

Estimácia nastavenia napät'ových a výkonových pomerov v elektrizačných sústavách v ustálenom stave

¹Matej BALINT, ²Martin KANÁLIK

^{1,2} Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická Univerzita v Košiciach, Slovenská Republika

¹matej.balint.2@tuke.sk, ²martin.kanalik@tuke.sk

Abstrakt — Tento článok je zameraný na problematiku riešenia ustáleného chodu elektrizačnej sústavy v dvoch úrovniach. Prvá úroveň predstavuje elektrizačnú sústavu, ktorej parametre siete a uzlových veličín sú známe. V druhej úrovni sa známa sústava rozšíri o neznámu vonkajšiu sieť so známymi elektrickými parametrami, avšak neznámymi veľkosťami napätí a výkonových tokov. Prvá časť článku oboznamuje čitateľa s vytvorením programu v prostredí MATLAB® pre všeobecný výpočet ustáleného chodu elektrizačnej sústavy, použitím Newton-Raphsonovej iteračnej metódy. Ďalšie úlohy sa venujú riešeniu sietí, v rámci ktorých sú známe napät'ové a výkonové pomery iba čiastočne s cieľom estimácie neznámych hodnôt napätí a činných a jalových výkonov. Posledné dve úlohy demonštrujú odlišnú metódu pre výpočet napät'ových a výkonových pomerov v ustálenom stave.

Keywords — elektrizačná sústava, cezhraničné vedenia, Newton-Raphson, prenosová sústava, prepojené sústavy, ustálený chod

I. ÚVOD

Elektrizačná sústava (ES) predstavuje súbor jednotlivých energetických prvkov, ktoré majú výrazný vplyv na technický rozvoj priemyslu a životnú úroveň obyvateľstva. Z tohto dôvodu, ES tvorí neoddeliteľnú súčasť elektroenergetických systémov. V elektrizačnej sústave prebiehajú rôzne merania v odlišných bodoch. Z pohľadu riadenia elektrizačnej sústavy je veľmi dôležitý zber údajov o cezhraničných tokoch, ktoré tečú hraničnými vedeniami z jednej okolitej sústavy do druhej a naopak. Údaje z meraní v elektrizačnej sústave SR sú známe. Naopak hodnoty veličín v okolitých sústavách známe nie sú a teda najbližším známym meracím miestom sú hraničné meracie body. Tento článok sa zameriava na riešenie problematiky hľadania nastavenia okolitej siete, v ktorej uzloch sú neznáme napät'ové a výkonové pomery.

II. ELEKTRIZAČNÁ SÚSTAVA

Elektrizačná sústava (ES) je súbor viacerých energetických prvkov, ktoré je možné rozdeliť na výrobu, prenos, distribúciu a spotrebu. Prvky vo výrobe slúžia k získavaniu elektrickej energie premenou iných druhov energií (vodná, veterná, chemická, slnečná, jadrová energia atď. [1].

Pre zabezpečenie výmeny elektrickej energie, bezpečnosti a stability (riešenie poruchových a havarijných stavov) sa elektrizačné sústavy prepájajú medzi sebou a tak vytvárajú väčšie celky – medzinárodné spolupracujúce sústavy. Medzi výhody takto prepojenej sústavy patrí spoločná rezerva potrebných výkonových rezerv, zlepšenie stability pri regulácii frekvencie (sieť je „tvrdšia“) a zvýšenie hospodárnosti ako celku [2].

Problémom je, že obchodné toky elektriny nie sú zhodné s fyzikálnymi prenosmi a to kvôli tomu, že prenosové sústavy v regióne CEE (*Central and Eastern Europe*) sú husto prepojené. Ďalším dôvodom je spôsob alokácie obchodných kapacít, kde impedancie vedení prenosových sústav jednotlivých regulačných oblastí nie sú rešpektované. Obchodnými tokmi sa nazývajú prenosy elektriny, ktoré sú dohodnuté v rámci obchodu medzi jednotlivými obchodnými oblasťami. Tieto prenosy elektriny, ktoré boli obchodne dohodnuté sa v reálnej prevádzke prejavujú vo forme fyzikálnych tokov elektriny na jednotlivých cezhraničných prenosových linkách. V niektorých hodinách fyzikálne toky prevyšujú plánované obchodné výmeny aj o viac ako 100 %. To môže spôsobiť neplnenie základného bezpečnostného kritéria $N - 1$ [3][4].

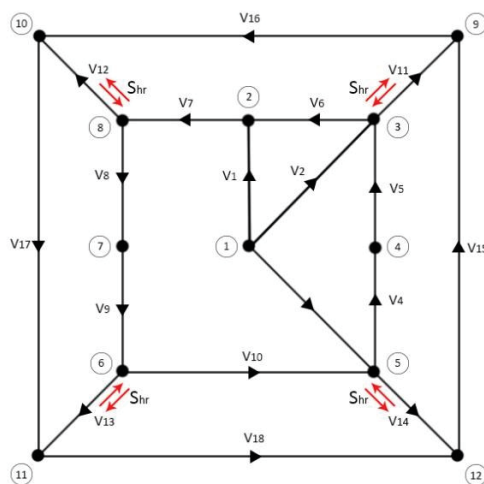
III. NUMERICKÉ METÓDY PRE RIEŠENIE CHODU SÚSTAVY

Numerické iteračné metódy pre riešenie ustáleného chodu elektrizačných sústav sa využívajú v prípade nelineárnych (hľadanie veľkostí napätí a činných a jalových výkonov v uzloch). Tieto metódy sa líšia, okrem iného, aj množstvom vykonaných krokov pre dosiahnutie výsledku. Pre riešenie ES sa používajú dve základné metódy

Prvou metódou je Gauss-Seidlová (G-S) metóda, ktorá urýchľuje Gaussovú metódu. Druhou a najpoužívanejšou metódou je Newton-Raphsonová (N-R) metóda. Rozdiel medzi G-S a N-R metódami je výrazný. Pri niektorých sieťach dokáže N-R svojou rýchlosťou ušetriť aj niekoľko stoviek (tisíc) krokov oproti G-S metóde. Rýchle znižovanie iterácií so sebou ale nesie riziko, kedy môže dôjsť k divergovaniu a teda nebude splnená konvergenčná podmienka [5][6][7].

IV. APLIKOVANIE NEWTON-RAPHSONOVEJ METÓDY PRE VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU

Pre nasledujúcu ukážku použitia Newton-Raphsonovej iteračnej metódy, bola vytvorená relatívne malá dvanásť uzlová sieť (Obr. 1), pre jednoduché pochopenie procesu výpočtu ustáleného chodu, pomocou tejto metódy.



Obr. 1 Zjednodušený model dvanásť uzlovej sústavy

V Tabuľke 1 sú zobrazené výsledne hodnoty riešenia ustáleného chodu siete, podľa zadaného typu uzla. Tabuľka 2 obsahuje vypočítané cezhraničné výkony. Hodnoty označené červenou farbou sú vypočítané hodnoty neznámych veličín.

Tabuľka 1

Vypočítané hodnoty uzlových veličín dvanásť uzlovej siete po aplikovaní N-R metódy

Číslo uzla	$P(\text{MW})$	$Q(\text{MVar})$	$U(\text{kV})$	Typ uzla
1	82,1562	-8,4939	418	P8
2	-10	5	417,9171	PQ
3	-20	-10	417,8731	PQ
4	50	5	418,1216	PQ
5	-20	-15	417,7346	PU
6	-7	-1	417,64	PQ
7	-20	-10	417,3467	PQ
8	-5	3	417,6266	PU
9	-25	10	417,9635	PQ
10	-5	7	417,9316	PQ
11	-5	5	417,8113	PQ
12	-15	10	417,9502	PQ
Kontrola	$\sum P(\text{MW})$	$\sum Q(\text{MVar})$		
	0,1562	0,5061		

Tabuľka 2

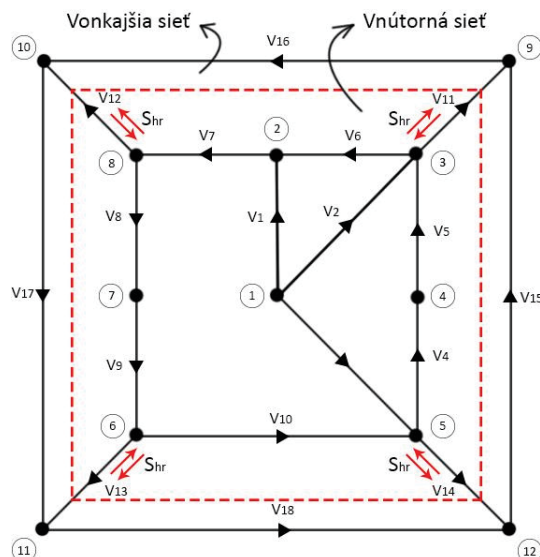
Vypočítané hodnoty cezhraničných tokov v dvanásť uzlovej sieti

Cezhraničný výkon				
Číslo vetvy	Z uzla	Do uzla	$P_{\text{hr}}(\text{MW})$	$Q_{\text{hr}}(\text{MVar})$
11	3	9	-26,1628	9,9553
12	8	10	-2,09391	5,2879
13	6	11	-6,53811	8,0979
14	5	12	-15,2496	8,5146

Prvú kontrolu výsledkov je možné vykonať priamo vo výslednej tabuľke (Tabuľka 1). Súčet zadáných výkonových tokov činného a jalového výkonu v uzloch č. 2-12 a výkonov dodávaných do siete bilančným uzlom (uzol č. 1) má byť rovný len stratám, ktoré vznikajú na vedeniach.

V. VÝPOČET UZLOV VO VONKAJŠEJ SIETI

V tejto úlohe bola použitá rovnaká sústava ako v prvej úlohe, ktorej vnútornú sieť tvoria uzly č. 1-8 a vonkajšiu sieť uzly č. 9-12. Je dôležité si uvedomiť, že veľkosť resp. počet uzlov nemá vplyv na spôsob výpočtu siete. Na nasledujúcom obrázku (Obr. 2) je zobrazená uvažovaná sieť, na ktorej červená čiarkovaná čiara znázorňuje oddelenie vnútornej siete od vonkajšej.



Obr. 2 Zjednodušený model sústavy s rozdelením na vnútornú a vonkajšiu sieť

Riešená sústava bude pozostávať len z vnútornej siete (bez vzájomného prepojenia vonkajších hraničných uzlov). Je potrebné poznať cezhraničné výkony, ktoré poslúžia ako referenčné hodnoty pre výpočet hľadaných hodnôt (Tabuľka 2). Výpočet výkonových tokov činných a jalových výkonov v uzloch č. 9, 10, 11 a 12 sú uvedené v Tabuľke 3.

Z výsledkov (Tabuľka 3) je možné pozorovať, že napätia v hľadaných uzloch sa zhodujú s referenčnými hodnotami napätí aj pri odlišnej topológii siete (sústava z prvej úlohy).

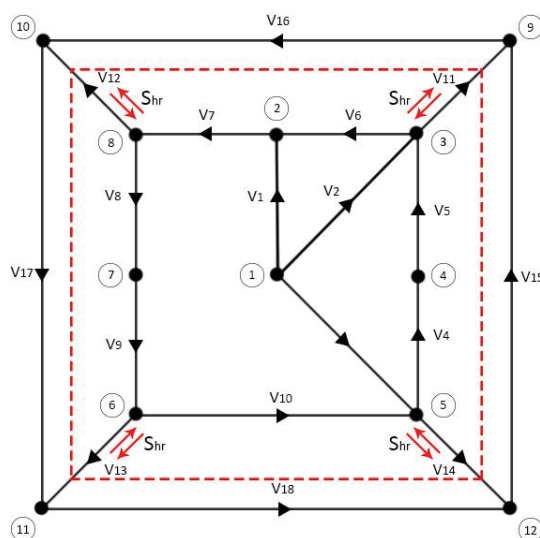
Tabuľka 3
 Vypočítané a nájdené hodnoty uzlov vo vonkajšej sieti

Číslo uzla	$P(\text{MW})$	$Q(\text{MVar})$	$U(\text{kV})$	Typ uzla
1	82,1562	-8,4939	418	Pδ
2	-10	5	417,9171	PQ
3	-20	-10	417,8731	PQ
4	50	5	418,1216	PQ
5	-20	-15	417,7346	PU
6	-7	-1	417,64	PQ
7	-20	-10	417,3467	PQ
8	-5	3	417,6266	PU
9	-26,1357	10,0433	417,9635	PQ
10	-2,0923	5,2931	417,9316	PQ
11	-6,5359	8,1052	417,8113	PQ
12	-15,2369	8,5558	417,9502	PQ
Kontrola	$\sum P(\text{MW})$	$\sum Q(\text{MVar})$		
	0,1554	0,5035		

VI. VÝPOČET HRANIČNÝCH UZLOV V PREPOJENEJ SIETI

Po vyriešení predchádzajúcej úlohy a nájdení odhadovaných hodnôt činných a jalových výkonov je sieť definovaná novo nájdenými hodnotami. Ak sa topológia siete zmení, vyvolá to opätovnú zmenu veľkostí napätí a rozloženia výkonových tokov. Je možné povedať, že sieť sa „rozháďže“ a je potrebné nájsť nové riešenie sústavy, ktoré súhlasí s požadovanými hodnotami.

V tejto úlohe je predpokladom, že uzly č. 9, 10, 11 a 12 sú vzájomne prepojené vetvami $V_{15}, V_{16}, V_{17}, V_{18}$ (Obr. 4).



Obr. 3 Zjednodušený model sústavy s ohraničením vnútornej a vonkajšej siete

Ako vstup neznámych uzlov (č. 9, 10, 11 a 12) budú zadané nulové hodnoty. Počiatočné nastavenie týchto uzlov, má na riešenie ustáleného chodu len minimálny vplyv v podobe časovej náročnosti. Ďalej budú použité vypočítané cezhraničné výkony (Tabuľka 2) ako referenčné hodnoty pre nájdenie neznámych uzlov. Riešenie úlohy je uvedené nižšie (Tabuľka 4).

Tabuľka 4
 Nájdené hodnoty uzlových veličín dvanásť uzlovej siete

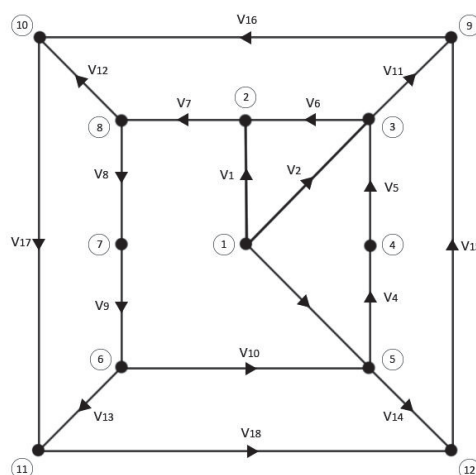
Číslo uzla	$P(\text{MW})$	$Q(\text{MVar})$	$U(\text{kV})$
1	82,15622	-8,4939	418
2	-10	5	417,9171
3	-20	-10	417,8731
4	50	5	418,1216
5	-20	-15	417,7346
6	-7	-1	417,64
7	-20	-10	417,3467
8	-5	3	417,6266
9	-24,999999	10,000004	417,9635
10	-4,999998	7,0000006	417,9316
11	-4,999998	5,000004	417,8113
12	-14,999998	10,00002	417,9502

Vypočítané hodnoty sa v rámci dostatočnej presnosti zhodujú s hodnotami z prvej úlohy. To znamená, že nájdené riešenie sústavy je správne. Pridávaním vonkajších uzlov, ktoré sú priamo spojené hraničnými vedeniami s vnútornou sieťou sa proces výpočtu nemení, bude sa predlžovať, len čas výpočtu riešenia.

Ďalším krokom je pridanie náhodných uzlov medzi hraničné uzly vonkajšej siete. Po vykonaní viacerých variácií nastavení siete je možné konštatovať nasledujúce tvrdenie. Hlavným zistením je, že bez dodatočných informácií o neznámych uzloch alebo tokoch v okolitej sieti, nie je možné hodnoty uzlových veličín vonkajšej siete nájsť. Aj napriek tomu, že tieto uzly sú vzájomnými väzbami prepojené medzi sebou a vnútornou sieťou, možných kombinácií hľadaných výkonov je hodnota blížiaci sa k nekonečnu (v závislosti na presnosti riešenia).

VII. ESTIMÁCIA NAPŤOVÝCH POMEROV POMOCOU NAPŤOVÉHO KOEFICIENTA

Z praxe je známe, že akákoľvek zmena veľkosti odberu/dodávky činného a jalového výkonu v určitom uzle elektrizačnej sústavy, má určitý vplyv na zvyšok siete. V tejto časti bude ukázaný vplyv zmeny jalového výkonu v jednom uzle na veľkosti napätia v danom uzle ako aj v ostatných uzloch modelovanej siete. Pre nasledujúcu demonštráciu sa použije sústava rovnaká dvanásť uzlová sústava z prvej úlohy (Obr. 4). Cezhraničné výkony sa v tejto úlohe nebudú uvažovať. Pretože nasledujúca metóda nemá pomenovanie, bude ďalej označovaná ako „metóda napäťového (U) koeficienta“.



Obr. 4 Zjednodušený model dvanásť uzlovej siete

Sústava (Obr. 4) bola riešená pomocou iteračnej metódy Newton-Raphson. Pribudol však jeden výpočet naviac, ktorým sa vypočíta U koeficient pre celú sieť. Tento koeficient vyjadruje vplyv zmeny jalového výkonu v každom uzle, a k tomu prislúchajúcu zmenu napätí v týchto uzloch.

Koeficientom je možné určiť vzťah, ktorý popisuje väzby medzi jalovými výkonmi a napätiami v uzloch. Tento vzťah sa popíše nasledujúcou rovnicou:

$$[\Delta U] = [c] \cdot [\Delta Q] \quad (1)$$

kde

$[\Delta U]$ – je zmena napätí pri zmene jalového výkonu prepočítaná koeficientom $[c]$

$[c]$ – U koeficient

$[\Delta Q]$ – zmena jalového výkonu v jednom alebo viacerých uzloch

U koeficient sa určí pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$[c] = \begin{bmatrix} \frac{dU_1}{dQ_1} & \frac{dU_1}{dQ_2} & \frac{dU_1}{dQ_3} & \dots & \frac{dU_1}{dQ_{12}} \\ \frac{dU_2}{dQ_1} & \frac{dU_2}{dQ_2} & \frac{dU_2}{dQ_3} & \dots & \frac{dU_2}{dQ_{12}} \\ \frac{dU_3}{dQ_1} & \frac{dU_3}{dQ_2} & \frac{dU_3}{dQ_3} & \dots & \frac{dU_3}{dQ_{12}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dU_{12}}{dQ_1} & \frac{dU_{12}}{dQ_2} & \frac{dU_{12}}{dQ_3} & \dots & \frac{dU_{12}}{dQ_{12}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Napríklad, hodnoty napätí po zmene jalových výkonov $\Delta Q_3 = +2,5$ MVar, $\Delta Q_6 = +3,3$ MVar, $\Delta Q_9 = +5,6$ MVar, $\Delta Q_{12} = -8,2$ MVar v uzloch (napríklad) č. 3, 6, 9 a 12 sa vypočítajú podľa vzťahu

$$U^{vyp.} = U^{pôv.} + \Delta U_{dQ3} + \Delta U_{dQ6} + \Delta U_{dQ9} + \Delta U_{dQ12} \quad (3)$$

Vypočítaný výsledok je možné overiť použitím N-R metódy. Porovnanie oboch metód je zobrazené v nasledujúcej tabuľke (Tabuľka 5).

Tabuľka 5
 Porovnanie vypočítaných veličín pomocou dvoch rôznych metód

Číslo uzla	P (MW)	Q (MVar)	U (kV) - koeficient	U (kV) – Newton-Raphson	Typ uzla
1	82,1572	-11,6908	418	418	Pδ
2	-10	5	417,9391	417,9391	PQ
3	-20	-7,5	417,925	417,9249	PQ
4	50	5	418,1364	418,1363	PQ
5	-20	-15	417,7216	417,7215	PQ
6	-7	2,3	417,6742	417,6741	PQ
7	-20	-10	417,3801	417,38	PQ
8	-5	3	417,6596	417,6595	PQ
9	-25	15,6	418,1044	418,1043	PQ
10	-5	7	417,973	417,9729	PQ
11	-5	5	417,8003	417,8001	PQ
12	-15	1,8	417,7673	417,7671	PQ

Porovnaním hodnôt (Tabuľka 5) je možné konštatovať, že v rámci prípustnej tolerancie sú výsledky totožné. Výhodou použitia tejto metódy je najmä rýchlosť výpočtu, keďže po vypočítaní U koeficientu, sa ďalej na riešenie sústavy, iteračné metódy nepoužívajú. Hlavnou výhodou je jednoduchosť tejto metódy. Nevýhodou tejto metódy je nízka presnosť a nedostatočná flexibilita.

Metódu napäťového koeficientu, je tiež možné použiť pre riešenie sústavy po zmene topológie siete pomocou upravenej rovnice (1):

$$[\Delta Q] = [c]^{-1} \cdot [\Delta U] \quad (4)$$

a potom analogicky z rovnice (3), bude vzťah pre jalový výkon:

$$Q^{\text{vyp.}} = Q^{\text{pôv.}} + \Delta Q \quad (5)$$

VIII. ZÁVER

Cieľom tohto článku, bolo preskúmanie možností estimácií napäťových a výkonových pomerov, v elektrizačnej sústave.

Článok je zameraný na identifikáciu veľkostí napätí a činných a jalových výkonov v uzloch vonkajšej siete, pri známych parametroch vnútornej sústavy a cezhraničných výkonových tokov. Tieto toky tečú hraničnými linkami, ktoré spájajú vnútornú a vonkajšiu sieť. Počiatočná sústava je tvorená, len vnútornou sieťou so známymi parametrami. Táto sieť sa v prvom kroku rozšíri o cezhraničné vedenia a úlohou je nájsť neznámych výkonových pomerov susedných vonkajších uzlov. V druhom kroku sa nájdené vonkajšie uzly prepoja vedeniami so známymi elektrickými parametrami, čo vytvorí uzavretú vonkajšiu sieť. Po úprave topológie sústavy, je potrebné opätovne nájsť správneho riešenia tak, aby toky výkonov a veľkosť napätí v rámci vnútornej sústavy korešpondovali známemu stavu. V poslednom kroku sa medzi hraničné uzly vonkajšej siete pridajú nové neznáme uzly. Existuje množstvo rôznych kombinácií pre riešenie takejto siete, ale bez dodatočných informácií o novo pridaných uzloch, nie je možné zvoliť tú správnu kombináciu, ktorá by sa zhodovala so skutočným stavom.

V poslednej časti sa poukazuje na vzájomný vzťah medzi jalovým výkonom a veľkosťou napätia. Pomocou zmeny jalového výkonu v každom uzle a tomu prislúchajúcich zmien napätí, je možné pre danú sústavu zostaviť maticu (U koeficient), ktorej prvky tvoria práve tieto zmeny. Táto metóda môže slúžiť ako informačný nástroj, pre simulovanie výsledných napätí v celej sústave, po zmene jalového výkonu v jednom alebo viacerých uzloch. Ďalším využitím tejto metódy je výpočet jalových výkonov po zmene topológie. Hlavným účelom tejto metódy je vytvorenie jednoduchého programu, pre riešenie ustáleného chodu sústavy, bez potreby znalosti programovania zložitých algoritmov v programe *MATLAB*. Výhodou je tiež rýchlosť výpočtu riešenia ustáleného chodu siete. Veľkou nevýhodou je naopak absencia výpočtu činných výkonov pre riešené uzly a menšia presnosť voči „hľadacej metóde“.

V budúcom riešení tejto problematiky je vhodné sa zamerať na odlišnú metódu výpočtu neznámej okolitej siete. Zaujímavým riešením je určenie impedančno-výkonových vzťahov pomocou matematických modelov pri zmene topológie. Vytvorením viacerých stavov (zmenou topológie), vychádzajúcich z počiatočnej siete, sa menia výkonové pomery a admitančné väzby v sústave. Z vypočítaných hodnôt každého stavu, by bolo možné určiť výsledný vzájomný vzťah medzi rozdelením výkonov v sústave a admitančnými väzbami pre konkrétnu sieť.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA č. 1/0372/18

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] KOLÁŘ, Pavel. Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON při provozu nového zdroje 120 MVA pracujícího do R 110 kV Prostějov [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013 [cit. 2018-04-22]. Dostupné na internete: <<http://hdl.handle.net/11012/28057>>.
- [2] GRIGER, V., GRAMBLÍČKA, M., NOVÁK, M., POKORNÝ, M. Prevádzka, riadenie a kontrola prepojenej elektrizačnej sústavy. Žilina: vydavateľstvo ŽU. 2001. 236s. ISBN 80-7100-823-0
- [3] Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a. s., Desiatročný plán rozvoja prenosovej sústavy na roky 2017 – 2026. [online]. Bratislava, 2016 [cit. 2018-01-25]. Dostupné na internete: <https://www.sepsas.sk/Dokumenty/ProgRozvoj/2017/04/DPR_PS_2017_2026.pdf>.
- [4] RAPŠÍK, M., SMOLA, M., BOHÁČ, M., MUCHA, M. Základy energetiky I. Bratislava: vydavateľstvo STU. 2004. 202s. ISBN 80-227-2074-7
- [5] KOLCUN, M., BEŇA, Ľ., MÉSZÁROS, A. Optimalizácia prevádzky elektrizačnej sústavy. Košice. 2009. 261s, ISBN 978-80-553-0323-9
- [6] SAADAT, Hadi. Power system analysis. The McGraw-Hill Companies, Inc. 1999. 691s. ISBN 0-07-561634-3
- [7] HODINKA, M., FECKO, Š. a NĚMEČEK, F. Přenos a rozvod elektrické energie. 1. vydanie. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1989. 323 s. ISBN 80-03-00065-3