

Daniel Hlubeň, Ľubomír Beňa, Michal Kolcun

Minimalizácia technických strát v elektrizačných sústavách reguláciou napätia

Znižovanie strát v elektrizačných sústavách na všetkých napät'ových úrovniach je technicky a organizačne náročný proces. Jednotlivé napät'ové úrovne majú rozdielnu percentuálnu hodnotu strát a tiež majú rôznu reálnu možnosť využívania konkrétnych nástrojov na ovplyvňovanie veľkosti týchto strát. Jeden z nástrojov, ktorý je možné použiť na minimalizáciu strát na všetkých napät'ových úrovniach, pri súčasnom zabezpečení spoľahlivosti dodávky a kvality elektrickej energie, je proces regulácie napätí a jalových výkonov.

Kľúčové slová: elektrizačná sústava, technické straty, cieľová funkcia, optimalizácia strát.

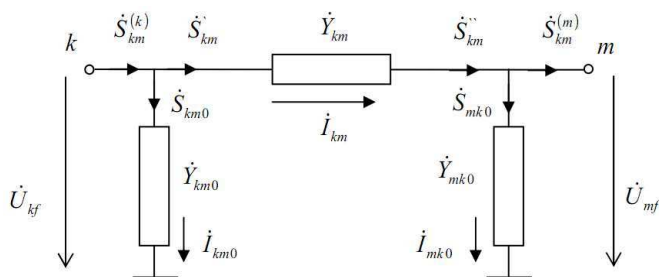
ÚVOD

Článok sa zaoberá rozdelením a popisom metód, vhodných na riešenie minimalizácie technických strát reguláciou napätia a tiež popisom prostriedkov na reguláciu napätia v elektrizačných sústavách. Pre potreby optimalizácie činných strát sa pre praktické využívanie v operatívnej prevádzke uprednostňujú len dostatočne rýchle a robustné programové nástroje, ktoré majú spĺňať nasledovné požiadavky:

- spoľahlivosť (robustnosť) – vykonávanie optimalizačných výpočtov musí byť spoľahlivé pri aplikácii v reálnom čase. Riešenie musí konvergovať k reálnym výsledkom a ak nie, tak musí byť poskytnuté vysvetlenie. Akceptovanie optimalizačného programu je založené na jeho spoľahlivej nepretržitej prevádzke.
- rýchlosť – optimalizačné výpočty vyžadujú výpočet nelineárnych cieľových funkcií a nelineárnych obmedzení s množstvom premenných. To si vyžaduje použitie metód, ktoré rýchlo konvergujú.
- pružnosť – pri riešení sa pracuje s modelom, ktorý simuluje reálny stav prevádzky systému. Kontinuálne sú definované nové požiadavky na výpočet, a preto optimalizačné algoritmy musia byť prispôsobivé širokému rozsahu úloh a modelov.
- jednoduchosť používania – algoritmus musí mať možnosť pohodlného použitia pri aplikácii v reálnom čase [1].

I. FORMULÁCIA ÚLOHY MINIMALIZÁCIE ČINNÝCH STRÁT

Predpokladajme, že každý prvok elektrizačnej sústavy (vedenie, transformátor) je reprezentovaný Π článkom (Obr. 1).



Obr. 1 Rozloženie výkonov v Π článku

Celkové straty činného výkonu v 3-fázovej symetrickej elektrizačnej sústave s n uzlami sú tvorené súčtom strát v jednotlivých prvkoch zapojených medzi uzlami k a m :

$$\Delta P = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{m=k+1}^n \left| \operatorname{Re} \left\{ \left[U_k^2 + U_m^2 - (\dot{U}_k^* \cdot \dot{U}_m + \dot{U}_k \cdot \dot{U}_m^*) \right] \cdot \dot{Y}_{km}^* + \left[+ U_k^2 \cdot \dot{Y}_{km0} + U_m^2 \cdot \dot{Y}_{mk0} \right] \right\} \right|, \quad (1)$$

kde \dot{Y}_{km}^* , \dot{Y}_{km0} , \dot{Y}_{mk0} sú komplexne združené fázory admitancií Π článku reprezentujúceho prvky ES a \dot{U}_k (\dot{U}_m) je fázor napätia v k -tom (m -tom) uzle.

Obmedzenia v tvare rovností sú formulované rovnicami ustáleného chodu ES. Ako obmedzenia v tvare nerovností je možné uvažovať napr. lineárne obmedzenia na amplitúdy napätí v uzloch a na pozície odbočiek transformátorov, obmedzenia na amplitúdy prúdov tečúcich cez vedenia medzi uzlami a obmedzenia na jalové výkony na svorkách generátorov zapojených do procesu regulácie napätia, ktoré priamo závisia od prevádzkových P - Q diagramov týchto generátorov [8].

II. ALGORITMY MINIMALIZÁCIE ČINNÝCH STRÁT

Z uvedenej formulácie optimalizačnej úlohy je možné konštatovať nasledovné:

- 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 spojitych (hodnoty napätí), aj celočíselných, resp. diskretných (pozície odbočiek transformátorov) regulovaných premenných.

Metódy a algoritmy používané pri riešení optimalizačných úloh je možné rozdeliť podľa rôznych hľadísk.

a) Klasické optimalizačné metódy.

Optimalizačné úlohy vzhľadom na ich rôzne obmedzenia a dopĺňajúce podmienky len zriedka možno riešiť analytickými metódami, z tohto dôvodu sa používajú hlavne numerické metódy. Do tejto skupiny patria metódy založené na rigorózných metódach klasickej matematiky. Algoritmy tohto charakteru zvyčajne vyžadujú splnenie viacerých predpokladov, na základe ktorých je daná optimalizačná úloha riešiteľná. K základným predpokladom zvyčajne patrí naefinovanie problému (t.j. cieľovej funkcie a všetkých obmedzení)

v analytickom tvare a spojitosť cieľovej funkcie na množine možných riešení. Výsledkom klasických (deterministických) algoritmov je nájdenie jediného riešenia, najbližšieho k zadanému počiatočnému priblíženiu. Ich nevýhodou je teda skutočnosť, že v prípade cieľovej funkcie s viacerými lokálnymi extrémami výsledok riešenia nemusí byť práve globálny extrém. Tieto metódy sú teda vhodné na riešenie optimalizačných úloh s unimodálnymi cieľovými funkciami, t.j. s iba jedným extrémom [5]. Niektoré z týchto metód využíva optimalizačný toolbox programu MATLAB, ktorý je popísaný v kapitole č. III.

b) Alternatívne optimalizačné metódy a algoritmy.

Pojem alternatívne optimalizačné metódy zastrešuje metódy a algoritmy spadajúce do kategórie tzv. stochastických algoritmov a zmiešaných algoritmov [4]. Princíp stochastických algoritmov je založený na využití náhody. Ide v podstate o čisto náhodné hľadanie hodnôt argumentov cieľovej funkcie s tým, že výsledkom je vždy to „najlepšie“ riešenie, ktoré bolo nájdené v priebehu celého náhodného hľadania. Algoritmy tohto typu sú obvykle pomalé a sú vhodné len na prehľadávanie priestorov možných riešení s malým rozsahom argumentov cieľovej funkcie. Prípadne môžu slúžiť na hrubý odhad riešenia optimalizačnej úlohy.

Zmiešané algoritmy sú založené na kombinácii metód klasických a stochastických. V prevažnej väčšine ide o tzv. evolučné algoritmy, ktorých snahou je využiť evolúciu za účelom vyhľadávania optimálneho riešenia. Evolúciou sa pritom rozumie postupná zmena premenných, smerujúca k nájdeniu extrému funkcie. Tieto výpočtové metódy napodobňujú procesy prirodzeného výberu, ktoré môžeme sledovať v prírode. To znamená, správanie a vlastnosti organizmov ovplyvňujú ich ďalšiu schopnosť prežiť a rozmnožovať sa. Typickým rysom evolučných algoritmov je, že pracujú s tzv. populáciami možných riešení, ktorým hovoríme „jedinci“. Títo jedinci navzájom ovplyvňujú svoju kvalitu na základe určitých evolučných princípov v cykloch, obvykle nazývaných „generácie“. Výhodou týchto algoritmov je, že sú zamerané na hľadanie tzv. globálneho a nie lokálneho extrém, ako je to väčšinou u klasických a zvlášť numerických metód. Sú vhodné a niekedy nevyhnutné na riešenie ťažko matematicky popísateľných úloh so zložitými ohraničeniami a tiež s minimálnymi predbežnými informáciami o výsledku (t.j. napr. pri zložitosti určenia počiatočného priblíženia riešenia) [9].

Medzi najviac rozpracované, najviac používané a v mnohých oblastiach technickej praxe osvedčené metódy patriace do tzv. evolučných algoritmov patria genetické algoritmy. Medzi najnovšie a podľa mnohých odborníkov z oblasti optimalizácie veľmi perspektívne a výkonné alternatívne optimalizačné algoritmy patrí tzv. SOMA (samo-organizujúci sa migračný algoritmus), ktorého princíp činnosti je popísaný v kapitole č. IV.

III. OPTIMALIZAČNÝ NÁSTROJ PROGRAMOVACIEHO JAZYKA MATLAB

Optimalizačný nástroj (Optimization Toolbox) programu 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 ohraničeniami, úloh lineárneho aj nelineárneho programovania. Na riešenie úloh formulovaných v kapitole č. I je určená funkcia *fmincon*. Jej použitím je možné určiť minimum nelineárnej viacparametrickej cieľovej funkcie s ohraničeniami typu 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.

Syntax funkcie *fmincon* je nasledovná:

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

- 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 ohraničenia typu nerovností zadaných v tvare $A \cdot \bar{x} \leq \bar{b}$,
- Aeq je matica a beq vektor, ktoré určujú lineárne ohraničenia typu rovností zadaných v tvare $A_{eq} \cdot \bar{x} \leq \bar{b}_{eq}$,
- lb a ub sú vektory obsahujúce hodnoty dolných a horných ohraničení pre hodnoty vo vektore x minimalizujúcom účelovú funkciu,
- *nonlcon* reprezentuje nelineárne ohraničenia typu rovností a nerovností, zadaných v tvare $c(\bar{x}) \leq 0$ a $c_{eq}(\bar{x}) = 0$.

Ďalej je potrebné zadať optimalizačné parametre, ktoré určujú štruktúru *options*. Tieto parametre je možné zadať použitím matlabovskej funkcie *optimset* nasledovne:

$$\text{options} = \text{optimset}(\text{'Display','iter','ToIX'},1.e-6,\text{'TolFun'},1.e-6,\text{'MaxFunEvals'},1000,\text{'LargeScale'},\text{'off'})$$

kde:

- 'Display','iter' sa zadáva za účelom zobrazenia výsledkov priebehu výpočtu po každom iteračnom kroku numerickej metódy.
- 'ToIX', (napr. 1.e-6) definuje presnosť pre vektor regulovaných premenných.
- 'TolFun', (napr. 1.e-6) definuje presnosť pre hodnotu účelovej funkcie.
- 'MaxFunEvals', (napr. 1 000) stanovuje maximálny počet výpočtov (ohodnotení) účelovej funkcie.
- 'LargeScale','off' stanovuje pre funkciu *fmincon* použiť tzv. „Medium-Scale Optimization“. Tento spôsob optimalizácie si nevyžaduje zadať pre výpočet gradient ani Hessovu maticu účelovej funkcie, čo bol dôvod jeho použitia.

Priebeh iteračného výpočtu v rámci funkcie *fmincon* môže byť 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 [3].

IV. POPIS A PRINCÍP ČINNOSTI SOMA ALGORITMU

Algoritmus bol vyvinutý na princípoch, ktoré je možné odpozorovať v prírode a ktorými sa v sociálnom prostredí riadia jedinci, ktorí kooperujú na riešení spoločného problému. Na rozdiel od ostatných evolučných algoritmov v ňom neprebíha tvorba nových riešení (jedincov, potomkov) filozofiou kríženia rodičov, ale je založená na kooperatívnom prehľadávaní (migrácii) priestoru možných riešení daného problému. Z toho dôvodu bol pre evolučný cyklus známy z genetických algoritmov ako „generácia“ zvolený názov migračný cyklus. Pojem samoorganizácia plynie z faktu, že sa jedinci ovplyvňujú navzájom v priebehu hľadania lepšieho riešenia,

t. zn. skupina jedincov, alebo populácia si sama organizuje vzájomný pohyb jedincov.

Ďalej sú vysvetlené základné pojmy používané v algoritme SOMA.

- Populácia a jedinci. Populácia môže byť znázornená ako matica, v ktorej stĺpce predstavujú jednotlivých jedincov a riadky argumenty (parametre) účelovej funkcie a im prislúchajúce hodnoty účelovej funkcie. Každý jedinec predstavuje aktuálne riešenie daného problému. V podstate je to množina argumentov účelovej funkcie spojená s jej hodnotou. Táto hodnota sa nezúčastňuje vlastného evolučného procesu, nesie len informáciu o kvalite príslušného jedinca. Vzhľadom na to, že sa populácia v čase vyvíja (stará sa nahrádza novou), hovorí sa týmto algoritmom „evolučné“.
- Perturbácia. Pri pohybe jedincov po priestore možných riešení sú ich parametre perturbované (rušené, modifikované). To, ako bude perturbácia prebiehať, záleží na nastavení parametra PRT, ktorý je jedným z užívateľsky nastaviteľných parametrov pre SOMA algoritmus. Pomocou neho sa generuje perturbačný vektor PRTv, ktorý je pre každého jedinca generovaný zvlášť a je platný len počas jedného migračného cyklu.
- Pohyb jedincov. U algoritmu SOMA prebieha počas výpočtu tzv. pohyb jedincov po priestore možných riešení (zmena parametrov účelovej funkcie v rámci daných ohraničení). Pri tomto pohybe sa v prípade minimalizácie uchovávajú hodnoty parametrov, pri ktorých účelová funkcia nadobúda minimum a toto riešenie tak postupuje do ďalších migračných cyklov.

Základná verzia algoritmu SOMA (stratégia AllToOne – všetci k jednému) sa skladá z nasledovných krokov:

- Definícia parametrov. Algoritmus SOMA potrebuje pre svoju činnosť zadať tzv. riadiace a ukončovacie parametre. Medzi ne patrí:
 - Tzv. vzor (*Specimen*), ktorý slúži na vygenerovanie celej počiatočnej populácie. Obsahuje typ premennej (reálny, celočíselný, diskretný) a dolné a horné hranice intervalu, v ktorých sa hodnota každého parametra jedinca môže pohybovať.
 - *Mass* resp. *PathLength*. Hodnota parametra *Mass* ovplyvňuje absolútnu veľkosť rozdielu hodnôt parametrov účelovej funkcie v aktuálnom riešení daného problému od najlepšieho riešenia daného problému v danom migračnom cykle. Hodnota *Mass* môže byť z uzavretého intervalu 1,1 až 3.
 - *Step*. Hodnota *Step* určuje „zrornosť“, s akou bude prehladávaná cesta aktívneho jedinca (veľkosť zmeny parametrov účelovej funkcie). Môže nadobúdať hodnoty 0,11 až *Mass*.
 - *PRT*. Podľa tohto parametra sa tvorí perturbačný vektor, ktorý ovplyvňuje pohyb aktívneho jedinca vzhľadom k vedúcemu jedincovi. Jeho hodnota môže byť z uzavretého intervalu od 0 do 1. Ak sa rovná 1, zaniká stochastická zložka správania sa algoritmu.
 - *D*. Udáva počet argumentov účelovej funkcie.
 - *NP* resp. *PopSize*. Môže nadobúdať hodnoty od 2 do vhodného konečného čísla. Určuje, koľko jedincov bude tvoriť populáciu.
 - *Migrácia*. Udáva počet migračných cyklov, to znamená, koľkokrát sa populácia jedincov preorganizuje.
 - *AcceptedError* resp. *MinDiv*. Definuje, aký je povolený maximálny rozdiel medzi najhorším a najlepším jedincom

v aktuálnej populácii. Ak je rozdiel menší, beh algoritmu je ukončený ešte pred dosiahnutím počtu migrácií definovaných parametrom *Migrácia*.

- Tvorba populácie. V tomto kroku je vytvorená počiatočná populácia pomocou generátora náhodných čísel a parametra *Specimen*.
- Migračný cyklus. Každý jedinec je ohodnotený účelovou funkciou a je zvolený vedúci jedinec (Leader). Ostatní jedinci sa začínú pohybovať smerom k Leadrovi pomocou „skokov“, ktorých veľkosť je určená parametrom *Step*. Po každom skoku sa pre každý jedinec na takto získanej pozícii prepočíta hodnota účelovej funkcie a pokiaľ je menšia ako predchádzajúca, tak sa uchová. Pohyb jedinca smerom k Leadrovi po skokoch pokračuje tak dlho, pokiaľ nie je dosiahnutá pozícia daná parametrom *Mass*. Po ukončení „behu“ sa jedinec vracia na pozíciu, kde bola nájdená najlepšia hodnota účelovej funkcie behom jeho cesty. Po skončení aktuálneho migračného cyklu sú všetci jedinci, okrem Leadra, premiestnení.
- Testovanie naplnenia ukončovacích parametrov. V tomto kroku je kontrolované, či je rozdiel medzi Leadrom (najlepší jedinec) a najhorším jedincom menší ako *AcceptedError*. Taktiež je testované, či boli vykonané migračné cykly v počte, ktorý je daný parametrom *Migrácia*. Pokiaľ nie je splnená ani jedna podmienka, proces sa vracia na krok 3. Ukončenie. Zobrazenie najlepšieho nájdeného riešenia po poslednom migračnom cykle.

Podrobnejší popis princípu SOMA aj s uvedením matematických vzťahov, diagramov, obrázkov popisujúcich činnosť algoritmu je uvedený v literatúre [4], [5], [6], [7].

V. SPÔSOBY REGULÁCIE NAPÄTIA V ELEKTRIZAČNÝCH SÚSTAVÁCH

Regulácia napätia v elektrizačnej sústave je veľmi dôležitou úlohou, ktorá zaisťuje bezpečnosť prevádzky, stabilitu napätia, hospodárnosť prevádzky elektrizačnej sústavy a okrem toho ovplyvňuje aj kvalitu dodávky elektrickej energie. Ako bolo spomenuté v úvode, je to jeden z nástrojov, ktorý je možné použiť na minimalizáciu strát na všetkých napäťových úrovniach, pri súčasnom zabezpečení spoľahlivosti dodávky a kvality elektrickej energie.

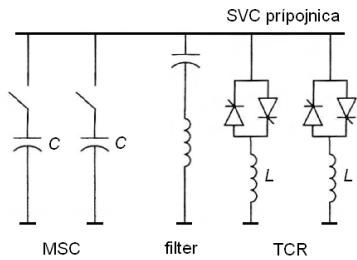
Regulácia napätia v elektrizačných sústavách je realizovaná predovšetkým:

- regulačnými transformátormi,
- generátormi elektrárníach,
- prečerpávacími vodnými elektrárnami v kompenzačnej prevádzke,
- synchronnými kompenzátormi (synchronne motory v stave naprázdno pracujúce v prebudenom alebo podbudenom stave),
- statickými kompenzačnými zariadeniami (tlmivky a kondenzátory)

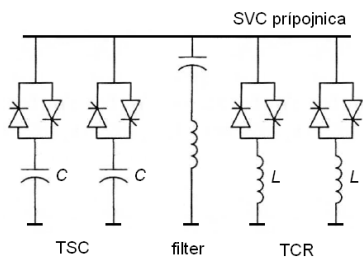
V posledných rokoch sa s rozvojom výkonovej elektroniky začali v zahraničných elektrizačných sústavách používať zariadenia FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System - pružný striedavý prenosový systém). Pre reguláciu napätí a jalového výkonu sa používajú nasledovné FACTS zariadenia:

SVC (Static VAR compensator). Je to zariadenie, predstavujúce paralelné kombinácie kondenzátorov (TSC – Thyristor Switched Capacitor alebo MSC – Mechanically Switched Capacitor) a tlmiviek (TCR – Thyristor Controlled Reactor) (obr. 2). Plynulá

zmena napätia a jalového výkonu sa zabezpečí riadením pomocou tyristorového regulátora.

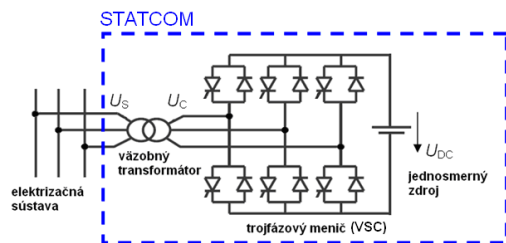


Obr. 2 Príklad SVC zariadenia tvoreného prvkami MSC a TCR

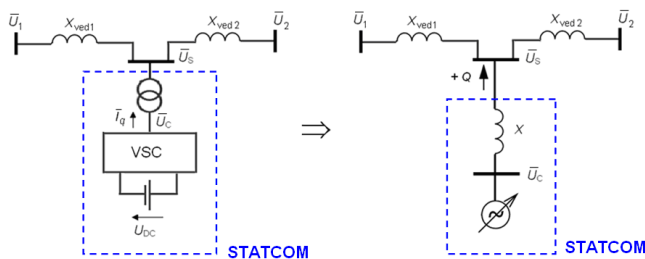


Obr. 3 Príklad SVC zariadenia tvoreného prvkami TSC a TCR

STATCOM (Static Synchronous Compensator). Nedávny vývoj v oblasti elektronickej paralelnej kompenzácie umožnil realizáciu statického synchronného kompenzátora (STATCOM – Static Synchronous Compensator), založeného na princípe trojfázového mostíkového meniča (VSC – Voltage Source Converter).



Obr. 4 Principiálna schéma STATCOM



Obr. 5 Zjednodušená a ekvivalentná schéma STATCOM

V porovnaní s SVC nevyžaduje veľké tlmičky a kondenzátory, takže má menšie nároky na priestor. Jalový výkon je dodávaný alebo absorbovaný pomocou spínacích režimov vlastného meniča. Principiálna, zjednodušená a k nej ekvivalentná schéma systému STATCOM je uvedená na obr. 4 a obr. 5 [10], [11].

ZÁVER

Jedným zo známych spôsobov možného zníženia technických strát v sieťach je optimálna regulácia napätia v ich uzloch. Hlavným zámerom tohto článku bolo matematicky formulovať úlohu

minimalizácie strát činného výkonu reguláciou napätia, popísať algoritmy vhodné na jej riešenie a tiež uviesť prostriedky, ktorými je možné dosiahnuť optimálne napätia v uzloch elektrizačnej sústavy.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-0385-07.

LITERATÚRA

- [1] Momoh, J. A.: Electric Power System Applications of Optimization. New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. 478 s. ISBN 0-8247-9105-3
- [2] Štecha, J.: Optimální rozhodování a řízení. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 242 s.
- [3] Optimization User's Guide, The MathWorks, Inc., 2003.
- [4] Zelinka, I.: Umělá inteligence v problémech globální optimalizace. 1. vyd. Praha: Vydavatelství BEN, 2002. 192 s. ISBN 80-7300-069-5
- [5] Kolcun, M., Beňa, L. Mészáros, A., Kurajda, M.: Nové metódy optimalizácie zaťaženia ES. Výskumná správa k etape 3.5 ŠPVAV: Uplatnenie progresívnych princípov výroby a premien energie. Bratislava, 2006
- [6] Rusnák, Jozef - Beňa, Lubomír - Kolcun, Michal: The usage of SOMA algorithm for the solution of optimisation problems in the electric power system control. In: Zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej. Opole : Politechnika Opolska, 2006. p. 591-596. ISSN 1429-1533.
- [7] Beňa, Lubomír - Rusnák, Jozef: SOMA algoritmus a možnosti jeho použitia na riešenie optimalizačných úloh z oblasti riadenia prevádzky elektrizačnej sústavy. In: Energyspectrum. (2006), p. 1-11. Internet: <http://www.energyspectrum.net/21/cl.pdf> ISSN 1214-7044
- [8] Kolcun, M., Rusnák, J., Hlubeň, D.: Minimalizácia strát v distribučných sústavách. Výskumná správa k etape 5.1 ŠPVAV: Uplatnenie progresívnych princípov výroby a premien energie. Bratislava, 2006
- [9] Kolcun, M. – Griger, V.: Riadenie prevádzky elektrizačnej sústavy. Košice: Mercury-Smékal, 2003, 288 s. ISBN 80-89061-76-1
- [10] Beňa, L.: Využitie špecializovaných zariadení na reguláciu tokov činných výkonov v elektrizačných sústavách. Habilitačná práca. FEI TU v Košiciach, 2009, 84 strán
- [11] Rusnák, J.: Matematická formulácia úlohy minimalizácie strát činného výkonu reguláciou napätia v elektrizačnej sústave a jej riešenie v prostredí programu MATLAB, In: Electric Power Engineering 2005. - Ostrava : VŠB-TU, 2005. - ISBN 8024808420. - 14 p.
- [12] Rusnák, J.: Active power losses minimisation in electrical distribution network, 2004. In: 4. Doktorandská konferencia a ŠVOS TU v Košiciach FEI. - Košice : ETC GRAFO, 2004. - ISBN 8096839594. - S. 91-92.
- [13] Mešter, M. - Hvizdoš, M. - Rusnák, J. - Szathmáry, P. - Vargončík, M.: Analýza elektrizačnej sústavy pomocou programu Eurostag. In: Stabilita elektrizačnej sústavy: Zborník príspevkov. Košice: Equilibria, 2006. s. 29-34. ISBN 80-969224-9-1.
- [14] Bracínik, P.: The optimization of signals transferred from 22 kV lines to dispatching control center by decision tree algorithm, X. International PhD Workshop OWD 2008, Wisla, Poland, 2008, 10, 18. - 21., AFC, str.: 167 - 170, ISBN 83-922242-4-8
- [15] Tůma, J., Rusek, S., Martínek, Z., Chemišinec, I., Goňo, R.: Spolehlivost v elektroenergetice. Conte, Praha, 2006, ISBN 80-239-6483-6
- [16] Daneshjo, Naqib (2003): Modelovanie a simulácia, Strojárstvo. roč. 7, č. 12 (2003), s. 45. ISSN 1335-2938
- [17] Varga, Ladislav - Ilenin, Stanislav - Leščinský, Peter: Prenos a rozvod elektrickej energie. Košice : Mercury - Smékal, 2003. 172 s. ISBN 80-89061-85-0
- [18] Miháľková, Jana: Problém výberu simulačného nástroja pre simulačný projekt. In: Novus scientia 2007: 10. celoštátna konferencia doktorandov strojníckych fakúlt technických univerzít a vysokých škôl s medzinárodnou účasťou: 20.11.2007 ÚVZ Herľany, Košice : TU, 2007. s. 392-396. ISBN 978-80-8073-922-5

Adresy autorov

Daniél Hlubeň, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, daniel.hluben@tuke.sk
Lubomír Beňa, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, lubomir.bena@tuke.sk
Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská republika, michal.kolcun@tuke.sk