

Štefan Lovas, Michal Kolcun

Možnosti regulácie napätia v elektrizačnej sústave Slovenskej republiky

Článok sa zaoberá možnosťami regulácie napätia v prenosovej sústave Slovenskej republiky a ukázkou spôsobu minimalizácie činných strát v elektrizačnej sústave za použitia optimálnej regulácie napätia transformátormi.

Kľúčové slová: elektrizačná sústava, regulácia napätia, činné straty, optimalizácia

I. ÚVOD

Regulácia napätia v elektrizačnej sústave spadá medzi široké spektrum úloh, ktoré sú riešené v operatívnej prevádzke sústavy. Regulácia napätia je úloha, ktorá zohráva dôležitú rolu z pohľadu stability a bezpečnosti prevádzky elektrizačnej sústavy, kvality dodávky elektriny a v neposlednom rade optimalizácie prevádzky sústavy. Proces regulácie napätia je možné realizovať rôznymi spôsobmi a za použitia rôznych technických regulačných prostriedkov.

Predkladaný článok sa zaoberá súčasnými možnosťami a prostriedkami regulácie napätia a jalového výkonu v prenosovej sústave Slovenskej republiky (ďalej len PS SR), novými prostriedkami použiteľnými na reguláciu napätia v elektrizačných sústavách, matematickou formuláciou úlohy optimálnej regulácie napätia, metódami a algoritmami vhodnými na riešenie úlohy optimálnej regulácie napätia a ekonomickým ocenením očakávaných prínosov navrhovaného riešenia optimálnej regulácie napätia v PS SR.

II. PROSTRIEDKY POUŽÍVANÉ NA REGULÁCIU NAPÄTIA

PROSTRIEDKY POUŽÍVANÉ NA REGULÁCIU NAPÄTIA V PS SR

Na udržanie napätia v dovolených hraniciach sa v PS SR používajú zdroje jalového výkonu a transformátory. V prvom rade sa využívajú točivé rezervy jalového výkonu pracujúcich elektrární. Ak tieto zdroje nestačia dochádza na príkaz službukonajúceho dispečera Slovenského elektroenergetického dispečingu (SED) k zapínaniu, alebo vypínaniu kompenzačných tlmiviek. Ako posledné riešenie sa na reguláciu napätia využíva prepínanie odbočiek transformátorov. Všetky tieto manipulácie sú na priamy príkaz dispečera SED.

V súčasnej dobe sa už nepoužíva kompenzačná prevádzka vodných elektrární (plynulá regulácia v rámci regulačného rozsahu), statické kondenzátory (stupňovitá regulácia napätia prepínaním jednotlivých stupňov) a rotačné kompenzátory (plynulá regulácia v rámci regulačného rozsahu) na reguláciu napätia. Všetky uvedené kompenzačné prostriedky so všetkými svojimi výhodami a nevýhodami sa v PS SR v minulosti používali.

Uvedené spôsoby a možnosti regulácie napätia a jalového výkonu sú v rámci dostupnosti ES SR v rámci spolupráce dispečerov jednotlivých úrovní riadenia ES SR. Dispečer SED môže po zvážení situácie v ES SR požiadať o pomoc dispečera susedných elektrizačných sústav a naopak.

V rámci liberalizovaného trhu s elektrinou sa regulácia napätia a jalového výkonu považuje za systémovú službu na zabezpečenie ktorej poskytujú poskytovatelia podporných služieb služby primárnej, sekundárnej a terciárnej regulácie napätia. V súčasnej dobe v ES SR sú tieto služby paušálne (platí sa za reguláciu napätia ako celok, nie

jednotlivo) mesačne platené, ale nie certifikované. Na certifikovaní sa intenzívne pracuje.

V súvislosti s reguláciou napätia je nutné zvýrazniť veľmi dôležitú spoluprácu prípravy prevádzky a operatívneho riadenia prevádzky (dispečerských znalostí sústavy - rôzne prevádzkové situácie, predporuchové, poruchové a poporuchové situácie). Len na základe tejto dobrej spolupráce sa dá PS SR bezpečne a hospodárne riadiť.

Otázkou regulácie napätia z hľadiska dodržania hladín napätia v dovolených toleranciách je potrebné riešiť pre elektrizačnú sústavu ako celok ako aj pre jej jednotlivé časti. Bez regulácie nie je možné udržať napätie v dovolených hraniciach. Úbytok napätia (celkový, od zdrojov až k spotrebiteľom) je vzhľadom na niekoľkostupňovú transformáciu a veľkosť prenášaného výkonu veľký a premenný s časom, tak ako sa mení s časom prenášaný výkon.

Kompenzačné prostriedky, zdroje jalového výkonu značne zlepšujú podmienky regulácie napätia v uzle, pretože nie je potrebné prenášať jalový výkon, ktorý je nutný pre prevádzku indukčných spotrebičov. Tým sa tiež dosiahne zníženie strát prenášaného výkonu a zníži sa aj úbytok napätia v sieti.

Reguláciu napätia v uzle môžeme prakticky uskutočniť, ak máme dostatočnú rezervu jalového výkonu.

Hlavné zásady regulácie napätia ES:

1. Výsledkom regulácie napätia musí byť predpísané napätie v požadovaných toleranciách na všetkých napäťových úrovniach.
2. V normálnych prevádzkových stavoch ES (t.j. mimo havarijných a pohavarijných stavoch) je určujúcou kvalitou elektrickej energie u spotrebiteľa t.j. na 110 kV (a vn) napäťovej úrovni.
3. V mimoriadnych prípadoch v ES (t.j. v havarijných a pohavarijných stavoch) je prioritné zachovanie stabilného chodu prenosovej sústavy 400 kV a 220 kV a to aj za cenu zníženia kvality dodávky elektrickej energie v napäťových hladinách 110 kV a vn na krajné hranice, t.j. $110 \pm 10\%$ (a vn $+10\% -5\%$).

MOŽNOSTI VYUŽITIA NOVÝCH PROSTRIEDKOV NA REGULÁCIU NAPÄTIA

V ostatných rokoch sa v riadení prevádzky v zahraničí čoraz viac inštalujú tzv. FACTS zariadenia. Tieto prostriedky je možné použiť aj na reguláciu napätia.

Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) sú organizáciou IEEE (the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) definované ako striedavé prenosové systémy na báze výkonovej elektroniky a iných statických regulátorov (nie na báze výkonovej elektroniky) na zlepšenie regulovateľnosti a zvýšenie výkonovej prenosovej schopnosti.

FACTS regulátor je definovaný ako systém na báze výkonovej elektroniky a iné statické zariadenie, ktoré poskytuje reguláciu jedného alebo viacerých parametrov striedavej prenosovej sústavy. Medzi regulovateľné parametre patrí napr. napätie, prúd, impedancia, fázový uhol. [1, 9, 11, 12]

Napätie, prúd, impedancia, činný výkon a jalový výkon sú navzájom ovplyvňované veličiny, z toho dôvodu každý regulátor je multifunkčným zariadením, ktoré je možné použiť v podmienkach regulácie napätia, toku výkonov, zlepšenia stability sústavy a pod. V nasledujúcej tabuľke sú podľa literatúry [1, 9] uvedené oblasti použitia jednotlivých typov FACTS regulátorov.

TABUĽKA I
FACTS regulátory použiteľné na reguláciu napätia

FACTS regulátor	oblasť použitia
STATCOM bez prídavného zdroja energie	regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, napätiová stabilita
STATCOM s prídavným zdrojom energie	regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napätiová stabilita
SVC, TCR, TSC, TSR	regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napätiová stabilita
UPFC	regulácia činného a jalového výkonu, regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napätiová stabilita, obmedzenie skratových prúdov
TCVL	napätiové obmedzenie počas prechodných a dynamických dejov
TCVR	regulácia jalového výkonu, regulácia napätia, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napätiová stabilita
IPFC	regulácia jalového výkonu, regulácia napätia, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napätiová stabilita

III. MATEMATICKÁ FORMULÁCIA ÚLOHY OPTIMÁLNEJ REGULÁCIE NAPÄTIA

V tejto kapitole je uvedená matematická formulácia úlohy minimalizácie strát činného výkonu v ES reguláciou napätia podľa [5]. Všetky uvedené vzťahy vychádzajú z formulovania veličín pre 3-fázovú symetrickú sieť [2, 3, 4, 10].

KLASIFIKÁCIA PREMENNÝCH

V matematicky formulovanej úlohe sa vyskytujú rôzne premenné, ktoré je možné rozdeliť do nasledovných kategórií:

Požadované premenné

Zahŕňajú premenné reprezentujúce konštantné hodnoty. Označované sú vektorom \bar{k} . Tieto premenné nesmú byť modifikované optimalizačným výpočtom. K požadovaným premenným patrí:

- činný výkon v PQ a v PU uzloch,
- jalový výkon v PQ uzloch,
- pozície odbočiek transformátorov a jalové výkony generátorov, ktoré sa nezúčastňujú procesu regulácie napätia.

Regulované premenné

Premenné, ktorých hodnota sa modifikuje za účelom minimalizácie cieľovej funkcie, pri rešpektovaní daných obmedzení. Sú reprezentované vektorom \bar{x} . Patria medzi ne:

- amplitúdy napätí v PU uzloch,

- pozície odbočiek transformátorov zapojených do regulácie.

Stavové premenné

Všetky premenné, ktoré môžu popisovať nejaký stav v sústave. Sú reprezentované vektorom \bar{s} . Patria medzi ne:

- amplitúdy napätí vo všetkých uzloch,
- uhly napätí vo všetkých uzloch.

Výstupné premenné

Všetky ďalšie premenné. Sú funkciou regulovaných a stavových premenných. Medzi ne patrí:

- prúd vo vedeniach,
- jalový výkon na svorkách generátorov zapojených do procesu regulácie napätia.

FORMULÁCIA CIEĽOVEJ FUNKCIE

K formulácii funkcie strát činného výkonu v ES je možné použiť dva rôzne prístupy [5, 8]:

1. Vyjadrenie strát ako súčet činných strát vo všetkých elektrických zariadeniach v časti sústavy (alebo celej sústavy), kde sú straty minimalizované. Uvedený prístup sa používa v prípade požiadavky na minimalizáciu strát činného výkonu len v špecifikovanej časti ES. Celkové straty činného výkonu v časti sústavy s n uzlami sú súčtom strát v jednotlivých prvkoch zapojených medzi uzlami k, m :

$$\Delta P = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{m=k+1}^n \Delta P_{km}, \quad (3.1)$$

$$\Delta P_{km} = \left| \operatorname{Re} \left\{ \left[U_k^2 + U_m^2 - \left(\dot{U}_k^* \dot{U}_m + \dot{U}_k \dot{U}_m^* \right) \right] Y_{km}^* + U_k^2 Y_{km0}^* + U_m^2 Y_{mk0}^* \right\} \right|$$

$Y_{km}^*, Y_{km0}^*, Y_{mk0}^*$ sú komplexne združené fázory admitancí Y článkov reprezentujúceho prvky ES, U_k (U_m) je amplitúda napätia v k -tom (m -tom) uzle, \dot{U}_k (\dot{U}_m) je fázor napätia v k -tom (m -tom) uzle a \dot{U}_k^* (\dot{U}_m^*) je komplexne združený fázor napätia v k -tom (m -tom) uzle.

2. Vyjadrenie strát ako suma činných výkonov vo všetkých uzloch sústavy (aj bilančnom), tzv. prístup bilančného uzla. Uvedený prístup sa používa v prípade, ak je požiadavka minimalizovať činné straty v celej riešenej sústave. Funkcia strát činného výkonu v ES s n uzlami je reálnou časťou funkcie strát zdanlivého výkonu v ES:

$$\Delta P = \operatorname{Re}(\Delta S) = \sum_{i=1}^n U_i^2 g_{ii} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n 2U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j) g_{ij}, \quad (3.2)$$

kde U_i (U_j) je absolútna hodnota napätia v i -tom (j -tom) uzle, δ_i (δ_j) je uhol fázora napätia \dot{U}_i (\dot{U}_j) v i -tom (j -tom) uzle, g_{ij} je reálna časť prvku uzlovej admitančnej matice (UAM) y_{ij} a g_{ii} je reálna časť prvku UAM y_{ii} .

FORMULÁCIA OBMEDZENÍ

Obmedzenia v tvare rovností

Obmedzenia v tvare rovností sú formulované rovnicami ustáleného chodu ES. Je ich možné zapísať v tvare: $\bar{h}(\bar{k}, \bar{x}, \bar{s}) = 0$.

Obmedzenia v tvare nerovností

Pri výpočtoch ES s n uzlami je možné uvažovať napr. nasledovné obmedzenia v tvare nerovností: lineárne obmedzenia na amplitúdy napätí v uzloch, lineárne obmedzenia na pozície odbočiek transformátorov, obmedzenia na amplitúdy prúdov tečúcich cez

vedenia medzi uzlami i a j (nelineárne z hľadiska regulovaných premenných \bar{x}), obmedzenia na jalové výkony na svorkách generátorov zapojených do procesu regulácie napätia, ktoré priamo závisia od prevádzkových P-Q diagramov týchto generátorov (nelineárne z hľadiska regulovaných premenných \bar{x}). Všetky obmedzenia v tvare nerovností sú funkciami vektorov regulovaných a stavových premenných \bar{x} a \bar{s} a je ich možné zapísať v tvare: $\bar{g}(\bar{x}, \bar{s}) \leq 0$.

FORMULÁCIA ÚLOHY

Na základe uvedeného je možné úlohu minimalizácie strát činného výkonu v ES matematicky formulovať nasledovne: Minimalizovať funkciu strát činného výkonu $f(\bar{k}, \bar{x}, \bar{s})$, pri rešpektovaní obmedzení v tvare rovností $h(\bar{k}, \bar{x}, \bar{s}) = 0$ a v tvare nerovností $g(\bar{x}, \bar{s}) \leq 0$.

Pretože vektor požadovaných premenných \bar{k} obsahuje konštantné hodnoty a funkcia f je minimalizovaná na množine regulovaných premenných \bar{x} , je možné cieľovú funkciu matematicky zapísať nasledovne:

$$f_{\bar{k}}(\bar{s}(\bar{x}), \bar{x}) = \min_{\bar{x}} f_{\bar{k}}(\bar{x}) \quad (3.3)$$

kde funkcia f je funkciou s parametrom vektora požadovaných premenných \bar{k} , vektor regulovaných premenných \bar{x} je vektorom nezávislých premenných a vektor stavových premenných \bar{s} je vektorom závislých premenných

IV. NÁVRH ALGORITMU RIEŠENIA OPTIMALIZAČNEJ ÚLOHY

Z uvedenej formulácie optimalizačnej úlohy v kapitole III a zo známych skutočností je možné konštatovať nasledovne:

- Formulovaná úloha je viacparametrickou optimalizačnou úlohou a optimum (v našom prípade minimum) účelovej funkcie je hľadané v oblasti vymedzenej podmienkami v tvare rovností aj nerovností.
- Účelová funkcia je nelineárna a v obmedzeniach sa vyskytujú lineárne aj nelineárne funkcie.
- Účelová funkcia je funkciou spojitých (hodnoty napätí) aj celočíselných, resp. diskretných (pozície odbočiek transformátorov) regulovaných premenných.

V súčasnosti neexistuje žiadny jednoduchý algoritmus na riešenie tejto úlohy. V princípe je možné riešiť danú úlohu použitím vhodných klasických numerických metód alebo je možné na riešenie použiť vhodné alternatívne metódy.

V článku sú prezentované výsledky optimálnej regulácie napätia na transformátoroch za účelom zníženia činných strát v električnej sústave použitím algoritmu optimalizačný nástroj programovacieho jazyka MATLAB, konkrétne funkciu *fmincon*, ktorá je určená na riešenie úloh definovaných v tvare (3.3) klasickými numerickými metódami. Funkcia bola zadaná spôsobom, ktorý viedol k určeniu minima účelovej funkcie sekvenčným kvadratickým programovaním. Sekvenčné kvadratické programovanie patrí v súčasnosti medzi najobľúbenejšie numerické metódy [6]. Algoritmus bol naprogramovaný v programovacom jazyku MATLAB a použitý na riešenie optimalizačnej úlohy na modeli reálnej ES SR.

POPIS OPTIMALIZAČNÉHO NÁSTROJA PROGRAMOVACIEHO JAZYKA MATLAB A POUŽITEJ OPTIMALIZAČNEJ FUNKCIE

Optimalizačný nástroj (Optimization Toolbox) programovacieho prostredia MATLAB je súborom funkcií, ktoré rozširujú použiteľnosť tohto jazyka na riešenie rôznych optimalizačných

problémov. Je ho možné použiť na riešenie optimalizačných úloh bez ohraničení, s ohraňovacími, úloh lineárneho aj nelineárneho programovania.

Na riešenie úloh formulovaných v tvare (3.3) je určená funkcia *fmincon*. Jej použitím je možné určiť minimum nelineárnej viacparametrickej cieľovej funkcie s ohraňovacími typy rovností i nerovností. Funkcia *fmincon* potrebuje pre svoju prácu zadať vstupné parametre v zadanom tvare, ktorý stanovuje jej syntax. Počtom vstupných parametrov a ich obsahom je možné ovplyvniť priebeh výpočtu vrátane výberu numerických metód použitých optimalizačným nástrojom na určenie minima cieľovej funkcie.

V použitom algoritme bola funkcia *fmincon* zadaná v tvare, ktorý umožnil riešiť danú úlohu pri použití čo najmenšieho počtu vstupných údajov potrebných pre jej riešenie. Nevyžadoval napr. zadať gradient ani Hessovu maticu účelovej funkcie.

Funkcia bola zadaná použitím nasledovnej syntaxe [7]:

$[x,s] = \text{fmincon}(\text{fun}, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub, \text{nonlcon}, \text{options})$

x je vektor obsahujúci hodnoty parametrov účelovej funkcie, pri ktorých nadobúda funkcia minimálnu hodnotu (v našom prípade je to vektor regulovaných premenných minimalizujúcich účelovú funkciu),

s je výsledná hodnota účelovej funkcie,

fun reprezentuje minimalizovanú účelovú funkciu,

$x0$ je vektor počiatočných hodnôt parametrov účelovej funkcie (v našom prípade počiatočných hodnôt regulovaných premenných),

A je matica a b vektor, ktoré určujú lineárne ohraňovania typu nerovností.

Aeq je matica a beq vektor, ktoré určujú lineárne ohraňovania typu rovností,

lb a ub sú vektory obsahujúce hodnoty dolných a horných ohraňovaní pre hodnoty vo vektore x minimalizujúcom účelovú funkciu,

nonlcon reprezentuje nelineárne ohraňovania typu rovností a nerovností,

options obsahuje optimalizačné parametre zadané v špecifickom tvare určenom syntaxou funkcie *optimset* spolupracujúcej s funkciou *fmincon*. Optimalizačnými parametrami je možné určiť presnosť výpočtu použitých numerických metód, počet iterácií, použité metódy a pod.

Priebeh iteračného výpočtu v rámci funkcie *fmincon* bol ukončený buď v prípade dosiahnutia stanovených presností, alebo v prípade dosiahnutia stanoveného maximálneho počtu ohodnotení účelovej funkcie. Funkcia vrátila vektor regulovaných premenných funkcie, pri ktorých nadobúda účelová funkcia minimálnu hodnotu a hodnotu účelovej funkcie pre tieto premenné. Popis bol spracovaný s použitím literatúry [7].

POSTUP RIEŠENIA ÚLOHY MINIMALIZÁCIE ČINNÝCH VÝKONOVÝCH STRÁT V ES S POUŽITÍM OPTIMALIZAČNÉHO NÁSTROJA PROGRAMU MATLAB

Postup riešenia úlohy minimalizácie činných výkonových strát s použitím optimalizačného nástroja programu MATLAB pozostáva z nasledovných krokov:

- Načítanie vstupných údajov z dátových súborov a určenie potrebných parametrov pre ďalší výpočet.
- Výpočet ustáleného chodu bez použitia regulácie v sústave. Na výpočet bola použitá Newtonova iteračná metóda.

- Zadané uzly, v ktorých sa má vykonať regulácia. Tieto uzly musia byť z množiny regulačných (PU) uzlov uvedených v datovom súbore.
- Optimalizačný výpočet s použitím funkcie fmincon a výpočet ustáleného chodu. Rovnice ustáleného chodu neboli súčasťou optimalizačného výpočtu v tvare ohraničení typu rovnosti z dôvodu už naprogramovanej funkcie na výpočet ustáleného chodu.

Nasledujúce výsledky boli vypisované na obrazovku:

- činné a jalové výkony, napätia a uhly napätí v uzloch,
- prúdy vo vedeniach,
- optimálne napätia v uzloch s možnosťou regulácie a stanovenie pozície odbočiek a hodnôt jalových výkonov pre generátory na dosiahnutie týchto napätí,
- činné výkonové straty v prvkoch sústavy zadaných užívateľom (v ktorých sa realizuje proces optimalizácie).

Výsledkom sú činné straty výkonu a vektor regulovaných premenných obsahujúci celočíselné aj spojité premenné.

V. MINIMALIZÁCIA ČINNÝCH STRÁT V ES SR POUŽITÍM NAVRHNUTÉHO ALGORITMU

Výpočty boli realizované na matematickom modeli ES zostavenom v MATLABe pozostávajúcom z časti PS SR a z UO Lemešany-Voľa-Sp. Nová Ves T402.

Pri riešení optimalizačnej úlohy boli konkrétne uvažované nasledovné ohraničenia v tvare nerovností:

Obmedzenia na napätia v uzloch:

- na napät'ových hladinách $U=400$ kV: $U + 5\%$, $U - 5\%$.

- na napät'ových hladinách $U=110$ kV a $U=220$ kV:

$U + 10\%$, $U - 5\%$.

- na napät'ových hladinách $U=10.5$ kV, $U=13.8$ kV a $U=33$ kV:

$U + 5\%$, $U - 5\%$.

Obmedzenia na pozície odbočiek transformátorov: podľa údajov SEPS, a.s.

Obmedzenia na prúdy tečúce vedeniami: podľa údajov SEPS, a.s.

Obmedzenia na jalové výkony generované resp. spotrebované generátormi: podľa prevádzkových PQ diagramov blokov elektrární.

Model riešenej sústavy bol zostavený podľa parametrov a vstupných údajov SEPS, a.s.

SUMÁRNE VÝSLEDKY

TABUĽKA II
Pred optimalizačným výpočtom

transformátor	Odb. [-]	Straty v riešenej časti PS [MW]	Straty v riešenej DS [MW]	Celkové straty [MW]
T401SUCA	11	6,6394	4,2831	10,9225
T402SPNV	15			
T401LEME	6			
T403LEME	14			
T402LEME	13			
T201LEME	5			
T201VOLA	4			

TABUĽKA III
Po optimalizácii PS

transformátor	Odb. [-]	Straty v riešenej časti PS [MW]	Straty v riešenej DS [MW]	Celkové straty [MW]
T401SUCA	12	6,4185	3,8832	10,3017
T402SPNV	13			
T401LEME	11			
T403LEME	15			
T402LEME	15			
T201LEME	1			
T201VOLA	4			

TABUĽKA IV
Po optimalizácii DS

transformátor	Odb. [-]	Straty v riešenej časti PS [MW]	Straty v riešenej DS [MW]	Celkové straty [MW]
T401SUCA	11	6,545	3,8752	10,4202
T402SPNV	13			
T401LEME	7			
T403LEME	15			
T402LEME	16			
T201LEME	3			
T201VOLA	1			

TABUĽKA V
Po optimalizácii PS a DS

transformátor	Odb. [-]	Straty v riešenej časti PS [MW]	Straty v riešenej DS [MW]	Celkové straty [MW]
T401SUCA	12	6,4214	3,8796	10,301
T402SPNV	14			
T401LEME	11			
T403LEME	15			
T402LEME	16			
T201LEME	1			
T201VOLA	4			

Z vyššie uvedeného je vidieť, že reguláciou odbočiek transformátorov pracujúcich v ES je možné znížiť činné straty v danej oblasti ES.

Optimalizáciou regulácie napätia transformátormi PS/DS za účelom zníženia činných strát v PS je možné okrem zníženia strát v PS (o 3,33 %) dosiahnuť zároveň aj zníženie strát v DS (o 9,34 %) a tým zníženie celkových strát o 5,68 %.

Optimalizáciou regulácie napätia transformátormi PS/DS za účelom zníženia činných strát v DS je možné okrem zníženia strát v DS (o 9,52 %) dosiahnuť zároveň aj zníženie strát v PS (1,42 %) a tým zníženie celkových strát o 4,6 %.

Optimalizáciou regulácie napätia transformátormi PS/DS za účelom zníženia činných strát v PS a DS súčasne je možné znížiť straty v PS o 3,28 % a straty v DS o 9,42 %, čím je možné dosiahnuť celkové zníženie strát o 5,69 %.

Je možné konštatovať, že pri danom prevádzkovom stave bolo reguláciou odbočiek transformátorov PS/DS za účelom zníženia strát v PS dosiahnuté súčasne aj zníženie činných strát v DS a opačne, t. zn. pri minimalizácii činných strát v DS sa dosiahlo zníženie strát aj v PS. Maximálne zníženie strát v riešenej ES bolo dosiahnuté pri optimalizácii celej riešenej ES.

VI. ODHAD CELKOVEJ EKONOMICKEJ EFEKTÍVNOSTI OPTIMALIZÁCIE REGULÁCIE NAPÄTIA V PS SR

Pri hodnotení efektívnosti projektu sa uvažovala iba pohyblivá zložka nákladov na činné straty, čo je v súlade s terajšou legislatívou platby za nákup elektriny na krytie strát.

Pri riešení sa uvažovali 3 varianty, uvedené podrobne v predchádzajúcej kapitole. Získané výsledky sú uvedené v tab. 6. Vo výpočtoch sa uvažovala hodnota $T\Delta = 8760$

TABUĽKA VI
Zisk z optimalizácie v ES

Variant – optimalizácia	Zníženie činných strát v MW		ZOP v €
	v PS	v DS	
1 - iba v PS	0,2209	0,3999	349 313,76
2 - iba v DS	0,0944	0,4079	253 085,16
3 - v PS a DS	0,2180	0,4035	348 604,20

Zo získaných výsledkov je zrejme, že hoci zníženie činných strát je maximálne pre 3. variant, keď sa uvažuje s optimálnou reguláciou napätia tak v PS ako aj v DS, vzhľadom na rozdielne oceňovanie činných strát v PS a DS ako ekonomicky výhodnejší vychádza 1. variant (optimálna regulácia napätia v PS), keď finančné úspory vyplývajúce zo zníženia činných strát – zisk z optimalizácie (ZOP) – budú maximálne. Z toho vyplýva aj to, že pre uvažovaný prípad postačuje optimálna regulácia napätia iba v PS SR

VII. ZÁVER

Za účelom ukážky aplikácie navrhnutého optimalizačného algoritmu bol zostavený matematický model elektrizačnej sústavy pozostávajúci z modelu časti prenosovej sústavy Slovenskej republiky a časti sústavy východného Slovenska. Na optimálnu reguláciu napätia boli vo výpočte použité transformátory. Súhrnné výsledky sú uvedené v tabuľkách v 5. kapitole.

Je možné konštatovať, že pri danom prevádzkovom stave bolo reguláciou odbočiek transformátorov PS/DS za účelom zníženia strát v PS dosiahnuté súčasne aj zníženie činných strát v DS a opačne, t. zn. pri minimalizácii činných strát v DS sa dosiahlo zníženie strát aj v PS. Maximálne zníženie strát v riešenej ES bolo dosiahnuté pri optimalizácii celej riešenej ES.

Zo získaných výsledkov uvedených v 6. kapitole je zrejme, že hoci zníženie činných strát je maximálne pre 3. variant, keď sa uvažuje s optimálnou reguláciou napätia tak v PS ako aj v DS, vzhľadom na rozdielne oceňovanie činných strát v PS a DS ako ekonomicky výhodnejší vychádza 1. variant (optimálna regulácia napätia v PS), keď finančné úspory vyplývajúce zo zníženia činných strát – zisk z optimalizácie – budú maximálne. Z toho vyplýva aj to, že pre uvažovaný prípad postačuje optimálna regulácia napätia iba v PS SR.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom finančnej podpory č. APVV-0385-07 a Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied prostredníctvom finančnej podpory VEGA č. 1/4072/07.

LITERATÚRA

- [1] HINGORANI, G. N., GYUGYI, L.: Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8
- [2] GLAVITSCH, H. – BACHER, R.: Optimal Power Flow Algorithms: Dissertation. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland. 72 s.
- [3] HODINKA, M. – FECKO, Š., – NĚMEČEK, F.: Přenos a rozvod elektrické energie. Praha: SNTL, 1989. 328 s. ISBN 80-03-00065-3
- [4] CHLADNÝ, V. – KOLCUN, M. – VARGA, L.: Počítačová analýza ES (učebný text). Košice: KEE FEI TU, 2000. 36 s.
- [5] RUSNÁK, J.: Optimalizácia prevádzky elektrizačnej sústavy: Dizertačná práca. Košice: Katedra elektroenergetiky, 2004, 135 s.
- [6] ŠTECHA, J.: Optimální rozhodování a řízení. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 242 s.
- [7] Optimization User's Guide, The MathWorks, Inc., 2003.
- [8] BEŇA, Ľubomír - RUSNÁK, Jozef: The solution of optimisation problems in the operation control of the electric power system. In: EPE 2006 : Proceedings of the 7th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2006 : Brno, May 16-18, 2006. Brno : Brno University of Technology, 2006. p. 37-43. ISBN 80-214-3180-6.
- [9] RUSNÁK, Jozef: Použitie nových prostriedkov v riadení prevádzky elektrizačnej sústavy. In: Elektroenergetika 2003 : The 2nd international scientific symposium : Symposium proceedings September 16-18, 2003 High Tatras - Stará Lesná, Slovak Republic. Košice : Mercury-Sméal, 2003. s. 218-219. ISBN 80-89061-80-X.
- [10] KOLCUN, M. - CHLADNÝ, V. - BEŇA, Ľ. - ILENIN, S. - LEŠČINSKÝ, P. - MEŠTER, M.: Analýza elektrizačnej sústavy. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005. 419 s. ISBN 80-89057-09-8
- [11] Fedor, Pavol – Perduková, Daniela - Timko, Jaroslav: Study of controlled structure properties with reference model. In: Acta Technica CSAV. vol. 46 (2001), p. 167-179. ISSN 0001-7043.
- [12] Perduková, Daniela - Fedor, Pavol: Control of a continuous line with incomplete access to state variables. In: Journal of Electrical Engineering. roč. 48, č. 1-2 (1996), s. 3-9. ISSN 1335-3662.

ADRESY AUTOROV

Štefan Lovas, Slovenská elektrizačná prenosová sústava, Mlynské nivy 59/A, 824 84 Bratislava 26, Slovenská Republika, lovas_stefan@sepsas.sk
Michal Kolcun, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, Slovenská Republika, michal.kolcun@tuke.sk