



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ 110 KV

CALCULATION OF THE NETWORK STEADY STATE ON THE VOLTAGE LEVEL 110 KV

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR MACHÁČ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR MASTNÝ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Petr Macháč

ID: 73002

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod
2. Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV - teorie
3. Výpočet zkratových poměrů v síti 110 kV - teorie
4. Výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV napájené z rozvodny 110 kV
5. Vyhodnocení provedených výpočtů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

MACHÁČ, P. *Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D..

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV

Petr Macháč

vedoucí: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

Calculation of the network steady state on the voltage level 110 kV

by
Petr Macháč

Supervisor: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Brno University of Technology, 2014

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výpočtem ustáleného chodu sítě 110 kV před a po připojení plynového zdroje 70 MW a paroplynového zdroje 58 MW. Tato síť může být napájena ze dvou rozvodů 400/110 kV a to Sokolnice a Otrokovice. Výpočet ustáleného chodu sítě se provádí pro napájení buď z Otrokovic nebo ze Sokolnice. Dále se v této práci provádí výpočet jednofázových a trojfázových zkratů v rozvodnách 110 kV sítě. Výsledkem této práce je posouzení napěťových poměrů v síti, proudového zatížení vedení a zkratová odolnost rozvodu.

KLÍČOVÁ SLOVA: elektrická síť; rozvodna; vedení; zdroj elektrické energie; uzel sítě; zkrat

ABSTRACT

This thesis deals with load flow calculation of electrical network 110 kV before and after the connection to the 70MW gas supply and the 58MW steam and gas supply. This grid can be powered from two 400/110kV substations, namely Sokolnice and Otrokovice. The load flow calculation is realized for the power supply either from Otrokovice or Sokolnice. Furthermore, the calculation of the uni-phase and three phase short circuits in the substations of 110kV network is realized in this thesis. The result of the thesis is the assessment of the voltage ratio in the network, current load of the power line and short circuit resistance of the substations.

KEY WORDS: electrical network; substation; power line; power plant; network node; short circuit

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
1 ÚVOD	12
2 CÍL PRÁCE	13
3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	14
3.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA	14
3.2 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU	16
3.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA.....	17
3.4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	18
4 VÝPOČET ZKRATŮ	23
4.1 ČASOVÝ PRŮBĚH ZKRATOVÝCH PROUDŮ	23
4.2 ZKRATY PODLE SPOJENÍ ŽIVÝCH ČÁSTÍ A ZEMĚ.....	24
4.3 METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	25
4.4 ODVOZENÍ ROVNIC PRO JEDNOTLIVÉ DRUHY ZKRATŮ	27
4.4.1 TROJFÁZOVÝ SOUMĚRNÝ ZKRAT	27
4.4.2 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT.....	28
4.5 ZKRATOVÉ VÝPOČTY VE SKUTEČNÝCH HODNOTÁCH	29
5 INFORMACE O ŘEŠENÉ SÍTI.....	31
6 VÝPOČTY USTÁLENÉHO CHODU.....	33
6.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE 110kV NAPÁJENÉ Z ROZVODNY OTROKOVICE	35
6.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE 110kV NAPÁJENÉ Z ROZVODNY SOKOLNICE	44
7 VÝPOČTY ZKRATŮ	52
8 ZÁVĚR.....	54
POUŽITÁ LITERATURA	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Příklad sítě.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4-1 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu [4]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4-2 Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory [3]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4-3 Schematické znázornění trojfázového zkratu a náhradní schéma [3]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-4 Schematické znázornění jednofázového zkratu a náhradní schéma [3]</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5-1 Řešená síť ve schématu ES ČR s vyznačeným zdrojem v uzlu Prostějov.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5-2 Řešená síť v jednopólovém schématu</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 6-1 Řešená síť 110kV napájená z rozvodny Otrokovice v programu LUG.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 6-2 Řešená síť 110kV napájená z rozvodny Sokolnice v programu LUG.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 7-1 Řešená síť pro výpočet zkratů v programu LUG.....</i>	<i>52</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 Tabulka činných a jalových výkonů v síti</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 6-1 Tabulka činných a jalových výkonů které jsou odebírány nebo dodávány do sítě 110kV</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 6-2 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v jarním období.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6-3 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v letním období.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6-4 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v podzimním období</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 6-5 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v zimním období</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6-6 Tabulka zatížení vedení bez připojení plynového a paroplynového zdroje</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6-7 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v jarním období</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 6-8 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v letním období.</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 6-9 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v podzimním období.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6-10 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v zimním období</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6-11 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v jarním období</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 6-12 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v letním období</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6-13 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v podzimním období</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6-14 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v zimním období</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6-15 Tabulka zatížení vedení bez připojení plynového a paroplynového zdroje</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6-16 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v jarním období</i>	<i>48</i>

Tab. 6-17 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v letním období	49
Tab. 6-18 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v podzimním období.....	50
Tab. 6-19 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v zimním období	51
Tab. 7-1 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení plynového i paroplynového zdroje . Sít' 110kV je napojena na rozvodnu Otrokovice	52
Tab. 7-2 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení pouze plynového zdroje . Sít' 110kV je napojena na rozvodnu Otrokovice	52
Tab. 7-3 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení plynového i paroplynového zdroje. Sít' 110kV je napojena na rozvodnu Sokolnice.....	53
Tab. 7-4 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení plynového zdroje. Sít' 110kV je napojena na rozvodnu Sokolnice.....	53

1 ÚVOD

Elektrizační soustava obsahuje množství prvků, které můžeme rozdělit do základních skupin:

- výroba elektrické energie – k tomuto účelu slouží elektrárny, které přeměňují různé druhy energií na energii elektrickou
- přenos a rozvod el. energie – tvoří cestu mezi výrobnami a spotřebiči el. energie. Tuto skupinu tvoří vedení, transformátory, zařízení rozvoden
- spotřeba – spotřebiče přeměňují el. energii na jiné druhy energie

Elektrizační soustava musí být uzpůsobena některým faktorům, které provázejí její existenci

- a) Současnost – el. energie vyrobená musí být v daný okamžik spotřebovaná. Aby nebylo třeba mít k dispozici maximální výkon potřebný ve špičkách spotřeby v klasických elektrárnách, je možné mít rezervy, které se „plní“ v době kdy je el. energie přebytek a poskytují svůj výkon ve špičkách. K tomuto účelu mohou sloužit např. přečerpávací elektrárny (v ČR např. Dalešice, Dlouhé Stráně) nebo baterie (např. Chino v Kalifornii 10MW)
- b) Přechodné děje – ke zvládnutí těchto fyzikálních jevů je zapotřebí rychlých automatizovaných prvků
- c) Rozvoj – el. soustava musí mít dostatečné rezervy výrobní i přenosové, aby bylo možno spotřebitele zásobovat kvalitní el. energií v požadovaném množství. Kvalitou el. energie je myšleno že bude mít požadované napětí, obsah vyšších harmonických, symetrii v třífázové soustavě a frekvenci v povolené toleranci

Elektrická síť – jejími hlavními prvky jsou el. vedení a el. stanice, které jsou vzájemně propojeny. Můžeme je rozdělit na přenosové sítě, které slouží k přenosu velkých výkonů na velké vzdálenosti, distribuční sítě - rozvádějí el. energii ke koncovým uživatelům a průmyslové sítě, které slouží k rozvodu v průmyslových objektech.

Elektrická vedení – slouží k přenosu el. energie mezi uzly sítě. Uzly mohou být místa připojení zdrojů nebo spotřebičů, místa rozvětvení sítě, místa transformace el. energie atd. Můžou být venkovní vedení, které sestává ze stožárů, izolátorů a izolovaných nebo neizolovaných vodičů nebo vedení pod zemí, která musí být tvořena izolovaným vodičem – kabelem.

Elektrické stanice – stavby a zařízení v uzlech el. soustavy sloužící k různým účelům:

- transformovny a rozvodny – transformace el. energie na jiné napětí a její rozvod
- spínací stanice – slouží k rozvodu el. energie o stejném napětí
- měnírny – změna střídavého proudu na jinou frekvenci nebo na stejnosměrný proud a rozvod
- kompenzační stanice

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV pokud uvažujeme že je rozvodna 110/22 kV v Prostějově napájena z rozvodny 400/110 kV Otrokovice nebo z rozvodny 400/110 kV Sokolnice. Výpočet ustáleného chodu této sítě provedeme, pro čtyři termíny v roce, kdy ve všech termínech pracuje stávající plynový zdroj 70 MW na 100% a při různém zatížení uvažovaného paroplynového zdroje a při různém odběru elektrické energie v rozvodnách 110/22 kV v dané síti.

Dále bude proveden výpočet zkratových poměrů při 3fázovém a jednofázovém zkratu ve všech rozvodnách sítě, pro napájení 110 kV sítě z rozveden 400/110 kV v Otrokovících nebo ze Sokolnice. Budeme uvažovat že v rozvodně Prostějov vyrábíme 0, 70 a 128 MW.

V první části práce bude teoreticky rozebrán výpočet ustáleného chodu a výpočet zkratových poměrů. V druhé části bude proveden výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů při podmínkách uvedených v prvním odstavci.

3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

Ustáleným chodem se myslí stav při kterém nedochází k přechodným dějům (zkraty, zapínání a vypínání různých zařízení nebo vedení). Aby bylo možné řídit provoz a navrhovat další rozvoj el. soustavy je třeba znát činné a jalové výkony, ztráty a napětí v jednotlivých uzlech a větvích. Dále využíváme tyto údaje při výpočtech přechodných jevů (zkraty, statická a dynamická stabilita) a při řešení optimalizačních úloh (hospodárné rozdělování výroby činných a jalových výkonů, regulace napětí, hodnocení spolehlivosti el. soustavy). Také se tyto výpočty používají ke kontrole přetížení některého prvku el. soustavy. Výpočty se většinou provádí pro maximální a minimální zatížení sítě. V praxi jsou odběry a dodávky zadávány v činných a jalových výkonech a z tohoto důvodu nemůžeme síť popsat soustavou lineárních rovnic, ale ustálený chod el. soustavy je popsán soustavou nelineárních rovnic. Na tuto soustavu musíme použít některou iterační metodu. Výpočty iteračními metodami bývají zdlouhavé a špatně nebo vůbec nekonvergují. V některých případech výpočtu ustáleného chodu, kde není třeba velká přesnost, je možné tuto úlohu linearizovat. Je to např. u dlouhodobého plánování rozvoje el. soustavy nebo u výpočtů spolehlivosti. Zadané výkony v uzlech se podělí střední hodnotou očekávaného napětí nebo jmenovitou hodnotou napětí.

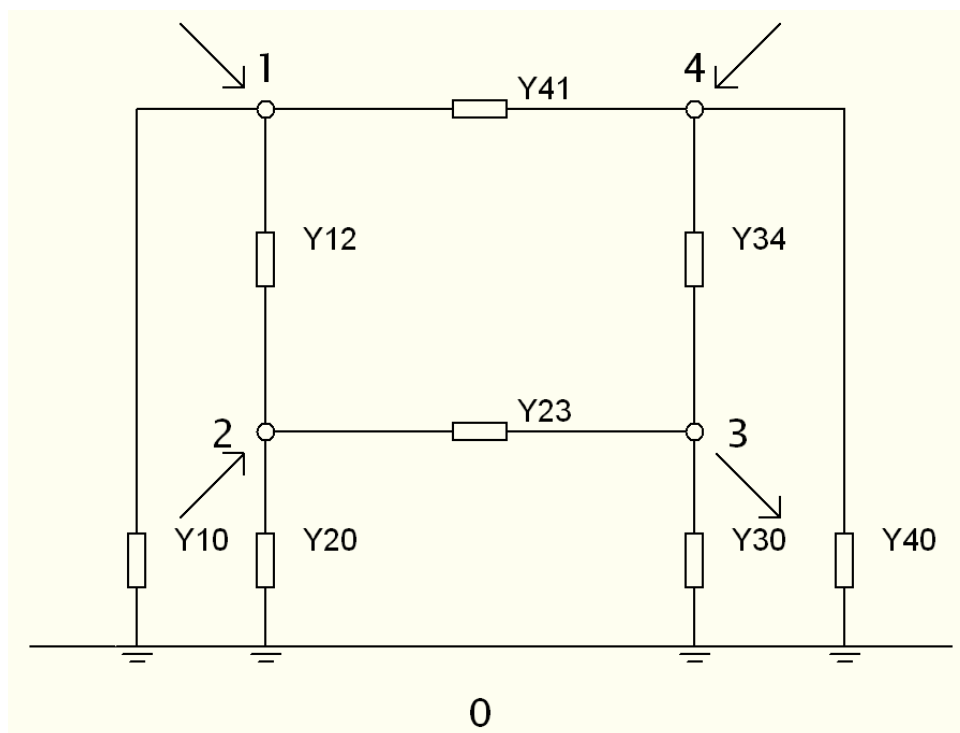
Pro sestavování rovnic ustáleného chodu můžeme použít některou metodu která řeší lineární obvody – metodu smyčkových proudů nebo metodu uzlových napětí.

Při řešení sítí uvažujeme tyto zjednodušující podmínky:

- a) vedení nahrazujeme Π články, transformátory zpravidla Γ články
- b) trojfázová soustava má všechny prvky souměrné – potom můžeme tuto soustavu řešit jako jednofázovou
- c) prvky sítě nejsou závislé na proudu a na napětí, mají lineární charakteristiku
- d) v soustavě se nenacházejí žádné zdroje vyšších harmonických frekvencí
- e) zdroje a odběry jsou zadány pomocí výkonů. Výkony nejsou závislé na změně napětí

3.1 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Jednotlivé prvky el. soustavy jsou zadány podélnými a příčnými admitancemi. Podélné admitance jsou mezi uzly a příčné mezi daným uzlem a referenčním uzlem který má nulový potenciál (zem). Parametry všech prvků jsou přepočítány na jedno společné napětí, aby bylo možné všechny prvky galvanicky spojit.



Obr. 3-1 Příklad sítě

Podle metody uzlových napětí můžeme sestavit maticový zápis soustavy rovnic podle obr. 2-1

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ -I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (A; S, V) \quad (3.1)$$

Tento zápis můžeme zkrátit

$$[I] = [Y][U] \quad (A; S, V) \quad (3.2)$$

U_1, U_2, U_3, U_4 – neznámá uzlová napětí

I_1, I_2, I_3, I_4 – zadané uzlové proudy, odběry se značí znaménkem - a dodávky +

Y_{ii} – součet admitancí které jsou připojeny k i – tému uzlu

Y_{ij} – součet admitancí se záporným znaménkem, které jsou připojeny mezi i – tý a j – tý uzel

Uvedme příklad výpočtu prvku admitanční matice pro síť na obr. 2-1

- diagonální prvek

$$Y_{11} = Y_{10} + Y_{12} + Y_{41} \text{ (S)} \quad (3.3)$$

- mimodiagonální prvek

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_{12} \text{ (S)} \quad (3.4)$$

Další možný zápis rovnic (2.1), (2.2) je

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \text{ (A, S, V)} \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

n je počet uzlů v síti bez referenčního uzlu, který bude mít v dalších zápisech číslo 0.

Pokud by síť na obr. 2-1 neobsahovala příčné admitance, byla by admitanční matice této sítě singulární a soustava (2.1), (2.2), (2.5) závislá a tato soustava by měla nekonečno řešení. Admitanční matice je sice regulární, ale k vypočítání skutečných hodnot uzlových napětí je třeba zvolit bilanční uzel – viz další kapitola.

3.2 Eliminace bilančního uzlu

Bilanční uzel hradí ztráty činných a jalových výkonů a vyrovnává bilanci výkonů mezi dodávkami a odběry. Protože je v rovnicích (2.1) a (2.5) více neznámých než rovnic je třeba zadat v bilančním uzlu napětí. V dalším zápisu soustavy rovnic bude mít bilanční uzel číselné označení 1.

Pokud máme zadáno napětí v bilančním uzlu U_1 , můžeme soustavu rovnic (2.1) přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ -I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{21} & U_1 \\ Y_{31} & U_1 \\ Y_{41} & U_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \text{ (A;S,V)} \quad (3.6)$$

přepíšeme také rovnici (2.5)

$$I_i = Y_{i1} U_1 + \sum_{j=2}^n Y_{ij} U_j \text{ (A, S, V)} \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.7)$$

Soustavu rovnic (2.6) (bez matice $[Y_{i1} U_1]$) můžeme řešit např. eliminační metodou, přímou inverzí admitanční matice řádu $(n - 1)$ nebo některou iterační metodou, po vypočítání uzlových napětí $U_2, U_3, \dots, U_n$ je třeba vypočítat proudy v jednotlivých větvích sítě podle vztahu

$$I_{pq} = Y_{pq} (U_p - U_q) \text{ (A, S, V)} \quad (3.8)$$

I_{pq} – proud tekoucí mezi uzly p a q

Y_{pq} – impedance mezi uzly p a q

U_p, U_q – napětí v uzlech p a q

Když známe proudy v jednotlivých větvích, můžeme vypočítat proud v bilančním uzlu. Eliminací bilančního uzlu se nazývá vypoštění rovnice pro bilanční uzel v rovnicích (2.6) a (2.7).

3.3 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

Obvykle bývají dodávky a odběry zadány činnými a jalovými výkony. Pro i – tý uzel platí:

$$S_i = P_i + jQ_i = U_i I_i^* \quad (\text{VA, W, var}) \quad (3.9)$$

O znaménku u jalového výkonu rozhoduje zda je jalový výkon induktivního nebo kapacitního charakteru. Na následujícím vztahu můžeme vysvětlit kdy bude jalový výkon záporný a kdy kladný.

$$S = P + jQ = UI^* = U \angle \delta I \angle -\alpha = UI \angle \varphi = S(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (\text{VA, W, var, V, A, rad}) \quad (3.10)$$

Fázový posuv φ mezi proudem a napětím se vypočítá

$$\varphi = \delta - \alpha \quad (\text{rad}) \quad (3.11)$$

Úhel δ je úhel mezi kladnou částí reálné osy a fázorem napětí, α je úhel mezi kladnou částí reálné osy a fázorem proudu. Pokud bude úhel δ větší než úhel α – bude fázor napětí předbíhat fázor proudu – fázový posuv φ , činný výkon P i jalový výkon Q bude kladný – charakter zdánlivého výkonu bude induktivní. Pokud bude úhel δ menší než úhel α – bude fázor proudu předbíhat fázor napětí – fázový posuv φ bude záporný, činný výkon P bude kladný a jalový výkon Q bude záporný – charakter zdánlivého výkonu bude kapacitní. U odběrového uzlu by znaménka u výkonů a u fázového posuvu byla opačná.

Tab. 3-1 Tabulka činných a jalových výkonů v síti

	Zdroj $P > 0$	Odběr $P < 0$
induktivní $\varphi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
kapacitní $\varphi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$

V praxi se používá termín „výroba jalového výkonu“ u spotřebičů induktivního charakteru, které jsou kompenzovány bateriemi kondenzátorů, ze znaménka u jalových výkonů v tab. 2-1 můžeme vidět proč. Pokud je činný výkon odebíráán (je záporný) je kapacitní jalový výkon kladný tzn. dodává jalový výkon spotřebiči.

Vyjádríme-li z rovnice (2.9) proud

$$I_i = \frac{S_i^*}{U_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} \quad (\text{A, VA, V, W, var}) \quad (3.12)$$

pak po dosazení do rovnice (2.7) dostaneme

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (\text{A, VA, V, W, var}) \quad (3.13)$$

Z rovnic (2.7) a (2.13) vyplývá, že byla provedena eliminace bilančního uzlu a také volba napětí U_1 . Pokud jsou zadány uzlové výkony hradí bilanční uzel ztráty činného a jalového výkonu v síti a rozdíl mezi dodávkami a odběry.

Protože jsou zadány odběry a dodávky výkonů v síti, napětí bilančního uzlu a admitance Y_{ij} , je třeba řešit soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic (2.13). V další kapitole se budeme

zabývat Newtonovou iterační metodou, která se používá k řešení těchto rovnic. Pomocí této metody zjistíme uzlová napětí a potom můžeme určit toky výkonů a výkonové ztráty v síti.

Nahradíme-li prvky sítě Π články, můžeme vypočítat proud tekoucí do uzlu i

$$I_i = (U_i - U_j)Y_{ij} + U_i Y_{i0} \quad (A, V, S) \quad (3.14)$$

a výkon

$$S_i = P_i + jQ_i = U_i I_i^* \quad (VA, W, \text{var}, V, A) \quad (3.15)$$

Podle úmluvy – pokud výkon do uzlu vtéká je výkon kladný, znaménko u jalového výkonu určuje jeho charakter.

Dále pro proud a výkon do uzlu j

$$I_j = (U_j - U_i)Y_{ij} + U_j Y_{j0} \quad (A, V, S) \quad (3.16)$$

$$S_j = P_j + jQ_j = U_j I_j^* \quad (VA, W, \text{var}, V, A) \quad (3.17)$$

Činné a jalové ztráty v tomto případě zjistíme algebraickým součtem výkonů tekoucích do uzlů i a j

$$\Delta P_{ij} = P_i + P_j \quad (W) \quad (3.18)$$

$$\Delta Q_{ij} = Q_i + Q_j \quad (\text{var}) \quad (2.19)$$

V těchto výpočtech je trojfázová soustava nahrazena jednofázovou soustavou, takže ve všech rovnicích počítáme z fázovými hodnotami napětí a výkonem přenášeným jednou fází.

3.4 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Je třeba vyřešit soustavu nelineárních nebo lineárních rovnic v tomto tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3.20)$$

Nejdříve musíme provést odhady kořenů v nulté iteraci $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$. Rozdíly mezi těmito odhady přesnými hodnotami jsou $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Přesné hodnoty kořenů jsou:

$$x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1, \quad x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2, \quad \dots, \quad x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n.$$

Soustavu rovnic (2.20) je možné tedy přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3.21)$$

Všechny rovnice soustavy (2.21) je možné přepsat v Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$. Přepíšeme 1. rovnici

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \bigg|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \bigg|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \bigg|_0 \Delta x_n + \Phi_1 = y_1 \quad (3.22)$$

$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \bigg|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ a ve Φ_1 jsou zahrnuty členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ a druhé a vyšší derivace funkce f_1 . Pokud jsou odhady kořenů přibližně stejné jako přesná hodnota, difference Δx_i jsou potom malé a můžeme Δx_i s vyššími mocninami zanedbat, protože $\Phi_1 \rightarrow 0$.

Označíme – li výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$ můžeme rovnici (2.22) přepsat do tohoto tvaru

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \bigg|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \bigg|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \bigg|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \quad (3.23)$$

$\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a hodnoty určené dosazením odhadu kořenů $y_1^{(0)}$ do rovnice (2.22).

Stejně můžeme upravit i ostatní rovnice soustavy (2.21). Dostaneme soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých pomocí kterých můžeme vypočítat neznámé difference $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Tuto soustavu je možné zapsat v maticovém zápisu

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \bigg|_0 & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \bigg|_0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \bigg|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \bigg|_0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \bigg|_0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \bigg|_0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \bigg|_0 & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \bigg|_0 & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \bigg|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Tuto soustavu můžeme zapsat i zkráceně

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (3.25)$$

Matice $[J]$ je matice parciálních derivací – Jacobián. Ze soustavy rovnic (2.24) nebo (2.25) vypočítáme vektor diferencí $[\Delta x]$ a vypočítáme nové – opravené odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \text{ pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.26)$$

Tyto opravené odhady kořenů použijeme při výpočtu v další iteraci. Vypočítané hodnoty diferencí Δx_i nejsou úplně přesné, protože jsme v Taylorově polynomu uvažovali pouze 1. derivace.

Pokud upravíme rovnice (2.25) a (2.26), můžeme iterační proces postupného zpřesňování kořenů rovnic zapsat v iteračním tvaru

$$[\Delta \mathbf{x}^{(k)}] = [\mathbf{J}^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta \mathbf{y}^{(k)}] \quad (3.27)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \quad (3.28)$$

kde horní index k určuje k-tou iteraci.

Pro úspěšné vyřešení soustavy rovnic předpokládáme – spojitost parciálních derivací $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$, jednoznačnost řešení soustavy rovnic (2.24) a konvergence iteračního postupu. Tyto podmínky bývají obvykle v praktických úlohách výpočtu ustáleného chodu sítí splněny.

Nyní použijeme tuto metodu na rovnice (2.13), které popisují ustálený chod sítí. Rovnice (2.13) přepíšeme do tvaru podle soustavy rovnic (2.20).

$$P_i - jQ_i = U_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j, \quad i = 2, 3, n \quad (3.29)$$

Pravou stranu rovnice (2.29) rozepíšeme na reálnou a imaginární část. Můžeme použít buď polární nebo složkový tvar. Použijeme polární tvar.

$$U_i = U_i \angle \delta_i, \quad U_i^* = U_i \angle -\delta_i, \quad Y_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij}$$

Dosazením napětí a admitance v těchto tvarech do rovnice (2.29), dostaneme po úpravě a využitím vlastností goniometrických funkcí – $\cos(-x) = \cos(x)$, $\sin(-x) = -\sin(x)$

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad i = 2, 3, \dots, n \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad i = 2, 3, \dots, n \end{aligned} \quad (3.30)$$

Toto je soustava $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ napětí a jejich úhlů. Pro tyto výpočty předpokládáme, že je zadáno napětí v bilančním uzlu a jeho úhel δ_1 (obvykle se volí $\delta_1 = 0$). Když použijeme rovnice (2.30) a soustavu rovnic (2.24) pro iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ dostaneme soustavu.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \hline \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

V tomto případě neznačí ΔU_i úbytky napětí, ale difference odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnic (2.30).

Zjednodušený maticový zápis

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Vypočítáme prvky Jacobiánu, derivováním rovnic (2.30) podle jednotlivých proměnných.

a) Výpočet prvků matice $[\partial P / \partial U]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i Y_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.33)$$

mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.34)$$

b) Výpočet prvků matice $[\partial P / \partial \delta]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.35)$$

mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.36)$$

c) Výpočet prvků matice $[\partial Q/\partial U]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i Y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.37)$$

mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.38)$$

d) Výpočet prvků matice $[\partial Q/\partial \delta]$

diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.39)$$

mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.40)$$

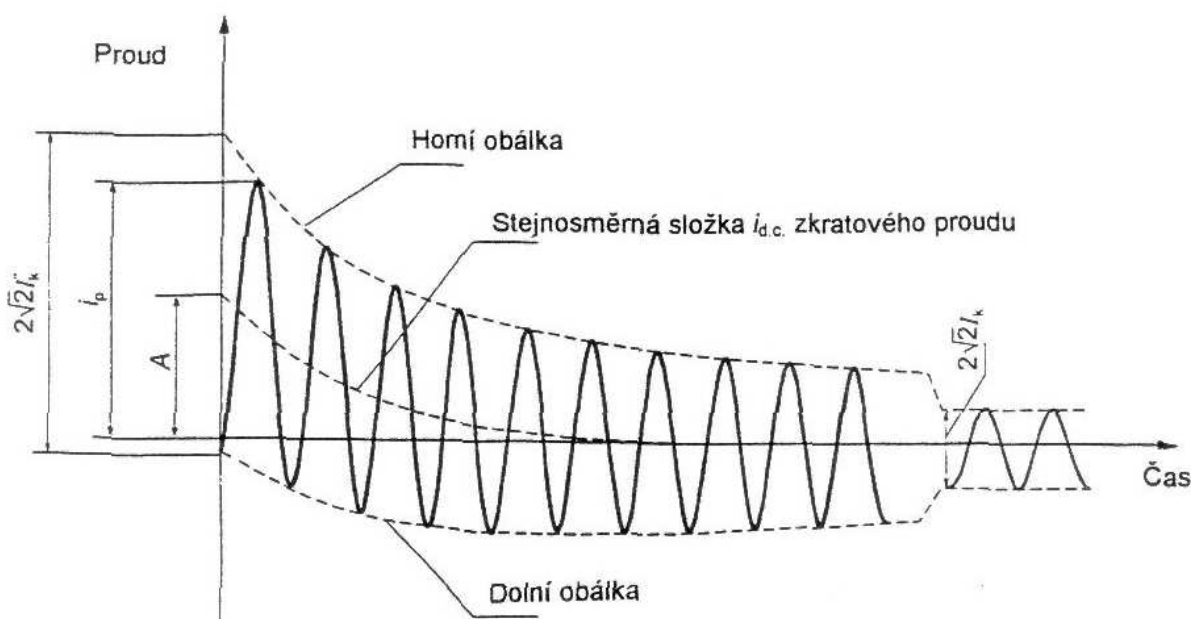
4 VÝPOČET ZKRATŮ

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj. Dochází k němu při vodivému spojení fází nebo fází se zemí, které mají při normálním provozu různá napětí, přes malý odpor nebo impedanci. Při zkratu dochází v místech blízkým zkratu k průtoku zkratového proudu, který je několikanásobně vyšší, než běžné provozní proudy. Proto musí dojít k odpojení zkratovaných částí od zdroje.

Při růstu spotřeby elektrické energie a z toho plynoucím růstem výroby elektrické energie v elektrárnách dochází k růstu zkratových proudů v elektrických sítích. Tento růst ovlivňuje parametry rozvodné soustavy a konstrukci elektroenergetických zařízení. Pro dimenzování těchto zařízení je potřeba znát velikost a časový průběh zkratových proudů.

4.1 Časový průběh zkratových proudů

Při zkratu dochází k prudké změně impedance a důsledkem této změny je přechodný děj v synchronních strojích a v ostatních prvcích ES. Energie magnetického pole se nemění skokem a proto má zkratový proud neharmonický průběh. Zkratový proud dosahuje největších hodnot při vzniku zkratu. V průběhu času hodnoty zkratového proudu klesá až se ustálí na harmonickém průběhu.



Obr. 4-1 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu [4]

Reálný časový průběh zkratu obsahuje tyto základní složky:

Rázovou (subtranzitní) složku $i_k''(t)$ – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k'' . Projevuje se na začátku zkratu a trvá méně než desetinu sekundy. Tato složka rychle doznívá.

Přechodnou (tranzitní složku $i'_k(t)$ – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T'_k . Jedná se o složku pomalu doznívající. Doba zániku bývá řádově v sekundách.

Ustálenou složku $i_k(t)$ – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a konstantní amplitudu.

Stejnoseměrnou (aperiodickou) složku $i_{d.c.}(t)$ – tato složka představuje exponenciálně klesající stejnosměrný proud s časovou konstantou $T_{d.c.}$.

Charakteristické hodnoty průběhu [4] a pomocí nich můžeme zjednodušit popis přechodného jevu:

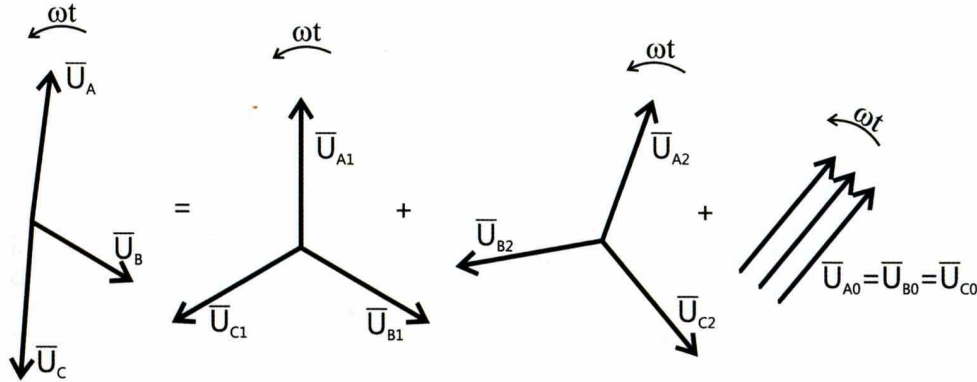
- *počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_k* - efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci
- *nárazový zkratový proud i_p* – maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu
- *souměrný zkratový vypínací proud I_b* – efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení
- *ustálený zkratový proud I_k* – efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu
- *ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}* – efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění
- *doba trvání zkratu T_k* – doba od počátku vzniku zkratu do okamžiku oddělení kontaktů posledního pólu spínacího zařízení

4.2 Zkraty podle spojení živých částí a země

- *jednofázové (jednopolové)* – spojení jedné fáze se zemí, v síti s účinně uzemněným uzlem
- *dvoufázové (dvupolové)* – spojení dvou fází
- *dvoufázové zemní (dvupolové zemní)* – spojení dvou fází se zemí
- *trojfázové (trojpolové)* spojení všech tří fází
- *trojfázové zemní (trojpolové zemní)* – spojení tří fází se zemí

4.3 Metoda souměrných složek

V trojfázových soustavách můžeme hvězdici nesymetrických fázorů nahradit složením symetrických fázorů sousledné, zpětné a netočivé soustavy.



Obr. 4-2 Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory [3]

Uvažujeme jednoduchou symetrickou trojfázovou soustavu s alternátorem jako zdrojem napětí sousledné složkové soustavy. Obvod zahrnuje impedanci složenou s impedance alternátoru a s impedance vnějšího obvodu.

Pokud zvolíme jako referenční fázi A, pak vyjádříme fázory napětí a proudu fází A, B, C v soustavě souměrných složek.

$$\begin{aligned} U_A &= U_1 + U_2 + U_0 \\ U_B &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0 \\ U_C &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} I_A &= I_1 + I_2 + I_0 \\ I_B &= a^2 I_1 + a I_2 + I_0 \\ I_C &= a I_1 + a^2 I_2 + I_0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Indexy 0, 1 a 2 značí nulovou, souslednou a zpětnou složkovou soustavu.

Pro operátor a platí

$$\begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 + a + a^2 &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pro výpočet sousledných, zpětných a nulových napětí a proudů platí:

$$\begin{aligned}U_1 &= \frac{1}{3}(U_A + aU_B + a^2U_C) \\U_2 &= \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C) \\U_0 &= \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C)\end{aligned}\tag{4.4}$$

$$\begin{aligned}I_1 &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) \\I_2 &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C) \\I_0 &= \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)\end{aligned}\tag{4.5}$$

Všechny tři soustavy (sousledná, zpětná a netočivá) můžeme považovat za samostatné. Pokud sečteme symetrická napětí a symetrické úbytky na jednotlivých zkratových impedancích Z_1 , Z_2 a Z_0 dostaneme jednotlivá symetrická napětí zdroje E_1 , E_2 , E_0 .

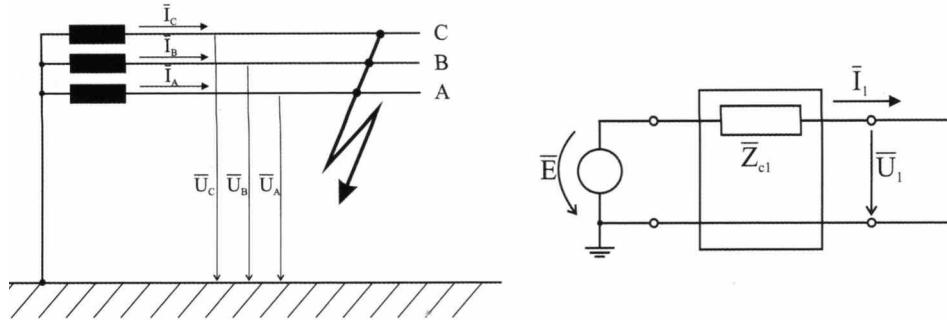
$$\begin{aligned}E_1 &= U_1 + I_1Z_1 \\E_2 &= U_2 + I_2Z_2 \\E_0 &= U_0 + I_0Z_0\end{aligned}\tag{4.6}$$

V praxi můžeme považovat napětí generátoru vždy za souměrné. Napětí zdroje má pak pouze souměrnou složku a rovnice (4.6) můžeme přepsat do tvaru

$$\begin{aligned}E &= U_1 + I_1Z_1 \Rightarrow U_1 = E - I_1Z_1 \\0 &= U_2 + I_2Z_2 \Rightarrow U_2 = -I_2Z_2 \\0 &= U_0 + I_0Z_0 \Rightarrow U_0 = -I_0Z_0\end{aligned}\tag{4.7}$$

4.4 Odvození rovnic pro jednotlivé druhy zkratů

4.4.1 Trojfázový souměrný zkrat



Obr. 4-3 Schematické znázornění trojfázového zkratu a náhradní schéma [3]

Ze schematu Obr. 4-3 vyplývá že se napětí v místě zkratu rovnají 0 ($U_A = U_B = U_C = 0$) a před zkratem je soustava v chodu naprázdno.

Pokud jsou napětí při zkratu nulová, pak z rovnic (4.1) plyne

$$\begin{aligned} U_A &= U_1 + U_2 + U_0 = 0 \\ U_B &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0 = 0 \\ U_C &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0 = 0 \\ \Rightarrow U_1 &= U_2 = U_0 = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Dosazením (4.8) do (4.7) dostaneme

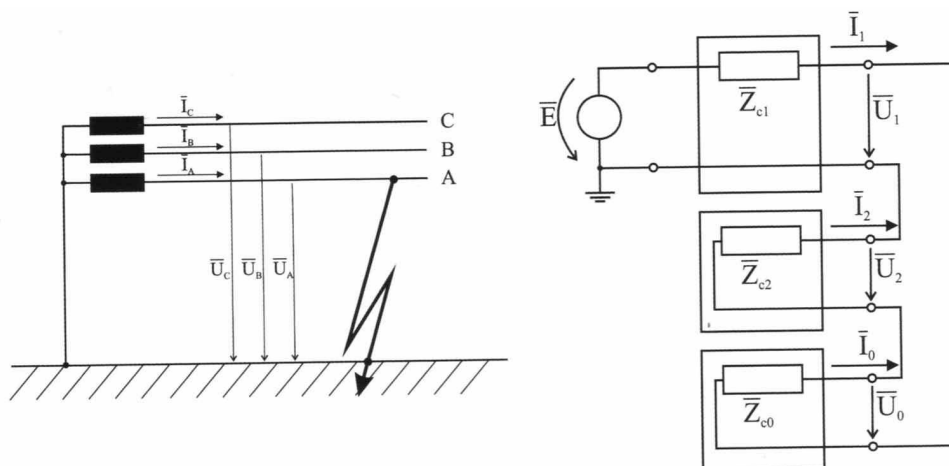
$$\begin{aligned} I_2 &= I_0 = 0 \\ I_1 &= \frac{E}{Z_1} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Z těchto rovnic vyplývá druhé schéma v Obr.4-3

Dosazením souměrných proudů (4.9) do (4.2) dostaneme vztahy pro výpočet proudů v jednotlivých fázích

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{E}{Z_1} \\ I_B &= a^2 \frac{E}{Z_1} \\ I_C &= a \frac{E}{Z_1} \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.4.2 Jednofázový zkrat



Obr. 4-4 Schematické znázornění jednofázového zkratu a náhradní schéma [3]

U tohoto zkratu předpokládáme, že $U_A = 0$, $I_B = I_C = 0$. Před zkratem je soustava v chodu naprázdno.

Pokud dosadíme $I_B = I_C = 0$ do (4.5) dostaneme

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_A \quad (4.11)$$

Dosazením $U_A = 0$ do (4.1) a (4.7) dostaneme

$$U_A = U_0 + U_1 + U_2 = E - Z_1 I_1 - Z_2 I_2 - Z_0 I_0 \quad (4.12)$$

Odtud s použitím (4.11) dostaneme vztah pro jednotlivé symetrické složky

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)} \quad (4.13)$$

Pokud sečteme složky (4.13), dostaneme výsledný zkratový proud

$$I_A = \frac{3E}{(Z_1 + Z_2 + Z_0)},$$

$$I_B = I_C = 0 \quad (4.14)$$

4.5 Zkratové výpočty ve skutečných hodnotách

Obvody zkratových proudů zahrnují transformátory a tedy více napěťových úrovní. Podélné impedance prvků zkratového obvodu (generátorů, transformátorů, reaktorů a vedení) je tedy potřeba přepočítat na zvolenou napěťovou hladinu (obvykle volíme napěťovou hladinu s místem poruchy). Přepočet tedy provedeme pomocí převodů transformátorů mezi místem poruchy a místem s přepočítávanou impedancí. Protože neznáme aktuální nastavení odboček transformátorů v momentě vzniku zkratu, vyjadřujeme převod přibližně pomocí jmenovitých napětí sítě. Podélné impedance prvků zkratového obvodu se v tomto případě přepočítávají do náhradního zkratového obvodu pomocí druhé mocniny převodu mezi základním obvodem s napětím U_v a obvodem s napětím U_n , ve kterém se nachází přepočítávaná impedance. Dále budou uvedeny v tomto odstavci výpočty sousledných impedancí některých prvků náhradní sousledné složkové soustavy.

Přepočtená impedance vedení $Z_{ved,p}$ je

$$Z_{ved,p} = Z_{ved,n} \left(\frac{U_v}{U_{ved,n}} \right)^2 \quad (4.15)$$

$Z_{ved,n}$ je impedance vedení v obvodu s napětím $U_{ved,n}$.

Modul přepočtené náhradní impedance transformátoru $Z_{tr,p}$ určíme následovně

$$Z_{tr,p} = e_k \frac{U_{tr,n}^2}{S_{tr,n}} \left(\frac{U_v}{U_{tr,n}} \right)^2 = e_k \frac{U_v^2}{S_{tr,n}} \quad (4.16)$$

Kde e_k je napětí nakrátko a $S_{tr,n}$ je jmenovitý výkon transformátoru.

Přepočtenou náhradní rezistenci transformátoru $R_{tr,p}$ vyjádříme

$$R_{tr,p} = \frac{\Delta P_{cu}}{3I_{tr,n}^2} \left(\frac{U_v}{U_{tr,n}} \right)^2 = \frac{\Delta P_{cu} U_{tr,n}^2}{S_{tr,n}^2} \left(\frac{U_v}{U_{tr,n}} \right)^2 = \frac{\Delta P_{cu} U_v^2}{S_{tr,n}^2} \quad (4.17)$$

ΔP_{cu} jsou ztráty transformátoru nakrátko

Přepočtená náhradní reaktance je

$$X_{tr,p} = \sqrt{Z_{tr,p}^2 - R_{tr,p}^2} \quad (4.18)$$

Přepočtená náhradní impedance je

$$Z_{tr,p} = R_{tr,p} + jX_{tr,p} \quad (4.19)$$

Při výpočtu počátečního rázového zkratového proudu můžeme zanedbat náhradní rezistenci transformátoru – $R_{tr,p} = 0, X_{tr,p} \cong Z_{tr,p}$. Náhradní rezistance se doporučuje uvažovat u transformátorů vn/nn.

Přepočtená náhradní impedance generátoru $Z_{g,p}$. Při zanedbání rezistance vypočteme tuto impedanci ze subtranzitní reaktance generátoru x_d'' (v poměrných jednotkách) a ze jmenovitého výkonu generátoru $S_{g,n}$.

$$Z_{g,p} = j \cdot x_d'' \frac{U_{g,n}^2}{S_{g,n}} \left(\frac{U_v}{U_{g,n}} \right)^2 \cong j \cdot x_d'' \frac{U_v^2}{S_{g,n}} \quad (4.20)$$

Modul přepočtené náhradní impedance sítě. Při výpočtu zkratových poměrů se občas stává, že je potřeba pro správnost výsledků zahrnout do zkratového obvodu i vliv připojené sítě obsahující zdroje, jejíž přesnou konfiguraci neznáme. Zkratový příspěvek takovéto sítě ke zkratovému proudu modelujeme pomocí náhradní impedance vypočtené z jmenovitého napětí této sítě $U_{s,n}$ a počátečního rázového zkratového výkonu příspěvku sítě při trojfázovém zkratu S_{ks}'' , případně počátečního rázového zkratového proudu příspěvku této sítě I_{ks}'' . Tedy ze zkratového proudu, který by tekla do trojfázového zkratu v místě připojení této sítě ke zkoumané části sítě.

Pokud nahradíme síť náhradní impedancí $Z_{s,n}$, pak počáteční rázový zkratový proud I_{ks}'' bude

$$I_{ks}'' = \frac{c \cdot U_{s,n}}{\sqrt{3} |Z_{s,n}|} \quad (4.21)$$

Pro modul náhradní impedance sítě $Z_{s,n}$ platí

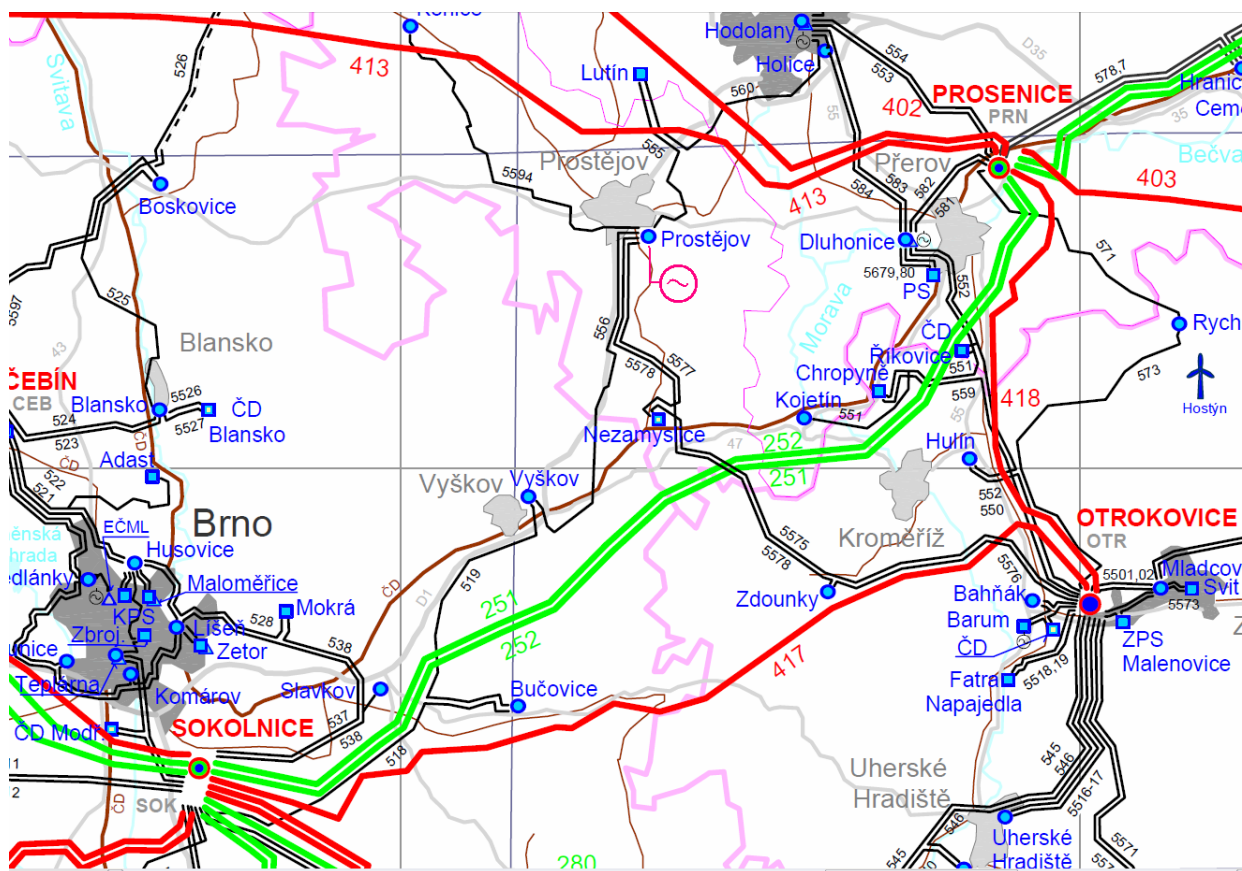
$$Z_{s,n} = \frac{c \cdot U_{s,n}}{\sqrt{3} I_{ks}''} = \frac{c \cdot U_{s,n}^2}{S_{ks}''} \quad (4.22)$$

Pro získání hodnoty modulu přepočtené náhradní impedance $Z_{s,p}$ musíme impedanci $Z_{s,n}$ přepočíst na vztažnou napěťovou hladinu:

$$Z_{s,p} = Z_{s,n} \left(\frac{U_v}{U_{s,n}} \right)^2 = \frac{c \cdot U_v^2}{\sqrt{3} I_{ks}'' \cdot U_{s,n}} = \frac{c \cdot U_v^2}{S_{ks}''} \quad (4.23)$$

Protože většinou neznáme podrobné informace o síti, vyjadřují se náhradní rezistence $R_{s,p}$ a reaktance $X_{s,p}$ sítě z modulu náhradní impedance $Z_{s,p}$ pomocí normovaných koeficientů. Často stačí položit $X_{s,p} \cong Z_{s,p}$. Přepočtená náhradní impedance sítě $Z_{s,p}$ má pak pouze imaginární část.

5 INFORMACE O ŘEŠENÉ SÍTI



Obr. 5-1 Řešená síť ve schématu ES ČR s vyznačeným zdrojem v uzlu Prostějov

Při běžném provozu jsou rozvodny Nezamyslice, Zdounky, Prostějov, Konice napájeny z rozvodny v Otrokovicích a rozvodny Vyškov, Bučovice z rozvodny Sokolnice. Všechny uvedené rozvodny patří společnosti E-ON. Současné napájení celé sítě z rozveden v Otrokovicích a v Sokolnicích není provozováno. Důvodem je výkon který by tekł z 400 kV sítě přes řešenou síť 110 kV zpět do 400 kV sítě. Ztráty vzniklé na 110 kV vedeních by musela společnost E-ON. hradit společnosti ČEPS, které patří 400 kV síť.

Při případné poruše na vedeních z rozvodny Otrokovice je možno napájet řešenou síť na Obr.5-2 z rozvodny Sokolnice a rozvodny Prosenice přes rozvodnu Lutín a Hodolany patří ČEZu. V rozvodně Prostějov se výkon z rozvodny Lutín převede na rozvodny Konice, Zdounky, Nezamyslice a na jeden transformátor 110/22 kV v rozvodně Prostějov. Rozvodny Bučovice, Vyškov a dva transformátory 110/22 kV v Prostějově jsou napájeny z rozvodny Sokolnice. V případě potřeby je možné do rozveden Bučovice, Vyškov dodávat výkon 22 kV vedeními z rozvodny Slavkov u Brna a odlehčit tak vedení 518 a 519.

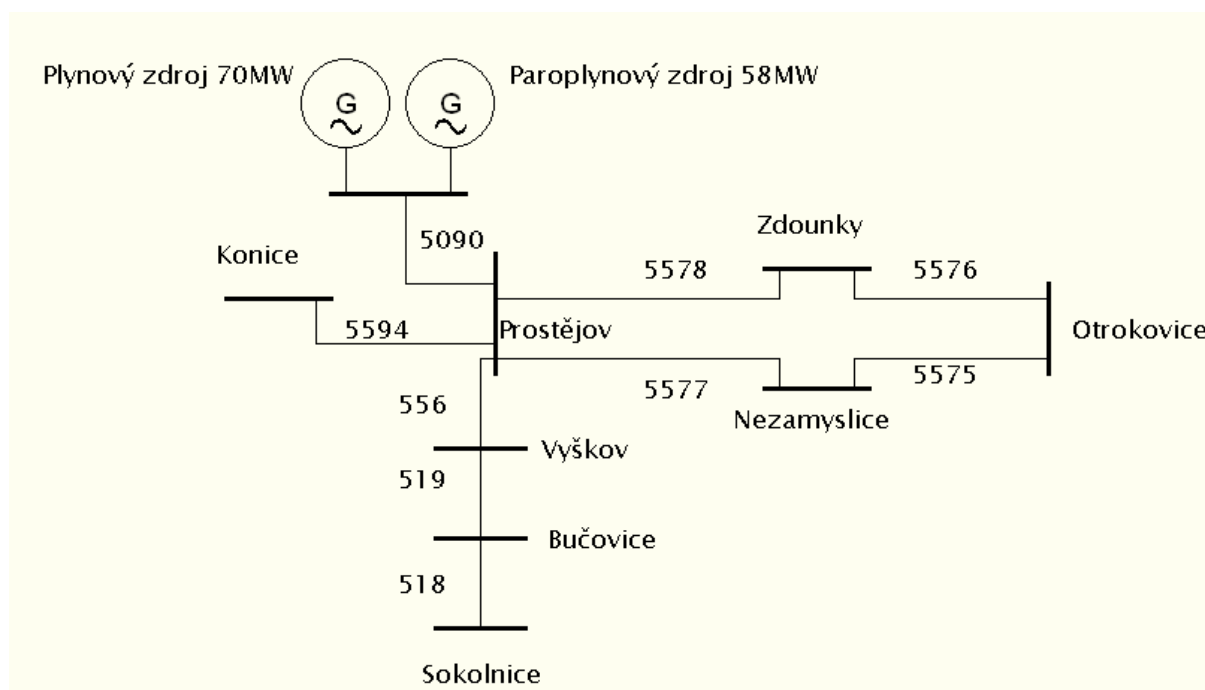
V rozvodně Otrokovice jsou tři autotransformátory 400/110 kV, T401 350 MVA, T402 350 MVA a T403 350 MVA. Rozvodny Nezamyslice, Zdounky, Prostějov, Konice jsou napájeny z autotransformátorů T401 a T402 a na sekundární straně udržujeme napětí 118 kV. V rozvodně Sokolnice je jeden autotransformátor 400/110 kV T402 350 MVA, z tohoto autotransformátoru jsou napájeny rozvodny Vyškov a Bučovice, udržujeme na něm napětí 118 kV. V případě potřeby

je možno napájet 110 kV síť v této rozvodně z transformátorů 220/110 kV. V rozvodně Prostějov jsou tři transformátory 110/22 kV 40 MVA, označené T101, T102 a T103.

Vedení 518, 519, 556 a 5594 jsou jednoduchá vedení typu sedlák. Vedení 5575, 5576, 5577 a 5578 tvoří dvojité vedení typu soudek. Zdroj 70 MW je propojen s rozvodnou Prostějov jeden a půl kilometr dlouhým kabelovým vedením 5090.

V této práci budou řešeny dva případy napájení sítě. Jedna varianta – napájení řešené sítě z rozvodny Otrokovice, která napájí rozvodny Zdounky, Nezamyslice, Prostějov, Konice. Druhá varianta – napájení řešené sítě z rozvodny Sokolnice, která napájí rozvodny Bučovice, Vyškov, Prostějov a Konice.

Stávající zdroj v Prostějově je plynová turbína 70 MW. Slouží jako záloha zajišťující podpůrné služby pro provozovatele přenosové soustavy v České republice - společnost ČEPS. Nově plánovaný zdroj má být paroplynový. Plynová turbína má mít 40 MVA a parní turbína 18 MVA.



Obr. 5-2 Řešená síť v jednopólovém schematu

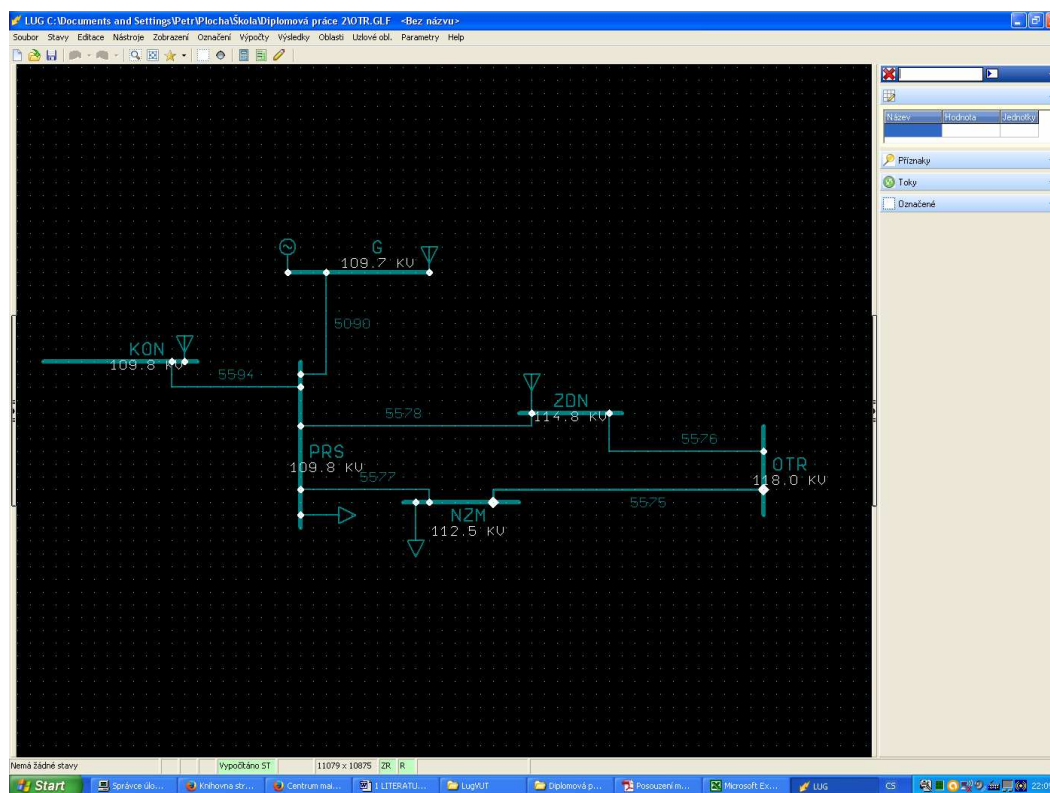
6 VÝPOČTY USTÁLENÉHO CHODU

Tab. 6-1 Tabulka činných a jalových výkonů které jsou odebírány nebo dodávány do sítě 110kV

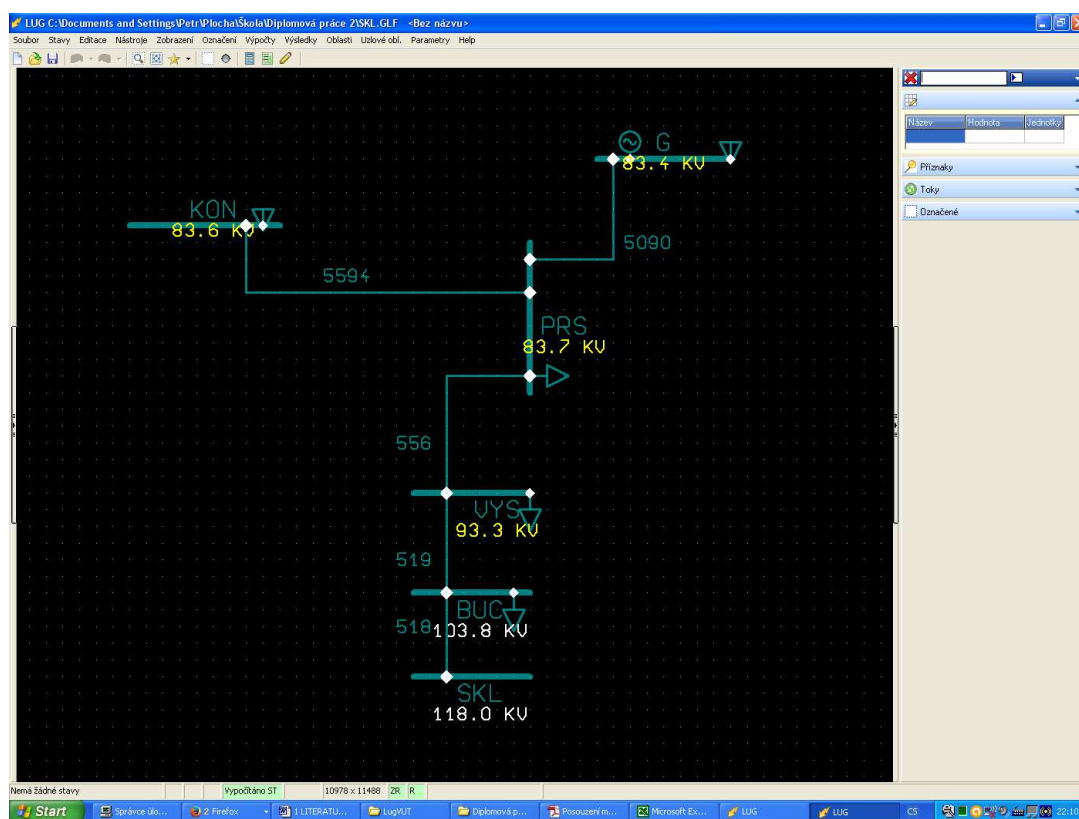
Období →	Jaro		Léto		Podzim		Zima	
Rozvodna	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
Bučovice	5	1,2	2	0,48	8	1,92	9	2,16
Vyškov	9	1,764	8	1,568	13	2,548	11	2,156
Prostějov	-4	-0,704	5	0,88	6	1,056	12	2,112
Konice	-2	-0,614	-2	-0,614	-3	-0,921	1	0,307
Zdounky	-6	-0,954	-4	-0,636	3	0,477	2	0,318
Nezamyslice	3	0,36	2	0,24	1	0,12	5	0,6
Plynový zdroj	70	-	70	-	70	-	70	-
Paroplyn. zdroj	40,6	-	0	-	40,6	-	58	-

V této tabulce jsou uvedeny činné a jalové výkony, které jsou odebírány nebo dodávány do sítě 110 kV. Výkony se znaménkem mínus jsou dodávány do sítě 110kV. Tyto výkony jsou dodávány fotovoltaickými elektrárnami. Předpokládáme že stávající plynový zdroj o výkonu 70MW pracuje po celý rok na 100%, u paroplynového zdroje předpokládáme že na jaře a na podzim pracuje na 70%, v létě není v provozu a v zimě pracuje na 100%.

Ustálený chod řešené sítě se v této práci počítají pomocí programu LUG. Na následujícím obrázku je vidět prostředí tohoto programu.



Obr. 6-1 Řešená síť 110kV napájená z rozvodny Otrokovice v programu LUG



Obr. 6-2 Řešená síť 110kV napájená z rozvodny Sokolnice v programu LUG

6.1 Výpočet ustáleného chodu sítě 110kV napájené z rozvodny Otrokovice

Tab. 6-2 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v jarním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	110,6	82,95	138,25	induktivní	129,935	4,22	9,43	118,735
0,81	110,6	80,07	136,54	induktivní	129,67	4,27	9,21	118,735
0,82	110,6	77,20	134,88	induktivní	129,405	4,32	8,99	118,735
0,83	110,6	74,32	133,25	induktivní	129,138	4,37	8,76	118,735
0,84	110,6	71,44	131,67	induktivní	128,869	4,42	8,53	118,735
0,85	110,6	68,54	130,12	induktivní	128,598	4,47	8,31	118,735
0,86	110,6	65,63	128,60	induktivní	128,324	4,53	8,08	118,735
0,87	110,6	62,68	127,13	induktivní	128,045	4,58	7,84	118,735
0,88	110,6	59,70	125,68	induktivní	127,763	4,63	7,60	118,735
0,89	110,6	56,66	124,27	induktivní	127,473	4,69	7,36	118,735
0,9	110,6	53,57	122,89	induktivní	127,177	4,75	7,11	118,735
0,91	110,6	50,39	121,54	induktivní	126,871	4,81	6,85	118,735
0,92	110,6	47,12	120,22	induktivní	126,554	4,87	6,59	118,735
0,93	110,6	43,71	118,92	induktivní	126,223	4,93	6,31	118,735
0,94	110,6	40,14	117,66	induktivní	125,873	5	6,01	118,735
0,95	110,6	36,35	116,42	induktivní	125,5	5,07	5,70	118,735
0,96	110,6	32,26	115,21	induktivní	125,095	5,15	5,36	118,735
0,97	110,6	27,72	114,02	induktivní	124,642	5,24	4,97	118,735
0,98	110,6	22,46	112,86	induktivní	124,113	5,34	4,53	118,735
0,99	110,6	15,76	111,72	induktivní	123,432	5,48	3,96	118,735
1	110,6	0,00	110,60	-	121,797	5,8	2,58	118,735
0,99	110,6	15,76	111,72	kapacitní	120,113	6,13	1,16	118,735
0,98	110,6	22,46	112,86	kapacitní	119,381	6,27	0,54	118,735
0,97	110,6	27,72	114,02	kapacitní	118,799	6,39	0,05	118,735
0,96	110,6	32,26	115,21	kapacitní	118,292	6,49	-0,37	118,735
0,95	110,6	36,35	116,42	kapacitní	117,831	6,58	-0,76	118,735
0,94	110,6	40,14	117,66	kapacitní	117,4	6,67	-1,12	118,735
0,93	110,6	43,71	118,92	kapacitní	116,991	6,75	-1,47	118,735
0,92	110,6	47,12	120,22	kapacitní	116,597	6,83	-1,80	118,735
0,91	110,6	50,39	121,54	kapacitní	116,216	6,9	-2,12	118,735
0,9	110,6	53,57	122,89	kapacitní	115,843	6,98	-2,44	118,735
0,89	110,6	56,66	124,27	kapacitní	115,478	7,05	-2,74	118,735
0,88	110,6	59,70	125,68	kapacitní	115,116	7,12	-3,05	118,735
0,87	110,6	62,68	127,13	kapacitní	114,759	7,2	-3,35	118,735
0,86	110,6	65,63	128,60	kapacitní	114,403	7,27	-3,65	118,735
0,85	110,6	68,54	130,12	kapacitní	114,049	7,34	-3,95	118,735
0,84	110,6	71,44	131,67	kapacitní	113,694	7,41	-4,25	118,735
0,83	110,6	74,32	133,25	kapacitní	113,339	7,48	-4,54	118,735
0,82	110,6	77,20	134,88	kapacitní	112,981	7,55	-4,85	118,735
0,81	110,6	80,07	136,54	kapacitní	112,621	7,63	-5,15	118,735
0,8	110,6	82,95	138,25	kapacitní	112,258	7,7	-5,46	118,735

Tab. 6-3 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v letním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	70	52,50	87,50	induktivní	125,777	2,41	6,35	118,263
0,81	70	50,68	86,42	induktivní	125,601	2,44	6,20	118,263
0,82	70	48,86	85,37	induktivní	125,424	2,47	6,06	118,263
0,83	70	47,04	84,34	induktivní	125,247	2,51	5,91	118,263
0,84	70	45,22	83,33	induktivní	125,07	2,54	5,76	118,263
0,85	70	43,38	82,35	induktivní	124,89	2,57	5,60	118,263
0,86	70	41,54	81,40	induktivní	124,709	2,6	5,45	118,263
0,87	70	39,67	80,46	induktivní	124,525	2,63	5,29	118,263
0,88	70	37,78	79,55	induktivní	124,338	2,67	5,14	118,263
0,89	70	35,86	78,65	induktivní	124,148	2,7	4,98	118,263
0,9	70	33,90	77,78	induktivní	124,057	2,73	4,90	118,263
0,91	70	31,89	76,92	induktivní	123,753	2,77	4,64	118,263
0,92	70	29,82	76,09	induktivní	123,545	2,8	4,47	118,263
0,93	70	27,67	75,27	induktivní	123,33	2,84	4,28	118,263
0,94	70	25,41	74,47	induktivní	123,102	2,88	4,09	118,263
0,95	70	23,01	73,68	induktivní	122,86	2,93	3,89	118,263
0,96	70	20,42	72,92	induktivní	122,6	2,97	3,67	118,263
0,97	70	17,54	72,16	induktivní	122,301	3,024	3,41	118,263
0,98	70	14,21	71,43	induktivní	121,959	3,08	3,13	118,263
0,99	70	9,97	70,71	induktivní	121,52	3,16	2,75	118,263
1	70	0,00	70,00	-	120,476	3,35	1,87	118,263
0,99	70	9,97	70,71	kapacitní	119,411	3,54	0,97	118,263
0,98	70	14,21	71,43	kapacitní	118,952	3,62	0,58	118,263
0,97	70	17,54	72,16	kapacitní	118,588	3,68	0,27	118,263
0,96	70	20,42	72,92	kapacitní	118,272	3,74	0,01	118,263
0,95	70	23,01	73,68	kapacitní	117,986	3,79	-0,23	118,263
0,94	70	25,41	74,47	kapacitní	117,72	3,84	-0,46	118,263
0,93	70	27,67	75,27	kapacitní	117,468	3,88	-0,67	118,263
0,92	70	29,82	76,09	kapacitní	117,227	3,92	-0,88	118,263
0,91	70	31,89	76,92	kapacitní	116,994	3,96	-1,07	118,263
0,9	70	33,90	77,78	kapacitní	116,767	4	-1,26	118,263
0,89	70	35,86	78,65	kapacitní	116,545	4,04	-1,45	118,263
0,88	70	37,78	79,55	kapacitní	116,326	4,08	-1,64	118,263
0,87	70	39,67	80,46	kapacitní	116,11	4,12	-1,82	118,263
0,86	70	41,54	81,40	kapacitní	115,89	4,16	-2,01	118,263
0,85	70	43,38	82,35	kapacitní	115,68	4,2	-2,18	118,263
0,84	70	45,22	83,33	kapacitní	115,469	4,24	-2,36	118,263
0,83	70	47,04	84,34	kapacitní	115,257	4,27	-2,54	118,263
0,82	70	48,86	85,37	kapacitní	115,045	4,31	-2,72	118,263
0,81	70	50,68	86,42	kapacitní	114,83	4,35	-2,90	118,263
0,8	70	52,50	87,50	kapacitní	114,617	4,39	-3,08	118,263

Tab. 6-4 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v podzimním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	110,6	82,95	138,25	induktivní	129,515	3,73	9,59	118,178
0,81	110,6	80,07	136,54	induktivní	129,249	3,78	9,37	118,178
0,82	110,6	77,20	134,88	induktivní	128,983	3,83	9,14	118,178
0,83	110,6	74,32	133,25	induktivní	128,715	3,88	8,92	118,178
0,84	110,6	71,44	131,67	induktivní	128,446	3,93	8,69	118,178
0,85	110,6	68,54	130,12	induktivní	128,173	3,98	8,46	118,178
0,86	110,6	65,63	128,60	induktivní	127,899	4,04	8,23	118,178
0,87	110,6	62,68	127,13	induktivní	127,619	4,09	7,99	118,178
0,88	110,6	59,70	125,68	induktivní	127,336	4,14	7,75	118,178
0,89	110,6	56,66	124,27	induktivní	127,045	4,2	7,50	118,178
0,9	110,6	53,57	122,89	induktivní	126,748	4,25	7,25	118,178
0,91	110,6	50,39	121,54	induktivní	126,441	4,31	6,99	118,178
0,92	110,6	47,12	120,22	induktivní	126,124	4,37	6,72	118,178
0,93	110,6	43,71	118,92	induktivní	125,791	4,44	6,44	118,178
0,94	110,6	40,14	117,66	induktivní	125,441	4,5	6,15	118,178
0,95	110,6	36,35	116,42	induktivní	125,066	4,57	5,83	118,178
0,96	110,6	32,26	115,21	induktivní	124,66	4,65	5,48	118,178
0,97	110,6	27,72	114,02	induktivní	124,205	4,74	5,10	118,178
0,98	110,6	22,46	112,86	induktivní	123,674	4,84	4,65	118,178
0,99	110,6	15,76	111,72	induktivní	122,991	4,97	4,07	118,178
1	110,6	0,00	110,60	-	121,35	5,29	2,68	118,178
0,99	110,6	15,76	111,72	kapacitní	119,66	5,61	1,25	118,178
0,98	110,6	22,46	112,86	kapacitní	118,925	5,76	0,63	118,178
0,97	110,6	27,72	114,02	kapacitní	118,341	5,87	0,14	118,178
0,96	110,6	32,26	115,21	kapacitní	117,831	5,97	-0,29	118,178
0,95	110,6	36,35	116,42	kapacitní	117,368	6,06	-0,69	118,178
0,94	110,6	40,14	117,66	kapacitní	116,936	6,15	-1,05	118,178
0,93	110,6	43,71	118,92	kapacitní	116,525	6,23	-1,40	118,178
0,92	110,6	47,12	120,22	kapacitní	116,129	6,3	-1,73	118,178
0,91	110,6	50,39	121,54	kapacitní	116,068	6,44	-1,79	118,178
0,9	110,6	53,57	122,89	kapacitní	115,372	6,45	-2,37	118,178
0,89	110,6	56,66	124,27	kapacitní	115,005	6,53	-2,68	118,178
0,88	110,6	59,70	125,68	kapacitní	114,642	6,6	-2,99	118,178
0,87	110,6	62,68	127,13	kapacitní	114,283	6,67	-3,30	118,178
0,86	110,6	65,63	128,60	kapacitní	113,925	6,74	-3,60	118,178
0,85	110,6	68,54	130,12	kapacitní	113,57	6,81	-3,90	118,178
0,84	110,6	71,44	131,67	kapacitní	113,213	6,88	-4,20	118,178
0,83	110,6	74,32	133,25	kapacitní	112,856	6,95	-4,50	118,178
0,82	110,6	77,20	134,88	kapacitní	112,496	7,02	-4,81	118,178
0,81	110,6	80,07	136,54	kapacitní	112,135	7,09	-5,11	118,178
0,8	110,6	82,95	138,25	kapacitní	111,77	7,17	-5,42	118,178

Tab. 6-5 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v zimním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	128	96,00	160,00	induktivní	130,577	3,79	11,14	117,49
0,81	128	92,67	158,02	induktivní	130,274	3,85	10,88	117,49
0,82	128	89,34	156,10	induktivní	129,969	3,91	10,62	117,49
0,83	128	86,02	154,22	induktivní	129,664	3,96	10,36	117,49
0,84	128	82,68	152,38	induktivní	129,356	4,02	10,10	117,49
0,85	128	79,33	150,59	induktivní	129,045	4,08	9,83	117,49
0,86	128	75,95	148,84	induktivní	128,73	4,14	9,57	117,49
0,87	128	72,54	147,13	induktivní	128,41	4,2	9,29	117,49
0,88	128	69,09	145,45	induktivní	128,086	4,27	9,02	117,49
0,89	128	65,58	143,82	induktivní	127,753	4,33	8,74	117,49
0,9	128	61,99	142,22	induktivní	127,412	4,39	8,44	117,49
0,91	128	58,32	140,66	induktivní	127,06	4,46	8,15	117,49
0,92	128	54,53	139,13	induktivní	126,695	4,53	7,83	117,49
0,93	128	50,59	137,63	induktivní	126,314	4,61	7,51	117,49
0,94	128	46,46	136,17	induktivní	125,911	4,68	7,17	117,49
0,95	128	42,07	134,74	induktivní	125,48	4,77	6,80	117,49
0,96	128	37,33	133,33	induktivní	125,011	4,86	6,40	117,49
0,97	128	32,08	131,96	induktivní	124,487	4,96	5,96	117,49
0,98	128	25,99	130,61	induktivní	123,873	5,08	5,43	117,49
0,99	128	18,24	129,29	induktivní	123,083	5,23	4,76	117,49
1	128	0,00	128,00	-	121,179	5,6	3,14	117,49
0,99	128	18,24	129,29	kapacitní	119,207	5,99	1,46	117,49
0,98	128	25,99	130,61	kapacitní	118,347	6,16	0,73	117,49
0,97	128	32,08	131,96	kapacitní	117,661	6,29	0,15	117,49
0,96	128	37,33	133,33	kapacitní	117,063	6,41	-0,36	117,49
0,95	128	42,07	134,74	kapacitní	116,516	6,52	-0,83	117,49
0,94	128	46,46	136,17	kapacitní	116,01	6,62	-1,26	117,49
0,93	128	50,59	137,63	kapacitní	115,52	6,72	-1,68	117,49
0,92	128	54,53	139,13	kapacitní	115,052	6,81	-2,08	117,49
0,91	128	58,32	140,66	kapacitní	114,598	6,9	-2,46	117,49
0,9	128	61,99	142,22	kapacitní	114,154	6,99	-2,84	117,49
0,89	128	65,58	143,82	kapacitní	113,716	7,08	-3,21	117,49
0,88	128	69,09	145,45	kapacitní	113,284	7,17	-3,58	117,49
0,87	128	72,54	147,13	kapacitní	112,855	7,25	-3,95	117,49
0,86	128	75,95	148,84	kapacitní	112,428	7,34	-4,31	117,49
0,85	128	79,33	150,59	kapacitní	112	7,43	-4,67	117,49
0,84	128	82,68	152,38	kapacitní	111,573	7,51	-5,04	117,49
0,83	128	86,02	154,22	kapacitní	111,143	7,6	-5,40	117,49
0,82	128	89,34	156,10	kapacitní	110,71	7,69	-5,77	117,49
0,81	128	92,67	158,02	kapacitní	110,274	7,78	-6,14	117,49
0,8	128	96,00	160,00	kapacitní	109,832	7,87	-6,52	117,49

Ve výše uvedených tabulkách jsou uvedeny procentní rozdíly napětí v rozvodně Prostějov před a po připojení plynového a paroplynového zdroje. Tyto procentní rozdíly napětí jsou závislé na výrobě nebo spotřebě jalových výkonů v elektrárnách. Podmínky pro připojení výroben elektrické energie udává maximální procentní změnu 2%. Ve výše uvedených tabulkách je vidět

jakému účinníku odpovídá jaké procentní napětí. Předpokládáme že všechny tři generátory pracují při stejném účinníku. Zeleně jsou vyznačeny řádky které vyhovují výše uvedené podmínce pro připojení výroben elektrické energie.

$$\Delta u = \frac{U_{se_zdrojem} - U_{bez_zdroje}}{U_{bez_zdroje}} \cdot 100 \text{ (\%;V)} \quad (6.1)$$

Tab. 6-6 Tabulka zatížení vedení bez připojení plynového a paroplynového zdroje

Vedení ↓	Období →	Jaro	Léto	Podzim	Zima
5575	I (A)	16	15	16	49
	i (%)	3,6	3,1	3,4	8,9
5576	I (A)	39	15	23	49
	i (%)	7,3	3,1	4,5	8,9
5577	I (A)	25	5	9	25
	i (%)	4,8	1,3	1,8	4,5
5578	I (A)	10	15	10	40
	i (%)	1,6	2	1,5	7,3
5594	I (A)	11	11	16	6
	i (%)	5,3	5,3	7,3	2,5

Tab. 6-7 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v jarním období

$P_G = 110,6 \text{ MW}$

Vedení	účinník $\rightarrow$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,95 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 1$
$\downarrow$	Q (Mvar) $\rightarrow$	82,95	53,57	36,35	0,00
5575	I (A)	316	286	273	262
	i (%)	57,5	52,1	49,7	47,8
5576	I (A)	358	328	316	304
	i (%)	65,2	59,8	57,5	55,5
5577	I (A)	323	296	285	277
	i (%)	58,8	53,9	51,8	50,4
5578	I (A)	330	299	286	275
	i (%)	60,0	54,4	52,0	50,0
5594	I (A)	12	12	12	12
	i (%)	5,2	5,2	5,2	5,2
5090	I (A)	617	560	537	524
	i (%)	61,8	56,1	53,7	52,4

Vedení	účinník $\rightarrow$	$\cos\varphi = 0,95$ kap.	$\cos\varphi = 0,9 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ kap.}$
$\downarrow$	Q (Mvar) $\rightarrow$	36,35	53,57	82,95
5575	I (A)	281	299	344
	i (%)	51,1	54,5	62,7
5576	I (A)	321	339	384
	i (%)	58,5	61,8	69,9
5577	I (A)	295	314	358
	i (%)	53,8	57,1	65,2
5578	I (A)	297	318	368
	i (%)	54,0	57,8	66,9
5594	I (A)	12	12	13
	i (%)	5,2	5,2	5,5
5090	I (A)	570	612	711
	i (%)	57,1	61,3	71,2

Tab. 6-8 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v letním období

$P_G = 70\text{MW}$

Vedení	účinník →	$\cos\varphi = 0,8 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,95 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 1$
↓	$\begin{matrix} Q \\ (\text{Mvar}) \rightarrow \end{matrix}$	52,50	33,90	23,01	0,00
5575	I (A)	197	174	164	152
	i (%)	35,9	31,8	29,9	27,8
5576	I (A)	224	201	190	179
	i (%)	40,8	36,6	34,7	32,6
5577	I (A)	200	179	170	161
	i (%)	36,5	32,7	31	29,4
5578	I (A)	205	181	170	159
	i (%)	37,3	32,9	31	29
5594	I (A)	12	12	12	12
	i (%)	5,2	5,2	5,2	5,2
5090	I (A)	405	365	348	335
	i (%)	40,5	36,5	34,8	33,5

Vedení	účinník →	$\cos\varphi = 0,95 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ kap.}$
↓	$\begin{matrix} Q \\ (\text{Mvar}) \rightarrow \end{matrix}$	23,01	33,90	52,50
5575	I (A)	161	172	199
	i (%)	29,4	31,4	36,2
5576	I (A)	186	197	222
	i (%)	34	35,8	40,5
5577	I (A)	172	182	209
	i (%)	31,3	33,2	38
5578	I (A)	171	183	213
	i (%)	31,1	33,4	38,8
5594	I (A)	12	12	13
	i (%)	5,2	5,2	5,4
5090	I (A)	360	384	441
	i (%)	36	38,4	44,1

Tab. 6-9 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v podzimním období

$P_G = 110,6 \text{ MW}$

Vedení	účinník $\rightarrow$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,95 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 1$
$\downarrow$	Q (Mvar) $\rightarrow$	82,95	53,57	36,35	0,00
5575	I (A)	298	267	253	241
	i (%)	54,3	48,6	46,1	43,9
5576	I (A)	312	278	263	251
	i (%)	56,9	50,6	47,9	45,6
5577	I (A)	297	267	255	246
	i (%)	54,1	48,7	46,4	44,8
5578	I (A)	322	290	276	265
	i (%)	58,6	52,8	50,3	48,3
5594	I (A)	16	16	16	17
	i (%)	6,9	7	7,1	7,2
5090	I (A)	619	562	539	526
	i (%)	62	56,2	53,9	52,6

Vedení	účinník $\rightarrow$	$\cos\varphi = 0,95$ kap.	$\cos\varphi = 0,9 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ kap.}$
$\downarrow$	Q (Mvar) $\rightarrow$	36,35	53,57	82,95
5575	I (A)	261	281	329
	i (%)	47,6	51,2	60
5576	I (A)	272	294	346
	i (%)	49,5	53,5	62,9
5577	I (A)	267	287	336
	i (%)	48,6	52,3	61,1
5578	I (A)	287	309	360
	i (%)	52,3	56,2	65,5
5594	I (A)	17	17	18
	i (%)	7,3	7,4	7,6
5090	I (A)	572	615	715
	i (%)	57,2	61,5	71,5

Tab. 6-10 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě z Otrokovic pro zatížení sítě v zimním období

 $P_G = 128\text{MW}$

Vedení	účinník → Q (Mvar)→	$\cos\varphi = 0,8 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,95 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 1$
↓		96,00	61,99	42,07	0,00
5575	I (A)	313	275	259	246
	i (%)	57,1	50,1	47,1	44,9
5576	I (A)	337	297	279	267
	i (%)	61,4	54	50,9	48,6
5577	I (A)	328	293	279	270
	i (%)	59,6	53,4	50,8	49,2
5578	I (A)	342	304	287	276
	i (%)	62,4	55,3	52,4	50,3
5594	I (A)	6	6	6	6
	i (%)	2,6	2,6	2,6	2,6
5090	I (A)	710	646	621	609
	i (%)	71,1	64,7	62,2	61

Vedení	účinník → Q (Mvar)→	$\cos\varphi = 0,95 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ kap.}$
↓		42,07	61,99	96,00
5575	I (A)	275	303	367
	i (%)	50,2	55,1	66,7
5576	I (A)	296	325	392
	i (%)	54	59,2	71,5
5577	I (A)	299	325	386
	i (%)	54,4	59,1	70,2
5578	I (A)	307	336	403
	i (%)	56,0	61,2	73,4
5594	I (A)	6	6	6
	i (%)	2,6	2,6	2,6
5090	I (A)	667	719	842
	i (%)	66,8	72	84,2

Ve čtyřech výše uvedených tabulkách jsou uvedeny proudové zatížení vedení a procentuální zatížení vedení. Při napájení sítě vedeními z Otrokovic nedochází k přetížení žádného vedení.

6.2 Výpočet ustáleného chodu sítě 110kV napájené z rozvodny Sokolnice

Tab. 6-11 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v jarním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	110,6	82,95	138,25	induktivní	144,758	7,53	21,89	118,761
0,81	110,6	80,07	136,54	induktivní	144,204	7,68	21,42	118,761
0,82	110,6	77,20	134,88	induktivní	143,648	7,84	20,96	118,761
0,83	110,6	74,32	133,25	induktivní	143,085	7,99	20,48	118,761
0,84	110,6	71,44	131,67	induktivní	142,517	8,15	20,00	118,761
0,85	110,6	68,54	130,12	induktivní	141,941	8,31	19,52	118,761
0,86	110,6	65,63	128,60	induktivní	141,358	8,47	19,03	118,761
0,87	110,6	62,68	127,13	induktivní	140,761	8,64	18,52	118,761
0,88	110,6	59,70	125,68	induktivní	140,153	8,81	18,01	118,761
0,89	110,6	56,66	124,27	induktivní	139,527	8,98	17,49	118,761
0,9	110,6	53,57	122,89	induktivní	138,884	9,16	16,94	118,761
0,91	110,6	50,39	121,54	induktivní	138,216	9,35	16,38	118,761
0,92	110,6	47,12	120,22	induktivní	137,521	9,55	15,80	118,761
0,93	110,6	43,71	118,92	induktivní	136,789	9,75	15,18	118,761
0,94	110,6	40,14	117,66	induktivní	136,013	9,97	14,53	118,761
0,95	110,6	36,35	116,42	induktivní	135,179	10,21	13,82	118,761
0,96	110,6	32,26	115,21	induktivní	134,265	10,47	13,05	118,761
0,97	110,6	27,72	114,02	induktivní	133,235	10,76	12,19	118,761
0,98	110,6	22,46	112,86	induktivní	132,019	11,11	11,16	118,761
0,99	110,6	15,76	111,72	induktivní	130,432	11,57	9,83	118,761
1	110,6	0,00	110,60	-	126,513	12,73	6,53	118,761
0,99	110,6	15,76	111,72	kapacitní	122,285	13,99	2,97	118,761
0,98	110,6	22,46	112,86	kapacitní	120,373	14,58	1,36	118,761
0,97	110,6	27,72	114,02	kapacitní	118,818	15,06	0,05	118,761
0,96	110,6	32,26	115,21	kapacitní	117,432	15,49	-1,12	118,761
0,95	110,6	36,35	116,42	kapacitní	116,145	15,89	-2,20	118,761
0,94	110,6	40,14	117,66	kapacitní	114,919	16,28	-3,24	118,761
0,93	110,6	43,71	118,92	kapacitní	113,73	16,66	-4,24	118,761
0,92	110,6	47,12	120,22	kapacitní	112,562	17,04	-5,22	118,761
0,91	110,6	50,39	121,54	kapacitní	111,409	17,42	-6,19	118,761
0,9	110,6	53,57	122,89	kapacitní	110,255	17,8	-7,16	118,761
0,89	110,6	56,66	124,27	kapacitní	109,098	18,18	-8,14	118,761
0,88	110,6	59,70	125,68	kapacitní	107,924	18,57	-9,13	118,761
0,87	110,6	62,68	127,13	kapacitní	106,735	18,97	-10,13	118,761
0,86	110,6	65,63	128,60	kapacitní	105,515	19,39	-11,15	118,761
0,85	110,6	68,54	130,12	kapacitní	104,268	19,82	-12,20	118,761
0,84	110,6	71,44	131,67	kapacitní	102,974	20,27	-13,29	118,761
0,83	110,6	74,32	133,25	kapacitní	101,633	20,75	-14,42	118,761
0,82	110,6	77,20	134,88	kapacitní	100,229	21,25	-15,60	118,761
0,81	110,6	80,07	136,54	kapacitní	98,756	21,78	-16,84	118,761
0,8	110,6	82,95	138,25	kapacitní	97,191	22,36	-18,16	118,761

Tab. 6-12 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v letním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	70	52,50	87,50	induktivní	135,82	4,2	15,68	117,409
0,81	70	50,68	86,42	induktivní	135,436	4,3	15,35	117,409
0,82	70	48,86	85,37	induktivní	135,053	4,39	15,03	117,409
0,83	70	47,04	84,34	induktivní	134,667	4,49	14,70	117,409
0,84	70	45,22	83,33	induktivní	134,282	4,58	14,37	117,409
0,85	70	43,38	82,35	induktivní	133,888	4,68	14,04	117,409
0,86	70	41,54	81,40	induktivní	133,492	4,78	13,70	117,409
0,87	70	39,67	80,46	induktivní	133,087	4,88	13,35	117,409
0,88	70	37,78	79,55	induktivní	132,675	4,98	13,00	117,409
0,89	70	35,86	78,65	induktivní	132,254	5,09	12,64	117,409
0,9	70	33,90	77,78	induktivní	131,821	5,19	12,28	117,409
0,91	70	31,89	76,92	induktivní	131,374	5,31	11,89	117,409
0,92	70	29,82	76,09	induktivní	130,91	5,42	11,50	117,409
0,93	70	27,67	75,27	induktivní	130,424	5,54	11,09	117,409
0,94	70	25,41	74,47	induktivní	129,909	5,67	10,65	117,409
0,95	70	23,01	73,68	induktivní	129,358	5,81	10,18	117,409
0,96	70	20,42	72,92	induktivní	128,757	5,96	9,67	117,409
0,97	70	17,54	72,16	induktivní	128,082	6,13	9,09	117,409
0,98	70	14,21	71,43	induktivní	127,291	6,33	8,42	117,409
0,99	70	9,97	70,71	induktivní	126,269	6,59	7,55	117,409
1	70	0,00	70,00	-	123,789	7,22	5,43	117,409
0,99	70	9,97	70,71	kapacitní	121,193	7,88	3,22	117,409
0,98	70	14,21	71,43	kapacitní	120,049	8,18	2,25	117,409
0,97	70	17,54	72,16	kapacitní	119,132	8,42	1,47	117,409
0,96	70	20,42	72,92	kapacitní	118,326	8,63	0,78	117,409
0,95	70	23,01	73,68	kapacitní	117,59	8,82	0,15	117,409
0,94	70	25,41	74,47	kapacitní	116,898	9	-0,44	117,409
0,93	70	27,67	75,27	kapacitní	116,204	9,26	-1,03	117,409
0,92	70	29,82	76,09	kapacitní	115,6	9,34	-1,54	117,409
0,91	70	31,89	76,92	kapacitní	114,98	9,5	-2,07	117,409
0,9	70	33,90	77,78	kapacitní	114,367	9,66	-2,59	117,409
0,89	70	35,86	78,65	kapacitní	113,762	9,82	-3,11	117,409
0,88	70	37,78	79,55	kapacitní	113,163	9,98	-3,62	117,409
0,87	70	39,67	80,46	kapacitní	112,565	10,14	-4,13	117,409
0,86	70	41,54	81,40	kapacitní	111,965	10,3	-4,64	117,409
0,85	70	43,38	82,35	kapacitní	111,367	10,46	-5,15	117,409
0,84	70	45,22	83,33	kapacitní	110,76	10,62	-5,66	117,409
0,83	70	47,04	84,34	kapacitní	110,152	10,79	-6,18	117,409
0,82	70	48,86	85,37	kapacitní	109,535	10,95	-6,71	117,409
0,81	70	50,68	86,42	kapacitní	108,908	11,12	-7,24	117,409
0,8	70	52,50	87,50	kapacitní	108,27	11,3	-7,78	117,409

Tab. 6-13 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v podzimním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	110,6	82,95	138,25	induktivní	143,638	6,37	23,22	116,573
0,81	110,6	80,07	136,54	induktivní	143,082	6,52	22,74	116,573
0,82	110,6	77,20	134,88	induktivní	142,52	6,67	22,26	116,573
0,83	110,6	74,32	133,25	induktivní	141,958	6,82	21,78	116,573
0,84	110,6	71,44	131,67	induktivní	141,565	7,05	21,44	116,573
0,85	110,6	68,54	130,12	induktivní	140,81	7,13	20,79	116,573
0,86	110,6	65,63	128,60	induktivní	140,224	7,29	20,29	116,573
0,87	110,6	62,68	127,13	induktivní	139,625	7,45	19,77	116,573
0,88	110,6	59,70	125,68	induktivní	139,014	7,62	19,25	116,573
0,89	110,6	56,66	124,27	induktivní	138,385	7,79	18,71	116,573
0,9	110,6	53,57	122,89	induktivní	137,74	7,97	18,16	116,573
0,91	110,6	50,39	121,54	induktivní	137,069	8,15	17,58	116,573
0,92	110,6	47,12	120,22	induktivní	136,371	8,34	16,98	116,573
0,93	110,6	43,71	118,92	induktivní	135,636	8,55	16,35	116,573
0,94	110,6	40,14	117,66	induktivní	134,979	8,85	15,79	116,573
0,95	110,6	36,35	116,42	induktivní	134,018	8,99	14,96	116,573
0,96	110,6	32,26	115,21	induktivní	133,1	9,25	14,18	116,573
0,97	110,6	27,72	114,02	induktivní	132,065	9,54	13,29	116,573
0,98	110,6	22,46	112,86	induktivní	130,843	9,88	12,24	116,573
0,99	110,6	15,76	111,72	induktivní	129,247	10,33	10,87	116,573
1	110,6	0,00	110,60	-	125,307	11,46	7,49	116,573
0,99	110,6	15,76	111,72	kapacitní	121,051	12,7	3,84	116,573
0,98	110,6	22,46	112,86	kapacitní	119,127	13,27	2,19	116,573
0,97	110,6	27,72	114,02	kapacitní	117,56	13,75	0,85	116,573
0,96	110,6	32,26	115,21	kapacitní	116,163	14,17	-0,35	116,573
0,95	110,6	36,35	116,42	kapacitní	114,866	14,56	-1,46	116,573
0,94	110,6	40,14	117,66	kapacitní	113,629	14,95	-2,53	116,573
0,93	110,6	43,71	118,92	kapacitní	112,43	15,32	-3,55	116,573
0,92	110,6	47,12	120,22	kapacitní	111,251	15,69	-4,57	116,573
0,91	110,6	50,39	121,54	kapacitní	110,087	16,05	-5,56	116,573
0,9	110,6	53,57	122,89	kapacitní	108,92	16,43	-6,56	116,573
0,89	110,6	56,66	124,27	kapacitní	107,752	16,8	-7,57	116,573
0,88	110,6	59,70	125,68	kapacitní	106,565	17,19	-8,59	116,573
0,87	110,6	62,68	127,13	kapacitní	105,362	17,58	-9,62	116,573
0,86	110,6	65,63	128,60	kapacitní	104,127	17,99	-10,68	116,573
0,85	110,6	68,54	130,12	kapacitní	102,863	18,41	-11,76	116,573
0,84	110,6	71,44	131,67	kapacitní	101,551	18,86	-12,89	116,573
0,83	110,6	74,32	133,25	kapacitní	100,191	19,32	-14,05	116,573
0,82	110,6	77,20	134,88	kapacitní	98,763	19,82	-15,28	116,573
0,81	110,6	80,07	136,54	kapacitní	97,265	20,346	-16,56	116,573
0,8	110,6	82,95	138,25	kapacitní	95,67	20,92	-17,93	116,573

Tab. 6-14 Tabulka procentních rozdílů napětí v rozvodně Prostějov, před a po připojení plynového a paroplynového zdroje, při daném účinníku a jalovém výkonu zdrojů v Prostějově pro typické zatížení v zimním období

cosφ	P (MW)	Q (Mvar)	S (MVA)	Charakter	U (kV)	δ(°)	u(%)	U (bez zdroje)
0,8	128	96,00	160,00	induktivní	146,133	6,65	27,12	114,955
0,81	128	92,67	158,02	induktivní	145,507	6,82	26,58	114,955
0,82	128	89,34	156,10	induktivní	144,875	6,99	26,03	114,955
0,83	128	86,02	154,22	induktivní	144,24	7,17	25,48	114,955
0,84	128	82,68	152,38	induktivní	143,595	7,34	24,91	114,955
0,85	128	79,33	150,59	induktivní	142,942	7,52	24,35	114,955
0,86	128	75,95	148,84	induktivní	142,277	7,7	23,77	114,955
0,87	128	72,54	147,13	induktivní	141,599	7,89	23,18	114,955
0,88	128	69,09	145,45	induktivní	140,907	8,08	22,58	114,955
0,89	128	65,58	143,82	induktivní	140,194	8,28	21,96	114,955
0,9	128	61,99	142,22	induktivní	139,457	8,48	21,31	114,955
0,91	128	58,32	140,66	induktivní	138,696	8,7	20,65	114,955
0,92	128	54,53	139,13	induktivní	137,9	8,92	19,96	114,955
0,93	128	50,59	137,63	induktivní	137,062	9,15	19,23	114,955
0,94	128	46,46	136,17	induktivní	136,171	9,4	18,46	114,955
0,95	128	42,07	134,74	induktivní	135,21	9,68	17,62	114,955
0,96	128	37,33	133,33	induktivní	134,156	9,97	16,70	114,955
0,97	128	32,08	131,96	induktivní	132,966	10,31	15,67	114,955
0,98	128	25,99	130,61	induktivní	131,659	10,83	14,53	114,955
0,99	128	18,24	129,29	induktivní	129,71	11,25	12,84	114,955
1	128	0,00	128,00	-	125,11	12,6	8,83	114,955
0,99	128	18,24	129,29	kapacitní	120,065	14,12	4,45	114,955
0,98	128	25,99	130,61	kapacitní	117,753	14,83	2,43	114,955
0,97	128	32,08	131,96	kapacitní	115,85	15,42	0,78	114,955
0,96	128	37,33	133,33	kapacitní	114,14	15,96	-0,71	114,955
0,95	128	42,07	134,74	kapacitní	112,534	16,47	-2,11	114,955
0,94	128	46,46	136,17	kapacitní	110,989	16,97	-3,45	114,955
0,93	128	50,59	137,63	kapacitní	109,476	17,47	-4,77	114,955
0,92	128	54,53	139,13	kapacitní	107,898	18,15	-6,14	114,955
0,91	128	58,32	140,66	kapacitní	106,468	18,468	-7,38	114,955
0,9	128	61,99	142,22	kapacitní	104,847	19,18	-8,79	114,955
0,89	128	65,58	143,82	kapacitní	103,383	19,52	-10,07	114,955
0,88	128	69,09	145,45	kapacitní	101,778	20,08	-11,46	114,955
0,87	128	72,54	147,13	kapacitní	100,112	20,67	-12,91	114,955
0,86	128	75,95	148,84	kapacitní	98,363	21,3	-14,43	114,955
0,85	128	79,33	150,59	kapacitní	96,352	22,22	-16,18	114,955
0,84	128	82,68	152,38	kapacitní	94,519	22,73	-17,78	114,955
0,83	128	86,02	154,22	kapacitní	92,164	23,83	-19,83	114,955
0,82	128	89,34	156,10	kapacitní	89,93	24,52	-21,77	114,955
0,81	128	92,67	158,02	kapacitní	87,122	25,67	-24,21	114,955
0,8	128	96,00	160,00	kapacitní	83,66	27,15	-27,22	114,955

Ve výše uvedených tabulkách jsou uvedeny procentní rozdíly napětí v rozvodně Prostějov před a po připojení plynového a paroplynového zdroje. Tyto procentní rozdíly napětí jsou závislé na výrobě nebo spotřebě jalových výkonů v elektrárnách. Podmínky pro připojení výroben elektrické energie udává maximální procentní změnu 2%. Ve výše uvedených tabulkách je vidět jakému účinníku odpovídá jaké procentní napětí. Předpokládáme že všechny tři generátory pracují

při stejném účinníku. Zeleně jsou vyznačeny řádky které vyhovují výše uvedené podmínce pro připojení výroben elektrické energie.

$$\Delta u = \frac{U_{se_zdrojem} - U_{bez_zdroje}}{U_{bez_zdroje}} \cdot 100 \text{ (\%;V)} \quad (6.2)$$

Tab. 6-15 Tabulka zatížení vedení bez připojení plynového a paroplynového zdroje

Vedení ↓		Jaro	Léto	Podzim	Zima
518	I (A)	41	64	118	165
	i (%)	9,1	14,1	25,9	36,0
519	I (A)	20	54	79	120
	i (%)	4,5	11,9	17,2	26,3
556	I (A)	33	17	17	65
	i (%)	7,4	3,8	3,9	14,3
5594	I (A)	12	12	17	6
	i (%)	5,3	5,3	7,4	2,6

Tab. 6-16 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v jarním období

P_G = 110,6MW

Vedení ↓	účinník → Q (Mvar)→	cosφ = 0,8 ind.	cosφ = 0,9 ind.	cosφ = 0,95 ind.	cosφ = 1
		82,95	53,57	36,35	0,00
518	I (A)	535	485	467	466
	i (%)	116,4	105,6	101,5	101,4
519	I (A)	553	507	489	490
	i (%)	120,4	110,2	106,5	106,6
556	I (A)	585	543	529	532
	i (%)	127,4	118,3	115,1	115,7
5594	I (A)	11	12	12	12
	i (%)	5,0	5,0	5,0	5,2
5090	I (A)	555	513	499	504
	i (%)	55,6	51,4	49,9	50,5

Vedení ↓	účinník → Q (Mvar)→	cosφ = 0,95 kap.	cosφ = 0,9 kap.	cosφ = 0,8 kap.
		36,35	53,57	82,95
518	I (A)	540	608	795
	i (%)	117,6	132,3	172,9
519	I (A)	562	627	809
	i (%)	122,2	136,4	176
556	I (A)	601	664	841
	i (%)	130,9	144,5	182,8
5594	I (A)	12	13	14
	i (%)	5,4	5,5	6,0
5090	I (A)	578	643	822
	i (%)	57,9	64,4	82,3

Tab. 6-17 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v letním období

$P_G = 70\text{MW}$

Vedení	účinník →	$\cos\varphi = 0,8 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,95 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 1$
↓	$\begin{matrix} Q \\ (\text{Mvar}) \rightarrow \end{matrix}$	52,50	33,90	23,01	0,00
518	I (A)	341	298	279	264
	i (%)	74,2	64,9	60,8	57,6
519	I (A)	345	304	287	274
	i (%)	75,2	66,3	62,4	59,7
556	I (A)	373	337	322	312
	i (%)	81,2	73,3	70	68
5594	I (A)	12	12	12	12
	i (%)	5,0	5,1	5,1	5,2
5090	I (A)	376	343	331	326
	i (%)	37,6	34,4	33,1	32,6

Vedení	účinník →	$\cos\varphi = 0,95 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ kap.}$
↓	$\begin{matrix} Q \\ (\text{Mvar}) \rightarrow \end{matrix}$	23,01	33,90	52,50
518	I (A)	298	331	411
	i (%)	65	72,1	89,5
519	I (A)	309	341	420
	i (%)	67,2	74,3	91,4
556	I (A)	344	374	448
	i (%)	74,9	81,4	97,5
5594	I (A)	12	12	13
	i (%)	5,3	5,4	5,6
5090	I (A)	361	392	467
	i (%)	36,2	39,3	46,7

Tab. 6-18 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v podzimním období

 $P_G = 110,6\text{MW}$

Vedení	účinník →	$\cos\varphi = 0,8 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,95 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 1$
↓	Q (Mvar)→	82,95	53,57	36,35	0,00
518	I (A)	481	423	400	397
	i (%)	104,6	92	87	86,3
519	I (A)	511	457	437	434
	i (%)	111,2	99,6	95,1	94,5
556	I (A)	558	512	495	495
	i (%)	121,3	111,3	107,7	107,8
5594	I (A)	15	16	16	16
	i (%)	6,5	6,7	6,8	7,0
5090	I (A)	560	517	503	509
	i (%)	56	51,8	50,4	51

Vedení	účinník →	$\cos\varphi = 0,95$ kap.	$\cos\varphi = 0,9 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ kap.}$
↓	Q (Mvar)→	36,35	53,57	82,95
518	I (A)	480	555	757
	i (%)	104,5	120,8	164,6
519	I (A)	511	582	775
	i (%)	111,3	126,6	168,5
556	I (A)	567	632	815
	i (%)	123,4	137,6	177,4
5594	I (A)	17	18	20
	i (%)	7,5	7,8	8,6
5090	I (A)	585	651	835
	i (%)	58,5	65,2	83,6

Tab. 6-19 Tabulka zatížení vedení při napájení sítě ze Sokolnice pro zatížení sítě v zimním období

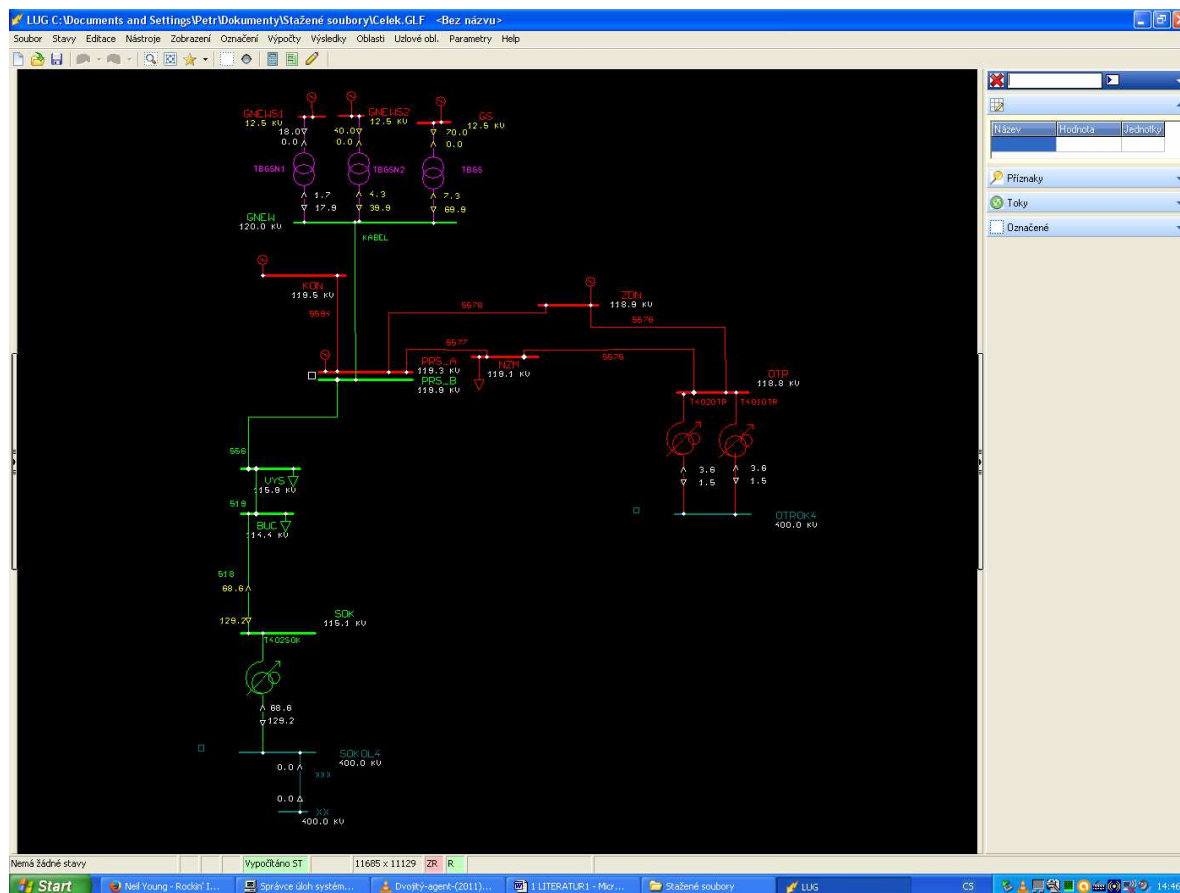
 $P_G = 128\text{MW}$

Vedení	účinník → Q (Mvar)→	$\cos\varphi = 0,8 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 0,95 \text{ ind.}$	$\cos\varphi = 1$
↓		96,00	61,99	42,07	0,00
518	I (A)	526	461	435	437
	i (%)	114,5	100,3	94,6	95
519	I (A)	560	500	477	479
	i (%)	121,9	108,8	103,8	104,2
556	I (A)	598	545	525	530
	i (%)	130,2	118,5	114,3	115,3
5594	I (A)	6	6	6	6
	i (%)	2,7	2,7	2,6	2,6
5090	I (A)	636	591	577	590
	i (%)	63,6	59,2	57,7	59

Vedení	účinník → Q (Mvar)→	$\cos\varphi = 0,95 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,9 \text{ kap.}$	$\cos\varphi = 0,8 \text{ kap.}$
↓		42,07	61,99	96,00
518	I (A)	437	651	997
	i (%)	95	141,7	216,8
519	I (A)	479	678	1011
	i (%)	104,2	147,6	219,8
556	I (A)	530	720	1042
	i (%)	115,3	156,7	226,6
5594	I (A)	6	6	7
	i (%)	2,6	2,6	3,0
5090	I (A)	590	783	1107
	i (%)	59	78,3	110,7

Ve čtyřech výše uvedených tabulkách jsou uvedeny proudové zatížení vedení a procentuální zatížení vedení. Při napájení sítě vedeními ze Sokolnice dochází k přetížení vedení při jarním, podzimním a zimním zatížení. Přetížená vedení jsou vyznačena červenou barvou.

7 VÝPOČTY ZKRATŮ



Obr. 7-1 Řešená síť pro výpočet zkratů v programu LUG

Tab. 7-1 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení plynového i paroplynového zdroje . Síť 110kV je napojena na rozvodnu Otrokovice

	I_{k3p}'' (kA)	S_{k3p}'' (MVA)	I_{k1p}'' (kA)	S_{k1p}'' (MVA)
Konice	3,21	612,26	0,51	96,56
Nezamyslice	5,78	1 102,12	0,96	183,36
Otrokovice	19,57	3 728,33	18,98	3615,67
Prostějov	7,04	1 341,50	7,68	1463,98
Zdounky	7,11	1 355,48	1,11	211,58
G_{new}	7,01	1 335,58	7,88	1501,34

Tab. 7-2 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení pouze plynového zdroje . Síť 110kV je napojena na rozvodnu Otrokovice

	I_{k3p}'' (kA)	S_{k3p}'' (MVA)	I_{k1p}'' (kA)	S_{k1p}'' (MVA)
Konice	2,96	564,85	0,50	95,26
Nezamyslice	5,37	1022,20	0,94	179,09
Otrokovice	19,09	3636,76	18,67	3557,11
Prostějov	5,94	1131,72	5,73	1091,71
Zdounky	6,79	1293,67	1,10	209,58
G_{new}	5,89	1122,20	5,81	1106,95

Tab. 7-3 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení plynového i paroplynového zdroje. Sít' 110kV je napojena na rozvodnu Sokolnice

	I_{k3p}'' (kA)	S_{k3p}'' (MVA)	I_{k1p}'' (kA)	S_{k1p}'' (MVA)
Bučovice	5,58	1063,13	1,11	211,48
Konice	2,65	504,89	0,23	43,82
Prostějov	4,77	908,81	5,73	1091,71
Sokolnice	12,63	2406,34	12,66	2412,05
Vyškov	4,52	861,18	2,85	543,00
G_{new}	4,82	918,33	5,91	1126,01

Tab. 7-4 Počáteční souměrné zkratové proudy a počáteční souměrné zkratové výkony při třífázových a jednofázových zkratech a při připojení plynového zdroje. Sít' 110kV je napojena na rozvodnu Sokolnice

	I_{k3p}'' (kA)	S_{k3p}'' (MVA)	I_{k1p}'' (kA)	S_{k1p}'' (MVA)
Bučovice	5,24	998,35	1,09	207,67
Konice	2,28	434,40	0,48	91,45
Prostějov	3,67	699,23	4,11	783,06
Sokolnice	12,42	2366,33	12,52	2385,38
Vyškov	3,99	760,20	2,55	485,84
G_{new}	3,7	704,94	4,2	800,21

Zkratová odolnost rozvoden je:

Otrokovice, Sokolnice: 5000MVA

Bučovice, Vyškov, Prostějov, Konice, Nezamyslice, Zdounky: 3500MVA

8 ZÁVĚR

V teoretické části této práce je popsána a vysvětlena Newtonova iterační metoda, která slouží k výpočtu ustáleného chodu sítě. V další části je popsán časový průběh zkratových proudů, popsána metoda souměrných složek, odvození rovnic pro jednofázové a třífázové zkraty a popsán výpočet zkratového obvodu ve skutečných hodnotách.

V praktické části jsou provedeny výpočty ustáleného chodu sítě 110kV ve dvou variantách. V jedné variantě jsou rozvodny Zdounky, Nezamyslice, Prostějov a Konice napájeny z rozvodny 400/110kV Otrokovice a v druhé variantě jsou rozvodny Bučovice, Vyškov, Prostějov a Konice napájeny z rozvodny 400/100kV Sokolnice. V rozvodně Otrokovice je síť 110kV napájena z autotransfómátorm 400/110kV T401 a T402 v mŭstkovém zapojení, v rozvodně Sokolnice je napájena síť 110kV z autotransfómátoru 400/110kV T402. Pro obě tyto varianty jsou provedeny výpočty ustáleného chodu. Počítají se napětí v rozvodně Prostějov před a po připojení plynového a paroplynového zdroje do rozvodny Prostějov, pro účinníky zdrojů 0,8 induktivní až 0,8 kapacitní s krokem 0,01. Tyto výpočty se počítají pro typické zatížení sítě a pro typické zatížení zdrojů na jaře, v létě, na podzim a v zimě. Dále se provádí výpočet ustáleného chodu pro výpočet proudů ve vedeních. Proudů se opět počítají pro napájení sítě z rozvodu 400/110kV Otrokovice a Sokolnice. Výpočet se provádí pro síť bez plynového a paroplynového zdroje a pro síť s připojenými zdroji s účinníkem 0,8ind., 0,9ind., 0,95ind., 1, 0,95kap., 0,9kap., 0,8kap. Všechny tři generátory pracují se stejným účinníkem. A opět jako v případě výpočtu napětí, se provádějí tyto výpočty pro typické zatížení sítě a pro typické zatížení zdrojů na jaře, v létě, na podzim a v zimě.

Pro napájení sítě z Otrokovic vyhovují podmínce změny napětí o 2% v jarním období účinníky zdrojů v rozsahu 0,99kap. – 0,92kap., v letním období 1 – 0,87kap., v podzimním období 0,99kap. – 0,91kap. a v zimním období 0,99kap. – 0,93kap. Proudové zatížení vedení pro napájení z Otrokovic v žádném období a pro žádné účinníky zdrojů není u žádného vedení překročeno.

Pro napájení sítě ze Sokolnice vyhovují podmínce změny napětí o 2% v jarním období účinníky zdrojů v rozsahu 0,98kap. – 0,96kap., v letním období 0,97kap. – 0,92kap., v podzimním období 0,97kap. – 0,95kap. a v zimním období 0,97kap. – 0,96kap. Pro jarní období jsou pro všechny účinníky zdrojů překročena proudová zatížení pro vedení 518, 519 a 556. V letním období nejsou překročena proudová zatížení u žádného vedení. V podzimním období jsou pro účinník 0,8ind. přetížená vedení 518, 519 a 556. Pro účinníky 0,9ind, 0,95ind a 1 je překročeno proudové zatížení pro vedení 556. Pro účinníky 0,95kap, 0,9kap.a 0,8kap je překročeno proudové zatížení pro vedení 518, 519 a 556. V zimním období jsou pro účinník 0,8ind. a 0,9ind. překročena zatížení pro vedení 518, 519 a 556. Pro účinníky 0,95ind., 1 a 0,95kap. jsou překročena zatížení pro vedení 519 a 556. Pro účinník 0,9kap. jsou přetížená vedení 518, 519 a 556. Pro účinník 0,8kap. jsou přetížená vedení 518, 519, 556 a kabel 5090.

Při výpočtu zkratů bylo zjištěno že zkratová odolnost rozvodu není překročena pro žádnou rozvodnu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALUZÍK, Řízení provozu elektrizačních soustav. SNTL, Praha 1984, 125 stran
- [2] BLAŽEK, SKALA, Distribuce elektrické energie. VUT Brno, 138 stran
- [3] TOMAN, DRÁPELA, MIŠÁK, ORSÁGOVÁ, PAAR, TOPOLÁNEK, Provoz distribučních soustav. ČVUT v Praze, Praha 2011, 263 stran
- [4] ČSN EN 60909-0:2002. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 0: Výpočet proudů.