

Roman JAKUBČÁK, Ľubomír BEŇA, Miroslav KMEC

Optimalizácia v distribučných sieťach s využitím PSO pomocou SVC

Tento článok je venovaný problematike optimalizácie prevádzky distribučných sietí (DS). Optimalizácia je zameraná na zníženie celkových činných strát v uvažovanej DS. Za týmto účelom bola využitá optimalizačná metóda nazývaná Metóda roja častíc (Particle Swarm Optimization). Taktiež sa uvažuje využitie statického kompenzátora jalového výkonu (SVC). Minimum celkových činných strát v uvažovanej DS je možné dosiahnuť vhodným umiestnením SVC s optimálnym nastavením jeho parametrov. Všetky simulácie boli vykonané v programe Matlab.

Kľúčové slová: optimalizácia, SVC, PSO

I. ÚVOD

Zníženie celkových činných strát v sieti sa zvyčajne vyžaduje, ak hlavným cieľom optimalizácie prevádzky je zníženie nákladov. Určenie celkových činných strát v sieti je závislé od viacerých premenných (napr. hodnoty napätí na transformátoroch) [1]. Tieto premenné je možné vhodne nastaviť tak, aby bol dosiahnutý čo najlepší napäťový profil a dosiahlo sa zníženie toku prúdov vo vedeniach. Prostriedky, ktoré je možné využívať za týmto účelom sú dané každou sieťou zvlášť. Napr. v uvažovanej sieti nie je možné využiť reguláciu napätia pomocou zmeny dodávaného/odoberaného jalového výkonu generátora, nakoľko žiadny nepracuje v danej sieti.

Na druhej strane je možné využiť FACTS zariadenia, ktoré prinášajú nové premenné do optimalizačného procesu. Využitie týchto zariadení ponúka možnosť dosiahnutia lepších výsledkov v optimalizačnom procese.

II. STATICKÝ KOMPENZÁTOR JALOVÉHO VÝKONU

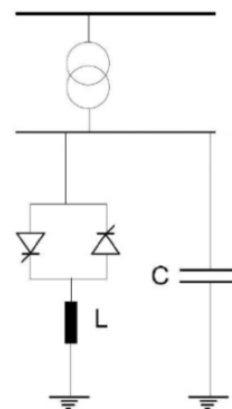
Statický kompenzátor jalového výkonu patrí do skupiny paralelných regulátorov. Ide o paralelne zapojený statický zdroj, alebo spotrebič jalového výkonu, ktorého úlohou je regulovať určité parametre v sieti (najčastejšie napätie v uzle). Pozostáva z tyristorovo riadenej alebo spínanej tlmivky, kondenzátora alebo ich kombinácie [3].

Tyristorovo riadená tlmivka – ide o paralelne zapojenú tyristorovo riadenú tlmivku, ktorej reaktancia sa mení spojivým spôsobom v závislosti od otvorenia tyristorových ventilov.

Tyristorovo spínaná tlmivka – ide o paralelne zapojenú tyristorovo spínanú tlmivku, ktorej reaktancia sa mení skokovitým spôsobom a to z nulovej hodnoty na maximálnu, v závislosti od tyristorových ventilov, ktoré v tomto prípade sú buď úplne uzatvorené, alebo úplne otvorené.

Tyristorovo spínaný kondenzátor – ide o paralelne zapojený, tyristorovo spínaný kondenzátor, ktorého reaktancia sa mení skokovitým spôsobom obdobne ako u tyristorovo spínanej tlmivky[2].

Model SVC pozostáva zo zdroja jalového výkonu, ktorý je zapojený do zvoleného uzla siete. Tento zdroj je schopný dodávať/odoberať jalový výkon do/zo siete, čím je schopný ovplyvňovať napätie v uzloch siete. Pri výpočtoch sa tento model prejavuje zmenou odoberaného, resp. dodávaného jalového výkonu v uzle, ktorom je SVC zapojené.



Obr. 1. Statický kompenzátor jalového výkonu

Inštaláciou SVC do jedného, alebo viacerých vhodne zvolených uzlov siete je možné dosiahnuť stabilizáciu a lepšiu regulovateľnosť napätia, zníženie strát spôsobených prenosom, tlmenie oscilácií a zvýšenie tlmenia menších porúch, zvýšenie prenosovej schopnosti už existujúcich vedení a zvýšenie limitov prenosovej stability.

III. METÓDA ROJA ČASTÍC

Metóda roja častíc (PSO) je stochastická optimalizačná metóda, inšpirovaná spoločenským správaním (napr. krdľom vtákov). PSO zdieľa veľa podobností s evolučnými výpočtovými metódami ako genetické algoritmy (GA). Systém je inicializovaný s populáciou náhodných prípustných riešení a hľadanie optima prebieha aktualizáciou generácií riešení. Avšak na rozdiel od GA, PSO v sebe nezahŕňa evolučné operátory ako kríženie a mutácia.

V PSO sa každé možné riešenie nazýva časticou, ktorá prelietava cez problémový priestor. Častice menia svoje pozície pri prelete viacrozmerným priestorom, až kým nenarazia na pozíciu, v ktorej sa ich pozícia relatívne nemení, alebo sa prekročí niektoré z výpočtových obmedzení. PSO kombinuje sociálny model s modelom poznávacím. Sociálny model navrhuje, aby jednotlivé častice ignorovali ich vlastné skúsenosti a správali sa podľa ich susedov. Na druhej strane poznávací model považuje jednotlivca za izolovanú bytosť. Častice modifikujú ich pozície na základe týchto dvoch modelov.

Každá častica sleduje jej súradnice v problémovom priestore, ktoré sú spojené s najlepším riešením, ktoré bolo doposiaľ dosiahnuté. Hodnota cieľovej funkcie každej častice je uchovávaná. Táto hodnota

sa nazýva *pbest* a je to najlepšia dosiahnutá hodnota danou časticou. Ďalšia hodnota, ktorá je sledovaná je najlepšia hodnota dosiahnutá vzdialenou akoukoľvek susediacou časticou. Táto pozícia sa nazýva *lbest*. Ak častica berie celú populáciu ako jej susedov, najlepšia hodnota je globálne najlepšia a nazýva sa *gbest*. Koncept PSO pozostáva v tom, že v každom kroku sa mení rýchlosť každej častice voči svojmu umiestneniu *pbest* a *lbest*[4].

Základné pojmy vyskytujúce sa pri PSO sú:

- Častica $X(i)$, je to kandidát na riešenie, ktorý je reprezentovaný pomocou k rozmerného vektora reálnych čísel, kde k je počet optimalizovaných parametrov, pri iterácii i . J -ta častica $x(i,j)$ môže byť opísaná ako:

$$X_j(i) = [x_{j,1}(i); x_{j,2}(i); \dots; x_{j,k}(i); \dots; x_{j,d}(i)](1)$$

Kde x sú optimalizované parametre, $x_k(i,j)$ je k -ty optimalizovaný parameter v j -tom kandidátovi, d reprezentuje počet riadených premenných.

- Populácia, je súbor n častíc pri iterácii i .

$$pop(i) = [X_1(i), X_2(i), \dots, X_n(i)]^T(2)$$

Kde n reprezentuje počet kandidátov na riešenie.

- Roj, je zdanlivo neorganizovaná populácia pohybujúcich sa častíc, s tendenciou zhlukovať sa. U každej častice sa zdá, že sa pohybuje v náhodnom smere.
- Rýchlosť častice $V(i)$, rýchlosť pohybujúcej sa častice je reprezentovaná d rozmerným vektorom reálnych čísel, pri iterácii i . J -ta častica $V_j(i)$ môže byť opísaná ako:

$$V_j(i) = [v_{j,1}(i); v_{j,2}(i); \dots; v_{j,k}(i); \dots; v_{j,d}(i)](3)$$

Kde $v_{j,k}(i,j)$ je zložka rýchlosti j -tej častice s rešpektovaním k -teho rozmeru.

- Zotrvačná hmotnosť $w(i)$, je riadený parameter, používaný k riadeniu vplyvu predchádzajúcej rýchlosti na súčasnú rýchlosť. Ovplyvňuje kompromis medzi schopnosťou častice robiť globálny a lokálny prieskum. Pre počiatočné fázy procesu hľadania veľká zotrvačnosť zlepšuje globálny prieskum. Táto zotrvačnosť sa znižuje v posledných fázach procesu, pre lepší lokálny prieskum. Preto sa zotrvačný faktor znižuje lineárne počas výpočtu. Vo všeobecnosti je možné ho popísať ako:

$$W = W_{max} - \frac{(W_{max} - W_{min})}{iter_{max}} * iter(4)$$

Kde $iter_{max}$ je maximálny počet iterácií, $iter$ je aktuálne číslo iterácie.

- Individuálne najlepšia hodnota $X^*(i)$, počas pohybu častice prehladávaným priestorom, častica porovnáva svoju hodnotu cieľovej funkcie v aktuálnej pozícii s najlepšou jej dosiahnutou hodnotou. Najlepšia pozícia je spojená s najlepšou hodnotou cieľovej funkcie, ktorá bola dosiahnutá a tá sa nazýva individuálne najlepšou hodnotou $X^*(i)$. Pre každú časticu v roji môže byť stanovená $X^*(i)$ a počas prehladávaného priestoru sa táto hodnota aktualizuje. Pre j -tu časticu je možné ju vyjadriť ako:

$$X_j^*(i) = [x_{j1}^*(i), x_{j2}^*(i), \dots, x_{jd}^*(i)]^T(5)$$

Pri riešení procesu minimalizácie s iba jednou cieľovou funkciou f , individuálne najlepšia hodnota j -tej častice $X_j^*(i)$ je aktualizovaná kedykoľvek ak platí $f(X_j^*(i)) < f(X_j^*(i-1))$. Ak podmienka nie je splnená, individuálne najlepšia hodnota j -tej častice sa nemení a ostáva hodnota z predchádzajúcej iterácie.

- Globálne najlepšia hodnota $X^{**}(t)$, predstavuje najlepšiu pozíciu, ktorá bola doposiaľ dosiahnutá medzi všetkými individuálnymi najlepšími hodnotami.
- Stop kritérium, proces výpočtu sa zastaví kedykoľvek ak jedno z nasledujúcich kritérií je splnené:
 - a) počet iterácií od poslednej zmeny najlepšieho riešenia je väčší ako vopred stanovená hodnota,
 - b) počet iterácií dosiahol maximálny dovolený počet.

V PSO algoritme, populácia má n častíc, ktoré reprezentujú kandidátov na riešenie. Každá častica je k -rozmerný vektor reálnych čísel, kde k reprezentuje počet optimalizovaných parametrov. Preto každý optimalizovaný parameter reprezentuje rozmer problémového priestoru. Na začiatku výpočtu sa vytvorí náhodne n častíc, z ktorých každá sa považuje za možné riešenie. Každá častica v počiatočnej populácii sa použije na určenie hodnoty cieľovej funkcie f . Ak kandidáti na riešenie poskytnú možné uskutočniteľné riešenie (t.j. všetky obmedzenia sú splnené), dochádza k aktualizácii poradového čísla iterácie. Následne dochádza k výpočtu cieľovej funkcie a k aktualizácii rýchlosti. Využívajúc individuálnu a globálnu najlepšiu hodnotu, rýchlosť j -tej častice v k -tom rozmere sa aktualizuje podľa vzťahu:

$$V(k, j, i + 1) = w * V(k, j, i) + C_1 * rand * (pbestx(j, k) - x(k, j, i)) + C_2 * rand * (gbestx(k) - x(k, j, i))(6)$$

Kde i reprezentuje poradové číslo iterácie, j poradové číslo častice, k je k -ta riadiaca premenná, w je faktor zotrvačnej hmotnosti, c_1 a c_2 sú akceleračné konštanty, $rand()$ je nemenné náhodné číslo v rozsahu od 0 do 1, $V(k, j, i)$ je rýchlosť častice j v i -tej iterácii, $x(k, j, i)$ je súčasná pozícia j -tej častice v i -tej iterácii. Následne sa kontrolujú rýchlostné limity. Ak sú prekročené, nastavujú sa na správnu hodnotu. Druhý výraz v uvedenej rovnici reprezentuje poznávaciu časť PSO, kde častica mení svoju rýchlosť na základe jej vlastného myslenia a pamäte. Tretí výraz reprezentuje sociálnu časť PSO, kde častica mení svoju rýchlosť na základe sociálno – psychologicko adaptácie znalostí. Po tomto kroku nasleduje aktualizácia pozícií. Tá je založená na aktualizácii rýchlostí, každá častica mení jej pozíciu podľa vzťahu:

$$x(k, j, i + 1) = x(k, j - 1, i) + v(k, j, i)(7)$$

Ďalším krokom je aktualizácia individuálne najlepšej hodnoty. Každá častica sa vyhodnocuje a je aktualizovaná podľa aktualizácie polohy. Nasleduje hľadanie minimálnej hodnoty v individuálne najlepších, pri posudzovaní najlepších riešení, ktoré boli dosiahnuté v každej iterácii a boli považované za minimum. Na záver sa kontroluje stop kritérium, ak je splnené výpočet sa ukončí, ak nie je, aktualizuje sa poradové číslo iterácie a všetko sa opakuje. Celý proces je zhrnutý v uvedenom vývojovom diagrame.



Obr. 2. Vývojový diagram PSO.

IV. METÓDA VÝPOČTU

Hlavnou úlohou je určiť najvhodnejšie umiestnenie SVC a nastavenie jeho optimálnych parametrov. Tento cieľ je dosiahnutý pomocou minimalizácie cieľovej funkcie. Nakoľko zaťaženie v sieti nie je konštantné, ale mení sa v čase (každú hodinu) je potrebné pre každý časový úsek zvlášť určiť najvhodnejšie umiestnenie SVC spolu s nastavením optimálnych parametrov zariadenia. Optimalizácia uvažovanej siete sa robí pre časový úsek 7 dní, t.j. na konci tohto úseku dostaneme 168 výsledkov. Následne sa zistí, v ktorom uzle siete bolo SVC zariadenie najčastejšie zapojené a celý výpočet sa opakuje, ale v tomto prípade už nie je možné meniť umiestnenie zariadenia. To je už pevne dané a je zapojené do uzla, v ktorom bolo najčastejšie zapojené v prvom prípade. Pomocou druhého výpočtu sa určuje najvhodnejšie nastavenie parametrov SVC zariadenia, s cieľom dosiahnuť minimum celkový činný strát v uvažovanej sieti.

Počas optimalizácie sa uvažujú tieto obmedzenia:

1. napätové obmedzenia – max. dovolená odchýlka je 5% na oboch napätových hladinách (110 kV, 22 kV),
2. max./min. možná odbočka na regulačnom transformátore – uvažuje sa regulácia napätia na primárnej strane. Regulačný rozsah u všetkých uvažovaných regulačných transformátoroch je $110 \pm 8 \times 2\% / 23 \text{ kV}$,
3. maximálny dovolený tok prúdu daným vedením,
4. max./min. možný dodávaný/odoberaný jalový výkon pomocou SVC zariadenia nesmie byť väčší ako 1 MVar.

Všetky vyššie uvedené obmedzenia sú zahrnuté v cieľovej funkcii vo forme penalizácií. Aby bolo možné určiť vplyv optimalizácie s a bez použitia SVC zariadenia, uvažovali sa tieto tri prípady:

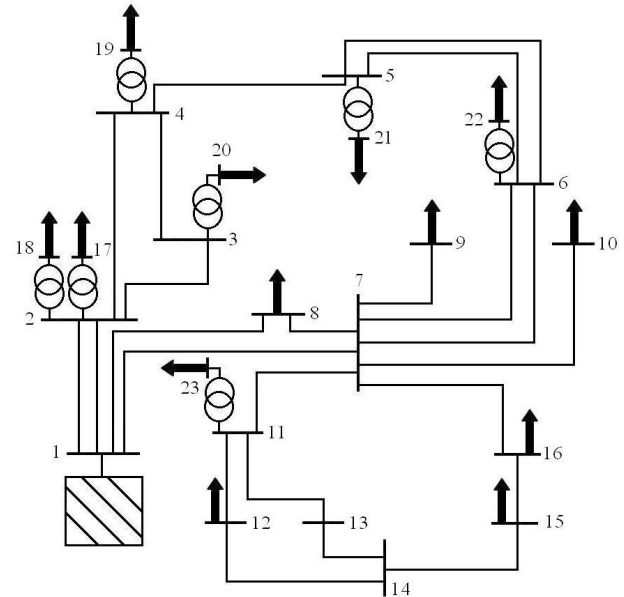
Prípád 1 – určenie celkových činných strát pred optimalizáciou.

Prípád 2 – určenie celkových činných strát po optimalizácii bez využitia SVC zariadenia.

Prípád 3 – určenie celkových činných strát po optimalizácii s využitím SVC.

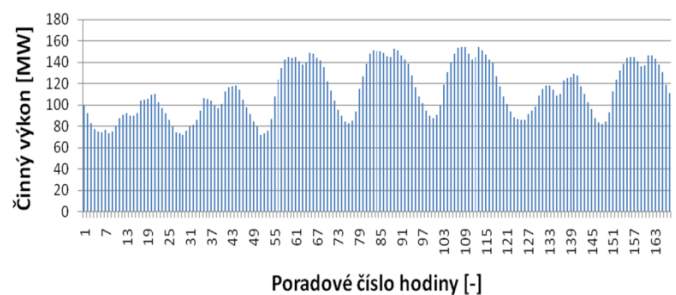
V. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

Uvažujeme 23 uzlovú DS z obr. 2. Prvých 16 uzlov sa nachádza na napätovej hladine 110 kV, ostatné na napätovej hladine 22 kV. Výsledky všetkých simulácií sú zosumarizované v nasledujúcich grafoch.



Obr. 2. 23 uzlová distribučná sieť.

Na obr. 3 je zobrazený priebeh zmeny celkového odoberaného činného výkonu počas uvažovaných 7 dní.

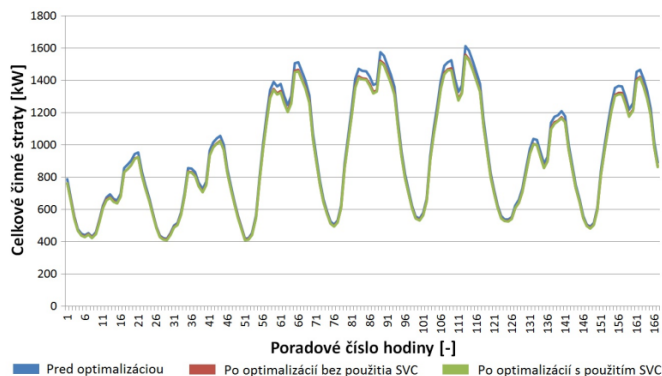


Obr. 3. Odber celkového činného výkonu počas 7 dní.

Ako už bolo spomenuté, uvažujú sa tri prípady. Zmeny celkových činných strát v sledovanom období pre všetky tri prípady sú zobrazené na obr. 4. Ako je jasné z uvedeného priebehu, rozdiely medzi prípadom 2 a 3 nie sú veľké. Môžeme povedať, že vplyv SVC je takmer zanedbateľný, čo sa týka zníženia celkových činných strát v uvažovanej DS. Z tohto dôvodu je využitie SVC zariadenia v tejto sieti len za týmto účelom otáznе.

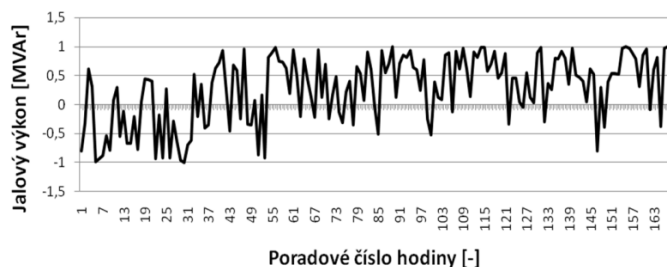
TABUĽKA I
Celkové činné straty

	dP [kW/h]	[%]
Prípád 1	157871	100,00
Prípád 2	153180	97,03
Prípád 3	152462	96,57



Obr. 4. Celkové činné straty pre všetky uvažované prípady.

Na poslednom grafe je zobrazená zmena dodávaného/odoberaného jalového výkonu SVC zariadením v sledovanom období. Ako je možné vidieť, vo väčšine prípadov bol prevádzkový rozsah SVC zariadenia dostatočný (± 1 MVar).



Obr. 5. Jalový výkon dodávaný/odoberaný SVC zariadením.

VI. ZÁVER

Ako bolo ukázané v tomto článku, pomocou SVC je možné znížiť celkové činné straty v uvažovanej sieti. Na druhej strane nedošlo k výraznému zníženiu a nakoľko sú finančné investície do SVC zariadenia vysoké, využitie tohto zariadenia v uvažovanej DS iba za

týmto účelom je otázne. Finančná stránka veci nebola predmetom tohto článku. S ohľadom na uvedené skutočnosti, v tomto konkrétnom prípade je oveľa efektívnejšie znížiť celkové činné straty v sieti iba s využitím prostriedkov, ktoré sa už v sieti nachádzajú (regulačné transformátory), t.j. bez využitia SVC.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied projektom VEGA 1/0388/13.

LITERATÚRA

- [1] MOMOH, J.: ElectricPowerSystemApplicationofOptimization. HowardUniversity Washington, D.C., 2001. 478 s. ISBN 0-8247-9105-3.
- [2] MATHUR, R. M., VARMA, R. K.: "Thyristor-based FACTS controllersforelectricaltransmissionsystems," InstituteofElectrical and Electronic Engineers,2002, 493 s, ISBN 0-471-20643-1.
- [3] JOHNS, A. T. - TER-GAZARIAN, A. - WARNE, F.: Flexible AC transmission systems (FACTS). The Institution of Electrical Engineers, 1999, 592 pp, ISBN 0-85296-771-3
- [4] SOLIMAN, S. - MANTAWY, A.: ModernOptimizationTechniqueswithApplications in ElectricPowerSystems. Universityof Florida, 2011. 426 s. ISBN 978-1-4614-1751-4.

ADRESY AUTOROV

Ing. Roman Jakubčák, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Roman.Jakubcak@tuke.sk

doc. Ing. Ľubomír Beňa, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Lubomir.Bena@tuke.sk

Ing. Miroslav Kmec, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Miroslav.Kmec@tuke.sk