažovania impedancie TS (bez impedancie pred bilančným uzlom),
- S_{kvsTS} - celkový skratový výkon v mieste pripojenia s uvažovaním impedancie TS (s impedanciou pred bilančným uzlom), $S_{kvsTS} = S_{kv}$,
- Z_{kbezTS} - skratová impedancia v mieste pripojenia bez uvažovania impedancie TS,
- Z_{ksTS} - celá skratová impedancia v mieste pripojenia s uvažovaním impedancie TS (s impedanciou pred bilančným uzlom), $Z_{ksTS} = Z_k$,
- Z_{TS} - skratová impedancia TS prepočítaná cez prevod transformátora (impedancia pred bilančným uzlom).

$$\frac{S_{kvbezTS}}{S_{kv}} = \frac{|\bar{Z}_k|}{|\bar{Z}_k - \bar{Z}_{TS}|} \quad (11)$$

Za predpokladu, že $\psi_{zksTS} \approx \psi_{zkbezTS}$ (12)

- $\psi_{zkbezTS}$ - uhol skratovej impedancie v mieste pripojenia bez uvažovania impedancie TS (bez impedancie pred bilančným uzlom),
- ψ_{zksTS} - uhol celej skratovej impedancie (impedancia pred aj za bilančným uzlom),
- $\psi_{zksTS} = \psi_{kv}$.

potom možno vyjadriť

$$\frac{|\bar{Z}_{ksTS}|}{|\bar{Z}_{ksTS} - \bar{Z}_{TS}|} = \frac{1}{1 - \frac{|\bar{Z}_{TS}|}{|\bar{Z}_{ksTS}|}} = \frac{1}{1 - \frac{S_{kvsTS}}{S_{kTS}}} \quad (13)$$

- S_{kTS} - skratový výkon TS (skratový výkon v mieste BU určený len impedanciou pred bilančným uzlom),
- ψ_{zksTS} - uhol celej skratovej impedancie (impedancia pred aj za bilančným uzlom),
- $\psi_{zksTS} = \psi_{kv}$.

Vzťah pre výpočet maximálneho výkonu zdroja S_{Amax} bude zohľadňovať vplyv umiestnenia bilančného uzla pridaním „korekčného činiteľa“

$$S_{Amax} = \frac{S_{kv}}{|50 \cdot \cos(\psi_{kv} - \varphi)|} * \frac{1}{1 - \frac{S_{kvsTS}}{S_{kTS}}} = \frac{S_{kv}}{|50 \cdot \cos(\psi_{kv} - \varphi)|} * \frac{1}{1 - \frac{S_{kv}}{S_{kTS}}} \quad (14)$$

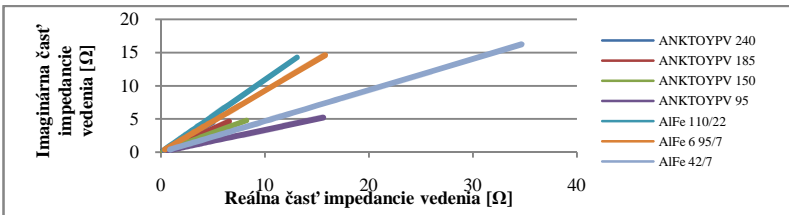
Ak sú podmienky výpočtu ustáleného stavu zvolené tak, že v modeli 22 kV vývodu je BU umiestnený na VVN strane transformátora, potom zdroj pripojený do vývodu v blízkosti transformátora môže mať väčší výkon ako udáva súčasné kritérium. Pre zdroje s miestom pripojenia ďalej od transformátora má korekčný činiteľ menšiu hodnotu. Vyplýva to z samotného výrazu pre korekčný činiteľ. Čím je pomer S_{kv}/S_{kTS} väčší, tým väčší môže byť výkon zdroja pripojený vzhľadom na dovolenú zmenu napätia.

3.2.2 Analýza nepresností korekčného činiteľa

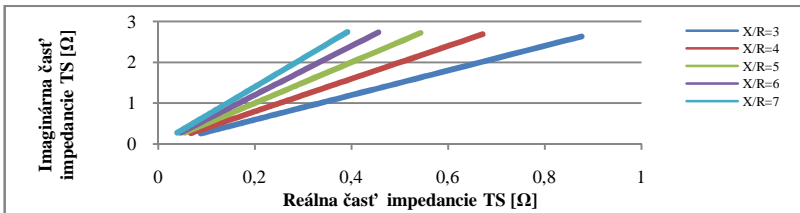
Boli vykonané výpočty ustáleného stavu s použitím korekčného činiteľa a v niektorých prípadoch bola zmena napätia po pripojení zdroja väčšia ako 2%. Táto nepresnosť vzniká vtedy, ak neplatí predpoklad podľa (12). Ak sa uhly podľa (12) nerovnajú, potom je potrebné upraviť korekčný činiteľ, ktorý sa po úprave rovná

$$S_{Amax} = \frac{S_k}{50 \cdot \cos(\psi_{kv} - \varphi)} * \frac{1}{1 - \frac{S_k}{S_{kTS}}} * \frac{|\bar{Z}_{kv}| - |\bar{Z}_{TS}|}{|\bar{Z}_{kbezTS}|} * \frac{\cos(\psi_{kv} - \varphi)}{\cos(\psi_{zkbezTS} - \varphi)} \quad (15)$$

Nepresnosť korekčného činiteľa sa mení v závislosti od parametrov prvkov v modeli a miesta pripojenia zdroja. Bola vykonaná analýza s cieľom kvantifikovať tieto nepresnosti, ktoré sa môžu vyskytovať vzhľadom na bežné hodnoty komplexných impedancií tvrdej siete a používané typy vzdušných a káblových 22 kV vedení. Pre tento účel bol vytvorený matematický model založený na impedančných maticiach. Tieto matice reprezentujú zmenu komplexnej impedancie tvrdej siete (vo vyjadrení skratových prúdov $I''_{kTS}=1$ kA až 10 kA, pomer $X/R=3$ až 7) a zmenu komplexnej impedancie vedení a transformátora. Pre vytvorenie impedančnej matice vedení boli vybrané typické 22kV vzdušné vedenia a káble. Na obrázkoch (obr. 3 a obr. 4) sú zobrazené hodnoty impedancie TS a vedenia v komplexnej rovine, z ktorých boli zostavené impedančné matice. Dĺžka vedení sa menila od 1km do 40km.



Obr. 3 Zmena impedancie vedení

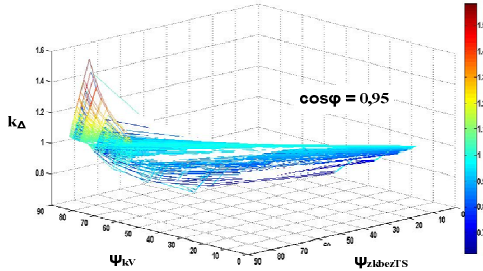


Obr. 4 Zmena impedancie tvrdej siete

Pre potreby analýzy bol vytvorený program, ktorý na základe kombinácií prvkov oboch matic vypočíta nepresnosti korekčného činiteľa $\Delta\varphi$ a Δz , ktoré vyplývajú zo vzťahu (14). Výsledný koeficient nepresnosti k_{Δ} , ktorý vyjadruje nepresnosť korekčného činiteľa, je vyjadrený ako

$$k_{\Delta} = \Delta_z * \Delta_{\psi} = \frac{|\bar{Z}_{kV}| - |\bar{Z}_{TS}|}{|\bar{Z}_{kbezTS}|} * \frac{\cos[\arctg(\text{Im}\{\bar{Z}_{kV}\})/\text{Real}\{\bar{Z}_{kV}\}) - \varphi]}{\cos[\arctg(\text{Im}\{\bar{Z}_{kbezTS}\})/\text{Real}\{\bar{Z}_{kbezTS}\}) - \varphi]} \quad (16)$$

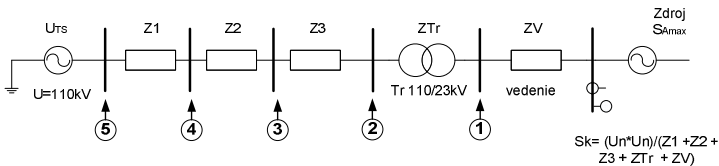
Na nasledujúcom obrázku (obr.5) je zobrazený priebeh nepresnosti k_{Δ} pre vyššie definované impedančné matice ($\cos\varphi=0,95$). Priebeh celkovej nepresnosti k_{Δ} je zobrazený ako závislosť uhlov ψ_{kV} a ψ_{zbezTS} .



Obr. 5 Priebeh koeficienta nepresnosti

3.2.3 Vplyv umiestnenia bilančného uzla v modeli na výpočet ustáleného stavu

Z iného pohľadu korekčný činiteľ dokazuje vplyv umiestnenia BU v modeli na výsledky výpočtu ustáleného stavu. Súvislosť medzi korekčným činiteľom a voľbou polohy bilančného uzla pri výpočte ustáleného stavu vyplýva z analýzy vplyvu umiestnenia BU pri výpočte ustáleného stavu na zmenu napätia v mieste pripojenia zdroja v 22 kV vývode. (obr.6).



Obr. 6 Zjednodušená schéma 22kV vývodu – zmena umiestnenia BU

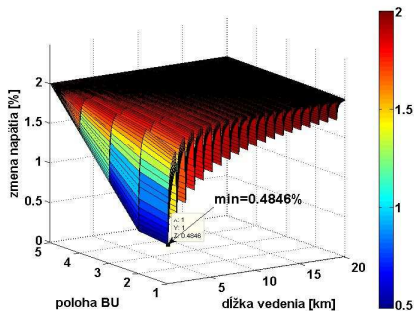
Pri výpočtoch ustáleného stavu sa menila pozícia BU v modeli. BU bol umiestnený najskôr na VN stranu transformátora a potom do 110 kV časti siete, kde sa jeho pozícia menila. Umiestnenie BU v modeli zobrazujú čísla 1 až 5. Cieľom analýzy je pomocou vytvoreného programu kvantitatívne odhadnúť vplyv umiestnenia BU pri daných skratových výkonoch 110 kV tvrdej siete a vybraných typoch 22 kV vedení.

Vstupnými údajmi programu sú:

- skratová impedancia TS (obr. 4) a z nej vypočítaný skratový prúd TS
- impedancia transformátora 110 kV/22 kV, $S_N=50\text{MVA}$,

- impedancia vzdušných a káblových vedení (obr.3), dĺžka vzdušných vedení sa menila od 1 km až 20 km, dĺžka káblových vedení od 1 km až 10 km.

Program na základe týchto meniacich sa parametrov sústavy vypočíta pre každú kombináciu skratového výkonu TS a impedancie vedenia skratový výkon v mieste pripojenia zdroja, t.j. na konci vedenia. Podľa vzťahu (4) vypočíta pre každú z týchto kombinácií maximálny výkon zdroja S_{Amax} (s neutrálnym účinníkom $\cos\phi = 1$) tak, aby zmena napätia v ustálenom stave po pripojení bola rovná 2%. Následne pre každý takto vypočítaný výkon zdroja program vypočíta ustálený stav pri rôznych umiesteniach BU (pozícia 1 až 5, obr.6) Výstupom programu je závislosť zmeny napätia v mieste pripojenia zdroja od pozície BU. Nasledujúci obrázok (obr.7) zobrazuje závislosť zmeny napätia v mieste pripojenia od veľkosti skratového prúdu TS, dĺžky vedenia AlFe6 95/7 a umiestnenia BU.

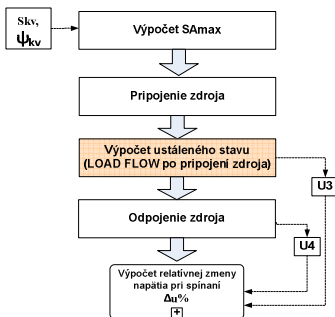


Obr. 7 Závislosť relatívnej zmeny napätia od umiestnenia BU, zmeny skratového prúdu TS a dĺžky vedenia

Z tejto závislosti vyplýva, že zmena napätia v mieste pripojenia zdroja je pri vzdialenejších miestach, t.j. pri pripojení zdroja bližšie ku koncu 22 kV vývodu, menej ovplyvňovaná zmenou umiestnenia BU v 110 kV sústave. Z minimálnych hodnôt napätí odčítaných zo simulácií pri ostatných typoch vzdušných vedení a káblov možno kvantifikovane odhadnúť mieru vplyvu umiestnenia BU na výsledok ustáleného stavu. Výpočet ustáleného stavu, resp. zmena napätia sa pohybovala od 2% do 0,13% pri neutrálnom účinníku dodávaného výkonu. Program umožňuje zadať aj iné skratové výkony TS, iné typy a dĺžky vedení, iné typy transformátorov a zmeniť účinník dodávaného výkonu. Výsledky simulácie pre ostatné typy vzdušných a káblových vedení sú uvedené v dizertačnej práci, príloha C. Vplyv umiestnenia BU pri výpočte ustáleného stavu bol simulovaný aj na zložitejšom modeli 22 kV sústavy. Výsledky a schéma modelu sú opísané v dizertačnej práci, kapitola 4.1.9, príloha D.

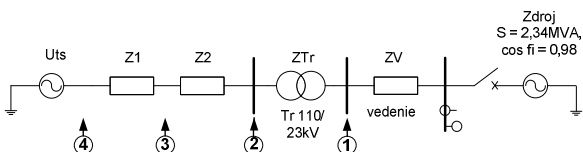
3.3 Analýza kritéria pre výpočet zmeny napätia pri spínaní

V práci je analyzované kritérium pre spínanie zdroja pre prípady, kedy sa spínací ráz $k_{imax} = 1$. Na obrázku (obr.8) je zobrazená metodika pre simuláciu zmeny napätia pri odpojení zdroja. Sústava sa pred odopnutím zdroja nachádza v ustálenom stave (predpokladá sa odopnutie zdroja z ustáleného stavu). Po odopnutí zdroja nedochádza k opätovnému výpočtu ustáleného stavu. Napätie v mieste odpojenia zdroja je odčítané zo časového priebehu napätia v mieste odpojenia/pripojenia zdroja.



Obr. 8 Metodika analýzy zmeny napätia pri spínaní

Zmena napätia pri odopnutí zdroja bola simulovaná na zjednodušenom modeli 22 kV vývodu (obr.9).



Obr. 9 Zjednodušený model 22kV vývodu

Podľa zvolenej metodiky sa sústava pred odpojením zdroja nachádzala v ustálenom stave, ktorý bol jednoznačne určený bilančným uzlom a výpočtom ustáleného stavu. Pozícia BU sa pre odopnutím zdroja menila (obr. 9, čísla 1 až 4). Podľa vzťahu (7) bol vypočítaný výkon zdroja tak, aby vyvolal 2% zmenu napätia pri spínaní. Z výsledkov zmeny napätia vyplýva, že bilančný uzol pri výpočte ustáleného stavu pred odpojením zdroja nemá žiadny vplyv na zmenu napätia pri jeho odopnutí. Zmena napätia z výsledkov simulácie pri odopnutí zdroja bola vo všetkých prípadoch rovná vypočítanej hodnote 2%. (tab.1)

Tab. 1: Zmena napätia pri spínaní zdroja

Zmena napätia pri odopnutí zdroja	poloha BU	U3 [V]	U4 [V]	Δu [%]
	1	13 530	13 263	2,01
	2	13 537	13 270	2,01
	3	13 543	13 275	2,02
	4	13 549	13 282	2,01

Každý zdroj, ktorý sa posudzuje z hľadiska dovolených zmien napätia, musí vyhovovať súčasne obojm kritériám, tzn. výkon zdroja musí byť taký, aby nespôsobil zmenu napätia väčšiu ako 2% v ustálenom stave a 3% pri spínaní. Z matematického vyjadrenia zmeny napätia v ustálenom stave a pri spínaní podľa vzťahov (5) a (6) vyplýva, že ak spínací ráz $k_{imax}=1$ (odopnutie zdroja, pripojenie FvE, pripojenie synchronného stroja), potom výkon zdroja S_{Amax} vypočítaný vzhľadom na podmienku napätia pri spínaní prekročí dovolenú zmenu napätia v ustálenom stave (3% > 2%). Pri simuláciách zmeny napätia pri spínaní a zmeny napätia v ustálenom stave (určenej výpočtom ustáleného) toho istého zdroja, môže nastať za určitých

okolností prípad, kedy toto neplatí a zdroj v ustálenom stave limit 2% neprekročí. Závisí to od polohy BU pri výpočte ustáleného stavu. Nasledujúca tabuľka (tab.2) zobrazuje podmienky umiestnenia bilančného uzla v modeli, pri ktorých sú súčasne splnené alebo nespĺnené kritéria zmeny napätia podľa technických podmienok PDS.

Tab. 2: Podmienky polohy bilančného uzla pre splnenie kritérií

Výkon zdroja S_{Amax} vzhľadom na	Splnenie kritéria pre zmenu napätia		Podmienka umiestnenia bilančného uzla
	v ustálenom stave	pri odopnutí zdroja	
2% podľa vzťahu (4)	splnené	splnené	obe kritéria splnené, pri akomkoľvek umiestnení BU
3% podľa vzťahu (7)	splnené	splnené	$\frac{\cos(\psi_1 - \varphi)}{S_{kv1}} < \frac{2}{100 * S_{Amax}}$ $\frac{\cos(\psi - \varphi)}{S_{kv}} < \frac{3}{100 * S_{Amax}}$
	nesplnené	splnené	$\frac{\cos(\psi_1 - \varphi)}{S_{kv1}} > \frac{2}{100 * S_{Amax}}$ $\frac{\cos(\psi - \varphi)}{S_{kv}} < \frac{3}{100 * S_{Amax}}$

S_{kv} - celý skratový výkon v mieste pripojenia zdroja,

S_{kv1} - skratový výkon medzi bilančným uzlom a miestom zdroja,

S_{Amax} - maximálny výkon zdroja,

ψ - uhol celej skratovej impedancie,

ψ_1 - uhol skratovej impedancie medzi bilančným uzlom a miestom zdroja,

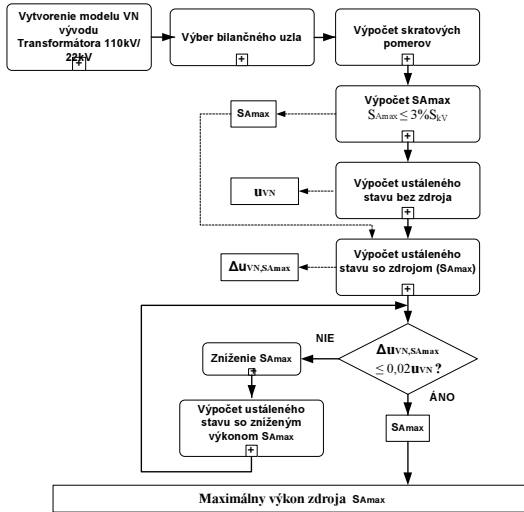
φ - účinník výkonu zdroja.

Ak je výkon zdroja určený vzhľadom na dovoľenú zmenu napätia v ustálenom stave, budú obe kritériá zmeny napätia vždy splnené, bez ohľadu na miesto bilančného uzla v modeli. Ak je výkon zdroja určený vzhľadom na dovoľenú zmenu napätia pri spínaní, potom kritérium pre zmenu napätia pri spínaní je splnené vždy, ale to, či takýto zdroj neprekročí dovoľenú zmenu napätia v ustálenom stave, závisí od miesta bilančného uzla. Pri simulácii paralelnej spolupráce zdroja so sieťou, musia byť splnené obe napäťové kritéria súčasne. Na základe výsledkov simulácií zmeny napätia v ustálenom stave a pri spínaní bola navrhnutá metodika hodnotenia vplyvu zdroja na DS vzhľadom na dovoľené zmeny napätia.

3.4 Návrh metodiky hodnotenia vplyvu zdroja na DS vzhľadom na dovoľené zmeny napätia

Podmienky paralelnej spolupráce zdrojov so sústavou a kritéria pripojiteľnosti zdroja do DS sú pre každého výrobcu záväzná. Každý zdroj musí splniť obe podmienky zmeny napätia pri ustálenom stave aj pri spínaní. Vzhľadom na podmienky splnenia kritérií (tab. 2) bola

navrhnutá metodika hodnotenia vplyvu zdroja na DS. Táto metodika spočíva vo výpočte maximálneho inštalovaného výkonu zdroja pripájaného v 22 kV sústave. Vychádza zo súčasných kritérií podľa technických podmienok PDS a výsledkov analýz. Táto metodika výpočtu zohľadňuje súčasne podmienky zvýšenia napätia v normálnej prevádzke a pri spínaní tak, ako sú definované v technických podmienkach prevádzkovateľov DS, pričom zohľadňuje aj vplyv umiestnenia BU pri výpočte ustáleného stavu. Podľa tejto metodiky je potrebné určiť najskôr veľkosť výkonu zdroja podľa kritéria pre spínanie a následne overiť veľkosť zmeny napätia, ktorú tento zdroj spôsobí v ustálenom stave. Ak v ustálenom stave zdroj nevyhovuje podmienke zvýšenia napätia, potom je potrebné výkon zdroja znižovať až kým je podmienka splnená. Nasledujúci obrázok (obr. 10) zobrazuje algoritmus navrhovanej metodiky.



Obr. 10 Metodika výpočtu maximálneho výkonu zdroja S_{Amax}

3.5 Analýza kritéria pre výpočet dovolených hodnôt harmonických prúdov

Vplyv zdroja na 22 kV sústavu je v rámci štúdie pripojiteľnosti posudzovaný aj z hľadiska dovolených emitovaných harmonických prúdov. Prevádzkovatelia DS vo svojich technických podmienkach uvádzajú pre napäťovú hladinu 22 kV hraničné hodnoty harmonických prúdov, ktoré musí zdroj splniť. Na základe vzťažných prúdov harmonických a skratového výkonu v mieste pripojenia zdroja, je možné pomocou vzťahu (8) vopred určiť, či zdroj spĺňa alebo nespĺňa toto kritérium. Výpočet sa týka len veľkostí jednotlivých harmonických, ale neuvažuje ich fázový posun. Preto bola realizovaná analýza, v ktorej sa sleduje vplyv fázového posunu harmonických prúdov striedača na harmonické skreslenie napätia v mieste pripojenia zdroja. Na zjednodušenom modeli časti DS s pripojenou FvE bol analyzovaný vplyv fázového posunu harmonických prúdov generovaných striedačom vo FvE na harmonické skreslenie napätia v mieste pripojenia FvE. Model 22 kV časti distribučnej sústavy tvorí zjednodušený 22 kV vývod. Do vývodu bola namodelovaná fotovoltaická elektrárň s výkonom 1 MW pripojená cez transformátor 23 kV/0,4 kV do vzdušného vedenia. Model striedača je reprezentovaný riadenými prúdovými zdrojmi, ktoré sú zapojené samostatne do každej fázy. V modeli striedača je možné nastaviť pre každú harmonickú prúdu jej veľkosť a fázu.

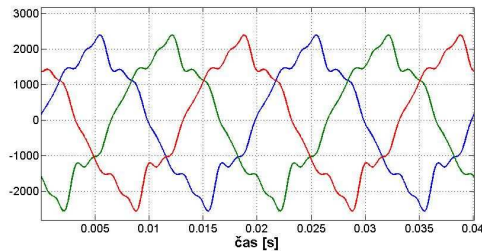
Simulácie boli zamerané na analýzu harmonického skreslenia napätia v mieste pripojenia zdroja v dvoch prípadoch:

- pripojenie fotovoltaickej elektrárne do sústavy bez harmonicky skresleného napätia,
- pripojenie fotovoltaickej elektrárne do sústavy s harmonicky skresleným napätím.

V oboch prípadoch sa fázové posuny harmonických prúdov striedača φ_A , φ_B , φ_C , menili v hodnotách 0° , 40° , 70° .

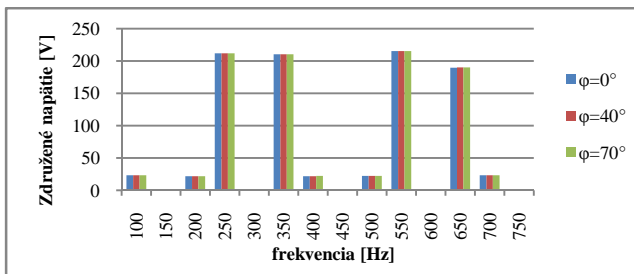
3.5.1 Pripojenie fotovoltaickej elektrárne do sústavy bez harmonicky skresleného napätia

Pred pripojením fotovoltaickej elektrárne bolo napätie v mieste pripojenia sínusového priebehu bez harmonického skreslenia. Na základe skratového výkonu v mieste pripojenia boli podľa vzťahu (8) vypočítané maximálne dovolené efektívne hodnoty harmonických prúdov striedača. Obrázok (obr.11) zobrazuje priebeh výstupného prúdu striedača s fázovým posunom harmonických prúdov $\varphi=70^\circ$.



Obr. 11 Prúd striedača ($\varphi=0^\circ$)

THD je vyjadrené ako závislosť veľkosti efektívnych hodnôt jednotlivých harmonických bez uvažovania ich fázového posunu. S fázovým posunom harmonických prúdov generovaných striedačom sa mení tvar vlny prúdu a tvar napätia, ale nemení sa hodnota THD. Z výsledkov simulácií vyplýva, že fázový posun harmonických prúdov striedača nemá žiadny vplyv na harmonické skreslenie napätia v mieste pripojenia zdroja. So zmenou fázového posunu harmonických prúdov striedača, sa harmonické skreslenie napätia v mieste pripojenie zdroja nemení. Na nasledujúcom obrázku (obr.12) sú zobrazené efektívne hodnoty harmonických združených napätí v mieste pripojenia FvE (VN strana transformátora) pre všetky fázové posuny harmonických prúdov striedača.

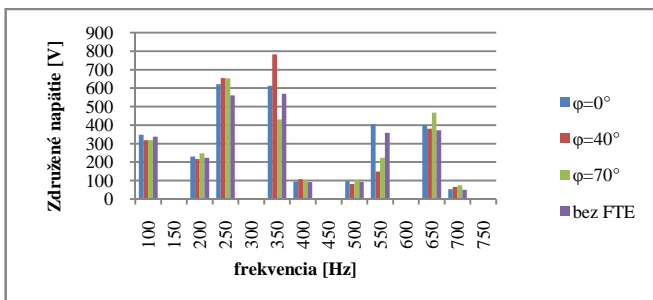


Obr. 12 Efektívne hodnoty harmonických napätí

3.5.2 Pripojenie fotovoltaickej elektrárne do sústavy s harmonicky skresleným napätím

V tomto prípade bolo napätie v mieste pripojenia pred pripojením fotovoltaickej elektrárne harmonicky skreslené, tzn. zdroj sa pripája do sústavy s jestvujúcim harmonickým skreslením napätia.

Boli vykonané simulácie s rovnakými efektívnymi hodnotami harmonických prúdov striedača a rovnakými fázovými posuvmi ako v predchádzajúcom prípade. Na nasledujúcom obrázku (obr.13) sú zobrazené efektívne hodnoty harmonických združených napätí v mieste pripojenia FvE (VN strana transformátora) pre všetky fázové posuny a efektívne hodnoty harmonických napätí pred pripojením FvE.



Obr. 13 Efektívne hodnoty harmonických napätí

Zo simulácií vplyvu fázového posunu harmonických prúdov emitovaných FvE vyplýva, že ak je napätie v mieste pripojenia pred pripojením FvE harmonicky deformované, fázový posun harmonických prúdov generovaných striedačom vplyva na celkové THD napätia v mieste pripojenia. Pri skreslených napätiach v DS je súčasné kritérium nepostačujúce, pretože harmonické skreslenie napätia nezávisí len od veľkosti harmonických prúdov zo striedača, ale aj od ich fázového posunu.

3.6 Návrh metodiky stanovenia hraničného výkonu OZE pripojiteľného do ES

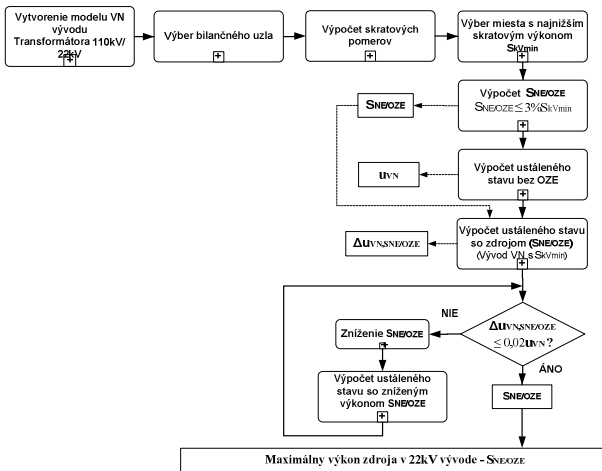
Dôvodom rýchleho nárastu inštalovaného výkonu vo fotovoltaických elektrárnach a neskôr pozastavenie vydávania povolení a zmena legislatívy sú dôsledky nepripravenosti elektroenergetickej infraštruktúry a nedostatočná skúsenosť s prevádzkou NOZE v elektrizačnej sústave. Prudký rozvoj výstavby FvE poukázal aj na tú skutočnosť, že na úrovni distribúcie v súvislosti s lokálnymi vplyvmi v DS, je možné pripojiť veľké množstvo menších zdrojov. Tieto zdroje splnili podmienky pripojenia do DS a preto mohli byť pripojené. Ich pripojenie do sústavy však vyvolalo negatívne systémové vplyvy. Preto PPS stanovil hranicu inštalovaného výkonu vo veterných a fotovoltaických elektrárnach a pozastavil vydávanie kladných stanovísk pre osvedčenie. V spolupráci s pracovníkmi Ústavu elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky STU bola vypracovaná analýza hraničného výkonu OZE pripojiteľného do DS. Táto analýza potvrdila skutočnosť, že z hľadiska lokálnych vplyvov na úrovni distribúcie a z hľadiska požiadaviek prevádzkovateľov DS na pripojenie zdroja, je možné pripojiť väčšie množstvo menších zdrojov, ako môže systém ako celok zvládnuť. Preto stanovenie hraničného výkonu OZE pripojiteľného do elektrizačnej sústavy musí byť posudzované komplexne. Navrhnutá metodika stanovenia hraničného výkonu

OZE pripojiteľného do elektrizačnej sústavy zohľadňuje stanovenie výkonu vzhľadom na systémové a lokálne vplyvy súčasne. Pre systémové vplyvy sa jedná o vplyv na reguláciu sústavy, koncovú cenu elektriny a pod. Výpočet hraničného výkonu OZE pripojiteľného do distribučnej sústavy s ohľadom na lokálne vplyvy tvoria tri stupne.

- výpočet maximálneho výkonu zdroja vzhľadom na vývod transformátora VN,
- výpočet maximálneho pripojiteľného výkonu zdrojov vzhľadom na voľnú pripojiteľnú kapacitu v 22 kV sústave stanovenú s ohľadom na výkon transformátorov VVN/VN,
- výpočet maximálneho pripojiteľného výkonu zdrojov vzhľadom na voľnú pripojiteľnú kapacitu v 110 kV sústave stanovenú s ohľadom na výkon transformátorov ZVN/VVN.

Výpočet maximálneho výkonu zdroja vzhľadom na vývod transformátora VN

Výpočet zahŕňa posúdenie zdroja vzhľadom na dovoľenú zmenu napätia v ustálenom stave a pri spínaní. Výpočet vzhľadom na harmonické prúdy nie je možné do výpočtu zahrnúť z toho dôvodu, že rôzne striedače produkujú rôzne prúdy harmonických. Nasledujúci obrázok (obr. 14) zobrazuje algoritmus výpočtu maximálneho výkonu zdroja vzhľadom na vývod transformátora.



Obr. 14 Metodika výpočtu hraničného výkonu na vývode 22kV

Suma takto stanovených výkonov na všetkých 22 kV vývodoch predstavuje vypočítaný hraničný výkon vzhľadom na VN vývody – $P_{max22kV/vývod}$.

Výpočet maximálneho pripojiteľného výkonu zdrojov vzhľadom na voľnú pripojiteľnú kapacitu v 22 kV sústave stanovenú s ohľadom na výkon transformátorov VVN/VN

Pri stanovení maximálneho pripojiteľného výkonu zdrojov s ohľadom na výkon transformátorov 110 kV/22 kV danej oblasti sa vychádza zo vzťahu:

$$P_{max/22kV} = (\sum P_{i_{n-1}} * k_{TR} + P_{spotreby}) * k_E \quad (17)$$

$P_{i_{n-1}}$ - je súčet inštalovaných výkonov transformátorov 110 kV/22 kV v posudzovanej oblasti s vylúčením transformátora s najvyšším výkonom (kritérium N-1),

k_{TR} - koeficient zohľadňujúci optimálne zaťaženie transformátora,

P_{spotreby} - celková minimálna spotreba posudzovanej oblasti,
 k_E - redukčný koeficient zohľadňujúci drobnú rozptýlenú výrobu. Tento koeficient umožňuje vytvorenie určitej výkonovej rezervy pre zdroje s nízkym inštalovaným výkonom (do 0,1 MW).

Voľná prenosová kapacita v 22 kV, resp. v 110 kV sústave je určená vzťahom:

$$P_{VK/22kV} = P_{\text{max}/22kV} - P_{\text{aktívne}} \quad (18)$$

$P_{\text{aktívne}}$ - súčet možných dodávaných výkonov zdrojov so zohľadnením koeficientu využitia výroby, ktoré sú už pripojené v danej oblasti, alebo majú súhlas prevádzkovateľa DS na pripojenie.

Výpočet maximálneho pripojiteľného výkonu zdrojov vzhľadom na voľnú pripojiteľnú kapacitu v 110 kV sústave stanovenú s ohľadom na výkon transformátorov ZVN/VVN

Pri stanovení maximálneho pripojiteľného výkonu zdrojov s ohľadom na výkon transformátorov 400 kV/110 kV (resp. 220 kV/110 kV) danej 110 kV oblasti sa vychádza zo vzťahu:

$$P_{\text{max}/110kV} = (\sum P_{i_{n-1}} * k_{TR} + P_{\text{spotreby}}) * k_E \quad (19)$$

$P_{i_{n-1}}$ - je súčet inštalovaných výkonov transformátorov 400 kV/110 kV, resp. 220 kV/110 kV v posudzovanej oblasti s vylúčením transformátora s najvyšším výkonom (kritérium N-1).

Voľná prenosová kapacita v sústave 110 kV je určená vzťahom:

$$P_{VK/110kV} = P_{\text{max}/110kV} - P_{\text{aktívne}} \quad (20)$$

Výsledky výpočtu hraničného výkonu ukázali, že najväčší objem inštalovaného výkonu je možné pripojiť z hľadiska lokálnych vplyvov na úrovni jednotlivých vývodov 22 kV siete. Postupnou analýzou smerom k prenosovej sústave vzhľadom na voľné kapacity distribučných transformátorov tento výkon klesá. Celkový objem inštalovaného výkonu pripojiteľného do elektrizačnej sústavy je limitovaný hlavne systémovými vplyvmi. Hranica inštalovaného výkonu OZE v elektrizačnej sústave je správne určená vtedy, ak sa v prvom rade posudzuje schopnosť sústavy z hľadiska systémových vplyvov. Hraničný výkon je daný minimálnou hodnotou:

$$P_{\text{HRAN}} = \min \left\{ \sum P_{vk/110kV}, \sum P_{vk/22kV}, \sum P_{\text{max}22kV/\text{vývod}}, P_{\text{max,sys}} \right\} \quad (21)$$

$\sum P_{vk/110kV}$ - suma všetkých voľných prenosových kapacít v 110kV sústave,

$\sum P_{vk/22kV}$ - suma všetkých voľných prenosových kapacít v 22kV sústave,

$\sum P_{\text{max}22kV/\text{vývod}}$ - suma maximálnych možných výkonov na všetkých 22kV vývodoch, s ohľadom na lokálne vplyvy zdrojov (podmienky paralelnej spolupráce zdrojov s distribučnou sústavou),

$P_{\text{max,sys}}$ - hraničný výkon zdrojov stanovený vzhľadom na systémové vplyvy (podporné služby, stav infraštruktúry, ekonomické dopady).

Dizertačná práca sa nezaobrá stanovením hraničného výkonu OZE vzhľadom na systémové dopady.

Záver

S nárastom inštalovaného výkonu vo fotovoltaických a veterných elektrárnach narastá aj veľkosť potrebnej regulačnej rezervy. Objem podporných služieb TRV10min± a zložka SRV_{OZE} môžu byť pozitívne ovplyvňované synergickým efektom, ktorý vzniká vďaka nepresnosti predikcie výroby v NOZE a nepresnosti predikcie zaťaženia. Pretože sa jedná o náhodný jav, kvantifikovať mieru pozitívneho vplyvu na regulačnú rezervu je možné len na základe historických údajov. Na nižšej úrovni, na hladine 22 kV a 0,4 kV sa prejavujú predovšetkým lokálne vplyvy zdrojov na kvalitu elektrickej energie. Preto prevádzkovatelia DS definujú vzťahy určujúce maximálne výkony zdrojov vzhľadom na dovolené hodnoty a výpočet spätných vplyvov. V dizertačnej práci boli analyzované niektoré vybrané kritéria paralelnej spolupráce zdrojov s DS. Podmienka zmeny napätia v ustálenom stave a vzťah určujúci zmenu napätia v ustálenom stave nezohľadňuje vplyv umiestnenia bilančného uzla pri výpočte ustáleného stavu. Pri modelovaní 22 kV vývodov sa v praxi často pristupuje k zjednodušovaniu modelu s využitím modelu 110 kV sústavy tvrdou sieťou. Vzhľadom na kritérium dovolenej zmeny napätia v ustálenom stave a vplyv bilančného uzla pri výpočte ustálených stavov je potrebné pri modelovaní 22 kV sústavy umiestniť BU na rozhranie prenosovej a distribučnej sústavy. Výsledky výpočtu ustáleného stavu výrazne ovplyvňujú pozícia bilančného uzla. Analýza kritéria zmeny napätia pri spínaní preukázala, že pri náhlom odopnutí zdroja z ustáleného stavu, bilančný uzol neovplyvňuje zmenu napätia pri spínaní. Vzhľadom na zložitosť modelov pre simuláciu dynamických dejov je súčasné kritérium postačujúce. Pretože každý zdroj musí spĺňať obe kritéria zmeny napätia súčasne a vzhľadom na to, že bilančný uzol ovplyvňuje výsledky ustáleného stavu, zatiaľ čo zmena napätia pri spínaní nezávisí od jeho pozície v modeli, bola navrhnutá metodika zahrňajúca vplyv bilančného uzla, podľa ktorej vypočítaný výkon zdroja nevyvolá neprípustné zmeny napätia v ustálenom stave a ani pri spínaní. Kritérium pre dovolené harmonické prúdy definuje len dovolené efektívne hodnoty jednotlivých harmonických prúdov. Analýza kritéria preukázala, že pri pripojení fotovoltaickej elektrárne do sústavy s skresleným harmonickým napätím, súčasné kritérium nie je postačujúce. So zmenou fázového posunu harmonických prúdov zo striedača sa mení aj harmonické skreslenie napätia v mieste pripojenia.

Prínosy pre prax

Hlavným prínosom pre prax sú odporúčania a navrhnuté metodiky pre posúdenie paralelnej spolupráce zdrojov s distribučnou sústavou, metodika hodnotenia vplyvu zdroja na DS vzhľadom na splnenie dovolených zmien napätia pri spínaní a pri ustálenom stave a návrh metodiky pre stanovenie hraničného výkonu OZE pripojiteľných do elektrizačnej sústavy.

- V distribučnej sústave môže vzniknúť z dôvodu nepresnosti v predikcii výroby v NOZE a nepresnosti v predikcii zaťaženia synergický efekt, ktorý pozitívne ovplyvňuje systémový odchýlku. Pretože sa jedná o náhodný jav, kvantifikovať mieru vplyvu na veľkosť podporných služieb možno na základe historických údajov.
- Pri výpočte ustáleného stavu, ktorého cieľom je zistiť zvýšenie napätia v mieste pripojenia zdroja, sú výsledky závislé od pozície bilančného uzla v modeli. V prípade pripojenia zdroja do 22 kV vývodu, ak je BU umiestnený v blízkosti transformátora 110 kV/22 kV, je posudzovanie zdroja z pohľadu dovolenej zmeny napätia optimistické, t.j. z posúdenia vyplynie, že zdroj môže mať vyšší inštalovaný výkon ako v prípade, ak by bol BU umiestnený čo najďalej od miesta pripojenia zdroja. Vzhľadom na vplyv bilančného uzla pri výpočte ustálených stavov a matematického vyjadrenia kritéria dovolenej zmeny napätia v ustálenom stave, pri modelovaní 22 kV sústavy sa odporúča umiestniť BU na rozhranie prenosovej a distribučnej sústavy. V práci je kvantifikovaný

vplyv umiestnenia bilančného uzla na zmenu napätia v ustálenom stave v 22 kV vývoде po pripojení zdroja..

- Analýza zmeny napätia pri spínaní zdroja preukázala, že umiestnenie bilančného uzla neovplyvňuje na zmenu napätia pri spínaní, a vo všetkých prípadoch sa rovnala vypočítanej hodnote podľa vzťahu (6). Vzhľadom na zložitosť modelov pre dynamické simulácie je použitie tohto kritéria postačujúce.
- Analýza kritéria harmonických prúdov preukázala vplyv fázového posunu harmonických prúdov na harmonické skreslenie napätia v prípadoch, kedy je napätie v mieste pripojenia deformované ešte pred pripojením zdroja. Súčasné kritérium definuje len dovolené efektívne hodnoty harmonických prúdov z FvE vzhľadom k skratovému výkonu sústavy v mieste pripojenia. V súčasnosti sú napätia sietí vysokého a nízkeho napätia čoraz viac deformované a preto toto kritérium bez uvažovania vplyvu fázového posunu nie je postačujúce. V krajných prípadoch môže posudzovaný zdroj vzhľadom na veľkosť harmonických prúdov spĺňať požiadavky pripojenia, ale ich fázový posun môže spôsobiť prekročenie prípustného skreslenia napätia v mieste pripojenia podľa STN EN 50 160.
- Zdroj pri posudzovaní pripojiteľnosti do DS musí svojím výkonom súčasne spĺňať obe kritériá zmeny napätia v ustálenom stave a pri spínaní. Na základe výsledkov analýzy zmeny napätia v ustálenom stave a pri spínaní zdroja bola navrhnutá metodika posúdenia vplyvu zdroja na distribučnú sústavu vzhľadom na dovolené zmeny napätia. Použitie tejto metodiky v praxi zaručuje splnenie oboch kritérií súčasne a zahŕňa vplyv umiestnenia bilančného uzla pri výpočtoch ustáleného stavu.
- Odolnosť distribučných sústav voči lokálnym vplyvom zdrojov OZE a voľná pripojiteľná kapacita v 110 kV a 22 kV sieťach umožňujú pripojiť väčší výkon zdrojov, ako môže ES ako systém absorbovať. Toto tvrdenie potvrdila aj analýza hraničného výkonu NOZE pripojiteľného do DS. Za súčasných podmienok je ďalšia výstavba NOZE na Slovensku veľmi nepravdepodobná. Nie je ale vylúčené, že záujem o výstavbu OZE sa presunie do iných technológií. Aby sa v budúcnosti predišlo chybnému a nekontrolovateľnému procesu udeľovania povolení na výstavbu OZE, musí byť vždy vopred stanovený taký hraničný výkon, ktorý je schopný sústava prijať. Navrhnutá metodika spočíva v komplexnom posúdení a stanovení hraničného výkonu OZE, tak z hľadiska lokálnych vplyvov a voľných kapacít v distribúcii, tak aj z hľadiska systémových vplyvov spoločne.

Stručný zoznam použitej literatúry

- [1] ACHA, E., MADRIGAL, M.: Power system harmonics, computer modeling and analysis. John Wiley & Sons, Ltd, New York, 2001, ISBN 0-471-52175-2
- [2] THUNBERG, E.: A harmonic Norton model of a real distribution network. In: IEEE 8th International Conference On Harmonics and quality o power proceedings, Vol. 1., 1992, p.303-309
- [3] Zákon NR SR č. 309/2009 o podpore obnoviteľných zdrojov energie a vysokoúčinnej kombinovanej výroby.
- [4] Zákon NR SR č. 251/2012 Z. z. Zákon o energetike a o zmene a doplnení niektorých zákonov
- [5] Technické podmienky prevádzkovateľov distribučných sústav, spoločnosť Západoslovenská distribučná, a.s. 2009, spoločnosť Stredoslovenská energetik-Distribúcia, a.s., spoločnosť Východoslovenská distribučná, a.s. 2009.
- [6] PNE 33 3430-0 – Výpočtové hodnotenie spätných vplyvov odberateľov a zdrojov distribučných sústav. Vnútro podniková norma spoločnosti Západoslovenská distribučná.s.
- [7] PNE 33 3430-2 – Parametre kvality elektrickej energie – kolísanie napätia. Vnútro podniková norma spoločnosti Západoslovenská distribučná, a.s.
- [8] STN EN 50 160 : 2002, Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávané z verejnej distribučnej siete
- [9] FRANTIŠEK, J. a kol.: Obnoviteľné zdroje energie 1. Bratislava 2009, Renesans, s.r.o., ISBN 978-80-89402- 04-5
- [10] FRANTIŠEK, J. a kol.: Obnoviteľné zdroje energie 2. Perspektívne premeny a technológie. Bratislava 2010, Renesans, s.r.o., ISBN 978-80-89402-13-7
- [11] SZATHMÁRY P.: Kvalita elektrickej energie. 1. Vyd. Bratislava 2003, ISBN 80-89057-04-7
- [12] ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A.: The Power System Steady-State Stability Analysis. In: Energy Spectrum. - ISSN 1214-7044. - Vol. 4, Iss. 2 (2009), s. 41-45
- [13] JALEC, M., ELESCHOVÁ, Ž.: Simulácia prechodných dejov v 22kV sieti v programe MATLAB Simulink. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 12, mimoriadne č (2006), s. 62-64
- [14] BELÁŇ A., ELESCHOVÁ, Ž., GAŠPAROVSKÝ D.: Monitorovanie kvality elektrickej energie. In: ElektroFakty [on-line]. - ISSN 1337-1010. - Roč. 1, č. 1 (2007), s. 1-4
- [15] SMITKOVÁ M., KOREC, M., KRONDIAK, E., ŠEDIVÝ, J., ŠULC, I: Analýza dopadov navýšenia inštalovanej kapacity obnoviteľných zdrojov na objemy rezervácie podporných služieb. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 14, mimoriadne číslo (2008), s. 142-147
- [16] DUGAN, r.c., McCARANAGHAN, M.F., Beaty, H.W.: Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw-Hill, 1996, ISBN 0-07-018031-8
- [17] BARRET, J.P., BORNARD, P., MEYER, B.: Power system simulation. Chapman & Hall, London 1997, ISBN 0-412-63870-3
- [18] GILKER, C., DWYER, R. V., DUGAN, R.: Program for analysis o power system harmonics, IEEE computer Application in Power, 1989
- [19] BELÁŇ, A., ELESCHOVÁ, Ž., LIŠKA, M., KOVAL, P., KOLÁRIK, J.: Štúdiá „stanovenie kapacity inštalovaného výkonu nepredikovateľných OZE pre distribučnú sieť SSE-D, a. s.“ Zhotoviteľ: STU Bratislava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Bratislava 2010

Zoznam vybraných publikácií autora

- [1] LIŠKA, M., KOVAL, P., KOLÁRIK, J.: The Influence of Harmonics on Ground-Fault Current. In: ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom.
- [2] KOLÁRIK, J., KOVAL, P., LIŠKA, M., JANÍČEK, F.: Solárne systémy natáčania za slnkom. In: Energie 21 – ISSN 1803 – 0394. – Vol. 3, No. 4 (2010), pp. 26-28.
- [3] LIŠKA, M.: Kvalita elektriny, štandardy a ich plnenie. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. – ISSN 1335-2547. - Roč. 16, mimoriadne číslo (2010), s. 230-233.
- [4] JANIGA, P., KOVAL, P., LIŠKA, M.: Eliminácia vplyvov vyšších harmonických v sieťach verejného osvetlenia, In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. – ISSN 1335-2547. - Roč. 16, mimoriadne číslo (2010), s. 219-221.
- [5] LIŠKA, M.: Možnosti predikcie fotovoltických elektrární. In: Odborná konferencia ČK Cired 2010, ISBN – 978-80-227-3282-6, nakladateľstvo STU Bratislava (2010) – CD-Rom.
- [6] LIŠKA, M.: Solving The Transients Event In Electric Circuits Using a Mathematical Model of Differential Equations . In. 18th International Conference Technical Computing Bratislava 2010, 20.10.2010 – Bratislava, ISBN – 978-80-970519-0-7.
- [7] JANÍČEK, F., DARULA, I., KOVAL, P., LIŠKA, M., JANIGA, P.: Vplyv veterných elektrární na veľkosť regulačnej rezervy, In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. – ISSN 1335-2547. - Roč. 17, číslo 2 (2011), s. 4-5.
- [8] LIŠKA, M., KOVAL, P., JANIGA P., ELESCHOVÁ Ž., JANÍČEK, F.: Prevádzka NOZE v rámci bilančnej skupiny prevádzkovateľa distribučnej sústavy, In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. – ISSN 1335-2547. - Roč. 17, číslo 2 (2011), s. 6-7.
- [9] LIŠKA, M., KOVAL, P.: Modeling of nonlinear VA-characteristic with the active upper harmonic filter. In: ELITECH'11 : 13th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 17.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2011. - ISBN 978-80-227-3500-1. - CD-Rom.
- [10] LIŠKA, M., KOVAL, P.: Replacement nonlinear elements in the electrical networks using the model of VA-characteristic. In: Energetika – Ekológia – Ekonomía '11. – ISBN 978-80-89402-40-3.
- [11] LIŠKA, M., MESSORI, D., BELÁŇ, A.: Usage of accumulation to sustain the daily diagram of electricity production in photovoltaic power plant. In. 20th International Conference Technical Computing Bratislava 2012, 7.11.2012 – Bratislava, ISBN – 978-80-970519-4-5.
- [12] LIŠKA, M., ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., CINTULA, B.: Simulation of synergy effect creation by photovoltaic power plant operation within the balance group of distribution system operator. In: 12th WSAS International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Prague 2012 – ISBN – 978-1-61804-128-9
- [13] LIŠKA, M., ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., JANÍČEK, F.: Control of Storage Element Dispatch in Photovoltaic Power Plant According to the Prediction of Electricity Production. In: 12th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Cambridge, MA, USA on January 30- February 1, 2013 (priятý príspevok v tlači)
- [14] SMITKOVÁ, M., JANÍČEK, F., ŠULC, I., ELESCHOVÁ, Ž., BELÁŇ, A., LIŠKA, M.: Evaluation of the Electricity Mix via LCA. In: 12th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Cambridge, MA, USA on January 30- February 1, 2013 (priятý príspevok v tlači)