

Roman Jakubčák, Miroslav Kmec, Ľubomír Beňa

Využitie evolučných výpočtových metód v optimalizácii prevádzky elektrizačných sústav

Tento článok sa zaoberá možnosťou využitia dvoch evolučných výpočtových metód v optimalizácii prevádzky elektrizačných sústav. Genetické algoritmy a metóda roja častíc boli navzájom porovnávané pri minimalizácii celkových činných strát v uvažovanej sieti. Zároveň sa posudzoval vplyv dvoch FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) zariadení na celkové činné straty v sieti. Všetky simulácie boli vykonané v programe Matlab.

Kľúčové slová: optimalizácia, genetické algoritmy, metóda roja častíc, FACTS

Article discusses the use of two evolutionary computing techniques to optimize the power system operation. Genetic algorithm and particle swarm optimization method were compared with each other to minimizing the total active power losses in considered network. It also assessed the impact of two FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) devices in the total active power in the network. All simulation were performed in program MATLAB. (Use of evolutionary computing techniques to optimize the power system operation)

Keywords: optimization, genetic algorithm, particle swarm optimization, FACTS

I. ÚVOD

V súčasnosti je trend neustáleho zvyšovania požiadaviek na riadenie elektrizačných sústav (ES). Tento tlak na riadenie ES je výsledkom neustáleho sa zvyšovania dopytu po elektrickej energii. Tento trend, spolu s liberalizáciou trhu s elektrinou ma za následok vznik problémov v riadení ES a taktiež vedie k ohrozeniu stability týchto sústav.

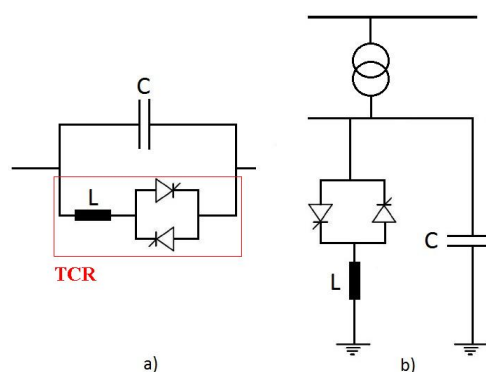
Výsledkom tohto je snaha čoraz viac využívať FACTS zariadenia, ktoré sú schopné riadiť prevádzkové parametre v ES. Tieto zariadenia sa využívajú za účelom riadenia tokov výkonov, zvýšenie prenosovej schopnosti už existujúcich vedení, zvýšenie napät'ovej stability, tlmenie oscilácií výkonov a pod. Taktiež ich je možné v určitých prípadoch pri vhodnom zvolení ich parametrov využiť pri znižovaní celkových činných strát v ES. Aby ich bolo možné využiť za týmto účelom, je nutné vhodne zvoliť ich umiestnenie a taktiež ich parametre. Za týmto účelom boli využité dve evolučné výpočtové metódy a to genetické algoritmy a metóda roja častíc. Tieto metódy je vhodné použiť v prípade, ak prehľadávaný priestor je veľký a nelineárny.

II. FACTS ZARIADENIA

Flexible alternating current transmission system (FACTS) zariadenia sú zariadenia, ktoré sú definované ako striedavé prenosové systémy na báze výkonovej elektroniky a iných statických regulátorov. 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].

Thyristor controlled series capacitor (TCSC) – patrí do skupiny sériových regulátorov. Je to kompenzátor, ku ktorému je paralelne pripojená tyristorom riadená tlmivka (TCR). Je jedným z FACTS zariadení, ktoré sa používajú predovšetkým na reguláciu tokov činného výkonu v ES a zvýšenie prenosovej schopnosti vedení.

Static var compensator (SVC) – ide o paralelne zapojený statický zdroj alebo spotrebič jalového výkonu, ktorého úlohou je regulovať určité parametre v sieti (najčastejšie napätie v uzle). SVC používa za účelom dodávky/odberu jalového výkonu a regulácie napätia. Princípiálne je zložený z tyristorovo riadenej alebo spínanej tlmivky, kondenzátora alebo ich kombinácie [3].



Obr. 1. a) TCSC b) SVC.

III. EVOLUČNÉ VÝPOČTOVÉ METÓDY

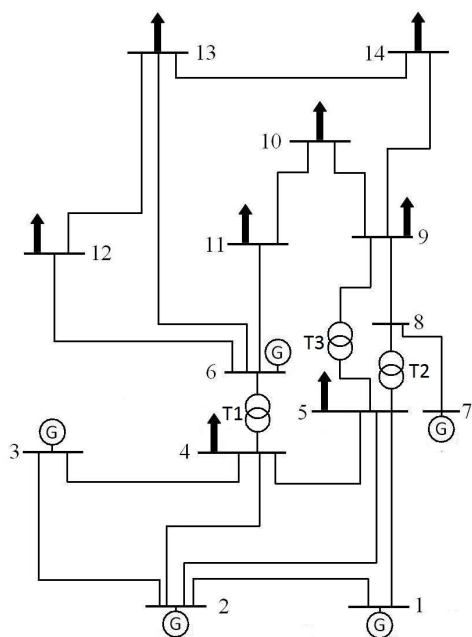
Vývoj výpočtovej techniky a zvyšujúca sa zložitosť riešenia optimalizačných problémov viedla k potrebe aplikácií špecializovaných programovacích techník pre rozsiahle problémy. Tie zahŕňajú dynamické programovanie, lagrangove multiplikátory, heuristiké techniky a evolučné techniky ako genetické algoritmy. Niekoľko heuristických nástrojov bolo vyvinutých, aby uľahčili riešenie optimalizačných problémov, ktoré boli v minulosti veľmi ťažko riešiteľné alebo dokonca neriešiteľné. Tieto nástroje zahŕňajú evolučné výpočtové techniky, simulované žihanie, tabu prehľadávanie, roje častíc a pod.

Genetické algoritmy – Genetický algoritmus (GA) je vyhľadávaci algoritmus založený na prirodzenom výbere. Funkcie GA sú odlišné od iných vyhľadávacích techník vo viacerých aspektoch. Algoritmus je viacestný, hľadajúci viacero vrcholov paralelne a teda znižuje možnosť uviaznutia v lokálnom minime. Okrem toho GA pracujú s kódovaním parametrov namiesto parametrov samotných. To uľahčuje genetickému operátoru vyvinúť sa z existujúceho stavu do ďalšieho pri minime vykonávaných výpočtoch. GA potrebuje vyhodnotiť cieľovú funkciu, aby nasmeroval svoje hľadanie.

Metóda roja častíc – Metóda rojov častíc (Particle swarm optimization (PSO)) je nová metodika v evolučných výpočtových metódach. Metóda sa trochu podobá na GA v tom, že systém je inicializovaný s populáciou náhodných riešení. Avšak na rozdiel od iných algoritmov každému potenciálnemu riešeniu je pridaná náhodná rýchlosť, ktorou potom prechádza problémovým priestorom. Bolo zistené, že táto metóda je extrémne efektívna pri riešení širokého rozsahu problémov, okrem toho je táto metóda veľmi ľahko aplikovateľná a daný problém vie veľmi rýchlo nájsť riešenie [2].

IV. FORMULÁCIA ÚLOHY

Hlavným cieľom optimalizačného procesu je zníženie celkových činných strát v ES. V optimalizačnom procese je teda nutné určiť najvhodnejšie nastavenie regulačných prvkov siete (odbočky na regulačných transformátoroch, dodávané/odoberané jalové výkony generátorov) a v prípadoch, keď sa uvažuje použitie FACTS zariadenia, tak je nutné určiť aj jeho umiestnenie a optimálne parametre. Optimalizačný proces bol aplikovaný na sieť z obr. 2. Sieť pozostáva zo 14 uzlov, pričom je rozdelená na dve napäťové hladiny 400 kV (uzly č. 1 - 5) a 220 kV (uzly č. 6 - 14). Tieto dve napäťové hladiny sú navzájom prepojené tromi regulačnými transformátormi 400/231 kV $\pm 11 \times 1,13$ %. U všetkých generátorov sa uvažoval regulačný rozsah dodávaného/odoberaného jalového výkonu ± 50 MVar (okrem generátora v uzle č.1 – bilančný uzol).



Obr. 2. 14 - uzlová sieť.

V procese optimalizácie sa uvažovali tieto prevádzkové obmedzenia:

1. Hodnoty napätí v uzloch – uvažuje sa maximálna dovolená odchýlka 5% na napäťovej hladine 400 kV aj 220 kV.
2. Max./min. možný jalový výkon dodávaný generátormi do siete.
3. Max./min. hodnoty nastavených odbočiek na transformátoroch. Uvažovala sa regulácia odbočiek na sekundárnej strane transformátorov.
4. Tepelné obmedzenia všetkých prenosových vedení, t.j. maximálny tok prúdu daným vedením nesmie prekročiť maximálnu možnú hodnotu. Na napäťovej hladine 220 kV sa uvažovalo použitie vodiča 1 x 350 AlFe s maximálnym dovoleným prúdom 720 A, na napäťovej hladine 400 kV sa uvažoval vodič 3 x 350 AlFe s maximálnym dovoleným prúdom 2000 A.
5. Max. možný jalový výkon dodávaný/odoberaný SVC zariadením. Uvažovala sa hodnota $-50 \leq Q_{SVC} \leq 50$ [MVar].
6. TCSC zariadenie môže odkompenzovať maximálne 60 % pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia.

Obmedzenia sú zahrnuté v cieľovej funkcii vo forme penalizácií. Ak nedôjde k porušeniu žiadneho z obmedzení, v takomto prípade hodnota penalizačnej funkcie je rovná 0. V prípade porušenia podmienok, jej hodnota je rovná 10 (hodnota bola zvolená tak, aby nedošlo k stavu kedy by bolo výhodnejšie porušiť prevádzkové obmedzenia a namiesto toho znížiť celkové činné straty v sieti, t.j. musí byť dostatočne vysoká), a tým dochádza k navýšeniu cieľovej funkcie. Takéto riešenie je v procese optimalizácie nevyhovujúce a takýmto spôsobom je možné potom zabezpečiť, aby výsledné riešenie spĺňalo všetky obmedzenia.

Optimalizácia bola vykonávaná nasledujúcim spôsobom:

- minimalizácia celkových činných strát v ES bez použitia FACTS zariadení (*Prípad A* – pomocou genetického algoritmu, *Prípad B* – pomocou PSO).
- minimalizácia celkových činných strát v ES s využitím TCSC zariadenia (*Prípad C* – pomocou genetického algoritmu, *Prípad D* – pomocou PSO).
- minimalizácia celkových činných strát v ES s využitím SVC zariadenia (*Prípad E* – pomocou genetického algoritmu, *Prípad F* – pomocou PSO).
- minimalizácia celkových činných strát v ES s využitím SVC a TCSC zariadenia (*Prípad G* – pomocou genetického algoritmu, *Prípad H* – pomocou PSO), pričom konkrétne miesta inštalácie FACTS zariadení boli určené výpočtom v predchádzajúcom prípade.
- minimalizácia celkových činných strát v ES s využitím SVC a TCSC zariadenia (*Prípad I* – pomocou genetického algoritmu, *Prípad J* – pomocou PSO). V týchto prípadoch miesta inštalácie zariadení bolo nutné určiť výpočtom.

Na záver boli výsledky oboch metód navzájom medzi sebou porovnávané.

Hľadanými premennými v optimalizačnom procese boli:

- hodnoty nastavených odbočiek na regulačných transformátoroch, pričom tieto hodnoty boli zadané v programe vo forme matice, kde prvý stĺpec reprezentoval hodnotu nastavenej odbočky a druhý stĺpec reprezentoval konkrétnu hodnotu nastaveného napätia na sekundárnej strane transformátora.

- hodnoty dodávaných/odoberaných jalových výkonov generátorov. Nehľadá sa konkrétna hodnota ale zmena (± 50 MVar), o koľko sa zmení dodávaný/odoberaný jalový výkon generátorov oproti pôvodnej hodnote.
- umiestnenie FACTS zariadenia/zariadení a jeho/ich optimálne parametre. U TCSC zariadenia sa hľadá vedenie a u SVC sa hľadá uzol.

V prvých dvoch prípadoch bolo celkovo 7 hľadaných premenných (3 premenné reprezentovali odbočky na transformátoroch, 4 premenné reprezentovali hodnoty dodávaných/odoberaných jalových výkonov generátorov). V prípadoch, kde sa uvažovalo použitie len jedného FACTS zariadenia sa hľadálo 9 premenných, kde jedna reprezentovala miesto inštalácie FACTS zariadenia, druhá optimálny parameter zariadenia. V prípadoch kde sa uvažovalo použitie dvoch FACTS zariadení a miesta inštalácie boli známe sa hľadálo 9 premenných (obe premenné reprezentovali optimálne parametre zariadení), v prípadoch keď sa uvažovalo použitie dvoch FACTS zariadení a miesta inštalácie neboli známe sa hľadálo 11 premenných (2 premenné reprezentujú miesta inštalácie zariadení, 2 premenné reprezentujú optimálne parametre zariadení).

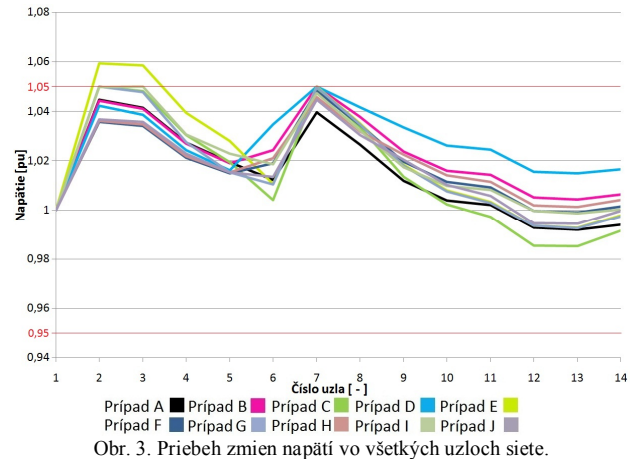
TABUĽKA I
Výroba/spotreba výkonov v jednotlivých uzloch siete

Č. uzla	Výroba/Spotreba	
	P [MW]	Q [MVar]
1	bilančný uzol	
2	200	50
3	200	50
4	-200	-100
5	-200	-100
6	200	50
7	200	50
8	0	0
9	-50	-25
10	-50	-25
11	-100	-50
12	-100	-50
13	-100	-50
14	-50	-25

V tab. I kladné hodnoty reprezentujú výrobu, záporné hodnoty odber činného výkonu v jednotlivých uzloch siete.

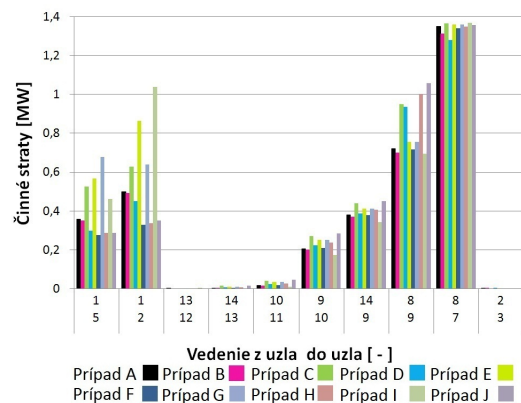
V. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Výsledky všetkých simulácií sú uvedené v nasledujúcich grafoch a tabuľkách. Na obr. 3 sú zobrazené hodnoty napätí vo všetkých uzloch siete pre všetky uvedené prípady. Ako je jasne vidieť z grafu, v jednom z prípadov sa GA (Prípady E) nepodarilo v optimalizačnom procese splniť prevádzkové obmedzenia a napätia v uzloch č. 2 a č. 3 prekročili povolenú hranicu.

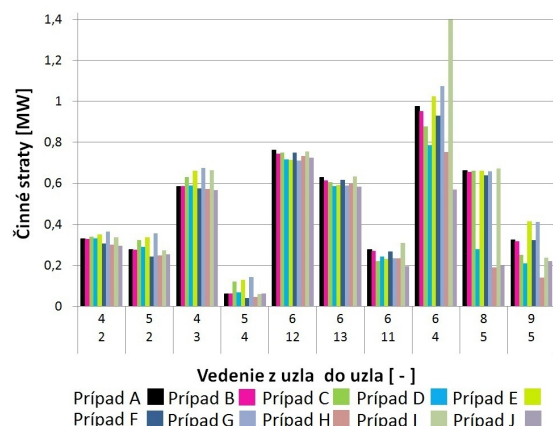


Obr. 3. Priebeh zmien napätí vo všetkých uzloch siete.

Na obr. 4 a obr. 5 sú zobrazené činné straty pre všetky vedenia a transformátory v sieti. Z grafu je jasne vidieť ako sa v jednotlivých prípadoch menili činné straty na vedeniach a transformátoroch, v závislosti od zmien nastavených odbočiek na regulačných transformátoroch, dodávaných/odoberaných jalových výkonov generátorov, od druhu použitého FACTS zariadenia, od počtu použitých FACTS zariadení a taktiež od zmeny použitej optimalizačnej metódy.



Obr. 4. Činné straty vo všetkých vedeniach pre všetky uvažované prípady.



Obr. 5. Činné straty vo všetkých vedeniach pre všetky uvažované prípady.

V tab. II a tab. III sú zobrazené zmeny nastavených odbočiek na regulačných transformátoroch, zmeny umiestnenia jednotlivých FACTS zariadení a taktiež rozdiely v nastavení parametrov FACTS zariadení v závislosti od druhu použitej optimalizačnej metódy pre

všetky uvažované prípady (*Prípady A - J*). U transformátorov uvedená číslo reprezentuje číslo nastavenej odbočky (od 1 – 23), u generátorov hodnota jalového výkonu definuje zmenu oproti pôvodne nastavenej hodnote (tab. I), v prípade použitia TCSC zariadenia je uvedené, medzi ktorými dvoma uzlami je zariadenie nainštalované, hodnota X_L predstavuje hodnotu pozdĺžnej reaktancie vedenia už po odkompenzovaní časti indukčnej reaktancie TCSC zariadením (*Prípad C – 0,8, Prípad D – 0,4, Prípad G – 0,5, Prípad H – 0,4, Prípad I – 0,8, Prípad J – 0,4* násobok pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia), v prípade použitia SVC zariadenia je v tabuľke uvedené číslo uzla, kde je zariadenie nainštalované a taktiež hodnota dodávaného/odoberaného jalového výkonu. Časy uvedené v tabuľkách predstavujú dobu potrebnú na výpočet v sekundách.

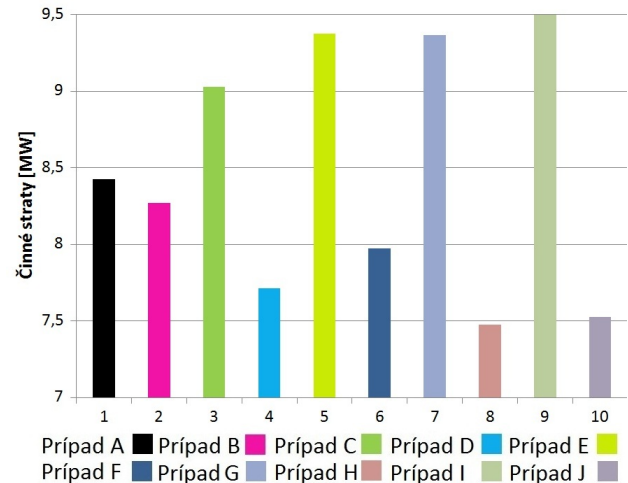
TABUĽKA II
Nastavenie regulačných prvkov siete pre prípady A - F

	A	B	C	D	E	F
T1 [-]	8	9	7	10	8	9
T2 [-]	8	9	9	10	8	9
T3 [-]	8	9	8	10	8	9
G2 [MVar]	-50	-49,9	-22,2	-49,9	0,2	-49,9
G3 [MVar]	-50	-49,9	-19,6	-49,9	-3,6	-49,9
G6 [MVar]	50	50,0	26,1	50,0	9,9	49,9
G7 [MVar]	-12,2	-15,9	1,8	-38,7	0,3	-7,3
vedenie [-]	-	-	1 - 5	8 - 9	-	-
XI [Ω]	-	-	23,4	3,5	-	-
č.uzla [-]	-	-	-	-	12	2
SVC [MVar]	-	-	-	-	10,1	-50
Čas [s]	107	63	102	69	127	72

TABUĽKA III
Nastavenie regulačných prvkov siete pre prípady G - J

	G	H	I	J
T1 [-]	8	9	9	8
T2 [-]	9	9	8	9
T3 [-]	9	9	8	9
G2 [MVar]	-4,1	-49,9	-0,1	-50,0
G3 [MVar]	5,7	-49,9	0,9	-50,0
G6 [MVar]	0,6	50,0	6,1	50,0
G7 [MVar]	0,5	-6,4	0,8	-4,6
vedenie [-]	1 - 5	8 - 9	1 - 2	8 - 9
XI [Ω]	16,4	3,5	46,2	3,5
č.uzla [-]	12	2	12	2
SVC [MVar]	11,1	-50	3	-50
Čas [s]	107	63	102	69

Na obr. 6 sú zobrazené celkové činné straty v sieti pre všetky uvažované prípady. Ako je vidieť z grafu, najnižšie celkové činné straty boli v prípade využitia SVC a TCSC zariadenia, pričom optimalizačný problém bol riešený metódou PSO. Výsledky v uvedenom grafe taktiež ukazujú na skutočnosť, že vo všetkých prípadoch použitia metódy PSO boli dosiahnuté lepšie výsledky, než v prípadoch použitia GA. U GA sa dokonca v prípadoch použitia FACTS zariadení ani nepodarilo znížiť celkové činné straty, naopak celkové činné straty v uvažovanej sieti boli vyššie než v prípade bez použitia FACTS zariadení. Tento výsledok poukazuje na to, že GA uviazol v lokálnom minime. V prípade E dokonca neboli pri použití GA dodržané ani prevádzkové obmedzenia v uvažovanej sieti (hodnoty napätí v uzloch).



Obr. 6. Celkové činné straty.

VI. ZÁVER

Tento článok sa zaoberá porovnaním dvoch evolučných výpočtových metód pri riešení optimalizačného problému v ES. Ako bolo preukázané v článku, metóda PSO sa javí ako vhodnejšia na riešenie tohto druhu problému, nakoľko je odolnejšia voči uviaznutiu v lokálnom minime oproti metóde GA. Stojí za zváženie ešte možnosť preformulovať zadanie údajov do programu v snahe vyhnúť sa skokovej zmene napätia u regulačných transformátorov a umožniť plynulú zmenu pri riešení optimalizačného procesu. V tomto prípade ale vzniká nový problém a to skutočnosť, že po vyriešení takto zadefinovanej úlohy je potrebné nastaviť najbližšie možnú (skutočnú) hodnotu napätia a v tomto bode môže dôjsť k porušeniu z niektorých z prevádzkových obmedzení (napätie v uzloch siete), nakoľko v optimalizačnom procese je snahou sa priblížiť k maximálnemu možnému stavu, ktorý ešte tieto obmedzenia spĺňa a následná zmena napätia už môže spôsobiť porušenie prevádzkových obmedzení. Doba potrebná na výpočet bola vo všetkých uvažovaných prípadoch u PSO metódy kratšia.

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] 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] SOLIMAN, S. – MANTAWY, A.: Modern Optimalization Techniques with Applications in Electric Power Systems. University of Florida, 2011. 426 s. ISBN 978-1-4614-1751-4
- [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.

ADRESY AUTOROV

Ing. Roman Jakubčák, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská republika, Roman.Jakubcak@tuke.sk

doc. Ing. Ľubomír Beňa, PhD., Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská republika, Lubomir.Bena@tuke.sk

Ing. Miroslav Kmec, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20, Košice, Slovenská republika, Miroslav.Kmec@tuke.sk