

# DOSTUPNÉ METÓDY VÝBERU PILOTNÝCH UZLOV PRE SEKUNDÁRNU REGULÁCIU ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVY

## PILOT BUS SELECTION AVAILABLE METHODS FOR THE SVC OF A POWER SYSTEM

Stanislav KUNÍK, Dušan MUDRONČÍK, Michal KOPČEK

*Autori: Ing. Stanislav Kuník, Prof. Ing. Dušan Mudrončík, PhD., Ing. Michal Kopček*  
*Pracovisko: Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a matematiky,*  
*Materiálovotechnologická fakulta STU*  
*Adresa: Hajdóczyho 1, 917 24 Trnava*  
*Tel.: +421 33 544 77 34*  
*E-mail: stanislav.kunik@stuba.sk, dusan.mudroncik@stuba.sk,*  
*michal.kopcek@stuba.sk*

### Abstract

*Predložený príspevok sa venuje doterajším možným riešeniam výberu pilotných uzlov v sekundárnej regulácii elektrizačnej sústavy (ES). Vychádza z práce [9] a kladie si za cieľ sumarizovať metódy na základe dostupnej literatúry a vlastných analýz vykonaných v rámci [9].*

*This paper is devoted to the feasible solutions of pilot bus selection in the secondary voltage control of a large – scale power system. It issue from the work [9] and its main aim is to summarize all methods according to the available literature and to the analyses, which were made in [9].*

### Key words

*sekundárna regulácia, elektrizačná sústava, výber pilotných uzlov*

*secondary voltage control, power system, pilot bus selection*

### Úvod

Problematika optimálneho výberu pilotných uzlov a jej fyzikálna a matematická podstata je podrobne opísaná v [9]. Príspevok sa preto bude ďalej venovať tejto téme hlavne z pohľadu na jej charakter, teda ako rozsiahlemu optimalizačnému problému.

Prvé prístupy riešenia výberu pilotných uzlov [15] boli založené na rozsiahlom vyčísl'ovaní priestoru možných riešení výberu jedného alebo dvoch pilotných uzlov tak, aby daný ukazovateľ dosahoval minimálnu hodnotu. Toto riešenie sa aplikovalo iba pre systémy menšieho rozmeru.

Je zřejmé, že práce přehledávání prostoru optimalizační úlohy nie je vhodná technika riešenia pre systémy reálnej veľkosti. V [8] a [14] bol použitý spôsob (tzv. simulované žihanie) na výber dvoch alebo troch pilotných uzlov tak, aby bola odchýlka napätí na uzloch minimálna.

Pokrokom bol koncept elektrickej vzdialenosti [1], [7], [10], [12], [16] k rozdeleniu elektrizačného systému na riadiace oblasti. Pomocou elektrickej vzdialenosti sa systém rozdelí na oblasti, v ktorých sa v „elektrickom ťažisku“ umiestňujú pilotné uzly, a to pre každú oblasť jeden.

Žiadny zo spomenutých prístupov nezvažuje rôzne prevádzkové podmienky s ohľadom na rôzne záťažové úrovne a rôzne topológie siete. Základné východiská na riešenie načrtnutého problému boli publikované v niekoľkých príspevkoch [3], [4], [6].

Využitie „greedy“ a „less-greedy“ algoritmu na riešenie výberu je popísané v [6]. Less-greedy algoritmus  $n$ -tého rádu je priama nadstavba greedy algoritmu. Zaručuje však vyššiu úroveň optimalizácie. Výsledok greedy aj less-greedy algoritmu môže byť vylepšený ďalším prehľadávaním [6]. Práve kombinácii greedy algoritmu a následného globálneho prehľadávania sa venuje [3] a [4]. Procedúra výberu pozostáva zo spomenutých dvoch krokov.

K novým prístupom [13] patrilo zavedenie prahovej hodnoty citlivostného koeficienta, pomocou ktorého sa dosiahlo podstatné zníženie počtu kandidátov na pilotné uzly. Ďalším podstatným prínosom tejto práce bolo vytvorenie algoritmu redukcie, ktorý využíva filozofiu zápisu matice citlivostných koeficientov ako riedkej matice citlivostných koeficientov.

V nasledujúcich kapitolách sa práca venuje podrobnejšiemu popisu jednotlivých dostupných metód výberu pilotných uzlov. Čiastočné porovnania boli spomenuté v [5], [6], [8].

### **Úplné vyčíslenie priestoru**

Prvotný systematický prístup riešenia výberu pilotných uzlov vychádzal z úplného vyčíslenia stavového priestoru (exhaustive enumeration algorithm) [15] ([13] používa označenie Metóda globálneho extrému – GlobEx). Vybraný bol jeden alebo dva pilotné uzly tak, aby zvolený ukazovateľ dosahoval extrém. Táto metóda nie je vhodná na prácu s elektrizačnými sústavami reálnej veľkosti [5], [6]. Prehľadanie celého stavového priestoru je však jediný spôsob ako zaručiť optimálny výber pilotných uzlov. Realizovateľné je len ako offline nástroj, a aj vtedy len pre malé sústavy [8], [14].

### **Simulované žihanie**

Metóda simulovaného žihania (simulated annealing), opísaná v [8] a [14], slúži na výber dvoch alebo troch pilotných uzlov tak, aby odchýlka napätí na uzloch bola minimálna [6]. Ideou je povolenie prechodného zhoršenia stavu, aby bol umožnený únik z lokálneho extrému. Zhoršenie je však pripustené len s určitou pravdepodobnosťou.

Algoritmus simulovaného žihania [8] má väčšinu výhod „pádových algoritmov“ (descent algorithm), ale je schopný nájsť i globálne maximum ukazovateľa akosti. Na začiatku optimalizačného procesu sa táto metóda podobá stochastickému prehľadávaniu stavového priestoru (t.j. rovnomerne prehľadáva celý stavový priestor), ale na konci rýchlo konverguje do lokálneho extrému, pričom prechod medzi týmito dvomi stavmi je plynulý. Komplikované je však nastavenie parametrov algoritmu. Pri výbere pilotných uzlov je to hlavne definícia susediacich uzlov a problematika prechodu. Z povahy algoritmu vyplýva ďalší problém, a to

nastavenie parametra T (vyjadruje teplotu pri skutočnom žíhaní), ktorý ovplyvňuje počiatkový a konečný stav optimalizácie a zároveň aj jej rýchlosť. Práve rýchlosť je kľúčovým faktorom účinnosti tohto algoritmu. Je potrebné hľadať kompromis medzi možným uviaznutím v lokálnom extrémne stavového priestoru a neúmerne dlhým časom potrebným na optimalizáciu. Ďalší problém je otázka reštartovania algoritmu, resp. počet reštartovaní. Každé spustenie algoritmu môže dať iný výsledok – iný lokálny extrém.

Simulované žíhanie patrí spolu s metódou najstrmšieho pádu (steepest descent method) a metódou náhodného pádu (random descent method) k skupine algoritmov, ktoré síce nevedú k optimálnemu výberu pilotných uzlov, ale ktorý by mal pre potreby praxe postačovať, nakoľko úplné vyčíslenie stavového priestoru neprichádza do úvahy [14].

Metóda simulovaného žíhania je považovaná za zdĺhavú, ťažkopádnu, a v porovnaní s inými heuristickými metódami za neefektívnu [6].

### **Lokálne prehľadávanie**

Algoritmus lokálneho prehľadávania (local search algorithm) [5] začína so skupinou vybraných pilotných uzlov a skúša všetky možné zámenny daného pilotného uzla s jeho susediacimi záťažovými uzlami.

Na začiatku je daný počet pilotných uzlov (je to práve počet uzlov v prvotnom výbere) a počet opakovaní algoritmu. Počas každého priebehu algoritmu sa najprv vyberie jeden pilotný uzol, ktorý bude zamenený s každým so svojich susedných záťažových uzlov a vypočíta sa účelová funkcia nového výberu. Ak je lepšia ako pre pôvodný uzol, stane sa nový uzol pilotným. Algoritmus skončí, ak bolo toto vykonané pre každý pilotný uzol. V prípade, že nie je dosiahnutý zvolený počet opakovaní algoritmu, prebehne tento ešte raz.

Táto metóda je nanajvýš efektívna na výpočtový čas, vyžaduje však dobrý počiatkový výber pilotných uzlov. Jedno-dve opakovania obyčajne zlepšia výsledný výber [5].

### **Rozšírené lokálne prehľadávanie**

Rozšírené lokálne prehľadávanie (extended local search) vychádza z algoritmu lokálneho prehľadávania, ale zohľadňuje dve úrovne susediacich záťažových uzlov. Algoritmus je menej časovo efektívny, ale výsledný výber je spravidla lepší ako pri lokálnom prehľadávaní [5].

### **Globálne prehľadávanie**

Globálne prehľadávanie (global search) [3], [4], [5] začína so skupinou vybraných pilotných uzlov a skúša všetky možné zámenny daného pilotného uzla so všetkými záťažovými uzlami, ktoré nie sú pilotnými uzlami. Je teda modifikáciou resp. rozšírením lokálneho prehľadávania.

Na začiatku je daný počet pilotných uzlov (je to práve počet uzlov v prvotnom výbere) a počet opakovaní algoritmu. Počas každého priebehu algoritmu sa najprv vyberie jeden pilotný uzol, ktorý bude zamenený s každým záťažovým uzlom, ktorý nie je pilotný a vypočíta sa účelová funkcia nového výberu. Ak je lepšia ako pre pôvodný uzol, stane sa nový uzol pilotným. Algoritmus skončí ak bolo toto vykonané pre každý pilotný uzol. V prípade, že nie je dosiahnutý zvolený počet opakovaní algoritmu, prebehne tento ešte raz – ku kvázi optimálnemu výberu pilotných uzlov vedie jedno alebo dve opakovania prehľadávania [3].

Použitím regulácie, ktorá obnovuje hodnoty napätia na pilotných uzloch za súčasného zabezpečenia rovnomerného zaťažovania riadiacich generátorov jalovým výkonom, množina pilotných uzlov určená navrhovanou metódou docieľuje najlepší možný napäťový profil. To je dôsledok toho, ako je definovaná účelová funkcia [3], [4].

Táto modifikácia lokálneho prehľadávania je výpočtovo najnáročnejšia, dosahuje však najlepšie výsledky pri výbere. Podmienkou je znova dobrá počiatočná skupina pilotných uzlov. Metóda veľmi zriedka ostane „uväznená“ v lokálnom extrémе [5].

### **Greedy algoritmus**

Tzv. nenásytný algoritmus (greedy algorithm) sa riadi pravidlom „v každom momente ber to najlepšie“. Greedy algoritmus je viacstupňová optimalizačná procedúra, ktorá sa skladá z kaskádovej postupnosti prehľadávanií do šírky. V každom kroku je vykonané prehľadávanie do šírky a vybrané najlepšie riešenie. Toto riešenie sa stane východiskovým pre ďalší optimalizačný krok [6].

Algoritmus vyberá pilotné uzly jeden po druhom, t.j. z danej podmnožiny vybraných pilotných uzlov nasledujúci pilotný uzol, ktorý má byť vybraný, je záťažový uzol, ktorý vykazuje najväčšie okamžité zlepšenie účelovej funkcie, za predpokladu, že taký záťažový uzol existuje. Okrem toho záťažový uzol, raz označený za pilotný uzol, je ponechaný v množine vybraných pilotných uzlov počas celého vyhľadávania. To znamená, pre raz vybraný záťažový uzol už nie je počítaná účelová funkcia. Počiatočná množina pilotných uzlov je prázdna množina [3], [4], [5], [6].

V algoritme sú použité dve zastavovacie kritériá [3], [4]. Prvé je založené na dopredu určenom počte pilotných uzlov, ktoré majú byť vybrané, druhé na miere zlepšenia účelovej funkcie. Druhé kritérium môže byť použité pre určenie počtu vybraných pilotných uzlov, t.j. pilotné uzly sú vyberané až kým miera zlepšenia účelovej funkcie nie je dostatočne malá.

Čo sa týka rýchlosti, pre daný počet pilotných uzlov rastie výpočtová náročnosť lineárne s počtom variantov. Pre primeraný počet variantov je algoritmus prekvapivo rýchly [6].

Spolu s algoritmami opísanými v kap. 0 a 0 vylepšuje táto metóda iné prístupy k výberu v dvoch smeroch [6]:

- Používa efektívny heuristický postup, ktorý využíva informácie z celého systému. To znamená, že systém nie je vopred svojvoľne rozdelený na oblasti, aby sa zmenšila rozmernosť problému.
- Uvažuje rôzne prevádzkové podmienky s ohľadom na rôzne záťažové úrovne (sezónne zmeny záťaže) a rôzne topológie siete.

### **Less-greedy algoritmus**

Less-greedy algoritmus  $n$ -tého rádu [6] zachováva rovnakú štruktúru ako pôvodný greedy algoritmus, rozširuje však jeho vyhľadávacie pravidlá. Pamätá si najlepších  $n$  riešení získaných v každom optimalizačnom kroku, a používa tieto riešenia ako východiskové pre ďalší krok. Algoritmus vykonáva v každom kroku  $n$  prehľadávanií do šírky, okrem prvého kroku, kedy sa vykoná len jedno prehľadávanie. Dôsledkom je približne  $n$ -násobne vyššia výpočtová náročnosť v porovnaní s originálnym greedy algoritmom.

Less-greedy algoritmus  $n$ -tého rádu je teda priama nadstavba greedy algoritmu a využíva sa na lokálnu validáciu greedy algoritmu. Zaručuje vyššiu úroveň optimalizácie v porovnaní s greedy algoritmom [6].

### **Dvojfázová technika**

Táto metóda vychádza z tzv. nelineárneho prístupu spomenutého v [3] a [4]. Využitá bola taktiež v [11] a [13] pod názvom Dvojfázová technika výberu s fixovanými pilotnými uzlami – AIFix.

Metóda v prvej fáze vytvorí počiatočnú skupinu pilotných uzlov využitím greedy algoritmu (kap. 0) a v nasledujúcej fáze optimalizuje výber globálnym prehľadávaním. Účelovou funkciou je minimálna hodnota kvadrátov odchýlok hodnôt napätia. Procedúra pozostáva z nasledujúcich blokov [3]:

1. Zváženie množiny podstatných základných prípadov vrátane rôznych záťažových úrovní a rôznych topológií siete. Definovanie množiny príslušných porúch jalového výkonu zodpovedajúcich jednotlivým základným prípadom. Výsledkom je množina variantov, ktoré budú brané do úvahy.
2. Generovanie množiny pilotných uzlov pomocou greedy algoritmu v prvom kroku procedúry výberu a globálne prehľadávanie v kroku druhom.
3. Úplný výpočet toku záťaže pre každú navrhovanú množinu pilotných uzlov pre každý prípad, výpočet koeficienta mocniny priemernej hodnoty odchýlky hodnoty napätia pre zodpovedajúci základný prípad. Výpočet priemerného koeficienta pre všetky prípady.
4. Výber množiny pilotných uzlov s najnižším priemerným koeficientom odchýlky napätia.

### **Vylučovací algoritmus**

Vylučovací algoritmus [13] vyberá pilotné uzly jeden po druhom, t.j. z danej podmnožiny vybraných pilotných uzlov nasledujúci pilotný uzol, ktorý má byť vybraný, je záťažový uzol, ktorý vykazuje najväčšie okamžité zlepšenie účelovej funkcie, za predpokladu, že taký záťažový uzol existuje. Okrem toho záťažový uzol, raz označený za pilotný uzol, je ponechaný v množine vybraných pilotných uzlov počas celého vyhľadávania. To znamená, pre raz vybraný záťažový uzol už nie je počítaná účelová funkcia. Počiatočná množina pilotných uzlov je prázdna množina.

Vylučovací algoritmus pozostáva z nasledujúcich krokov:

1. Množina vybraných pilotných uzlov je prázdna množina a hodnota aktuálnej účelovej funkcie je plus nekonečno.
2. Vždy po jednom je zahrnutý do množiny pilotných uzlov záťažový uzol z podmnožiny doteraz nevybraných a je vyhodnotená účelová funkcia. Do množiny pilotných uzlov je pridaný záťažový uzol s najväčším okamžitým zlepšením účelovej funkcie. Toto bude aktuálna množina pilotných uzlov. Hodnota aktuálnej účelovej funkcie je nastavená na hodnotu príslušnej účelovej funkcie.
3. Ak hodnota účelovej funkcie vyčíslená pre množinu pilotných uzlov pred krokom 2 je menšia ako hodnota účelovej funkcie vyčíslenej pre aktuálnu množinu pilotných uzlov, zastav. Množina pilotných uzlov pred krokom 2 je pre vylučovací algoritmus optimálna. V opačnom prípade ďalej.

4. Ak nie je dosiahnutý požadovaný počet pilotných uzlov a miera zlepšenia účelovej funkcie je dosť veľká, choď na krok 2. V opačnom prípade zastav, aktuálna množina pilotných uzlov je optimálna.

Použité sú dve ukončovacie kritériá. Prvé je založené na dopredu určenom počte pilotných uzlov, ktoré majú byť vybrané, druhé na miere zlepšenia účelovej funkcie. Druhé kritérium môže byť použité pre určenie počtu vybraných pilotných uzlov, t.j. pilotné uzly sú vybrané až kým miera zlepšenia účelovej funkcie nie je dostatočne malá.

Výber realizovaný vylučovacím algoritmom zdokonaľuje modifikovaný vylučovací algoritmus.

### ***Modifikovaný vylučovací algoritmus***

Keďže vylučovací algoritmus nezabezpečuje dosiahnutie globálneho extrému, bola vyvinutá metóda, ktorej výsledkom je výber pilotných uzlov bližšie ku globálnemu extrému. Princíp [13] spočíva v tom, že každý z vybraných pilotných uzlov vylučovacím algoritmom sa nahradí jedným z množiny kandidátov na pilotné uzly a vyhodnocuje sa účelová funkcia. Tento postup je opakovane spúšťaný špecifikovaný počet krát.

Je potrebné definovať počítadlo pilotných uzlov v rozpätí 1 až *počet pilotných uzlov v počiatočnom výbere* a počítadlo reštartov v rozpätí 1 až *požadovaný počet spustení algoritmu*. Uvedený postup pozostáva z nasledujúcich krokov:

1. Výber vhodného počiatočného výberu (t.j. vylučovací algoritmus). Nastavenie počítadla reštartov a počítadla pilotných uzlov na 1.
2. Do úvahy je braný pilotný uzol zodpovedajúci počítadlu pilotných uzlov. Tento pilotný uzol sa vymení s každým záťažovým uzlom, ktorý nie je práve označený ako pilotný uzol a vyčíslí sa hodnota účelovej funkcie pre každú z týchto kombinácií. Vyberie sa kombinácia s najmenšou hodnotou účelovej funkcie, tá sa stáva aktuálnym riešením.
3. Inkrementuj o 1 jednotku počítadlo pilotných uzlov. Ak je aktuálna hodnota počítadla menšia alebo sa rovná želanému počtu vybraných pilotných uzlov, choď na krok 2. V opačnom prípade pokračuj.
4. Inkrementuj o 1 jednotku počítadlo reštartov. Ak je hodnota počítadla menšia ako počiatočne určený počet reštartov, nastav počítadlo pilotných uzlov na 1 a choď na krok 2. V opačnom prípade zastav, aktuálne riešenie je optimálne.

### **Princíp elektrickej vzdialenosti**

Tento princíp (concept of electrical distance) [1], [10], [12], [16] rozdeľuje elektrizačnú sústavu do jednotlivých riadiacich oblastí. Výber pilotného uzlu pre každú oblasť je realizovaný znova na základe princípu elektrickej vzdialenosti [6].

### **Decentralizované riadenie**

Podľa [7], rôzne zmeny činného výkonu, jalového výkonu a zásahov riadiaceho napätia majú lokálny vplyv na elektrizačnú sústavu. Preto je možné rozdeliť elektrizačnú sústavu do niekoľkých oblastí riadenia, v ktorých zmeny riadiacich premenných (napätie na

generátoroch), ktoré prislúchajú daným oblastiam riadenia vyvolávajú výrazné zmeny napätia len na pilotných uzloch, ktoré patria týmto oblastiam riadenia.

Výhody, ktoré ponúka systém decentralizovaného riadenia [7]:

- skrátenie času potrebného na výpočet
- malé požiadavky na výpočty
- možnosť paralelného spracovania výberu pilotných uzlov
- vyššia spoľahlivosť

V konečnom dôsledku, riadiace zásahy generátorov v oblasti decentralizovaného riadenia sú dostatočne veľké na riadenie napätia na pilotných uzloch, ktoré patria tejto oblasti a poruchy produkované riadiacimi zásahmi susedných oblastí sú dostatočne paralyzované generátormi, ktoré riadia tieto oblasti.

Je možné garantovať, aby generátory v danej oblasti riadenia boli schopné vysporiadať sa s prípadnými zmenami jalového zaťaženia (prenesených na zmeny napätí na pilotných uzloch) pri zachovaní adekvátnej hranice jalového výkonu.

Takýmto spôsobom sa pôvodný systém dekomponoval na niekoľko podsystémov menšieho rozmeru, čím sa podstatne redukoval problém vysokého počtu kombinácií kandidátov na pilotné uzly.

### **Operatívny výber**

Okrem prístupu k výberu optimálnych pilotných uzlov cez citlivostné koeficienty existujú i iné prístupy, vychádzajúce z rozdielnych potrieb. Ako príklad môže slúžiť výber pilotných uzlov na základe ich skratových výkonov [2]. Pilotným uzlom sa stane ten uzol, ktorý má v danom regióne najväčšiu skratovú úroveň. K vybranému pilotnému uzlu je priradený generátor na základe matice citlivosti vyjadrujúcej pomery zmeny napätia na danom pilotnom uzle k zmene výkonu generátora. Zvolený je generátor s najväčšou hodnotou pomeru.

### **Redukcia počtu kandidátov na pilotné uzly**

Táto kapitola pojednáva o prístupoch k redukcii počtu kandidátov na pilotné uzly použitých v [13].

#### ***Metóda prahovej hodnoty koeficienta citlivosti [13]***

Podľa hodnoty napäťových koeficientov citlivosti je možné určiť taký generátorický uzol, ktorý má najväčší vplyv na napätie určitého uzla ES z hľadiska čo najlepšieho udržiavania konštantného napätia na tomto uzle pri zmenách jeho zaťaženia. Takýto uzol je vhodným kandidátom na funkciu pilotného uzla pre daný generátorický uzol. Základná myšlienka metódy je, že záťažový uzol s malými koeficientmi citlivosti od všetkých generátorických uzlov nie je vhodným kandidátom na funkciu pilotného uzla.

Matica citlivosti obsahuje množstvo koeficientov blízkyh k nule, preto bola pre redukcii počtu zavedená prahová hodnota  $\sigma$  citlivostných koeficientov. Je zrejmé, že zvolená vyššia hodnota  $\sigma$  znamená menší počet kandidátov na pilotné uzly.

Ďalej je metóda totožná s algoritmom GlobEx (kap. 0). Rozdiel je len v tom, že bola pridaná podmienka testovania každého koeficienta, ktorý participoval na danej kombinácii, aby spĺňal podmienku prahovej hodnoty koeficienta. Ak sa našiel čo i jediný koeficient

z kombinácie, ktorý nespĺňal prahovú hodnotu, bola kombinácia označená ako nevyhovujúca a algoritmus prechádza na výpočet ďalšej kombinácie. Týmto sa značne znížil počet členov, s ktorými sa v [13] ďalej pracovalo.

### ***Metóda riedkej matice prahových koeficientov [13]***

Hlavným nedostatkom predchádzajúceho algoritmu bolo, že aj keď počíta kombinácie iba pre dvojice, ktoré vyhovujú podmienke, pracuje stále s celou maticou koeficientov, čo podstatne zdržuje výpočty. Pretože členov, ktoré vyhovujú podmienkam je oveľa menej ako tých nevyhovujúcich, vznikol návrh transformácie matice citlivostných koeficientov na redukovanú maticu, ktorá bude obsahovať iba členy vyhovujúce podmienke prahovej hodnoty. Redukovaná matica je mnohonásobne menšia a obsahuje iba zlomok členov pôvodnej matice.

V podstate sa jedná o špeciálny typ zápisu tzv. riedkej matice, t.j. matice, ktorá má malé percento nenulových prvkov. Princíp zápisu jednotlivých prvkov redukovanej citlivostnej matice je v tom, že každý prvok je definovaný jednoznačne svojou hodnotou a pozíciou v pôvodnej matici citlivostných koeficientov.

### **Záver**

Elektrizačná sústava (ES) sa vyznačuje predovšetkým zložitou, veľkou a vopred neznámym charakterom zaťaženia, meniacim sa v čase. Keďže sústava slúži na prenos veľkých elektrických výkonov, i malé zmeny jej nastavení môžu viesť k významným ekonomickým úsporám.

Na reguláciu ES sa využíva trojstupňová hierarchická štruktúra, ktorej prostredná úroveň je tzv. sekundárna regulácia. Táto má priamy vplyv na koncových odberateľov, konkrétne na jeden z najdôležitejších kvalitatívnych ukazovateľov – napätie. Sekundárna regulácia sa snaží udržať konštantné napätie na strane spotrebiteľov reguláciou svorkového napätia synchronných generátorov. Pritom je na daný účel sledovaná úroveň napätia len v niekoľkých bodoch celej sústavy, v tzv. pilotných uzloch. Výber pilotných uzlov teda zásadne vplýva na kvalitu sekundárnej regulácie napätia.

Prvé prístupy zaoberajúce sa problematikou výberu pilotných uzlov pre sekundárnu reguláciu pochádzajú z konca 80-tych rokov 20. storočia. Postupne boli publikované ďalšie, avšak za podstatný prínos pre optimálny výber pilotných uzlov v reálnom čase pre potreby dispečerského riadenia možno považovať až prácu [13] z roku 2006, zameranú predovšetkým na redukcii počtu kandidátov na pilotné uzly. Ani táto práca však neposkytuje optimálne riešenie výberu pilotných uzlov (ako je dokázané v [9]), zvlášť pre vyšší počet hľadaných pilotných uzlov v sústave.

### **Zoznam bibliografických odkazov:**

- [1] BLANCHON, G. A New Aspect of Studies of Reactive Energy and Voltage of the Networks. In *Proceedings of 1972 Power Systems Computation Conference (PSCC)*. Grenoble (France), 1972.
- [2] CAÑIZARES, A. C. – CAVALLO, C. – POZZI, M – CORSI, S. Comparing secondary voltage regulation and shunt compensation for improving voltage stability and transfer capability in the Italian power system. In *Electric Power System Research*, 73/2005, s. 67-76.



- [3] CONEJO, A., AGUILAR, M. J. A nonlinear approach to the selection of pilot buses for secondary voltage control. In *Proceedings Power System Control and Management, 16-18 April 1996*, Conference Publication No. 421. London: IEEE, 1996, s. 191-195.
- [4] CONEJO, A., AGUILAR, M. J. Secondary voltage control: Nonlinear selection of pilot buses, design of an optima control law, and simulation results. In *IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib.*, 145/1998, s. 77-81.
- [5] CONEJO, A., FUENTE, J. I., GÖRANSSON, S. Comparison of alternative algorithms to select pilot buses for secondary voltage control in electric power networks. In *7th Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1994, s. 940 – 943.
- [6] CONEJO, A., GÓMEZ, T., FUENTE, J. I. Pilot-bus selection for secondary voltage control. In *ETEP* 3/1993, s. 359-366.
- [7] GÓMEZ, T., CONEJO, A. J., FUENTE, J. I., PAGOLA, F. L., REHN, C. J. Decentralized Secondary Voltage Control and Pilot Bus Selection. In *IFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems*. Munich, Germany, 1992.
- [8] ILIC-SPONG, M., CHRISTENSEN, J., EICHORN, K. L. Secondary voltage control using pilot point information. In *IEEE Transactions on Power Systems*, 3/1988, s. 660 – 668. ISSN 0885-8950
- [9] KUNÍK, S. *Optimálny výber pilotných uzlov v sekundárnej regulácii zložitej ES*. Doktorandská dizertačná práca, Trnava: ÚIAM MTF STU, 2008. 116 s. Školiteľ: Dušan Mudrončík.
- [10] LAGONOTTE, P., SABONNADIÈRE, J. C., LEOST, J.Y., PAUL, J. P. Structural analysis of the electrical system: Application to secondary voltage control in France. In *IEEE Transactions on Power Systems*, 2/1989, s. 479-486.
- [11] MLEJNEK, D. *Výber pilotných uzlov v elektrizačnej sústave*. Diplomová práca. Bratislava: FEI STU, 1999. 77 s. Vedúci diplomovej práce: Dušan Mudrončík
- [12] PAUL, J. P., LEEOST, J. M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations. In *IEEE Transactions on Power Systems*, 2/1987, s. 505-511.
- [13] RAKOVSKÝ, M. *Redukcia výberu pilotných uzlov v sekundárnej regulácii*. Doktorandská dizertačná práca. Trnava: KAIA MTF STU, 2006, 101 s. Školiteľ: Dušan Mudrončík
- [14] STANKOVIC, A., ILIC-SPONG, M., MARATUKULAM, D. Recent results in secondary voltage control of power systems. In *IEEE Transactions on Power Systems* 6/1991, s. 94-101. ISSN 0885-8950
- [15] THORP, J. S., ILIC-SPONG, M., VARGHESE, M. An optimal secondary voltage-VAR control technique. In *Automatica*. Journal of IFAC, 22/1986, s. 217 – 222. ISSN 0005-1098
- [16] VIALAS, C., PAUL, J. P. Trends in automatic regional voltage control of the French EHV power system: the effect on communication requirements. In *Power Systems-Modelling and Control Applications*. Brussels: IFAC symposium, 1988, s. 161-165.