

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 VYBRANÉ ČÁSTI SÍŤE 110 KV E.ON
S PROVEDENÍM ANALÝZY POMĚRU TOKU JALOVÉHO VÝKONU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN SKOUPÝ

BRNO 2015



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 VYBRANÉ ČÁSTI SÍTĚ 110 KV E.ON S PROVEDENÍM ANALÝZY POMĚRU TOKU JALOVÉHO VÝKONU

LOAD FLOW CALCULATION OF CHOSEN PART OF E.ON 110 KV GRID WITH ANALYSIS OF
REACTIVE POWER FLOW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

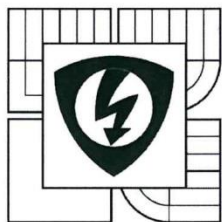
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN SKOUPÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Martin Skoupý
Ročník: 3

ID: 155237
Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

**Výpočet ustáleného chodu vybrané části sítě 110 kV E.ON s provedením
analýzy poměru toku jalového výkonu**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoretický rozbor chodu sítě
2. Určení optimálního provozu sítě z hlediska činných ztrát
3. Analýza zatížení sítě a příspěvků jalového výkonu z úrovně sítě 110 kV a 22 kV v dané oblasti
4. Návrh opatření pro minimalizaci přetoku jalového výkonu distribuční sítě
5. Vliv minimalizace přetoku jalového výkonu na snížení činných ztrát v síti

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

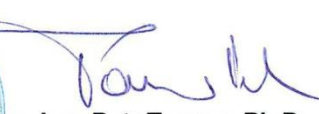
Termín zadání: 9. 2. 2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:




doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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:

SKOUPÝ, M. *Výpočet ustáleného chodu vybrané části sítě 110 kV E.ON s provedením analýzy poměru toku jalového výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 67 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Rád bych poděkoval doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při zpracovávání bakalářské práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

ABSTRAKT

Obsahem této bakalářské práce je úvod do problematiky výpočtu ustáleného chodu sítě a optimalizace provozování sítě z hlediska zmenšení činných ztrát na vedení. Dále se práce zabývá analýzou zatížení sítě, rozdělením toku činného a jalového výkonu a důsledky přetoku jalového výkonu z napěťové úrovně VN do úrovně VVN.

V následující praktické části se věnujeme návrhu zapojení dané oblasti a výpočtu jeho chodu z hlediska ztrát. Dále se pak věnujeme návrhu opatření pro minimalizaci přetoku jalového výkonu do distribuční soustavy a jeho vlivu na snížení činných ztrát v dané síti.

V závěru práce jsou shrnuty získané výsledky a závěrečné posouzení vlivu jalového výkonu na chod sítě.

KLÍČOVÁ SLOVA: činný výkon; jalový výkon; optimalizace vedení; přenos výkonu; ustálený chod sítě

ABSTRACT

Content of this bachelor thesis is theoretic introduction to the steady state of network and optimization of network operation from the viewpoint of reducing active power losses in the electric wiring. Furthermore, the work deals with analysis of the network traffic flow distribution of the active and reactive power and consequences of overflow of the reactive power from the medium voltage level to the high voltage level.

The following part includes designing practical involvement of the area and carrying out calculations of its operation in terms of losses. Another chapter is proposition of measures to minimize the overflowing of reactive power in distribution system and its impact on reduction of operating losses in the network. In the conclusion the work summarizes results obtained and the final assessment of influence of reactive power for operation of the network.

KEY WORDS: active power; reactive power; optimization of power lines; power transmission; stabilized operation

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ	12
SEZNAM ZKRATEK.....	15
1 ÚVOD.....	16
2 CÍLE PRÁCE.....	17
3 ELEKTRICKÝ VÝKON	18
3.1 ČINNÝ VÝKON	18
3.2 JALOVÝ VÝKON.....	18
3.3 ÚČINÍK	19
3.4 PŘIROZENÝ VÝKON VEDENÍ.....	19
3.5 NABÍJECÍ VÝKON VEDENÍ.....	19
3.6 ZTRÁTY NA VEDENÍ.....	20
3.7 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU	20
3.8 ZDROJE A SPOTŘEBIČE JALOVÉHO VÝKONU	22
4 USTÁLENÝ CHOD VEDENÍ.....	24
4.1 VEDENÍ VN A VVN	24
4.2 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY.....	24
4.3 NÁHRADA VEDENÍ DVOJBRANY – PŘIBLIŽNÉ ŘEŠENÍ.....	25
4.4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA.....	26
4.4.1 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU	28
4.5 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA	28
4.6 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU GAUSS-SEIDLOVOU ITERAČNÍ METODOU	30
4.6.1 PŘÍKLAD VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU GAUSS-SEIDLOVOU METODOU	32
4.7 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	34
4.7.1 PŘÍKLAD VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	36
5 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	39
5.1 ŘEŠENÁ SOUSTAVA.....	41
6 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ	43
6.1 ZIMNÍ MAXIMUM.....	44
6.1.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V ROZVODNÁCH SÍTĚ 110 KV	44
6.1.2 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	45
6.1.3 ZATÍŽENÍ VEDENÍ	47
6.2 ZIMNÍ MINIMUM.....	48
6.2.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V ROZVODNÁCH SÍTĚ 110 KV	48
6.2.2 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	49
6.2.3 ZATÍŽENÍ VEDENÍ	51

7 ANALÝZA PŘETOKU JALOVÉHO VÝKONU	52
7.1 ZDROJE A SPOTŘEBIČE JALOVÉHO VÝKONU	52
7.1.1 VEDENÍ 110 kV	52
7.1.2 VYSÍLAČE HDO	53
7.1.3 TRANSFORMÁTORY 110/22 kV.....	53
7.1.4 SYNCHRONNÍ GENERÁTORY	54
7.1.5 KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY.....	55
7.1.6 PŘÍSPĚVKY ZE SÍTĚ 22 kV	55
7.2 VÝSLEDKY ANALÝZY PŘETOKU JALOVÉHO VÝKONU	60
7.3 NÁVRH OPATŘENÍ PRO MINIMALIZACI PŘETOKU JALOVÉHO VÝKONU.....	62
7.4 Vliv minimalizace přetoku jalového výkonu na činné ztráty v síti	63
8 ZÁVĚR.....	65
POUŽITÁ LITERATURA	67

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Trojúhelník výkonů</i>	18
<i>Obr. 3-2 Proudové zatížení (modře) a ztráty v síti (červeně) jako funkce účinníku (zeleně) [7].....</i>	20
<i>Obr. 3-3 Přetok jalového výkonu v síti bez kompenzace (horní část) a s kompenzací jalového výkonu (spodní část) [7].....</i>	21
<i>Obr. 4-1 Lineární dvojbran</i>	25
<i>Obr. 4-2 Náhradní schéma sítě s podélnými a příčnými admitancemi</i>	26
<i>Obr. 4-3 Fázorový diagram induktivního a kapacitního odběru</i>	29
<i>Obr. 4-4 Náhradní schéma π článku</i>	30
<i>Obr. 4-5 Algoritmus řešení výpočtu Gauss – Seidlovou iterační metodou[6].....</i>	32
<i>Obr. 4-6 Síť názorného příkladu</i>	32
<i>Obr. 4-7 Algoritmus řešení výpočtu Newtonovou iterační metodou [6]</i>	36
<i>Obr. 5-1 Působení jednotlivých distribučních společností na území ČR.....</i>	39
<i>Obr. 5-2 Způsob regulace jalového výkonu systémem ASRU</i>	40
<i>Obr. 5-3 Schéma řešené sítě 110 kV</i>	41
<i>Obr. 6-1 Roční odběrový diagram P a Q transformátoru 400/110 kV v rozvodně CNT</i>	43
<i>Obr. 6-2 Roční odběrový diagram P a Q transformátoru 400/110 kV v rozvodně SO</i>	43
<i>Obr. 6-3 Zapojení sítě 110 kV v časovém řezu 13. 2. 2015 11:00 hod</i>	44
<i>Obr. 6-4 Zapojení sítě 110 kV v časovém řezu 25. 12. 2014 04:00 hod</i>	48
<i>Obr. 7-1 Týdenní odběrový diagram P a Q transformátorů 400/110 kV</i>	52
<i>Obr. 7-2 Týdenní diagram Q vybraných transformátorů 110/22 kV</i>	56
<i>Obr. 7-3 Rozdělení toku jalového výkonu v síti</i>	61

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 Velikost nabíjecích výkonů venkovního vedení</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 3-2 Velikost nabíjecích výkonů kabelového vedení</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 4-1 Znaménka činného a jalového výkonu ve zdrojových a odběrových uzlech</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 4-2 Výsledné hodnoty napětí jednotlivých iterací Gauss-Seidlovou metodou</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 4-3 Výsledné hodnoty napětí jednotlivých iterací Newtonovou metodou</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6-1 Napěťové poměry v rozvodnách sítě 110 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6-2 Zatížení transformátorů 400/110 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6-3 Zatížení transformátorů 110/22 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 6-4 Zatížení vedení 110 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 6-5 Napěťové poměry v rozvodnách sítě 110 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 6-6 Zatížení transformátorů 400/110 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 6-7 Zatížení transformátorů 110/22 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6-8 Zatížení vedení 110 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 7-1 Bilance P, Q zdrojů pracujících do sítě 25. 12. 2014 04:00 hod.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 7-2 Měření P, Q vývodů transformátoru MEY T101</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7-3 Měření P, Q vývodů transformátoru BOB T101</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 7-4 Měření P, Q vývodů transformátoru BOB T102</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 7-5 Měření P, Q vývodů transformátoru LI T101</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 7-6 Měření P, Q vývodů transformátoru BNT T101.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 7-7 Rozdělení toku jalového výkonu v síti 22 kV</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 7-8 Rozdělení toku jalového výkonu v síti.....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 7-9 Posouzení vlivu přetoku jalového výkonu na činné ztráty</i>	<i>63</i>

SEZNAM SYMBOLŮ

<u>Veličina</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Význam</u>
\bar{A}	[-]	Blondelova konstanta
\bar{B}	[Ω]	Blondelova konstanta
b_{ij}	[S]	Susceptance vedení mezi uzly i a j
B_k	[S/km]	Kapacitní susceptance vedení na jednotku délky
C_k	[F/km]	Kapacita vedení na jednotku délky
C	[F]	Kapacita vedení
\bar{C}	[S]	Blondelova konstanta
\bar{D}	[-]	Blondelova konstanta
f	[Hz]	Kmitočet sítě
g_{ij}	[S]	Konduktance vedení mezi uzly i a j
G_k	[S/km]	Konduktance vedení na jednotku délky
I	[A]	Proud
$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$	[A]	Fázory uzlové proudy
\bar{I}_i, \bar{I}_j	[A]	Fázové proudy na začátku a na konci vedení
I_C	[A]	Nabíjecí proud vedení
I_{nv}	[A]	Jmenovitý proud vedení
i_0	[%]	Proud naprázdno transformátoru
I_{1v}	[A]	Proud na začátku vedení
l	[m]	Délka vedení
L	[H]	Indukčnost vedení
P	[W]	Činný výkon
P_P	[W]	Přirozený výkon vedení
P_{1v}	[W]	Činný výkon na začátku vedení
P_{2t}	[W]	Činný výkon dodávaný transformátorem
P_{2v}	[W]	Činný výkon na konci vedení
ΔP	[W]	Výkonové ztráty na činném odporu
ΔP_2	[W]	Diference činného výkonu
Q	[Var]	Jalový výkon
Q_{bil}	[Var]	Jalový výkon vypočítaný z bilance sítě
Q_{Ck}	[Var/km]	Nabíjecí výkon vedení na jednotku délky
Q_C	[Var]	Nabíjecí výkon vedení
$Q_{C,celk}$	[Var]	Celkový nabíjecí výkon vedení
$Q_{C,CNT}$	[Var]	Nabíjecí výkon vedení napájených z uzlu CNT
$Q_{C,HDO}$	[Var]	Jalový výkon dodávaný vysílačem HDO
$Q_{C,kabel}$	[Var]	Celkový nabíjecí výkon kabelových vedení
$Q_{C,SO}$	[Var]	Nabíjecí výkon vedení napájených z uzlu SO
$Q_{C,venk}$	[Var]	Celkový nabíjecí výkon venkovních vedení
Q_{HDO}	[Var]	Celkový jalový výkon dodávaný vysílači HDO

Q_k	[Var]	Jalové ztráty nakrátko transformátoru
Q_{S22}	[Var]	Jalový výkon dodávaný ze sítě 22 kV mimo rozvodny CNT a SO
Q_{VN}	[Var]	Jalový výkon dodávaný ze sítě 22 kV bez uvažování výroben
Q_{vyr}	[Var]	Jalový výkon dodávaný výrobny
Q_{zt}	[Var]	Jalový výkon spotřebovaný na transformátorech 110 / 22 kV
Q_{ztb}	[Var]	Jalový výkon spotřebovaný na transformátorech vypočítaný bilancí sítě
Q_{ztd}	[Var]	Jalový výkon spotřebovaný na transformátorech 22 / 0,4 kV
Q_{ztv}	[Var]	Jalový výkon spotřebovaný na transformátorech získaný výpočtem
Q_0	[Var]	Jalové ztráty naprázdno transformátoru
Q_{1v}	[Var]	Jalový výkon na začátku vedení
Q_{2t}	[Var]	Jalový výkon dodávaný transformátorem
Q_{2v}	[Var]	Jalový výkon na konci vedení
Q_{22}	[Var]	Jalový výkon dodávaný ze sítě 22 kV
ΔQ	[Var]	Jalové ztráty v podélné impedanci
ΔQ_2	[Var]	Diference jalového výkonu
ΣQ_{ved}	[Var]	Jalový výkon dodávaný do napájecích rozvodů CNT a SO
R	[Ω]	Činný odpor vedení
R_l	[Ω]	Činný odpor jedné fáze vedení
R_k	[Ω/km]	Rezistance vedení na jednotku délky
S	[VA]	Zdánlivý výkon
$\overline{S}_i, \overline{S}_j$	[VA]	Fázové zdánlivé výkony na začátku a na konci vedení
S_n	[VA]	Jmenovitý výkon
S_{nt}	[VA]	Jmenovitý výkon transformátoru
s_{zt}	[%]	Procentní zatížení transformátoru
s_{zv}	[%]	Procentní zatížení vedení
S_{2t}	[VA]	Zdánlivý výkon dodávaný transformátorem
U	[V]	Napětí
$\overline{U}_1, \overline{U}_2, \overline{U}_3, \overline{U}_4$	[V]	Fázory uzlových napětí
U_a	[V]	Reálná složka napětí
U_f	[V]	Fázové napětí
$\overline{U}_i, \overline{U}_j$	[V]	Fázová napětí na začátku a na konci vedení
u_k	[%]	Napětí nakrátko transformátoru
U_r	[V]	Imaginární složka napětí
U_S	[V]	Sdružené napětí
U_{1v}	[V]	Napětí na začátku vedení
U_{2v}	[V]	Napětí na konci vedení
X	[Ω]	Reaktance vedení
X_k	[Ω/km]	Induktivní reaktance vedení na jednotku délky
\overline{Y}_{ij}	[S]	Prvky admitanční matice
Y_k	[S/km]	Příčná admitance vedení na jednotku délky

\bar{Z}	[Ω]	Impedance vedení
Z_k	[Ω/km]	Podélná impedance vedení na jednotku délky
Z_V	[Ω]	Vlnová impedance vedení
α	[$^\circ$]	Fázový posun proudu
δ	[$^\circ$]	Fázový posun napětí
δ_{1v}	[$^\circ$]	Fázový posun napětí na začátku vedení
δ_{2v}	[$^\circ$]	Fázový posun napětí na konci vedení
ε	[-]	Zadaná přesnost výpočtu ustáleného chodu
π	[-]	Ludolfovo číslo
λ	[-]	Power factor
φ	[$^\circ$]	Fázový posun mezi napětím a proudem
∂	[-]	Parciální derivace

SEZNAM ZKRATEK**Zkratka****Význam**

AD	Adamov - ADAST
ASRU	Automatický systém regulace napětí
BNC	Brno - Černovice
BNP	Brno - Příkop
BNT	Brno - Teplárna
BOB	Brno - Bohunice
CML	Brno - elektrárna Červený Mlýn
CNT	Čebín
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HUV	Brno - Husovice
ind.	induktivní
kap.	kapacitní
KPO	Brno - Královopolská
KV	Brno - Komárov
LI	Brno - Líšeň
MED	Modřice u Brna - ČD
MEY	Brno - Medlánky
MOB	Brno - Moravany
MQ	Mokrá - Cementárna
NN	nízké napětí
RIS	Řídicí a informační systém
SHH	Brno - Feramo
SLB	Slavkov u Brna
SO	Sokolnice
VMA	Brno - Maloměřice výtopna
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
ZBB	Brno - Zbrojovka
ZET	Brno - Zetor
ZVN	zvlášť vysoké napětí

1 ÚVOD

Elektrizační soustava je tvořená z vedení, ty mohou být buďto venkovní volné nebo kabelové. Jejich hlavním účelem je přenos elektrické energie z míst výroby do míst spotřeby, tj. k odběratelům.

Důvodem, proč provádíme výpočet ustáleného chodu sítě, je určení toku činného a jalového výkonu, napěťových poměrů na začátku a konci vedení či v jednotlivých uzlech vedení, dále pak určení proudového zatížení vedení. Ustálený chod sítě je vlastně stav, při kterém můžeme uvažovat proměnné parametry sítě za konstantní. Při výpočtu ustáleného chodu uvažujeme, že soustava, tedy zdroje, přenosová soustava i odběry jsou souměrné, to znamená, že můžeme soustavu uvažovat jako jednofázovou souslednou síť. Hodnoty získané výpočtem ustáleného chodu jsou potřebné například k řízení soustavy a používají se také k řízení výroby činného a jalového výkonu.

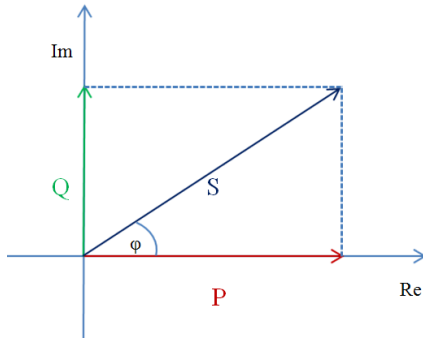
V posledních letech se začíná řešit problematika jalového výkonu, kterého je v síti přebytek. Přibližně od 70. let 20. století se z důvodů účtování jalového výkonu velkoodběratelům začaly vyplácet investice do zařízení na kompenzaci jalového výkonu. Jalový výkon v síti je sice potřebný pro správnou funkci většiny elektrických spotřebičů, ale jeho přebytek zvyšuje zatížení v dané síti a tím negativně ovlivňuje ztráty činného výkonu. Další jeho negativní vlastností je ovlivňování hladiny napětí na všech napěťových úrovních. Jalový výkon se totiž přelévá z jedné úrovně na druhou a způsobuje výkyvy napětí, které často není možné řídit ani změnou buzení generátorů ve výrobnách elektrické energie.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je teoretický rozbor chodu sítě, určení nejlepší možné optimalizace provozu z hlediska stanovení činných ztrát na vedení, dále pak rozbor a analýza zatížení sítě a příspěvky jalového výkonu z úrovně VN do VVN v dané oblasti sítě. Pokud by z výpočtů ustáleného chodu sítě či analýzy přetoků jalového výkonu vyplývalo, že některé prvky sítě jsou přetíženy nebo nedostačují pro plnění řádných funkcí, navrhne změny, které budou zajišťovat bezpečný provoz sítě a minimalizaci přetoku jalového výkonu mezi jednotlivými úrovněmi napěťových hladin. Na závěr se pokusíme stanovit vliv přetoku jalového výkonu na velikost činných ztrát na vedení.

3 ELEKTRICKÝ VÝKON

Elektrický výkon je součin elektrického napětí a proudu. Ve střídavých obvodech rozlišujeme podle jednotlivých prvků obvodu tři druhy elektrického výkonu, tedy výkon činný, jalový a zdánlivý. Jejich velikosti určuje zejména výskyt jednotlivých prvků v obvodu. Velikost jednotlivých výkonových složek a fázového posunu mezi nimi si můžeme lépe představit pomocí tzv. trojúhelníku výkonu (Obr. 3-1). Ve třífázových obvodech se jedná o součet výkonů v jednotlivých fázích.



Obr. 3-1 Trojúhelník výkonů

Zdánlivý výkon S můžeme tedy matematicky vyjádřit jako:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.1)$$

3.1 Činný výkon

Činný výkon je energie, které koná užitečnou práci, jako například světlo, teplo nebo mechanický moment hřídele motoru. V případě, že se jedná o čistě odporovou nebo vykompenzovanou zátěž, může být činný výkon téměř roven výkonu zdánlivému, poté platí, že fázový posun $\varphi = 0^\circ$. Činný výkon lze vypočítat jako součin napětí, proudu a účinníku obvodu.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.2)$$

3.2 Jalový výkon

Jalový výkon je elektrický výkon, který nekoná užitečnou práci. Jeho podstatou je však vytváření magnetického pole pro spotřebiče, které ho potřebují pro svoji funkci. Jedná se například o motory, transformátory, zářivky či indukční ohřevy. Tento „neužitečný“ výkon přetéká od zdroje ke spotřebiči a zpět dle toho, kde je zrovna potřeba.

Rozeznáváme dva charaktery jalového výkonu, induktivní a kapacitní. Induktivní jalový výkon je způsobován indukčními prvky v obvodu, má za následek, že napětí předbíhá proud o 90° . Naopak kapacitní jalový výkon je způsobován kapacitními prvky v obvodu a způsobuje, že se napětí zpožďuje za proudem o 90° . Jalový výkon je vyráběn společně s činným výkonem. Spotřebiče induktivního charakteru jej odebírají ze sítě, což má za následek snižování napětí v síti. Naopak u spotřebičů kapacitního charakteru je dodáván jalový výkon do sítě, což napětí v síti nebezpečně zvyšuje. Navíc vysoká dodávka jalového výkonu do sítě přetěžuje vedení a vede tak k následným ztrátám činného výkonu [5]. Jalový výkon lze vypočítat z následujícího vztahu (3.3).

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3.3)$$

3.3 Účinník

Účinník značí míru přeměny zdánlivého výkonu S ve výkon činný P . Účinník je jedním z velmi často používaných údajů při hodnocení kvality odběru elektrické energie. V praxi se značí jako $\cos\varphi$, což vychází z trojúhelníku výkonu. Toto značení však není zcela správné, protože zanedbává deformační výkon. Účinník je dán poměrem činného a jalového výkonu:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (3.4)$$

Značení účinníku $\cos\varphi$ odpovídá poměru činného a jalového výkonu pouze v případě, kdy je průběh proudu v síti čistě sinusový a lze tak zanedbat deformační složku výkonu. Účinník λ (power factor) je ukazatel, který je výhradně a jednoznačně stanovený jako poměr činného výkonu P a zdánlivého výkonu S . Z hodnoty účinníku lze posoudit, do jaké míry jsou účinně využívány možnosti elektroenergetického systému[8].

Pro další úvahu se přijmou předpoklady:

- soustava je trojfázová a souměrná, takže stačí vyšetřit poměry v jedné fázi,
- jedná se o ustálený chod; proudy i napětí mají jen první harmonickou,
- vedení i kompenzační prostředky se považují za ideální (bezeztrátové),
- kompenzační prostředky jsou rozloženy rovnoměrně podél vedení a jsou nezávislé na napětí a proudu [5].

3.4 Přirozený výkon vedení

Přirozený výkon vedení je dán velikostí vlnové impedance vedení a jeho provozním napětím. Vychází ze vztahu (3.5):

$$P_p = \frac{U_s^2}{Z_v} \quad (3.5)$$

kde Z_v je vlnová impedance vedení:

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.6)$$

Definice přirozeného výkonu vychází z Ferrantiho jevu. Jestliže provozujeme dlouhé vedení naprázdno nebo málo zatížené, dojde vlivem kapacity vedení ke zvýšení napětí na jeho konci a tím k ohrožení prvků v dané síti. Přirozený výkon je takový elektrický výkon, při jehož přenosu se energie magnetického pole rovná energii pole elektrického, dojde tak k jejich vyrušení a dochází tak k nejpříznivějšímu provoznímu stavu, kdy ztráty na vedení jsou tvořeny pouze činným odporem vedení. Pokud bychom uvažovali ideální vedení s $R = 0 \Omega$, bylo by napětí na konci vedení stejně velké jako na jeho začátku. Pokud na vedení přenášíme výkon menší než přirozený, je napětí na konci vedení větší než na začátku. Naopak platí, že pokud přenášíme výkon větší než přirozený, napětí na konci vedení je menší než na jeho začátku.

3.5 Nabíjecí výkon vedení

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, při vysokých napětích se projevuje kapacita vedení, která má za následek vyvolání velkých kapacitních proudů a výkonů, které mají vliv na přenos.

Tento kapacitní jalový výkon kompenzuje induktivní jalový výkon, při odlehčení vedení však způsobuje zvyšování napětí na konci vedení, tzv. Ferrantioho jev.

Nabíjecí proud trojfázového vedení lze vypočítat dle vztahu (3.7):

$$I_C = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot l \cdot U_f \cdot 10^{-6} \quad (3.7)$$

Nabíjecí výkon celého trojfázového vedení pak:

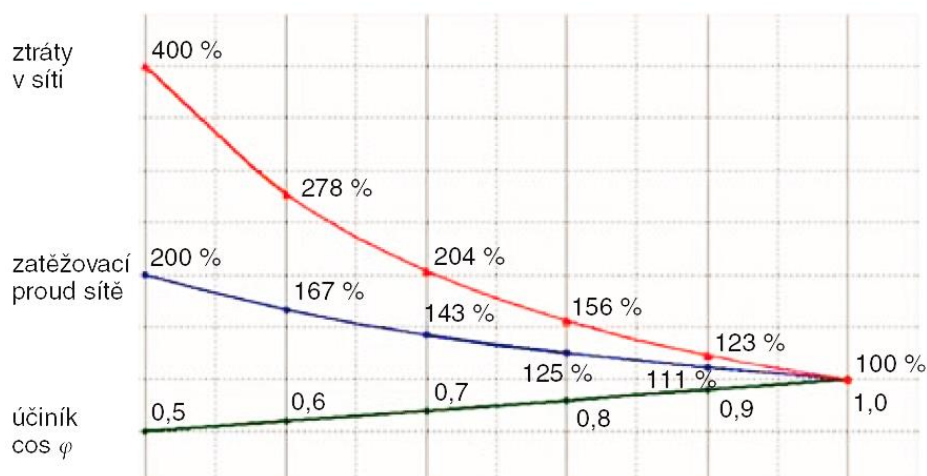
$$Q_C = 3 \cdot U_f \cdot I_C \quad (3.8)$$

3.6 Ztráty na vedení

Jalový výkon vede k tomu, že proud na vedení je větší, než by tomu bylo při přenosu čistě činného výkonu. Z tohoto důvodu se také zvyšují ztráty v přívodních vedeních, jinak řečeno, proudové zatížení elektrických sítí klesá proporcionálně s klesajícím zdánlivým výkonem. Ztráty v síti se však snižují s kvadrátem zatěžovacího proudu, jak definuje vztah (3.9).

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (3.9)$$

Tak může například 5% snížení proudu v důsledku kompenzace jalového výkonu přinést snížení ztrát v síti téměř o 10%. Závislost těchto ztrát a velikosti zatěžovacího proudu jako funkci účinku můžeme vidět na Obr. 3-2 [7].



Obr. 3-2 Proudové zatížení (modře) a ztráty v síti (červeně) jako funkce účinku (zeleně) [7]

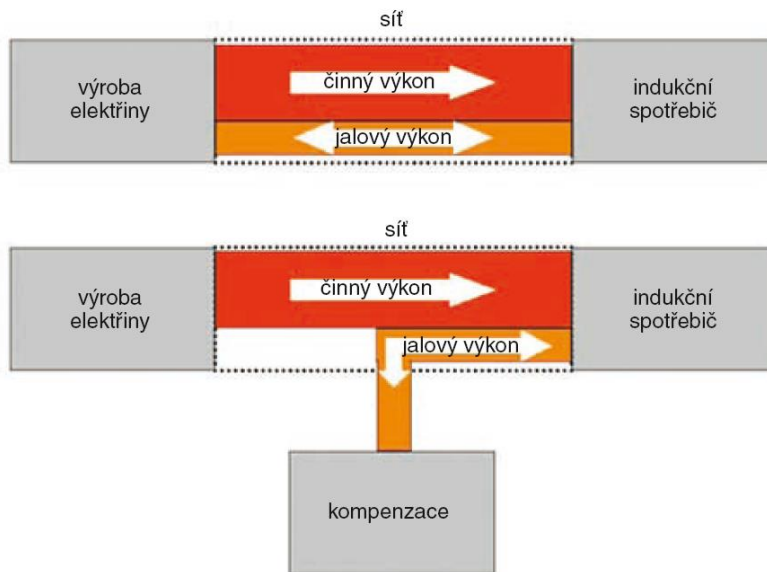
Ztráty způsobené jalovým výkonem se obecně týkají jednak přenosových a rozvodných sítí provozovatelů těchto sítí, ale také sítí se zařízeními odběratelů [7].

Jsou-li například z téže sítě napájeny dva odběry zatěžující rozvodný systém stejným proudem, z nichž jeden pracuje s účínkem $\cos \varphi = 1$ a druhý s $\cos \varphi = 0,5$, tato druhá zátěž bude ve srovnání s první zátěží umožňovat odběr pouze polovičního činného výkonu. To je důvodem snahy o dosažení účinku pokud možno blížíícího se jedné [8].

3.7 Kompenzace jalového výkonu

Spotřebiče v elektrických sítích mají zpravidla indukční charakter. Snížení indukčního jalového výkonu lze dosáhnout paralelním připojením kondenzátorů k indukčnímu spotřebiči. Díky tomu je vracející se jalový výkon, který byl použit k vytvoření magnetického pole,

„uskladněn“ v kondenzátorových bateriích a pak přetéká jen mezi kondenzátorem a indukčním spotřebičem. Přetoky jalového výkonu jsou znázorněny na *Obr. 3-3*. Výkon kondenzátoru má kapacitní charakter a je směřován proti indukčnímu výkonu spotřebiče [7].



Obr. 3-3 Přetok jalového výkonu v síti bez kompenzace (horní část) a s kompenzací jalového výkonu (spodní část) [7]

Důsledky špatného účinníku:

- zmenšení využití stávajících rozvodných elektrických zařízení (menší přenášený činný výkon),
- zvětšení pořizovacích nákladů všech zařízení, jako jsou například transformátory, vypínače a další spínací zařízení, jističí přístroje a ochrany, měřicí přístroje atd. dle dimenzování velikosti zdánlivého výkonu,
- zvětšení ztrát v rozvodu elektrické energie,
- zvětšení úbytků napětí v rozvodu elektrické energie (zvětšení kolísání napětí v elektrizační soustavě),
- špatný účinník má nepříznivý vliv i na práci v elektrizační soustavě, neboť se zhoršuje spolupráce mezi elektrárnami při předávání velkých jalových výkonů, zhoršuje se stabilita přenosu elektrické energie, snižují se účinnosti alternátorů, transformátorů a dalších zařízení,
- rozvodné podniky uplatňují finanční postih velko odběru pracujícího se špatným účinníkem [9].

Kompenzaci parametrů provádíme u vedení VVN a ZVN pomocí kondenzátorů, tlumivek nebo rotačních kompenzátorů. Hlavním důvodem je regulace napětí a zvýšení stability chodu elektrizační soustavy. V České Republice, kde délka vedení dosahuje maximálně 200 km, se provádí pouze příčná kompenzace pomocí tlumivek nebo rotačních kompenzátorů [5].

Hlavním důvodem snahy o zlepšování účinníku je penalizace za příliš velký odběr či dodávku jalového výkonu za síť. Dle pravidel provozovatele distribuční soustavy zákazník neplatí žádnou cenovou přírážku, pohybuje-li se $\cos\varphi$ v mezích 0,95 – 1,00. Pokud je však vypočtený účinník podle naměřených hodnot menší než 0,95, platí zákazník provozovateli distribuční soustavy cenovou přírážku dle aktuálního ceníku Energetického regulačního úřadu.

3.8 Zdroje a spotřebiče jalového výkonu

Změnu výroby či spotřeby jalového výkonu můžeme uskutečnit několika způsoby:

- Synchronní generátory – mohou být použity pro výrobu či spotřebu jalového výkonu, když pracují v přebuzeném či podbuzeném stavu. Mezní velikost vyráběného či spotřebovaného jalového výkonu je omezena řadou faktorů, jako je například maximální dovolený proud statoru, mez budícího proudu a omezení statickou stabilitou.
- Synchronní kompenzátory – jsou v podstatě synchronní motory běžící bez zatížení. V přebuzeném stavu dodávají jalový výkon až do své jmenovité hodnoty. V podbuzeném stavu mohou absorbovat asi polovinu svého jmenovitého výkonu. Synchronní kompenzátory se obvykle připojují na terciální vinutí transformátorů. Jejich velkou výhodou je pružné přizpůsobení výroby či spotřeby jalového výkonu podle okamžitého zatížení v síti. Nevýhodou je poměrně vysoká pořizovací cena, avšak bývá nutností toto zařízení používat, neboť v některých uzlech elektrizační soustavy je nutná výroba jalového výkonu pro její normální a spolehlivý chod.
- Transformátory – jsou spotřebiči jalového výkonu. Jalový výkon je spotřebováván na sycení magnetického obvodu. Jejich ztrátový jalový výkon lze vypočítat dle vztahu:

$$Q_{zt} = Q_0 + Q_K \cdot \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 = \frac{S_n}{100} \cdot \left[i_0 + u_k \cdot \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

- Venkovní vedení – Při zatíženích blížících se hranici dovoleného proudového zatížení nebo při zatíženích podstatně větších než je jejich přirozený výkon, stávají se venkovní vedení spotřebičem jalového výkonu, který můžeme přibližně určit jako jalové ztráty v podélné impedanci dle vztahu (3.11):

$$\Delta Q = 3 \cdot X \cdot I^2 \quad (3.11)$$

Při malém zatížení pod hodnotou přirozeného výkonu až k chodu naprázdno začíná převažovat nabíjecí kapacitní výkon vedení a to se stává zdrojem jalového výkonu. Například je-li zatížení polovina přirozeného výkonu, tvoří kapacitní výkon přibližně 70% výkonu nabíjecího - výkonu při chodu naprázdno. Pro základní představu jsou v tabulce (Tab. 3-1) uvedeny nabíjecí výkony venkovních vedení.

Tab. 3-1 Velikost nabíjecích výkonů venkovního vedení

U [kV]	22	110	220	400
Q _{ck} [MVar/100 km]	0,07	3,5	13	60

- Kabelová vedení – mají provozní kapacitu značně vyšší než venkovní vedení a relativně malou indukčnost. Nabíjecí výkon kabelů 35 kV je kolem 0,13 MVar/km a například u kabelů na napětí 275 kV je nabíjecí výkon 6 až 7 MVar/km. Kapacita rozsáhlejších kabelových sítí přispívá tedy k celkové výrobě jalového výkonu.

Tab. 3-2 Velikost nabíjecích výkonů kabelového vedení

U [kV]	22	35	110	275
Q _{ck} [MVar/100 km]	5	13	100	600-700

- Statické kondenzátory – obvykle se používají pro výrobu jalového výkonu v sítích NN a VN. Jejich výhodou jsou velmi malé činné ztráty. Nevýhodou je stupňovitá regulace jalového výkonu. V poslední době se pro řízení plynulé regulace začíná využívat výkonových tyristorů.
- Kompenzační tlumivky – používají se pro absorpci kapacitního jalového výkonu v sítích VVN, zejména 400 kV v době odlehčení. Do přenosové sítě jsou připojovány přes transformátory obdobně jako synchronní kompenzátory. V uzlových vybraných bodech sítí 400 kV se používají tlumivky o výkonu až 150 MVar [2].
- Zhášecí tlumivka – známá také jako Petersenova se používá v trojfázových soustavách, které nejsou přímo uzemněné. Mezi uzel transformátoru a zem lze vložit impedanci pro kompenzaci proudů při zemních spojeních. V sítích s izolovaným uzlem totiž při spojení fáze se zemí protéká místem poruchy proud, jehož velikost určuje především kapacitní susceptance k zemi. Porucha je velmi často doprovázena obloukem. Vložíme-li mezi uzel vinutí transformátoru a zem tlumivku, přivedeme do místa poruchy proud téměř čistě induktivního charakteru. Nařídíme-li reaktanci tlumivky tak, aby její proud byl velikostně přibližně roven zmíněnému proudu kapacitnímu, bude pak místem poruchy protékat pouze malý proud zbytkový, který je dán činným odporem tlumivky, což bude mít za následek zhasnutí oblouku. Ladění induktivních jalových proudů na tlumivce probíhá automaticky. Zhášecí tlumivky se používají v sítích od 6 kV do 35 kV [3].
- Zatížení – v uzlových bodech sítí 110 kV by mělo být odebíráno zatížení s účínkem lepším než 0,95, aby byly nároky na výrobu a přenos jalového výkonu nadřazenou soustavou v přijatelných mezích [2].
- Vysílače HDO – vysílače HDO mají velkou vlastní kapacitu, mohou tedy být zdrojem jalového výkonu.

4 USTÁLENÝ CHOD VEDENÍ

Posouzení jednotlivých variant zapojení sítě z hlediska ztrát provedeme na základě výpočtu ustáleného chodu sítě. Výpočtem ustáleného chodu sítě rozumíme výpočet elektrických poměrů v závislosti na zatěžovacích poměrech.

Znalost těchto poměrů, tj. znalost proudů, napětí, ztrát výkonu, činných a jalových výkonů v jednotlivých prvcích a jednotlivých uzlech elektrizační soustavy, je nutná pro řízení provozu elektrizační sítě a pro návrh jejího dalšího rozvoje. Vypočítané hodnoty ustáleného chodu jsou také používány jako výchozí údaje pro výpočet poměrů přechodových dějů a pro optimalizaci výroby elektrické energie či regulace napětí [2].

4.1 Vedení VN a VVN

Distribuční sítě VN jsou tvořeny vedeními provozovanými v převážné míře na napěťových hladinách 22 kV nebo 35 kV. V drtivé většině jsou tyto sítě provozovány jako paprskové případně formou průběžného rozvodu. Vedení VN se využívají pro přenos elektrické energie do center její spotřeby, jako jsou obce, města a velkoodběratelé. V městských zástavbách toto řešení většinou umožňuje řadu propojení do dvoj-paprskového nebo okružního rozvodu. Tato vedení dosahují kratších délek než vedení 110 kV, jsou však daleko hustější. Rovněž se u nich vyžaduje vysoká spolehlivost dodávky, ovšem ne tak velká, jak je tomu u vedení 110 kV. Pro venkovní vedení VN se používají holé vodiče, jednoduché izolované vodiče a slané závěsné kabely, nicméně soustava VN bývá často provozována i jako kabelová [1].

Distribuční soustava 110 kV tvoří základ distribuční soustavy, slouží k přenosu velkých výkonů z místa propojení s přenosovou soustavou do míst s velkou koncentrací odběrů. Do těchto sítí je vyveden výkon řady elektráren o výkonech desítek MW, jsou provozovány zpravidla jako okružní a zvolenému způsobu provozu odpovídá i použitý systém chránění distančními ochranami. Sítě se spolu s vedeními ZVN a VVN přenosové soustavy vyznačují vysokou spolehlivostí a velice nízkou četností poruch. Díky způsobu provozu a zálohování většina poruch při správném působení ochranných systémů nezpůsobí přerušení dodávky elektřiny odběratelům. Vedení jsou nejčastěji konstruována jako dvojítá (dvě vedení na jednom stožáru), nicméně v ČR se vyskytují i vedení jednoduchá, trojitá a čtyřnásobná. Délky těchto vedení mohou činit i několik desítek kilometrů, tvoří je holá ocelohliníková lana AlFe [1]. V městských aglomeracích mohou být vedení 110 kV provozována i jako kabelová, toto řešení se však používá jen pro velmi krátké úseky.

4.2 Zjednodušující předpoklady

Výpočet ustáleného chodu sítě zahrnuje výpočet počátečního nebo koncového napětí v síti, protékající proud, výkonové poměry na začátku a konci vedení a výkonových ztrát. Při řešení uzlových sítí VVN uvažujeme prvky podélné impedance \overline{Z}_k i prvky příčné admittance \overline{Y}_k .

$$\overline{Z}_k = (R_k + j.X_k)$$

$$\overline{Y}_k = (G_k + j.B_k)$$

(4.1)

kde : R_k je rezistance vedení na jednotku délky
 X_k je induktivní reaktance vedení na jednotku délky
 G_k je konduktance vedení na jednotku délky
 B_k je kapacitní susceptance vedení na jednotku délky.

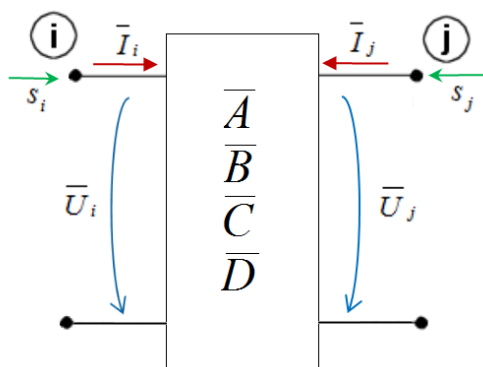
Při řešení ustáleného chodu sítě VVN předpokládáme tyto zjednodušující podmínky:

- trojfázová soustava je souměrná v parametrech prvků, ve zdrojích i ve spotřebičích, proto řešíme pouze její jednofázový obvod,
- napětí a proudy jsou harmonickými funkcemi času s konstantním kmitočtem $f = 50$ Hz, neobsahují vyšší harmonické složky, jejich průběh je tedy čistě sinusový a neuvažuje se deformační výkon v síti
- prvky sítě s homogenně rozloženými parametry nahrazujeme:
 - vedení nahrazujeme obvykle π - články
 - transformátory Γ - články nebo π - články,
- parametry vedení, transformátory a ostatní prvky elektrizační soustavy jsou konstanty nezávislé na velikosti proudu a napětí, mají tedy lineární charakteristiku,
- zdroje a odběry jsou zadány pomocí výkonů, kde proudy nejsou závislé na napětí – neuvažuje se jejich statická charakteristika,
- parametry všech prvků jsou přepočítány na jedno vztažné napětí [3], [4].

4.3 Náhrada vedení dvojbranou – přibližné řešení

Vedení, případně jiný prvek elektrizační soustavy, lze pro výpočet poměrů na jeho začátku nebo konci nahradit dvojbranem, který obsahuje soustředěné parametry. V této kapitole se zmíníme o dvojbranech používaných obvykle k náhradě prvků při výpočtech jejich ustáleného chodu.

Pokud není třeba vyšetřovat podrobněji poměry uvnitř prvku soustavy (transformátory, vedení atd.), postačí zjistit pro výpočet ustáleného chodu vzájemné vztahy mezi veličinami na vstupu a výstupu. Při poruše symetrie se s výhodou použije souměrných složek. Prvek v jedné fázi, případně pro jednu souměrnou složku, lze nahradit lineárním dvojbranem, který znázorňuje *Obr. 4-1*. Pro něj platí mezi fázory vstupních a výstupních proudů a napětí v maticovém zápisu rovnice s postupnou kaskádní maticí (4.2) a se zpětnou kaskádní maticí (4.3) [5].



Obr. 4-1 Lineární dvojbran

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_i \\ \bar{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_j \\ \bar{I}_j \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_j \\ \bar{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{D} & -\bar{B} \\ -\bar{C} & \bar{A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_i \\ \bar{I}_i \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

kde \bar{U}_i, \bar{U}_j jsou fázory fázových napětí na začátku a na konci vedení,
 \bar{I}_i, \bar{I}_j jsou fázory fázových proudů na začátku a na konci vedení,
 $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ jsou Blondelovy konstanty.

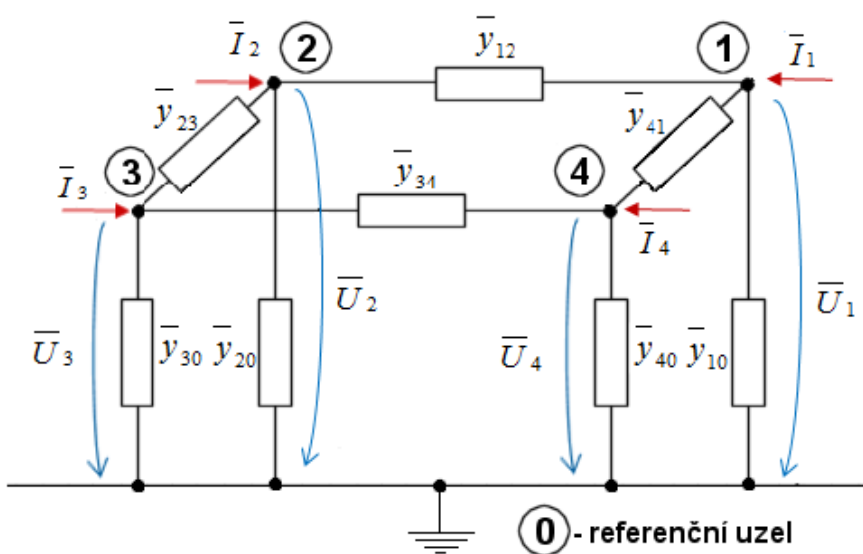
Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, v praxi se ve výpočtech používají následující typy článků:

- π článek – nejčastěji využívaný
- Γ článek
- T článek
- Steinmetzův článek

V této práci se však zaměříme na přesnější řešení výpočtu chodu sítě. Náhrada vedení dvojbrany je detailně popsána v literatuře [3] a [5].

4.4 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Tato kapitola byla vytvořena na základě literatury [2]. Při výpočtu ustáleného chodu jako lineární úlohy předpokládáme, že jsou zadány odebírané a dodávané proudy do uzlů sítě. Prvky elektrizační soustavy jsou zadány jejich podélnými a příčnými admitancemi. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2, přenosová a rozvodná vedení se nejčastěji nahrazují π články, transformátory Γ nebo π články. Podélné admitance jsou mezi jednotlivými příslušnými uzly sítě. Příčné admitance jsou mezi příslušnými uzly sítě a uzlem referenčním (zemí) o nulovém potenciálu. Předpokládáme dále, že parametry všech prvků jsou přepočítány na jedno společné vztažné napětí, a můžeme tedy elektrizační soustavu nahradit galvanickým spojením prvků např. podle Obr. 4-2.



Obr. 4-2 Náhradní schéma sítě s podélnými a příčnými admitancemi

Síť na Obr. 4-2 můžeme matematicky popsat pomocí metody uzlových napětí soustavou rovnic (4.4 - první řádky jednotlivých matic odpovídají uzlu 1, druhé řádky uzlu 2 atd.).

$$\begin{bmatrix} \overline{I}_1 \\ \overline{I}_2 \\ \overline{I}_3 \\ \overline{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Y}_{11} & \overline{Y}_{12} & \overline{Y}_{13} & \overline{Y}_{14} \\ \overline{Y}_{21} & \overline{Y}_{22} & \overline{Y}_{23} & \overline{Y}_{24} \\ \overline{Y}_{31} & \overline{Y}_{32} & \overline{Y}_{33} & \overline{Y}_{34} \\ \overline{Y}_{41} & \overline{Y}_{42} & \overline{Y}_{43} & \overline{Y}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \\ \overline{U}_3 \\ \overline{U}_4 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

kde $\overline{U}_1, \overline{U}_2, \overline{U}_3$ a \overline{U}_4 jsou fázory neznámých uzlových napětí

$\overline{I}_1, \overline{I}_2, \overline{I}_3$ a \overline{I}_4 jsou fázory zadaných uzlových proudů, znaménko „+“ značí, že jsou zadány dodávky a znaménkem „-“ jsou označeny odběry

Předchozí soustava rovnic (4.4) se dá zkráceně zapsat v maticovém tvaru:

$$[\overline{I}] = [\overline{Y}] \cdot [\overline{U}] \quad (4.5)$$

kde prvky admitanční uzlové matice $[\overline{Y}]$ jsou sestaveny podle algoritmu vyplývajícího z druhého Kirchhoffova zákona takto:

- i-tý diagonální prvek Y_{ii} je tvořen součtem admitancí všech větví incidenčních s i-tým uzlem,
- mimodiagonální prvek Y_{ij} ($i \neq j$) je tvořen záporně vzatým součtem admitancí všech větví spojujících i-tý uzel s j-tým uzlem.

Předpokládáme přitom, že větve nemají vzájemné induktivní vazby. Takže např. pro prvek v síti, jejíž schéma nám znázorňuje *Obr. 4-2*, platí:

- diagonální prvek: $\overline{Y}_{22} = \overline{y}_{12} + \overline{y}_{23} + \overline{y}_{20}$
 - mimodiagonální prvek: $\overline{Y}_{21} = \overline{Y}_{12} = -\overline{y}_{12}$
- } (4.6)

Pro snazší rozlišení značíme prvky admitanční uzlové matice a uzlové veličiny velkými písmeny a admitance jednotlivých větví a větvové proudy malými písmeny.

Soustavu rovnic (4.5) můžeme také zapsat ve tvaru:

$$\overline{I}_i = \sum_{j=1}^n \overline{Y}_{ij} \cdot \overline{U}_j \quad \text{pro } i=1,2,3,\dots,n \quad (4.7)$$

kde n je počet uzlů v síti mimo uzel referenční, kterému po zjednodušení dalších zápisů přiřadíme pevné číslo a to 0.

Pozn.: Neuvažujeme-li v síti na *Obr. 4-2* příčné admitance, pak matice $[\overline{Y}]$ je singulární a soustava rovnic (4.5) nebo (4.6) je závislá. Závislost se dá odstranit eliminací bilančního uzlu, viz další kapitola.

4.4.1 Eliminace bilančního uzlu

Text v této kapitole byl vytvořen podle [2]. Soustava rovnic (4.4) sestavená na základě II. Kirchhoffova zákona pro síť na Obr. 4-2 je nezávislá, tj. matice $[\bar{Y}]$ je regulární. Avšak jeden z uzlů sítě musí hradit neznámé proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnávat bilanci mezi dodávkami a odběry. Tento uzel s neznámým uzlovým proudem budeme v dalším postupu nazývat bilančním uzlem. Aby byl stejný počet neznámých jako rovnic (4.4), (4.5) a (4.7), je nutné v bilančním uzlu zadat známé napětí. Pro formální zjednodušení dalšího zápisu přiřadíme bilančnímu uzlu pevné číslo 1. Vzhledem k tomu, že v bilančním uzlu máme zadáno napětí \bar{U}_1 , můžeme soustavu rovnic (4.4) přepsat do tvaru:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{21} & \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{31} & \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{41} & \bar{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

a analogicky můžeme přepsat i rovnici (4.7):

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1} \cdot \bar{U}_1 + \sum_{j=2}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i=1,2,3,\dots,n \quad (4.9)$$

Po vypočítání neznámých napětí $\bar{U}_2, \bar{U}_3, \dots, \bar{U}_n$ dopočítáme neznámý proud \bar{I}_1 v bilančním uzlu při určení proudů v jednotlivých větvích sítě. Vynechání rovnice pro bilanční uzel ve vztazích (4.8) a (4.9) označujeme jako eliminace bilančního uzlu. Soustavu rovnic řešíme eliminační metodou nebo iteračními metodami s přímou inverzí admitanční uzlové matice řádu $(n-1)$. Po výpočtu neznámých uzlových napětí určíme rozdělení proudů ve větvích náhradního schématu podle vztahu:

$$\bar{i}_{pq} = y_{pq} \cdot (\bar{U}_p - \bar{U}_q) \quad (4.10)$$

kde \bar{i}_{pq} je proud tekoucí o admitanci \bar{y}_{pq} z uzlu p do uzlu q.

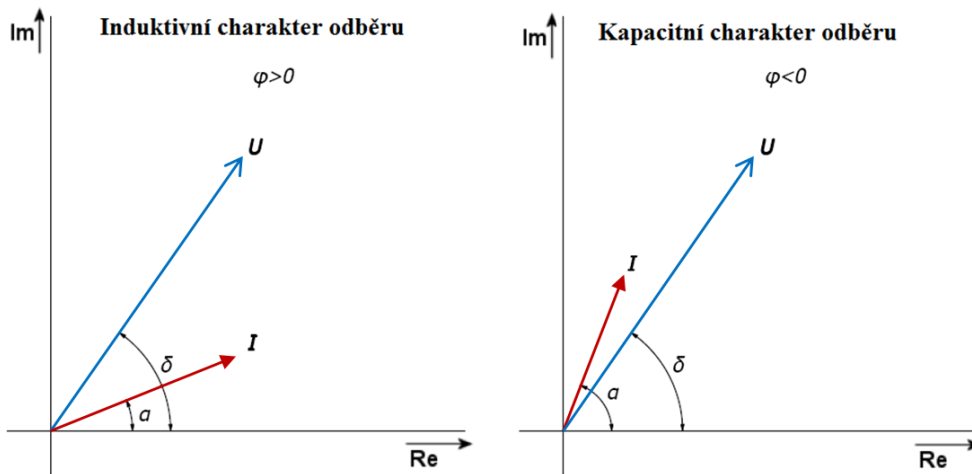
4.5 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

Text této kapitoly byl vytvořen podle literatury [2]. Jak již bylo zmíněno v kapitole (4.2), v praxi bývají odběry a dodávky v uzlech zadávány činnými a jalovými výkony. Soustava je souměrná a můžeme uvažovat pouze její jednofázový obvod. Takže pro i -tý uzel platí:

$$\bar{S}_i = P_i + j \cdot Q_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (4.11)$$

kde \bar{I}_i^* je komplexně sdružený proud k proudu \bar{I}_i .

Znaménko u činného a jalového výkonu podle rovnice (4.11) určíme z diagramu napětí a proudu v uzlu se zdrojem, tzn. činný výkon je dodáváný do sítě. Určení znaménka je zřejmé z Obr. 4-3.



Obr. 4-3 Fázorový diagram indukčního a kapacitního odběru

Fázorový diagram znázorňuje výrobu činného a jalového výkonu (proudu) s indukčním fázovým posunem. Dodávaný zdánlivý výkon do uzlu sítě pak je:

$$\bar{S}_i = P_i + j \cdot Q_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* = U \angle \delta \cdot I \angle -\alpha = U \cdot I \angle \varphi = S (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (4.12)$$

kde fázový posun napětí a proudu je vyjádřený úhlem $\varphi = \delta - \alpha$. Odtud plyne, je-li indukční posun proudu vůči napětí (proud je zpožděn za napětím), je pak $\varphi > 0$ a $P > 0$ i $Q > 0$.

Pro odběrový uzel uvažujeme, že proud má znaménko záporné. To má za následek změnu znaménka u činného a jalového výkonu oproti uzlu s dodávkou. Nejlépe je to možné vidět v následující tabulce (Tab. 4-1) při uvažované orientaci toku výkonu (proudu) šipkou směrem do uzlu.

Tab. 4-1 Znaménka činného a jalového výkonu ve zdrojových a odběrových uzlech

Typ zátěže	Posun proudu	Zdroj	Odběr
Induktivní	$\varphi > 0$	$P > 0$ $Q > 0$	$P < 0$ $Q < 0$
Kapacitní	$\varphi < 0$	$P > 0$ $Q < 0$	$P < 0$ $Q > 0$

Z rovnice (4.11) si vyjádříme proud:

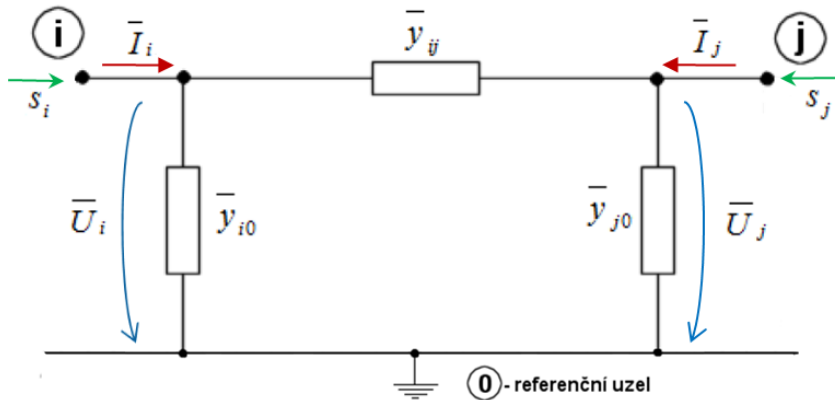
$$\bar{I}_i = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - j \cdot Q_i}{\bar{U}_i^*} \quad (4.13)$$

Dosažením do rovnice (4.9) dostaneme:

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - j \cdot Q_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (4.14)$$

Z rovnic (4.9) a (4.14) je zřejmé, že byla provedena eliminace bilančního uzlu, a tedy volba napětí U_1 . Bilanční uzel v tomto případě, kdy jsou zadány uzlové výkony, hradí rozdíl mezi dodávkami a odběry a navíc ztráty činného a jalového výkonu v síti.

Řešení soustavy rovnic (4.14) by bylo velmi náročné, proto se nejčastěji používají dvě iterační metody – **Gauss-Seidlova** a **Newtonova**. Vzhledem k tomu, že jsou zadány výkony v uzlech sítě (dodávky a odběry), napětí bilančního uzlu a admitance Y_{ij} vede výpočet neznámých napětí k řešení soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic (4.14). Po výpočtu neznámých (hledaných) uzlových napětí se určí toky výkonů v síti a výkonové ztráty.



Obr. 4-4 Náhradní schéma π článku

Jsou-li jednotlivé prvky sítě nahrazeny π – články (Obr. 4-4), pak proud tekoucí do uzlu i je určen rovnicí:

$$\bar{I}_i = (\bar{U}_i - \bar{U}_j) \cdot \bar{y}_{ij} + \bar{U}_i \cdot \bar{y}_{i0} \quad (4.15)$$

Výkon pak lze vyjádřit jako:

$$\bar{S}_i = P_i + j \cdot Q_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (4.16)$$

Je-li dle úmluvy $P_i > 0$, pak činný výkon vtéká do uzlu i . Znaménko u jalového výkonu pak určuje, zda se jedná o výkon induktivního či kapacitního charakteru.

Analogicky vyjádříme proud a výkon tekoucí do uzlu j :

$$\begin{aligned} \bar{I}_j &= (\bar{U}_j - \bar{U}_i) \cdot \bar{y}_{ij} + \bar{U}_j \cdot \bar{y}_{j0} \\ \bar{S}_j &= P_j + j \cdot Q_j = \bar{U}_j \cdot \bar{I}_j^* \end{aligned} \quad (4.17)$$

Činné a jalové ztráty výkonu v tomto náhradním článku dostáváme algebraickým součtem výkonů tekoucích do uzlů i, j

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij} &= P_i + P_j \\ \Delta Q_{ij} &= Q_i + Q_j \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.6 Výpočet ustáleného chodu Gauss-Seidlovou iterační metodou

Předpokládejme, že máme sestavenou admitanční uzlovou matici $[Y]$ náhradního schématu sítě o n uzlech. Sít obsahuje bilanční uzel s označením 1 , ve kterém je zadáno napětí a jeho fáze:

$$\bar{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ \quad (4.19)$$

Zbývající uzly 2, 3... n jsou odběrové a zdrojové, jsou v nich tedy zadány činné a jalové výkony. Chceme přibližným výpočtem určit napětí a jeho úhel v těchto uzlech, přepíšeme tedy výkonové rovnice do tvaru:

$$\overline{U}_i = \frac{1}{\overline{Y}_{ii}} \left[\frac{P_i - j \cdot Q_i}{3 \cdot \overline{U}_i^*} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \overline{Y}_{ij} \cdot \overline{U}_j \right] \text{ pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (4.20)$$

Podstata Gauss-Seidlový metody spočívá v odhadu napětí $\overline{U}_2, \overline{U}_3, \dots, \overline{U}_n$ a jeho srovnání s hodnotami stanovenými podle rovnice (4.20). Velikostí rozdílu vypočtených a odhadovaných hodnot se hodnotí správnost odhadu. Při větších rozdílech, než je požadovaná přesnost, se provede nový odhad a srovnání se opakuje.

Postup iteračního výpočtu lze tedy shrnout:

1. Provede se první dohad napětí $U_i^{(0)}$ pro $i = 2, 3, \dots, n$. Obvykle se tato napětí volí stejná v absolutní hodnotě i úhlu, například jmenovité napětí řešení sítě nebo napětí bilančního uzlu.
2. Odhadnutá napětí se dosadí do pravé strany rovnice (4.20):

$$\overline{U}_2^{(1)} = \frac{1}{\overline{Y}_{22}} \left[\frac{P_2 - j \cdot Q_2}{3 \cdot (\overline{U}_3^{(0)})^*} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \overline{Y}_{2j} \cdot \overline{U}_j^{(0)} \right] \quad (4.21)$$

3. Původní odhad napětí zpřesníme o hodnotu napětí druhého uzlu, stanoveného podle (4.21), takže napětí třetího uzlu počítáme pomocí odhadu $\overline{U}_1, \overline{U}_2^{(1)}, \overline{U}_3^{(0)}, \overline{U}_4^{(0)}, \dots, \overline{U}_n^{(0)}$.

$$\overline{U}_3^{(1)} = \frac{1}{\overline{Y}_{33}} \left[\frac{P_3 - j \cdot Q_3}{3 \cdot (\overline{U}_3^{(0)})^*} + \overline{Y}_{13} \cdot \overline{U}_1 + \overline{Y}_{23} \cdot \overline{U}_2^{(1)} + \sum_{j=4}^n \overline{Y}_{3j} \cdot \overline{U}_j^{(0)} \right] \quad (4.22)$$

Znovu zpřesníme odhad napětí o $\overline{U}_3^{(1)}$ před výpočtem napětí čtvrtého uzlu $\overline{U}_1, \overline{U}_2^{(1)}, \overline{U}_3^{(1)}, \overline{U}_4^{(0)}, \overline{U}_5^{(0)}, \dots, \overline{U}_n^{(0)}$.

Takto postupujeme až po výpočet napětí posledního n -tého uzlu.

4. Je-li rozdíl

$$\left| \overline{U}_i^{(0)} - \overline{U}_i^{(1)} \right| > \varepsilon \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (4.23)$$

kde ε je požadovaná přesnost stanovení uzlových napětí, pak výpočet opakujeme ve druhé iteraci s počátečním odhadem z konce iterace první.

Celý postup lze matematicky vyjádřit vztahem:

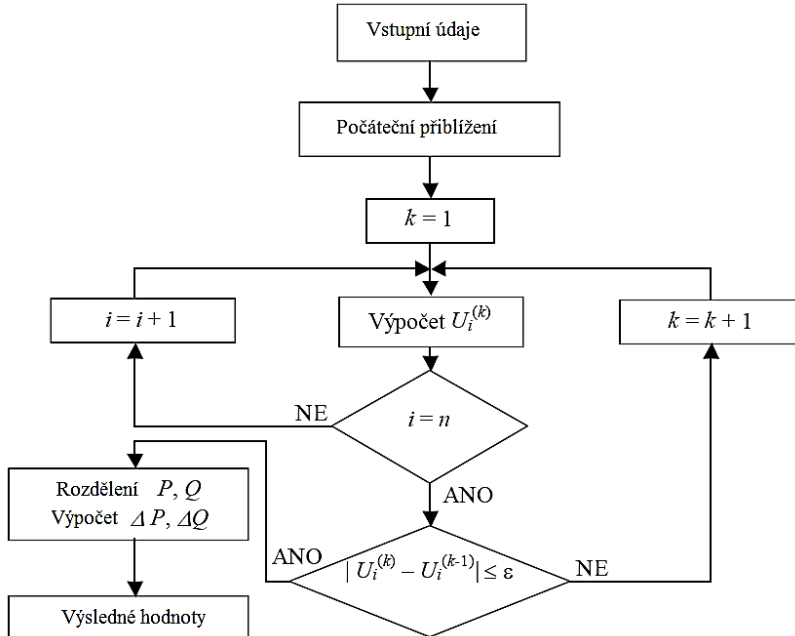
$$\overline{U}_i^{(p+1)} = \frac{1}{\overline{Y}_{ii}} \left[\frac{P_i - j \cdot Q_i}{3 \cdot \overline{U}_i^{(p)*}} + \sum_{j=1}^{i-1} \overline{Y}_{ij} \cdot \overline{U}_j^{(p+1)} + \sum_{j=i+1}^n \overline{Y}_{ij} \cdot \overline{U}_j^{(p)} \right] \quad (4.24)$$

pro $\overline{U}_1, \overline{U}_2^{(0)}, \overline{U}_3^{(0)}, \dots, \overline{U}_n^{(0)}, i=2, 3, \dots, n$

Výpočet se ukončí, je-li splněno

$$\left| \overline{U}_i^{(p)} - \overline{U}_i^{(p+1)} \right| \leq \varepsilon \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (4.25)$$

Kde p značí počet opakování výpočtu napětí (iterací) [4],[6].



Obr. 4-5 Algoritmus řešení výpočtu Gauss – Seidlovou iterační metodou[6]

4.6.1 Příklad výpočtu ustáleného chodu Gauss-Seidlovou metodou

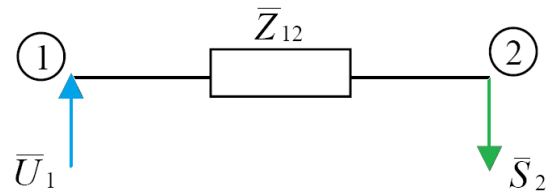
Postup výpočtu byl zpracován dle literatury [6].

Vypočítáme napětí v uzlu č. 2 v síti podle Obr. 3-6 Gauss-Seidlovou iterační metodou s přesností $\varepsilon = 0,01$.

$$\overline{U}_1 = 120 \text{ kV}$$

$$\overline{Z}_{12} = (1 + j3) \Omega$$

$$\overline{S}_2 = (-50 - j40) \text{ MVA}$$



Obr. 4-6 Síť názorného příkladu

Postup výpočtu:

Sestavení uzlové admitanční matice:

$$[\overline{Y}] = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,1 \\ -0,1 & 0,1 \end{bmatrix} - j \cdot \begin{bmatrix} 0,3 & -0,3 \\ -0,3 & 0,3 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Všeobecně pro výpočet proudu platí vztah (4.9):

$$\overline{I}_i = \overline{Y}_{ij} \cdot \overline{U}_1 + \sum_{j=2}^n \overline{Y}_{ij} \cdot \overline{U}_j = \sum_{j=1}^n \overline{Y}_{ij} \cdot \overline{U}_j \quad (4.27)$$

Konkrétně pro uzel č. 2 platí ($i = 2$), můžeme tedy rovnici (4.27) napsat:

$$\bar{I}_2 = \bar{Y}_{12} \cdot \bar{U}_1 + \bar{Y}_{22} \cdot \bar{U}_2 \quad (4.28)$$

Odkud můžeme vyjádřit napětí v uzlu č. 2:

$$\bar{U}_2 = \frac{1}{\bar{Y}_{22}} \cdot (\bar{I}_2 - \bar{Y}_{12} \cdot \bar{U}_1) = \frac{g_{22} + jb_{22}}{g_{22}^2 + b_{22}^2} \cdot [(I_{a2} + jI_{r2}) - (g_{12} - jb_{12}) \cdot U_1] \quad (4.29)$$

V uzlu č. 2 máme zadané výkony, takže proud vyjádříme pomocí výkonů následovně:

$$\bar{I}_2 = \frac{S_2^*}{U_2^*} = (I_{a2} + jI_{r2}) = \frac{(P_2 - jQ_2)}{(U_{a2} + jU_{r2})} = \frac{(P_2 - jQ_2) \cdot (U_{a2} + jU_{r2})}{U_{a2}^2 + U_{r2}^2} \quad (4.30)$$

Potom pro napětí v uzlu č. 2 platí:

$$\bar{U}_2 = \frac{g_{22} + jb_{22}}{g_{22}^2 + b_{22}^2} \cdot \left[\frac{(P_2 - jQ_2) \cdot (U_{a2} + jU_{r2})}{U_{a2}^2 + U_{r2}^2} - (g_{12} - jb_{12}) \cdot U_1 \right] \quad (4.31)$$

Tuto rovnici upravíme a přepíšeme do iteračního tvaru:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{a2}^{(p+1)} &= \frac{1}{g_{22}} \cdot \left[\frac{P_2 \cdot U_{a2}^{(p)} + Q_2 \cdot U_{r2}^{(p)}}{U_{a2}^{2(p)} + U_{r2}^{2(p)}} + g_{12} \cdot U_1 \right] + \frac{1}{b_{22}} \cdot \left[\frac{Q_2 \cdot U_{a2}^{(p)} - P_2 \cdot U_{r2}^{(p)}}{U_{a2}^{2(p)} + U_{r2}^{2(p)}} + b_{12} \cdot U_1 \right] \\ \bar{U}_{r2}^{(p+1)} &= \frac{1}{g_{22}} \cdot \left[\frac{-Q_2 \cdot U_{a2}^{(p+1)} + P_2 \cdot U_{r2}^{(p)}}{U_{a2}^{2(p+1)} + U_{r2}^{2(p)}} - b_{12} \cdot U_1 \right] + \frac{1}{b_{22}} \cdot \left[\frac{P_2 \cdot U_{a2}^{(p+1)} + Q_2 \cdot U_{r2}^{(p)}}{U_{a2}^{2(p+1)} + U_{r2}^{2(p)}} + g_{12} \cdot U_1 \right] \end{aligned} \quad (4.32)$$

Dosadíme - li počáteční přiblížení napětí v uzlu č. 2 do rovnic (4.32), dostaneme nové přibližné napětí v tomto uzlu. Zvolíme například počáteční přiblížení $U_{a2}^{(0)} = 115 \text{ kV}$ a $U_{r2}^{(0)} = 0 \text{ kV}$.

$$\bar{U}_{a2}^{(p+1)} = 1 \cdot \left[\frac{-50 \cdot 115 - 40 \cdot 0}{115^2 + 0^2} + 0,1 \cdot 120 \right] + 3 \cdot \left[\frac{-40 \cdot 115 + 50 \cdot 0}{115^2 + 0^2} + 0,3 \cdot 120 \right] = 118,5217 \text{ kV} \quad (4.33)$$

$$\bar{U}_{r2}^{(p+1)} = 1 \cdot \left[\frac{40 \cdot 118,5217 - 50 \cdot 0}{118,5217^2 + 0^2} + 0,1 \cdot 120 \right] + 3 \cdot \left[\frac{-50 \cdot 118,5217 - 40 \cdot 0}{118,5217^2 + 0^2} + 0,3 \cdot 120 \right] = -0,9281 \text{ kV}$$

Výsledky pro jednotlivé iterace jsou v následující tabulce (Tab. 4-2):

Tab. 4-2 Výsledné hodnoty napětí jednotlivých iterací Gauss-Seidlovou metodou

p	U_{a2} [kV]	U_{r2} [kV]
0	115	0
1	118,5217	-0,92810
2	118,5585	-0,91653
3	118,5590	-0,91667

Zadaná přesnost výpočtu ε byla dosažena při třetí iteraci, napětí v uzlu č. 2 se tedy rovná:

$$\bar{U}_2 = (118,559 - j0,91667) \text{ kV} = (118,5625 \angle -0,443^\circ) \text{ kV}.$$

4.7 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Kapitola byla převzata z literatury [6].

Pro řešení ustáleného chodu elektrizační soustavy použijeme Newtonovu iterační metodu. Předpokládejme, že ustálený chod v elektrizační soustavě je opět namodelován pomocí soustavy nelineárních rovnic. Pro použití Newtonovy iterační podmínky musí soustava splňovat následující podmínky:

- k příslušné Jakobihovi matici existuje inverzní matice,
- je možná dostatečně přesná počítačová aproximace,
- koeficienty rovnic jsou reálná čísla.

Obyčejně bývají splněny první dvě podmínky. Třetí podmínku zabezpečíme, když rovnice s komplexními koeficienty upravíme na rovnice s reálnými koeficienty. V souladu s rovnicí (3.13) můžeme napsat:

$$P_i - j \cdot Q_i = \overline{U_i^*} \cdot \sum_{j=1}^n \overline{Y_{ij}} \cdot \overline{U_j} \quad \text{pro } i=2,3,\dots,n \quad (4.34)$$

Pravou stranu rovnice rozepíšeme na reálnou a imaginární část. Můžeme to provést zápisem fázoru napětí a admitancí ve složkovém nebo polárním tvaru. U polárního tvaru předpokládejme:

$$\left. \begin{aligned} \overline{U_i} &= U_i \angle \delta_i \\ \overline{U_i^*} &= U_i \angle -\delta_i \\ \overline{Y_{ij}} &= Y_{ij} \angle \alpha_{ij} = g_{ij} - j b_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (4.35)$$

Dosazením rovnic (4.35) do (4.34) a úpravou dostaneme:

$$P_i - j \cdot Q_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot e^{-j(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij})} \cdot U_i \cdot U_j \quad \text{kde } i=2,3,\dots,n \quad (4.36)$$

Z rovnice (4.36) můžeme vyjádřit činný a jalový výkon:

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad \text{kde } i=2,3,\dots,n \quad (4.37)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad \text{kde } i=2,3,\dots,n \quad (4.38)$$

Dostali jsme tak $2 \cdot (n-1)$ rovnic s reálnými koeficienty o $2 \cdot (n-1)$ neznámých. Neznámými jsou velikosti napětí a jejich úhlů v uzlech $i=2,3,\dots,n$. Pokud budeme předpokládat, že ve všech uzlech, kromě uzlu bilančního (obvykle bývá zadán jako $\overline{U_1} = U_1$), je $\delta_1 = 0^\circ$, můžeme potom pro iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ v souladu s Newtonovou iterační metodou napsat:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Zkráceně můžeme rovnici (4.39) přepsat:

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Jednotlivé parciální derivace dostaneme derivováním rovnic (4.37) a (4.38) podle příslušných proměnných následovně:

$$\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right]:$$

$$\text{Diagonální prvky: } \left[\frac{\partial P_i}{\partial U_i} \right] = 2.U_i . Y_{ii} . \cos(\alpha_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j . Y_{ij} . \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.41)$$

$$\text{Mimodiagonální prvky: } \left[\frac{\partial P_i}{\partial U_j} \right] = U_i . Y_{ij} . \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.42)$$

$$\left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]:$$

$$\text{Diagonální prvky: } \left[\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} \right] = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i . U_j . Y_{ij} . \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.43)$$

$$\text{Mimodiagonální prvky: } \left[\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \right] = U_i . U_j . Y_{ij} . \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.44)$$

$$\left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right]:$$

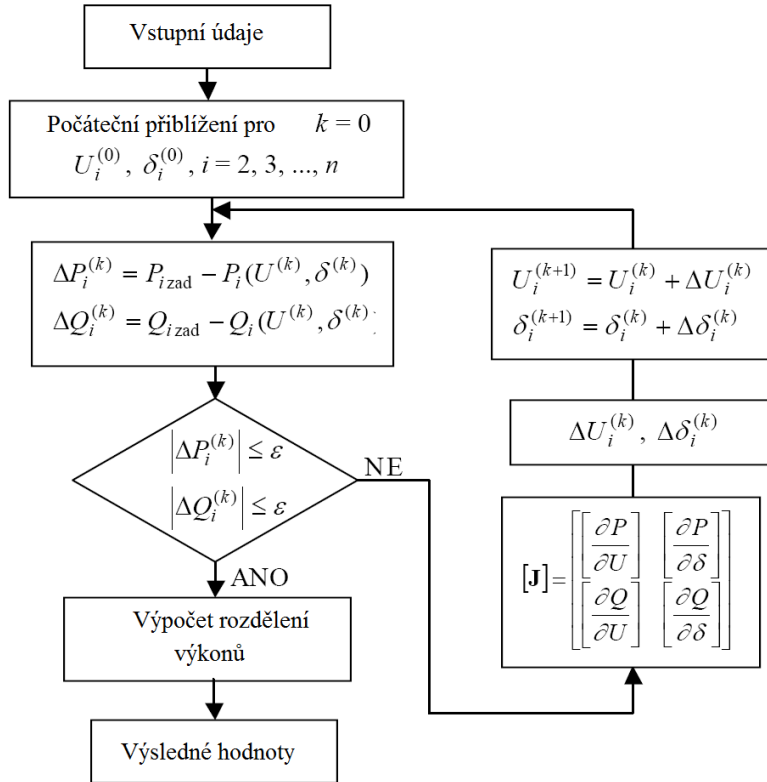
$$\text{Diagonální prvky: } \left[\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} \right] = -2.U_i . Y_{ii} . \sin(\alpha_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j . Y_{ij} . \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.45)$$

$$\text{Mimodiagonální prvky: } \left[\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} \right] = U_i . Y_{ij} . \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.46)$$

$$\left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right]:$$

$$\text{Diagonální prvky: } \left[\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} \right] = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i . U_j . Y_{ij} . \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.47)$$

$$\text{Mimodiagonální prvky: } \left[\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \right] = -U_i . U_j . Y_{ij} . \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.48)$$



Obr. 4-7 Algoritmus řešení výpočtu Newtonovou iterační metodou [6]

4.7.1 Příklad výpočtu ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Pro příklad výpočtu Newtonovou iterační metodou použijeme stejné zadání jako v kapitole 3.6.1. Postup výpočtu byl zpracován dle literatury [6].

Na základě vztahu (4.34) a (4.35) můžeme napsat:

$$P_i - j \cdot Q_i = U_i \cdot (\cos \delta_i - j \sin \delta_i) \cdot \sum_{j=1}^n (g_{ij} - j b_{ij}) \cdot (\cos \delta_j - j \sin \delta_j) \cdot U_j \quad (4.49)$$

Rovnici (4.49) můžeme rozdělit na reálnou a imaginární část:

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot [g_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (4.50)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot [g_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)]$$

Pro uzel č. 2 pak můžeme rovnice (4.50) přepsat na tvar:

$$P_2 = U_2^2 \cdot g_{22} + U_1 \cdot U_2 \cdot [g_{21} \cdot \cos \delta_2 - b_{21} \cdot \sin \delta_2] \quad (4.51)$$

$$Q_2 = U_2^2 \cdot b_{22} + U_1 \cdot U_2 \cdot [g_{21} \cdot \sin \delta_2 + b_{21} \cdot \cos \delta_2] \quad (4.52)$$

Zápis Newtonovy metody pro řešení této soustavy pak bude:

$$\begin{bmatrix} [\Delta P_2] \\ [\Delta Q_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P_2}{\partial U_2} \right] & \left[\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \right] \\ \left[\frac{\partial Q_2}{\partial U_2} \right] & \left[\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U_2] \\ [\Delta \delta_2] \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Diference výkonů pak jsou:

$$\Delta P_2 = P_{2z} - \left[U_2^2 \cdot g_{22} + U_1 \cdot U_2 \cdot (g_{21} \cdot \cos \delta_2 - b_{21} \cdot \sin \delta_2) \right] \quad (4.54)$$

$$\Delta Q_2 = Q_{2z} - \left[U_2^2 \cdot b_{22} + U_1 \cdot U_2 \cdot (g_{21} \cdot \sin \delta_2 + b_{21} \cdot \cos \delta_2) \right] \quad (4.55)$$

Dosazením zadaných hodnot výkonu, napětí a vypočtených hodnot admittance do rovnic (4.54) a (4.55) dostaneme:

$$\Delta P_2 = -50 - \left[U_2^2 \cdot 0,1 + 120 \cdot U_2 \cdot (-0,1 \cdot \cos \delta_2 + 0,04 \cdot \sin \delta_2) \right] \quad (4.56)$$

$$\Delta Q_2 = -40 - \left[U_2^2 \cdot 0,3 + 120 \cdot U_2 \cdot (-0,1 \cdot \sin \delta_2 - 0,3 \cdot \cos \delta_2) \right] \quad (4.57)$$

Dosadíme počáteční přibližní napětí v uzlu č. 2 do rovnic (4.56) a (4.57), vypočteme tak diference výkonů na 0-té iteraci. Zvolíme například počáteční přibližní $U_2^{(0)} = 115 \text{ kV}$, $\delta_2^{(0)} = 0^\circ$.

$$\Delta P_2 = -50 - \left[115^2 \cdot 0,1 + 120 \cdot 115 \cdot (-0,1 \cdot \cos 0^\circ + 0,04 \cdot \sin 0^\circ) \right] = 7,5 \text{ MW} > \varepsilon \quad (4.58)$$

$$\Delta Q_2 = -40 - \left[115^2 \cdot 0,3 + 120 \cdot 115 \cdot (-0,1 \cdot \sin 0^\circ - 0,3 \cdot \cos 0^\circ) \right] = 132,5 \text{ MVar} > \varepsilon \quad (4.59)$$

Dále určíme prvky Jakobího matice pro 0-tou iteraci:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} &= 2 \cdot U_2 \cdot g_{22} + U_1 \cdot (g_{21} \cdot \cos \delta_2 - b_{21} \cdot \sin \delta_2) = \\ &= 2 \cdot 115 \cdot 0,1 + 120 \cdot (-0,1 \cdot \cos 0 + 0,3 \cdot \sin 0) = 11 \end{aligned} \quad (4.60)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = -U_1 \cdot U_2 \cdot (g_{21} \cdot \sin \delta_2 + b_{21} \cdot \cos \delta_2) = -120 \cdot 115 \cdot (-0,1 \cdot \sin 0 - 0,3 \cdot \cos 0) = 4140 \quad (4.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} &= 2 \cdot U_2 \cdot b_{22} + U_1 \cdot (g_{21} \cdot \sin \delta_2 + b_{21} \cdot \cos \delta_2) = \\ &= 2 \cdot 115 \cdot 0,3 + 120 \cdot (-0,1 \cdot \sin 0 - 0,3 \cdot \cos 0) = 33 \end{aligned} \quad (4.62)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = U_1 \cdot U_2 \cdot (g_{21} \cdot \cos \delta_2 - b_{21} \cdot \sin \delta_2) = 120 \cdot 115 \cdot (-0,1 \cdot \cos 0 + 0,3 \cdot \sin 0) = -1380 \quad (4.63)$$

Z vypočtených hodnot můžeme sestavit matici dosazením hodnot do (4.53):

$$\begin{bmatrix} 7,5 \\ 132,5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11 & 4140 \\ 33 & -1380 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2^{(0)} \\ \Delta \delta^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

Roznásobením matice dostaneme soustavu lineárních rovnic:

$$11 \cdot \Delta U_2^{(0)} + 4140 \cdot \Delta \delta^{(0)} = 7,5 \quad (4.65)$$

$$33 \cdot \Delta U_2^{(0)} - 1380 \cdot \Delta \delta^{(0)} = 132,5 \quad (4.66)$$

Řešením této soustavy rovnic jsou kořeny:

$$\Delta U_2^{(0)} = 3,6818 \text{ kV}$$

$$\Delta \delta^{(0)} = -0,4567^\circ$$

Dále můžeme určit nové přibližné hodnoty napětí v uzlu č. 2:

$$U_2^{(1)} = U_2^{(0)} + \Delta U_2^{(0)} = 115 + 3,6818 = 118,6818 \text{ kV} \quad (4.67)$$

$$\delta^{(1)} = \delta^{(0)} + \Delta \delta^{(0)} = 0 - 0,4567 = -0,4567^\circ \quad (4.68)$$

Z nových přibližných hodnot provedeme analogicky výpočet pro 1. iteraci a výpočty opakujeme, dokud difference výkonů nejsou menší, než je požadovaná přesnost. Vypočtené hodnoty jsou znázorněny v *Tab. 4-3*.

Tab. 4-3 Výsledné hodnoty napětí jednotlivých iterací Newtonovou metodou

p	U_2 [kV]	δ_2 [°]	ΔP_2 [MW]	ΔQ_2 [MVar]
0	115	0	7,5	132,5
1	118,6818	-0,4567	-0,34466	-4,5545
2	118,5627	-0,4430	-0,00044	-0,0047

Zadaná přesnost výpočtu ε byla dosažena při druhé iteraci, napětí v uzlu č. 2 se tedy rovná:

$$\bar{U}_2 = (118,56257 \angle -0,443^\circ) \text{ kV} = (118,559 - j0,91667) \text{ kV}.$$

Výsledná hodnota napětí je stejná jako hodnota napětí vypočtená Gauss-Seidlovou iterační metodou.

5 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Distribuční soustava měla dříve za úkol pouze distribuovat elektrickou energii z předávacích uzlů 400/110 kV či 220/110 kV, tedy z uzlů přenosové soustavy s distribuční sítí do míst konečných odběrů. V poslední době má však navíc distribuční soustava za úkol vyvedení výkonu z menších výroben až do míst konečné spotřeby, tím klesá odběr energie z přenosové soustavy, a při velkém odlehčení sítě mají v některých oblastech sítě 110 kV vůči přenosové soustavě charakter výroby. Provoz malých elektráren v oblastech, které se vyznačují nízkou spotřebou elektrické energie, může mít za následek „vytlačování“ přebytečné energie na vyšší napěťovou úroveň. To platí i pro přebytečný jalový výkon, který se v síti může nahromadit. Může za to především trend poslední doby, čímž je výstavba kabelových vedení na úrovních 22 kV i 110 kV. Jak již bylo zmíněno v kapitole (3.8), kabelová vedení mají oproti venkovním vedením mnohem větší nabíjecí výkony a tak při odlehčení sítě bývají hodnoty jalových výkonů nad rámec dané sítě. Nezanedbatelný vliv má také jalový výkon běžných domácích spotřebičů, které ve srovnání s dřívějšími spotřebiči mají jiný charakter odběru jalové energie.

V současné době na území České republiky provozují distribuční soustavy tři významné společnosti, ČEZ Distribuce, a.s., PREdistribuce, a.s. a E.ON Distribuce, a.s. Rozpoložení jejich působnosti je znázorněno na *Obr. 5-1*. Provoz přenosové soustavy v České republice zajišťuje společnost ČEPS, a.s.



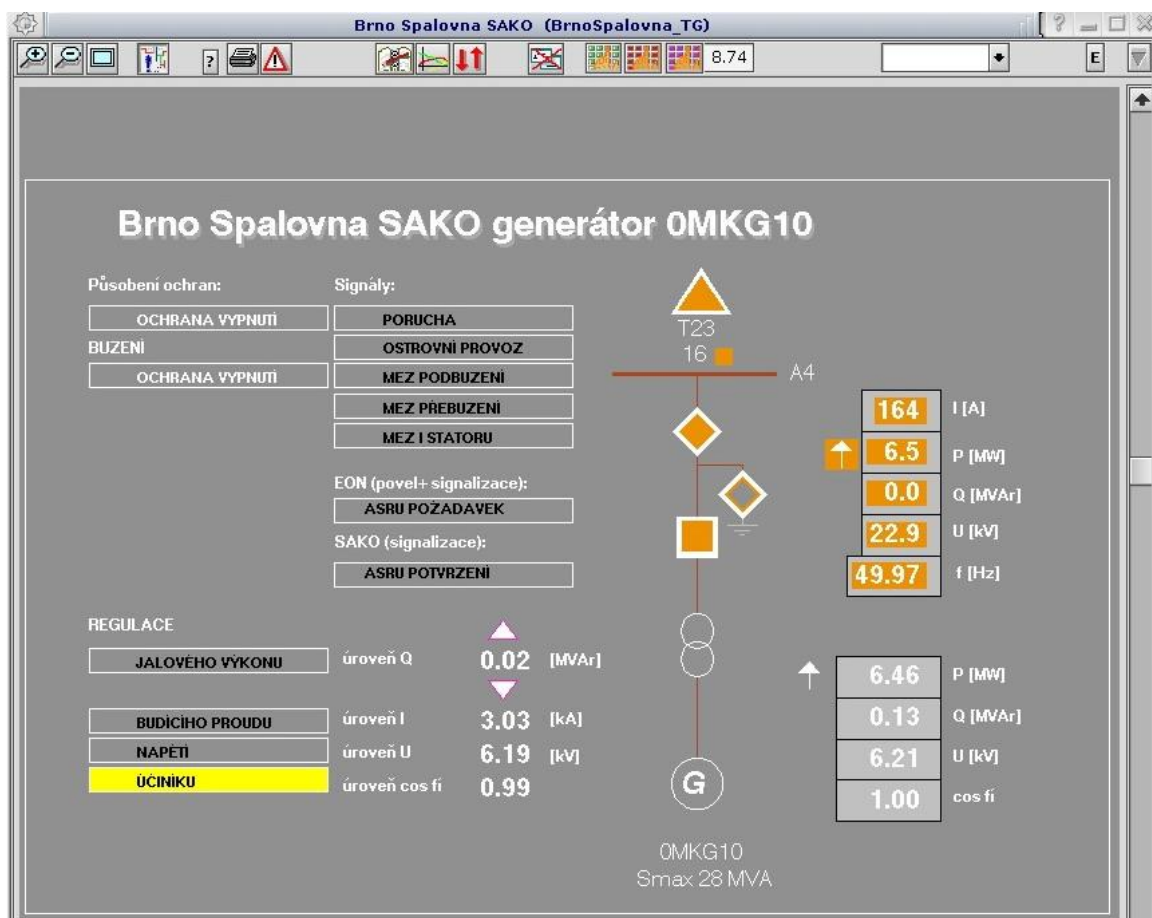
Obr. 5-1 Působení jednotlivých distribučních společností na území ČR

Společnost E.ON Distribuce, a.s. provozuje linky vedení velmi vysokého napětí 110 kV, dále pak linky vysokého napětí 22 kV a linky nízkého napětí 0,4 kV. Energie do těchto sítí je dodávána především z přenosové soustavy, z menší části pak z výroben 110 kV a 22 kV společnosti E.ON či soukromých dodavatelů.

Pro výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV bude využit program PAS DAISY off-line společnosti DAISY s.r.o. Tento program je využíván jednak k výpočtům ustáleného chodu sítě, k simulacím přechodových dějů v ní, ale i k simulaci rozvoje sítě. Pro výpočet ustáleného chodu sítě využívá Newtonovu iterační metodu, která byla popsána v kapitole (4.7).

Pro síť 22 kV využívá společnost E.ON propracovanější systém RIS (Řídicí a informační systém). Tento systém zajišťuje stejně jako PAS DAISY výpočet ustáleného chodu sítě, ale umožňuje navíc sběr a zpracování údajů z naměřených hodnot a uchovává je v paměti. Tímto způsobem bude možné analyzovat přetoky činného i jalového výkonu na jednotlivých linkách vedení vysokého napětí či transformátorech. Tímto způsobem lze vysledovat slabá místa v síti, která mají za následek ovlivňování hladiny napětí.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, přetoky jalového výkonu při odlehčení sítě do úrovně vyššího napětí mohou způsobit zvýšení jeho nominální hodnoty, což může být nebezpečné. V současné době se využívají tři způsoby pro snížení přebytků kapacitního jalového výkonu. Základním způsobem je připojení indukčních tlumivek na terciální vinutí transformátorů 400/110 kV, 220/110 kV i 110/22 kV ve chvílích, kdy je přebytek kapacitního jalového výkonu. Induktivní tlumivky pak tento výkon vykompenzují. Dalším možným způsobem je změna buzení synchronních generátorů v elektrárnách, kdy v podbuzeném stavu generátory spotřebovávají jalovou energii. V elektrárně Brno Spalovna SAKO byl nově instalován generátor, který umožňuje automatický systém regulace napětí (ASRU). Systém však zatím není plně využíván. Jeho způsob regulace v systému RIS je znázorněn na Obr. 5-2.

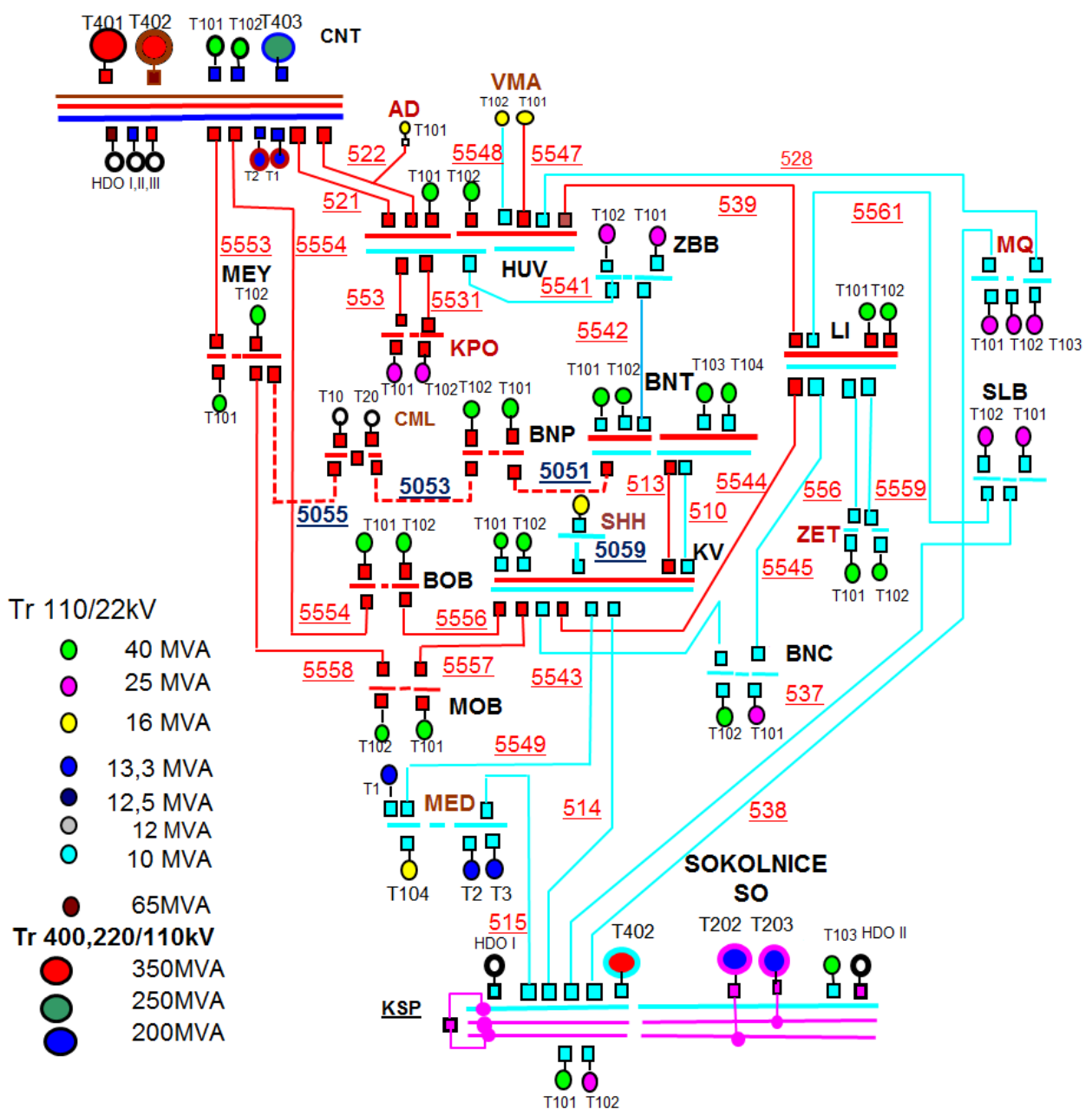


Obr. 5-2 Způsob regulace jalového výkonu systémem ASRU

Posledním možným způsobem regulace jalové energie je dálkové ovládání kompenzačních prostředků fotovoltaických elektráren. Všechny fotovoltaické elektrárny v síti VN a VVN společnosti E.ON s výkonem nad 100 kVA musí mít regulaci činného a jalového výkonu. Regulace činného výkonu je možná ve 4 stupních (100% - 60% - 30% - 0%), jalový výkon je možné regulovat dle nastavení účinníku, který je možné řídit v 5 stupních (0,95 ind.; 0,97 ind.; 1,00; 0,97 kap.; 0,95 kap.). Tímto způsobem je možné, aby fotovoltaické elektrárny pracovaly v podbuzeném stavu a spotřebovávaly jalovou energii [10].

5.1 Řešená soustava

Pro bakalářskou práci byla zadavatelem vybrána část sítě 110 kV E.ON, jejíž schéma je zobrazeno na Obr. 5-3.



Obr. 5-3 Schéma řešené sítě 110 kV

Jedná se o oblast mezi rozvodnami Čebín (CNT) a Sokolnice (SO), což jsou hlavní rozvodny pro napájení oblasti města Brna. Do rozvodny CNT je výkon přenášen pomocí 3 transformátorů 400/110 kV a to T401, T402 o výkonu 350 MVA a T403 o výkonu 200 MVA. Pro napájení oblasti Brna se střídavě používají pouze transformátory T401 a T402. Rozvodna SO je napájena taktéž třemi transformátory, jedním transformátorem 400/110 kV označeným T402 o výkonu 350 MVA. Zbývající dva transformátory 220/110 kV nesou označení T202 a T203 a jejich jmenovitý výkon je 200 MVA. Pro napájení oblasti Brna je v současné době využíván pouze transformátor T402. V rozvodně SO se navíc nachází transformátor T401, který slouží pro transformaci mezi napětovými hladinami 400 kV a 220 kV. V dané oblasti se nachází 20 podružných rozvodů 110/22 kV. Rozdělení napájení jednotlivých sběrů je zřejmé dle barevného rozdělení ve schématu na *Obr. 5-3*, kde červenou barvou jsou značeny sběry napájené z rozvodny CNT a tyrkysově sběry napájené z rozvodny SO.

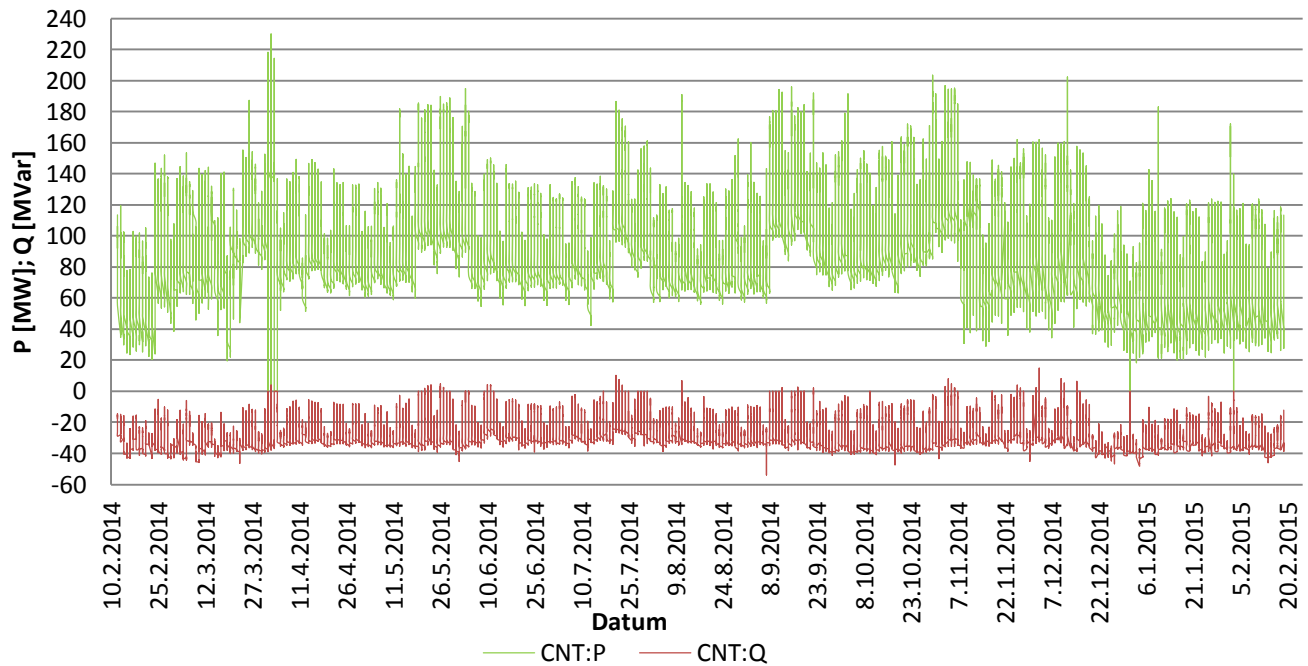
Ze schématu je taktéž možné určit zapojení sítě, velikost a počet distribučních transformátorů 110/22 kV v jednotlivých rozvodnách a také typ vedení mezi jednotlivými rozvodnami. Většina vedení je provozována jako venkovní, v Brně lze nalézt i 4 vedení kabelová.

Do sítě 110 kV také pracuje několik výroben, jsou to Brno - Maloměřice výtopna (VMA), Brno - elektrárna Červený Mlýn (CML) a Brno - Teplárna (BNT). Výrobna Brno spalovna SAKO dodává výkon do sítě 22 kV.

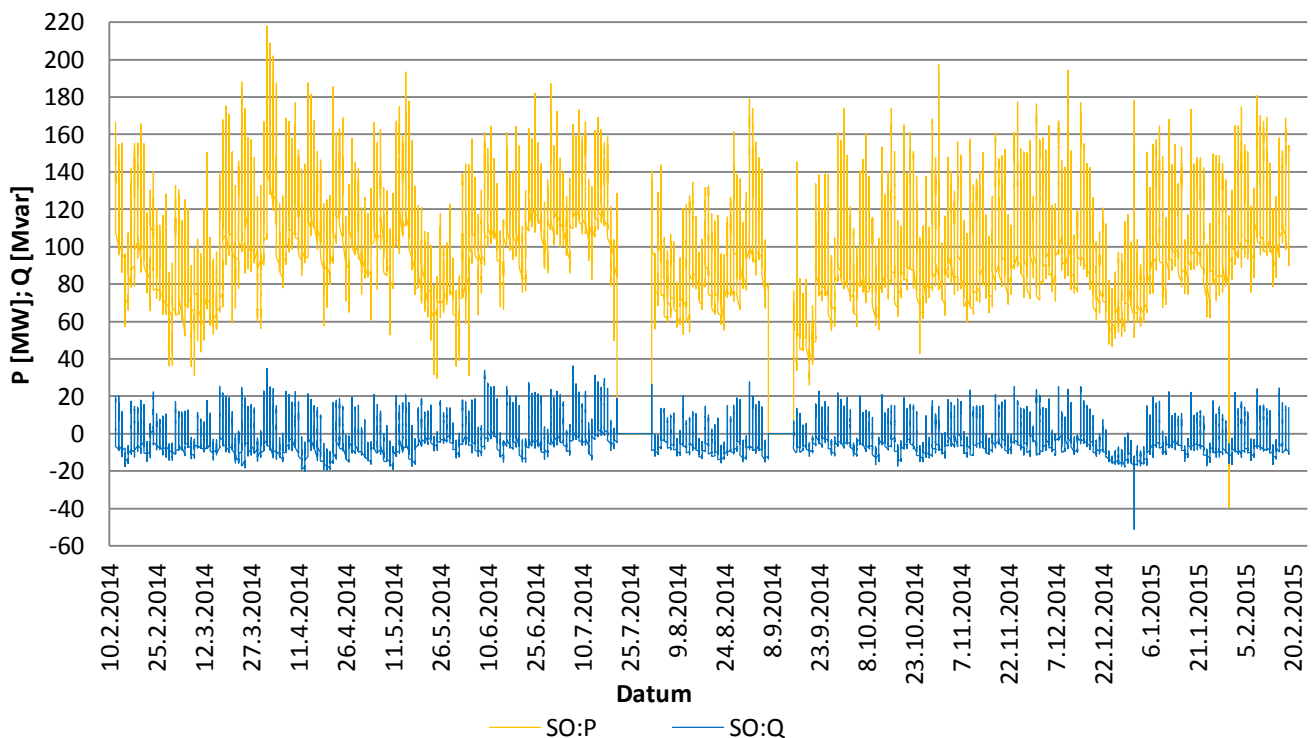
6 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ

Na základě ročního diagramu přenášeného činného a jalového výkonu na transformátorech 400/110 kV v rozvodnách CNT a SO (Obr. 6-1 a 6-2) byly zadavatelem stanoveny 2 časové řezy, kterými se bude zabývat další část práce. Jedná se o tyto specifické časové řezy:

- 25. 12. 2014 04:00 hod – zimní minimum odebíraného výkonu
- 13. 2. 2015 11:00 hod – zimní maximum odebíraného výkonu



Obr. 6-1 Roční odběrový diagram P a Q transformátoru 400/110 kV v rozvodně CNT

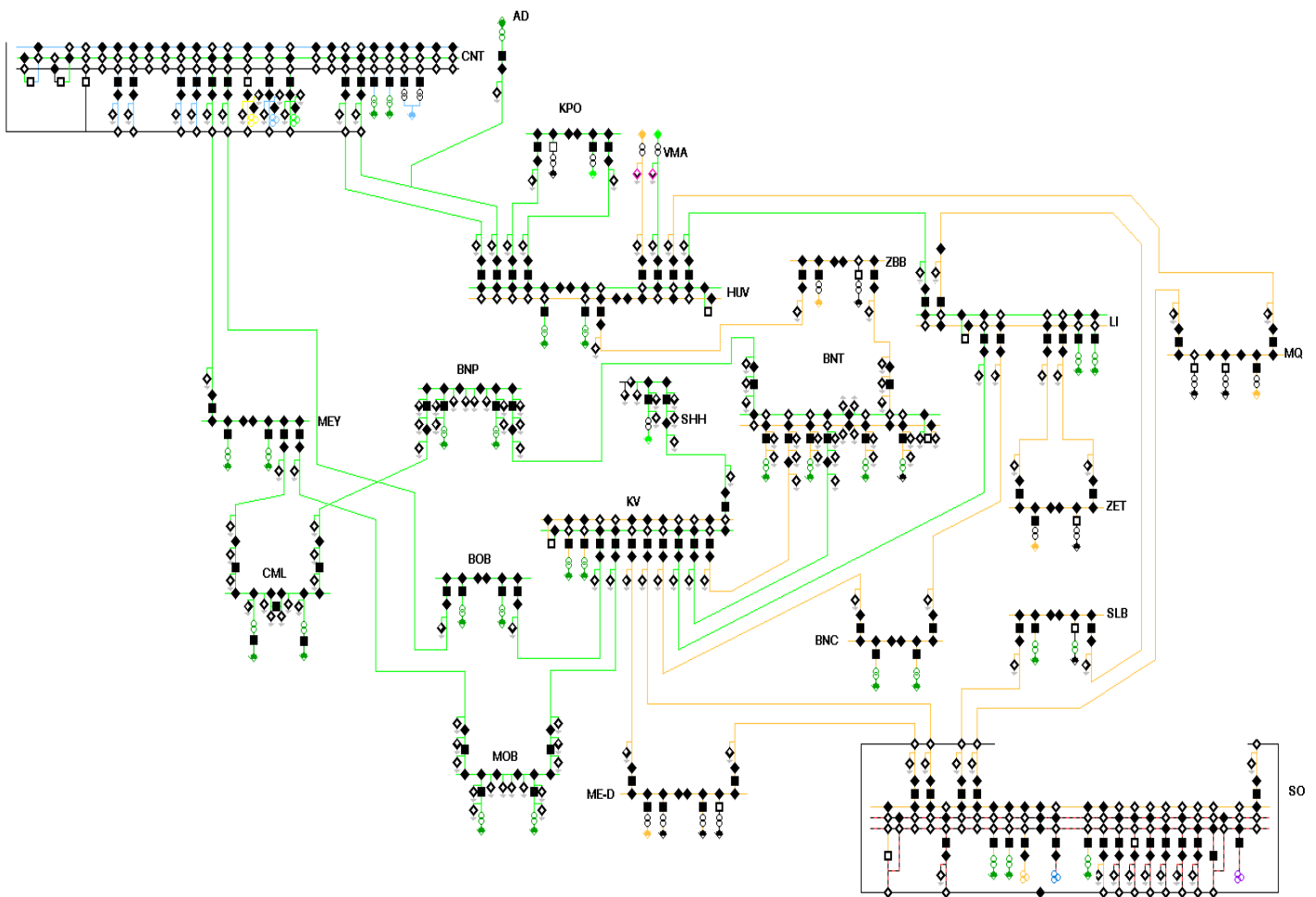


Obr. 6-2 Roční odběrový diagram P a Q transformátoru 400/110 kV v rozvodně SO

Pro jednotlivé určené řezy bude proveden výpočet ustáleného chodu sítě v následujících kapitolách. Ve výpočtu se zaměříme na napěťové poměry v rozvodných distribuční sítě 110 kV, zatížení transformátorů 400/110 kV a 110/22 kV a zatížení vedení 110 kV.

6.1 Zimní maximum

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, časový řez zimního maxima byl stanoven na 13. 2. 2015 v 11:00 hod. V tento čas byl odebírána poměrně vysoký činný výkon, při čemž by nemělo docházet k nevyžádaným přetokům jalového výkonu do přenosové soustavy. Zapojení sítě v daném časovém řezu je možné stanovit v dispečerském systému RIS. Schéma zapojení sítě 110 kV je zřejmé z *Obr 6-3*.



Obr. 6-3 Zapojení sítě 110 kV v časovém řezu 13. 2. 2015 11:00 hod

Barevné značení uzlů, transformátorů a vedení značených v tabulkách v následujících kapitolách odpovídá skutečnému zapojení v daný čas dle schématu na *Obr. 6-3*. Výpočet ustáleného chodu sítě byl proveden ve výpočetním programu PAS DAISY off-line.

6.1.1 Napěťové poměry v rozvodných sítě 110 kV

Vypočtené hodnoty velikosti a úhlu natočení napětí v jednotlivých rozvodných sítě 110 kV jsou zapsány v tabulce *Tab. 6-1*. Jestliže je v rozvodně použito více sběrů, jsou v dalším postupu značeny písmeny A, B dle značení v dispečerském systému.

Tab. 6-1 Napěťové poměry v rozvodnách sítě 110 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod

Rozvodna	U	δ
Označení	[kV]	[°]
AD	119,19	-2,57
BNC	117,52	-5,24
BNP	119,62	-2,95
BNT - A	119,58	-2,97
BNT - B	117,32	-5,46
BOB	119,27	-3,16
CML	119,67	-2,91
CNT	119,36	-2,08
HUV - A	119,11	-2,88
HUV - B	117,43	-5,35
KPO	119,10	-2,89
KV - A	119,38	-3,05
KV - B	117,54	-5,23
LI - A	119,17	-3,07
LI - B	117,53	-5,22
MED	117,86	-4,95
MEY	119,61	-2,92
MOB	119,40	-3,07
MQ	117,71	-5,10
SHH	119,38	-3,06
SLB	117,79	-4,97
SO	118,34	-4,53
VMA - A	119,10	-2,88
VMA - B	117,43	-5,35
ZBB	117,36	-5,42
ZET	117,52	-5,23

Z vypočtených hodnot napěťových poměrů v uzlech jednotlivých rozvodů 110 kV je zřejmé, že napětí v uzlech nepřesahuje dovolenou mez, která je dána rozmezím 110 kV \pm 10% (99 kV – 121 kV). Napětí je udržováno blíže horní meze rozsahu, což je výhodnější z hlediska ztrát na vedení.

6.1.2 Zatížení transformátorů

V tabulce Tab. 6-2 jsou zaznamenány výsledné hodnoty vypočtených zatížení transformátorů 400/110 kV v uzlových rozvodnách CNT a SO. Hodnoty zdánlivého výkonu S_{1t} byly vypočteny dle vztahu (3.1).

Tab. 6-2 Zatížení transformátorů 400/110 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod

Rozvodna	Transformátor	S_{nt}	P_{2t}	Q_{2t}	S_{2t}	s_{zt}
Označení	Označení	[MVA]	[MW]	[MVar]	[MVA]	[%]
CNT	T401	350	106,54	-28,17	110,20	31,49
SO	T402	350	117,32	15,81	118,38	33,82

Z vypočítaných procentních hodnot zatížení transformátoru k jeho jmenovitému výkonu je zřejmé, že oba transformátory mají dostatečnou rezervu pro případné zvýšení zátěže či další rozvoj sítě. Z výpočtu je evidentní, že k přetoku jalové energie dochází pouze na transformátoru T401 z rozvodném uzlu CNT.

V tabulce *Tab. 6-3* jsou zaznamenány změřené hodnoty distribučních transformátorů 110/22 kV, které byly zadány jakožto zatížení sítě pro výpočet ustáleného chodu. Tyto hodnoty pochází z měřených hodnot dispečerského systému RIS. Pro větší přehlednost jsou v tabulce uvedeny pouze transformátory, které byly v daném časovém řezu v provozu.

Tab. 6-3 Zatížení transformátorů 110/22 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod

Rozvodna	Transformátor	S_{nt}	P_{2t}	Q_{2t}	S_{2t}	S_{zt}
Označení	Označení	[MVA]	[MW]	[MVar]	[MVA]	[%]
AD	T101	16	1,04	0,16	1,05	6,58
BNC	T101	25	10,82	-0,17	10,82	43,29
	T102	40	-5,26	0,75	5,31	13,28
BNP	T101	40	14,16	0,72	14,18	35,45
	T102	40	13,07	1,97	13,22	33,04
BNT	T101	40	15,88	-0,24	15,88	39,70
	T102	40	15,07	-0,13	15,07	37,68
	T104	40	14,03	-0,38	14,04	35,09
BOB	T101	40	10,41	-1,36	10,50	26,25
	T102	40	22,13	-1,36	22,17	55,43
CML	T10	100	-41,33	-9,58	42,43	42,43
	T20	40	-14,44	-4,41	15,10	37,75
HUV	T101	40	19,72	-0,49	19,73	49,32
	T102	40	12,07	0,36	12,08	30,19
KPO	T102	25	2,70	0,24	2,71	10,84
KV	T101	40	23,04	3,53	23,31	58,27
	T102	40	14,21	1,60	14,30	35,75
LI	T101	40	6,77	-1,38	6,91	17,27
	T102	40	12,29	0,18	12,29	30,73
MED	T1	13,3	1,76	0,68	1,89	14,19
	T3	13,3	3,01	-0,07	3,01	22,64
	T104	16	3,17	-0,28	3,18	19,89
MEY	T101	40	23,90	-3,45	24,15	60,37
	T102	40	12,20	-0,25	12,20	30,51
MOB	T101	40	0,89	-0,17	0,91	2,27
	T102	40	8,15	1,02	8,21	20,53
MQ	T102	25	2,58	0,60	2,65	10,60
SHH	T1	16	1,69	1,44	2,22	13,88
SLB	T101	25	7,75	2,79	8,24	32,95
SO	T101	40	-6,41	1,31	6,54	16,36
	T102	25	5,18	1,19	5,31	21,26
	T103	40	7,76	3,40	8,47	21,18
VMA	T101	16	-0,04	0,24	0,24	1,52
	T102	16	-0,08	0,10	0,13	0,80
ZBB	T102	25	0,85	0,16	0,86	3,46
ZET	T101	40	6,41	0,81	6,46	16,15

Z vypočtených procentních hodnot zatížení je zřejmé, že žádný z transformátorů není přetížen.

6.1.3 Zatížení vedení

Výsledné hodnoty výpočtu zatížení vedení jsou uvedeny v tabulce Tab. 6-4. Procentuální hodnoty zatížení jsou vypočteny z podílu přenášeného proudu po vedení k přenosové schopnosti vedení, dané nejslabším prvkem v dané části vedení.

Tab. 6-4 Zatížení vedení 110 kV – 13. 2. 2015 11:00 hod

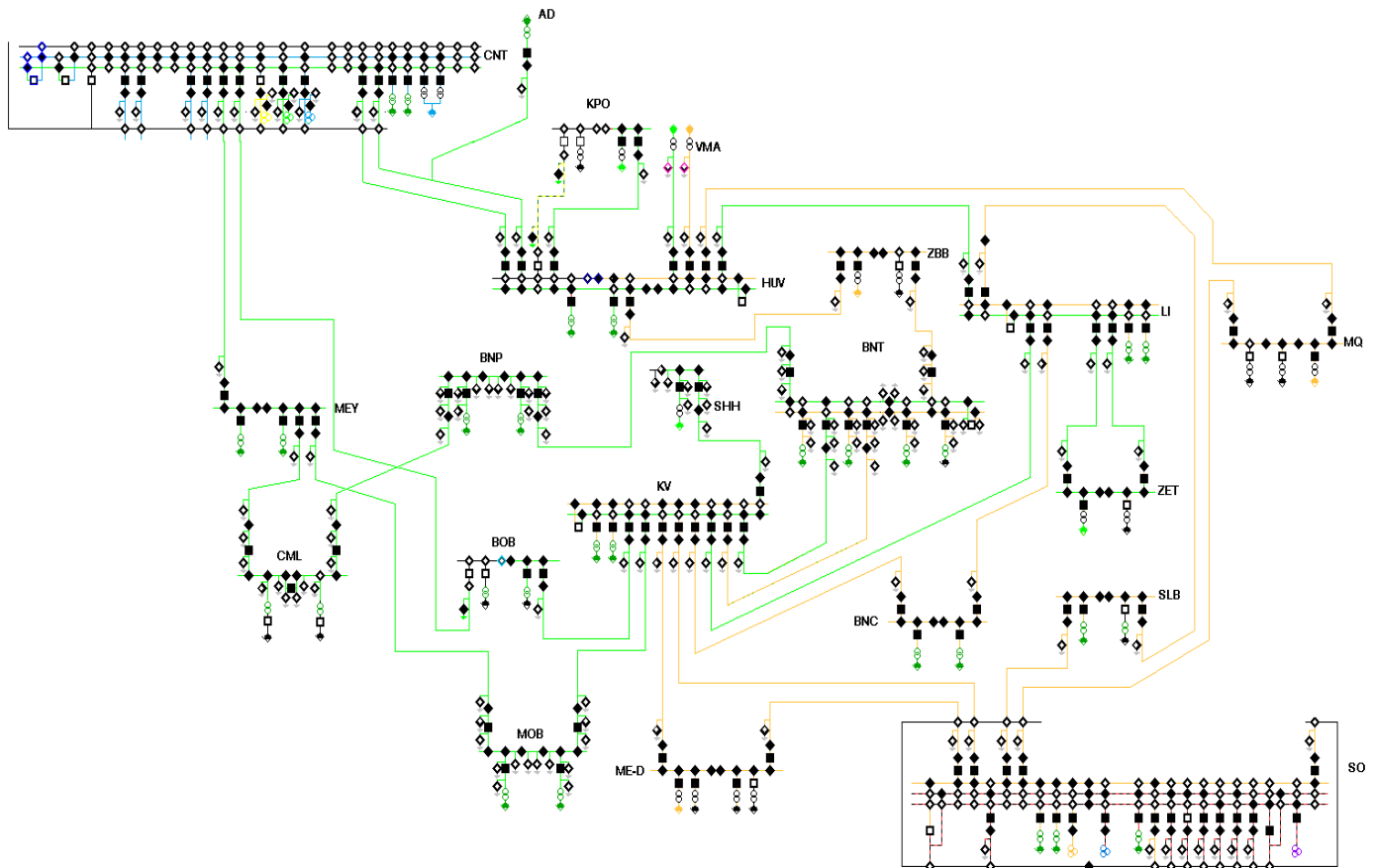
Vedení	Směr vedení		I _{nv}	Začátek vedení					Konec vedení				
				U ₁	δ ₁	P _{1v}	Q _{1v}	I _{1v}	U ₂	δ ₂	P _{2v}	Q _{2v}	s _{zv}
Linka	Označení uzlů		[A]	[kV]	[°]	[MW]	[MVar]	[A]	[kV]	[°]	[MW]	[MVar]	[%]
510	KV	BNT	455	117,54	-5,23	-35,40	-2,16	174,2	117,32	-5,46	35,34	2,17	38,3
513	BNT	KV	455	119,58	-2,97	-16,75	-8,38	90,4	119,38	-3,05	16,74	8,51	19,9
514	SO	KV	480	118,34	-4,53	-50,13	-7,38	247,2	117,32	-5,46	49,88	7,08	51,5
515	SO	MED	455	118,34	-4,53	-33,48	-4,63	164,9	117,86	-4,95	33,38	4,69	36,2
521	CNT	HUV	530	119,36	-2,08	-25,44	4,06	124,6	119,11	-2,88	25,33	-3,63	23,5
522	CNT	522A	530	119,36	-2,08	-26,20	4,14	128,3	119,21	-2,55	26,13	-3,91	24,2
	522A	AD	120	119,21	-2,55	-1,08	0,12	5,3	119,19	-2,57	1,08	0,26	4,4
	522A	HUV	530	119,21	-2,55	-25,06	3,79	122,7	119,11	-2,88	25,01	-3,61	23,2
528	MQ	HUV	455	117,71	-5,10	-10,86	-1,12	53,5	117,43	-5,35	10,84	1,64	11,8
537	SO	SLB	530	118,34	-4,53	-17,64	-3,00	87,3	117,79	-4,97	17,58	3,51	16,5
538	SO	MQ	530	118,34	-4,53	-13,62	-1,25	66,7	117,71	-5,10	13,57	2,17	12,6
539	HUV	LI	455	119,11	-2,88	-15,74	9,44	89,0	119,17	-3,07	15,71	-9,26	19,6
5051	BNP	BNT	960	119,62	-2,95	-16,75	-6,13	86,1	119,58	-2,97	16,75	8,38	9,0
5053	CML	BNP	720	119,67	-2,91	-44,00	-6,52	214,6	119,62	-2,95	43,99	8,82	29,8
5055	CML	MEY	720	119,67	-2,91	-11,77	-7,47	67,3	119,61	-2,92	11,77	11,11	9,3
5059	KV	SHH	960	119,11	-2,88	-1,69	0,54	8,6	119,38	-3,06	1,69	1,44	0,9
5531	HUV	KPO	455	119,11	-2,88	-1,37	-0,18	6,7	119,10	-2,89	1,37	0,28	1,5
5532	HUV	KPO	455	119,11	-2,88	-1,37	-0,18	6,7	119,10	-2,89	1,37	0,28	1,5
5541	HUV	ZBB	530	117,43	-5,35	-10,90	-1,55	54,1	117,36	-5,42	10,89	1,71	10,2
5542	ZBB	BNT	530	117,36	-5,42	-10,01	-1,26	49,6	117,32	-5,46	10,01	1,35	9,4
5543	KV	BNC	480	117,54	-5,23	-2,31	-0,79	12,0	117,53	-5,22	2,31	0,99	2,5
5544	KV	LI	530	119,38	-3,05	-3,47	-9,03	46,8	119,17	-3,07	3,46	9,36	8,8
5545	LI	BNC	680	117,53	-5,22	-3,25	0,56	16,2	117,52	-5,24	3,25	-0,41	2,4
5547	VMA	HUV	180	119,10	-2,88	-0,02	0,33	1,6	119,11	-2,88	0,02	-0,23	0,9
5548	VMA	HUV	180	117,43	-5,35	-0,06	0,19	1,0	117,43	-5,35	0,06	-0,09	0,5
5549	MED	KV	455	117,86	-4,95	-25,31	-3,61	125,2	117,32	-5,46	25,26	3,75	27,5
5553	CNT	MEY	820	119,36	-2,08	-31,62	10,32	160,9	119,61	-2,92	31,54	-9,93	19,6
5554	CNT	BOB	680	119,36	-2,08	-23,28	4,15	114,4	119,27	-3,16	23,19	-3,05	16,8
5556	KV	BOB	680	119,38	-3,05	-9,57	-2,34	47,6	119,27	-3,16	9,56	2,70	7,0
5557	KV	MOB	680	119,38	-3,05	-2,02	2,32	14,9	119,40	-3,07	2,01	-2,12	2,2
5558	MEY	MOB	680	119,61	-2,92	-7,04	-2,23	35,6	119,40	-3,07	7,03	2,97	5,2
5559	LI	ZET	360	117,53	-5,22	-3,28	-0,93	16,7	117,52	-5,23	3,27	0,99	4,7
5560	LI	ZET	360	117,53	-5,22	-3,28	-0,93	16,7	117,52	-5,23	3,27	0,99	4,7
5561	SLB	LI	455	117,79	-4,97	-9,83	-0,71	48,3	117,53	-5,22	9,82	1,31	10,6

Jelikož je na vedení V522 odbočný bod ke stanici AD, byl pro výpočet vytvořen uzel 522A, který toto vedení rozděljuje na 3 části (CNT – 522A, 522A – AD, 522A – HUV).

Z vypočtených hodnot je zřejmé, že žádné z distribučních vedení 110 kV není přetíženo, ba naopak mají velkou rezervu pro případ, že by nastal poruchový stav či zvýšení odběrového zatížení.

6.2 Zimní minimum

Z ročního odběrového diagramu P a Q transformátorů 400/110 kV v uzlech CNT a SO byl stanoven časový řez, kdy byl odebíráán nejnižší činný výkon a zároveň docházelo k největšímu přetoku jalového výkonu do přenosové soustavy. Jedná se o datum 25. 12. 2014 v čase 4:00 hod. Pro tento časový řez bude proveden výpočet chodu sítě a v další kapitole bude navázáno na analýzu přetoku jalového výkonu. Zapojení sítě v daném časovém řezu je možné stanovit v dispečerském systému RIS. Schéma zapojení sítě 110 kV je zřejmé z *Obr 6-4*.



Obr. 6-4 Zapojení sítě 110 kV v časovém řezu 25. 12. 2014 04:00 hod

Stejně jako v předchozí kapitole odpovídá barevné značení uzlů, transformátorů i vedení značených v tabulkách v následujících kapitolách skutečnému zapojení v daný čas dle schématu na *Obr. 6-4*. Výpočet ustáleného chodu sítě byl opět proveden ve výpočetním programu PAS DAISY off-line.

6.2.1 Napěťové poměry v rozvodnách sítě 110 kV

Vypočtené hodnoty velikosti a úhlu natočení napětí v jednotlivých rozvodnách sítě 110 kV jsou zapsány v tabulce *Tab. 6-1*. Jestliže je v rozvodně použito více sběrů, jsou v dalším postupu značeny písmeny A, B dle značení v dispečerském systému.

Tab. 6-5 Napěťové poměry v rozvodnách sítě 110 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod

Rozvodna	U	δ
Označení	[kV]	[°]
AD	120,07	-0,88
BNC	119,91	-3,02
BNP	120,66	-0,80
BNT - A	120,64	-0,81
BNT - B	119,84	-3,15
BOB	120,45	-1,02
CML	120,68	-0,77
CNT	119,92	-0,71
HUV - A	120,17	-1,00
HUV - B	119,81	-3,15
KPO	120,17	-1,00
KV - A	120,50	-0,93
KV - B	119,90	-3,04
LI - A	120,34	-1,02
LI - B	119,90	-3,02
MED	119,95	-2,93
MEY	120,68	-0,77
MOB	120,52	-0,93
MQ	119,74	-3,13
SHH	120,50	-0,93
SLB	119,90	-2,99
SO	120,01	-2,78
VMA - A	120,17	-1,00
VMA - B	119,81	-3,15
ZBB	119,83	-3,15
ZET	119,90	-3,02

Z vypočtených hodnot napěťových poměrů v uzlech jednotlivých rozvodů 110 kV je zřejmé, že napětí v uzlech nepřesahuje dovolenou mez, která je dána rozmezím 110 kV \pm 10% (99 kV – 121 kV). Napětí je udržováno blíže horní meze rozsahu, což je výhodnější z hlediska ztrát na vedení.

6.2.2 Zatížení transformátorů

V tabulce Tab. 6-2 jsou zaznamenány výsledné hodnoty vypočtených zatížení transformátorů 400/110 kV v uzlových rozvodnách CNT a SO. Hodnoty zdánlivého výkonu S_{I_t} byly vypočteny dle vztahu (3.1).

Tab. 6-6 Zatížení transformátorů 400/110 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod

Rozvodna	Transformátor	S_{nt}	P_{2t}	Q_{2t}	S_{2t}	s_{2t}
Označení	Označení	[MVA]	[MW]	[MVar]	[MVA]	[%]
CNT	T401	350	35,93	-39,75	53,58	15,31
SO	T402	350	53,20	-10,82	54,29	15,51

Z vypočítaných procentních hodnot zatížení transformátoru k jeho jmenovitému výkonu je zřejmé, že oba transformátory mají dostatečnou rezervu pro případné zvýšení zátěže či další

rozvoj sítě. Z výpočtu je evidentní, že k přetoku jalové energie dochází na transformátoru T401 v rozvodném uzlu CNT i na transformátoru T402 v rozvodném uzlu SO.

V tabulce *Tab. 6-7* jsou zaznamenány změřené hodnoty distribučních transformátorů 110/22 kV, které byly zadány jakožto zatížení sítě pro výpočet ustáleného chodu. Tyto hodnoty pochází z měřených hodnot dispečerského systému RIS. Pro větší přehlednost jsou v tabulce uvedeny pouze transformátory, které byly v daném časovém řezu v provozu.

Tab. 6-7 Zatížení transformátorů 110/22 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod

Rozvodna	Transformátor	S_{nt}	P_{2t}	Q_{2t}	S_{2t}	s_{zt}
Označení	Označení	[MVA]	[MW]	[MVar]	[MVA]	[%]
AD	T101	16	-0,04	-0,03	0,05	0,31
BNC	T101	25	3,93	-1,82	4,33	17,32
	T102	40	-7,60	0,69	7,63	19,08
BNP	T101	40	5,39	-1,35	5,56	13,89
	T102	40	4,82	0,10	4,82	12,05
BNT	T101	40	3,59	-3,38	4,93	12,33
	T102	40	5,87	-2,10	6,23	15,59
	T104	40	6,76	-1,23	6,87	17,18
BOB	T101	40	7,16	-3,34	7,90	19,75
	T102	40	6,38	-3,69	7,37	18,43
CML	T10	100	-36,70	3,18	36,84	36,84
	T20	40	-13,40	-3,90	13,96	34,89
CNT	T101	40	4,44	0,00	4,44	11,10
	T102	40	8,46	0,45	8,47	21,18
HUV	T101	40	9,20	-2,89	9,64	24,11
	T102	40	7,45	-1,65	7,63	19,08
KPO	T102	25	0,41	0,12	0,43	1,71
KV	T101	40	8,60	-1,02	8,66	21,65
	T102	40	4,58	-0,80	4,65	11,62
LI	T101	40	3,15	-2,24	3,87	9,66
	T102	40	5,82	-1,82	6,10	15,24
MED	T1	13,3	0,82	-0,28	0,87	6,51
MEY	T101	40	11,30	-6,25	12,91	32,28
	T102	40	4,57	-0,95	4,67	11,67
MOB	T102	40	6,12	-0,40	6,13	15,33
MQ	T103	25	7,70	1,70	7,89	31,54
SHH	T1	16	0,62	1,67	1,78	11,13
SLB	T101	25	6,83	0,28	6,84	27,34
SO	T101	40	4,42	-0,71	4,48	11,19
	T102	25	5,17	1,23	5,31	21,26
ZBB	T102	25	0,35	0,07	0,36	1,43
ZET	T101	40	1,33	-0,15	1,34	3,35

Z vypočtených procentních hodnot zatížení je zřejmé, že žádný z transformátorů není přetížen. Červeně označené transformátory byly vyhodnoceny jako transformátory s největším přetokem jalového výkonu ze sítě 22 kV do sítě 110 kV. V následujících kapitolách bude provedena analýza zatížení těchto transformátorů.

6.2.3 Zatížení vedení

Výsledné hodnoty výpočtu zatížení vedení jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6-4). Procentuální hodnoty zatížení jsou vypočteny z podílu přenášeného proudu po vedení k přenosové schopnosti vedení dané nejslabším prvkem v dané části vedení.

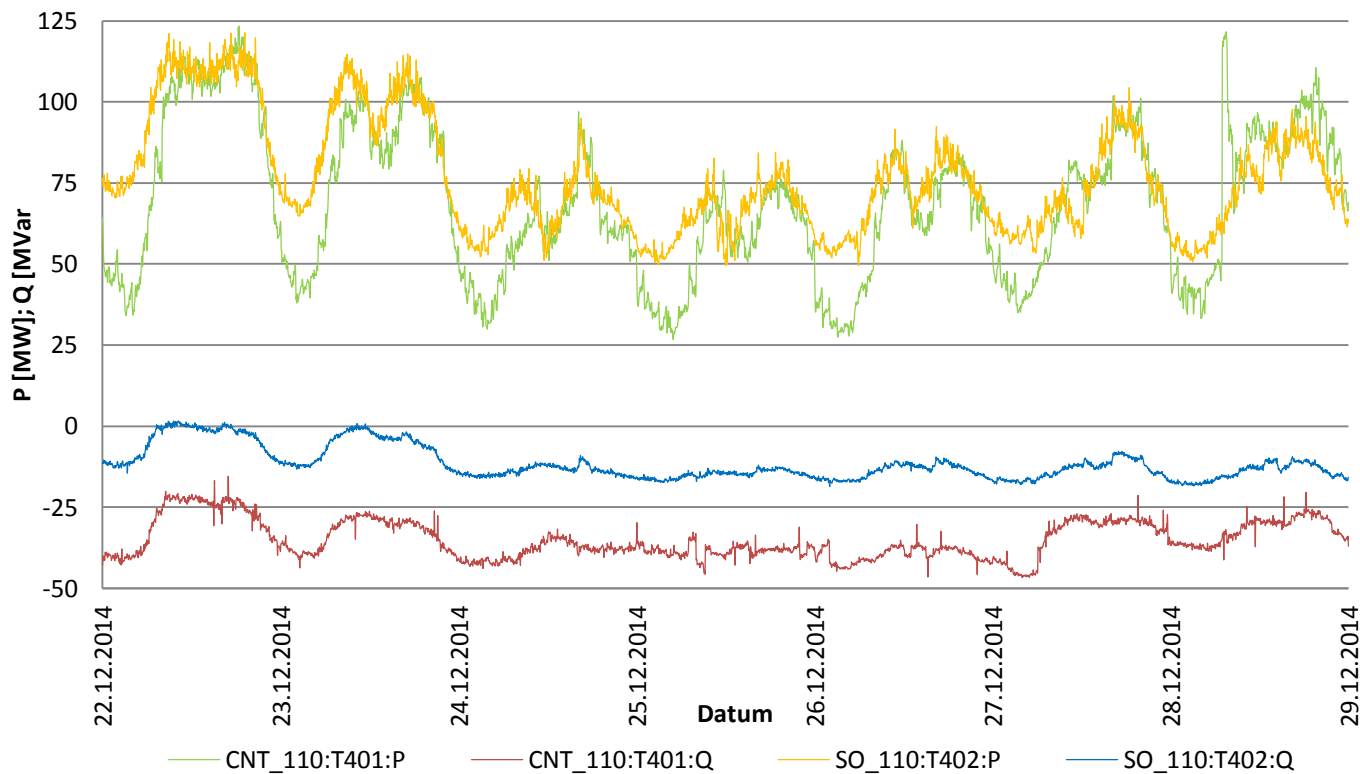
Tab. 6-8 Zatížení vedení 110 kV – 25. 12. 2014 04:00 hod

Vedení	Směr		Začátek vedení					Konec vedení				S _{ZV}	Q _C
			U ₁	δ ₁	P _{1v}	Q _{1v}	I _{1v}	U ₂	δ ₂	P _{2v}	Q _{2v}		
Linka	Označení		[kV]	[°]	[MW]	[MVar]	[A]	[kV]	[°]	[MW]	[MVar]	[%]	[MVar]
510	KV	BNT	120,50	-0,93	-16,69	2,51	80,9	120,64	-0,81	16,68	-2,37	17,8	-0,14
513	BNT	KV	119,84	-3,15	-19,11	-2,86	93,1	119,90	-3,04	19,10	2,99	20,5	-0,13
514	SO	KV	120,01	-2,78	-17,14	2,76	83,5	119,90	-3,04	17,11	-2,46	17,4	-0,30
515	SO	MED	120,01	-2,78	-10,56	1,91	51,6	119,95	-2,93	10,55	-1,61	11,3	-0,30
521	CNT	HUV	119,92	-0,71	-7,92	6,84	50,4	120,17	-1,00	7,90	-6,11	9,5	-0,73
522	CNT	522A	119,92	-0,71	-8,01	7,04	51,3	120,10	-0,9	8,00	-6,63	9,7	-0,41
	522A	AD	120,10	-0,9	0,00	0,32	1,5	120,07	-0,88	0,00	0,07	1,3	-0,25
	522A	HUV	120,10	-0,9	-8,00	6,30	49,0	120,17	-1,00	7,99	-6,00	9,2	-0,30
528	MQ	HUV	119,74	-3,13	-0,26	1,92	9,3	119,81	-3,15	0,26	-1,33	2,1	-0,59
537	SO	SLB	120,01	-2,78	-7,83	1,15	38,1	119,90	-2,99	7,82	-0,51	7,2	-0,64
538	SO	MQ	120,01	-2,78	-8,13	0,59	39,2	119,74	-3,13	8,11	0,46	7,4	-1,05
539	LI	HUV	120,34	-1,02	-1,31	-8,36	40,6	120,17	-1,00	1,31	8,60	8,9	-0,24
5051	BNP	BNT	120,66	-0,80	-19,12	-0,57	91,5	120,64	-0,81	19,11	2,86	9,5	-2,29
5053	CML	BNP	120,68	-0,77	-29,33	3,04	141,1	120,66	-0,80	29,33	-0,68	19,6	-2,36
5055	CML	MEY	120,68	-0,77	-20,77	-3,76	101,0	120,68	-0,77	20,76	7,46	14,0	-3,70
5059	KV	SHH	120,50	-0,93	-0,62	0,35	3,4	120,50	-0,93	0,62	1,67	0,4	-2,02
5531	HUV	KPO	120,17	-1,00	-0,22	-0,11	1,2	120,17	-1,00	0,22	0,21	0,3	-0,10
5532	HUV	KPO	120,17	-1,00	-0,22	-0,11	1,2	120,17	-1,00	0,22	0,21	0,3	-0,10
5541	HUV	ZBB	119,81	-3,15	-0,26	1,32	6,5	119,83	-3,15	0,24	-1,14	1,2	-0,18
5542	BNT	ZBB	119,84	-3,15	-0,14	-1,40	6,8	119,83	-3,15	0,14	1,51	1,3	-0,11
5543	BNC	KV	119,91	-3,02	-3,17	-0,32	15,3	119,90	-3,04	3,17	0,53	3,2	-0,21
5544	KV	LI	120,50	-0,93	-10,39	-4,89	55,0	120,34	-1,02	10,38	5,22	10,4	-0,33
5545	BNC	LI	119,91	-3,02	-0,50	-0,81	4,6	119,90	-3,04	0,50	0,97	0,7	-0,16
5547	HUV	VMA	120,17	-1,00	-0,02	0,01	0,1	120,20	-1,00	0,02	0,09	0,1	-0,10
5548	HUV	VMA	119,81	-3,15	-0,02	0,01	0,1	119,80	-3,2	0,02	0,09	0,1	-0,10
5549	MED	KV	119,95	-2,93	-9,69	1,49	47,2	119,90	-3,04	9,69	-1,22	10,4	-0,27
5553	CNT	MEY	119,92	-0,71	-1,29	13,91	67,3	120,68	-0,77	1,28	-13,09	8,2	-0,82
5554	CNT	BOB	119,92	-0,71	-5,70	7,64	45,9	120,45	-1,02	5,69	-6,15	6,7	-1,49
5556	KV	BOB	120,50	-0,93	-8,02	0,01	38,4	120,45	-1,02	8,02	0,37	5,7	-0,38
5557	KV	MOB	120,50	-0,93	-0,07	1,54	7,4	120,52	-0,93	0,07	-1,34	1,1	-0,20
5558	MEY	MOB	120,68	-0,77	-6,05	-0,18	29,0	120,52	-0,93	6,05	0,94	4,3	-0,76
5559	LI	ZET	119,90	-3,02	-0,74	-0,42	4,1	119,90	-3,02	0,74	0,48	1,1	-0,06
5560	LI	ZET	119,90	-3,02	-0,74	-0,42	4,1	119,90	-3,02	0,74	0,48	1,1	-0,06
5561	SLB	LI	119,90	-2,99	-0,99	0,79	6,1	119,90	-3,02	0,99	-0,12	1,3	-0,67

Z vypočtených hodnot zatížení vedení lze usoudit, že žádné vedení 110 kV není přetížené a mají relativně velkou rezervu pro nárůst odebíraného výkonu, rozvoj sítě či poruchové stavy.

7 ANALÝZA PŘETOKU JALOVÉHO VÝKONU

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, analýza přetoku jalového výkonu bude provedena pouze pro časový řez zimního minima, tedy pro čas, kdy docházelo k největšímu přetoku jalové energie z distribuční soustavy do přenosové soustavy.



Obr. 7-1 Týdenní odběrový diagram P a Q transformátorů 400/110 kV

Z odběrového diagramu činného a jalového výkonu z týdne od 22. 12. 2014 do 29. 12. 2014 (Obr. 7-1), ve kterém se nachází i analyzovaný časový řez, je zřejmé, že hodnoty jalového výkonu dodávaného do přenosové soustavy v daném časovém řezu 25. 12. 2014 04:00 hod nejsou nahodilé, ale přetok jalového výkonu je trvalý přes den i noc. Jedná se však o období vánočních svátků, kdy je síť jen velmi málo zatížená.

7.1 Zdroje a spotřebiče jalového výkonu

V následující kapitole bude podrobněji rozebráno, jakým způsobem se podílí jednotlivé prvky sítě zmíněné v kapitole 3.8 na přetoku jalového výkonu v síti.

7.1.1 Vedení 110 kV

V tabulce (Tab. 6-8) je proveden výpočet nabíjecích výkonů jednotlivých vedení. Hodnoty nabíjecích výkonů jsou vypočteny z rozdílu hodnot přenášeného jalového výkonu na začátku a konci jednotlivých vedení.

Celková suma všech nabíjecích výkonů vedení v dané oblasti pak je

$$Q_{C,celk} = -21,55 \text{ MVar}$$

Z toho část vedení napájená z rozvodného uzlu CNT

$$Q_{C,CNT} = -16,72 \text{ MVar}$$

a část napájená z rozvodného uzlu SO

$$Q_{C,SO} = -4,83 \text{ MVar}$$

Velký rozdíl nabíjecích výkonů mezi oblastí napájenou z uzlu CNT a oblastí napájenou z uzlu SO je způsoben tím, že oblast napájená z uzlu CNT obsahuje 4 kabelová vedení, která produkují velké množství jalového výkonu. Nabíjecí výkon vedení si tedy pro představu můžeme rozdělit na nabíjecí výkon kabelových vedení:

$$Q_{C,kabel} = -10,28 \text{ MVar}$$

a venkovních vedení:

$$Q_{C,venk} = -11,27 \text{ MVar}$$

7.1.2 Vysílače HDO

V rozvodných uzlech CNT a SO, kde jsou umístěny transformátory 400/110 kV, se zároveň nachází i vysílače HDO, které jsou připojeny na sběrnou 110 kV. Uplatňuje se zde pravidlo, že jednomu transformátoru 400/110 kV náleží vždy jeden vysílač HDO. Na základě autorova návrhu bylo se zadavatelem dohodnuto změření velikosti jalového výkonu dodávaného vysílačem HDO. Jelikož nejsou vysílače HDO vybaveny měřicími přístroji, bylo zadavatelem provedeno experimentální měření, kdy byl samotný HDO vysílač připojen do samostatné sběrné pouze s jedním měřeným vývodem. Hodnota jalového výkonu dodávaná do tohoto vývodu pak odpovídá hodnotě jalového výkonu, který produkuje HDO vysílač. Hodnota jalového výkonu dodávaného vysílačem HDO:

$$Q_{C,HDO} = -5,5 \text{ MVar}$$

Hodnota Q_{0HDO} byla při měření konstantní bez ohledu na to, zda vysílač vysílal signál nebo ne. Jelikož jsou v dané síti zapojeny dva vysílače HDO, budeme tedy uvažovat celkový nabíjecí výkon vysílačů:

$$Q_{HDO} = -11 \text{ MVar}$$

7.1.3 Transformátory 110/22 kV

Jalovou energii, kterou transformátory spotřebují na sycení jejich magnetického obvodu, je možné určit dvěma způsoby. Prvním z nich je bilance sítě. Součtem příspěvků ze sítě 22 kV (uvažováno bez transformátorů 110/22 kV v uzlech CNT a SO) s nabíjecími výkony vedení dostaneme hodnotu:

$$Q_{bil} = Q_{s22} + Q_{C,celk} = -31,48 - 21,55 = -53,03 \text{ MVar} \quad (7.1)$$

Z hodnot výpočtu chodu sítě můžeme určit, kolik jalového výkonu přitéká do napájecích rozvodů CNT a SO. Jedná se o linky 514, 515, 521, 522, 537, 538, 5553 a 5554.

$$\Sigma Q_{ved} = -41,84 \text{ MVar}$$

Spotřebu transformátorů pak můžeme určit jako rozdíl těchto vypočtených hodnot.

$$Q_{ztb} = \Sigma Q_{ved} - Q_{bil} = -41,84 - (-53,03) = 11,19 \text{ MVar} \quad (7.2)$$

Z výpočtu jsou však vynechány transformátory 110/22 kV v rozvodných uzlech CNT a SO. Spotřebu transformátorů umístěných přímo v rozvodných uzlech CNT a SO nelze určit na základě bilančního výpočtu. Pro výpočet jejich spotřeby lze použít vztah (3.10). Jelikož nejsou známy štítkové hodnoty těchto transformátorů, je nutné hodnoty proudu naprázdno a napětí nakrátko určit jiným způsobem. Pro jejich výpočet byl stanoven souhrnný transformátor o ztrátovém výkonu $Q_{ztl} = 11,19 \text{ MVar}$. Jmenovitý výkon tohoto transformátoru je pak určen celkovým součtem jmenovitých výkonů transformátorů mimo rozvodné uzly CNT a SO, ten činí $S_{nt} = 1030,3 \text{ MVA}$. Výpočetním odhadem byly zjištěny hodnoty proudu naprázdno $i_0 = 0,6\%$ a napětí nakrátko $u_k = 11\%$. Pro tyto hodnoty byl zpětně vypočten ztrátový výkon na transformátorech, který činil $Q_{ztl} = 11,187 \text{ MVar}$. Vzhledem k tomu, že odchylka hodnot Q_{ztb} a Q_{ztl} je minimální, lze z hodnot proudu naprázdno a napětí nakrátko vypočítat spotřebu jalového výkonu transformátorů umístěných v rozvodnách CNT a SO dle vztahu (3.10). Transformátory umístěné v rozvodnách CNT a SO spotřebovávají:

$$Q_{ztl} = 1,301 \text{ MVar}$$

Celkovou spotřebu všech transformátorů lze tedy vypočítat:

$$Q_{zt} = Q_{ztb} + Q_{ztl} = 11,19 + 1,301 = 12,491 \text{ MVar} \quad (7.3)$$

7.1.4 Synchronní generátory

V daném časovém řezu pracovaly do sítě generátory:

- TG28 v rozvodném uzlu BNT, jmenovitý výkon $S_n = 35,3 \text{ MVA}$
- TG10 v rozvodném uzlu CML, jmenovitý výkon $S_n = 87,5 \text{ MVA}$
- TG20 v rozvodném uzlu CML, jmenovitý výkon $S_n = 30,0 \text{ MVA}$
- TG23 v rozvodném uzlu SAKO, jmenovitý výkon $S_n = 28,0 \text{ MVA}$

Bilance výroby činného výkonu a výroby či spotřeby jalového výkonu těchto generátorů v daném časovém řezu je vyčíslena v tabulce Tab. 7-1. Hodnoty byly získány z naměřených hodnot v dispečerském systému RIS.

Tab. 7-1 Bilance P, Q zdrojů pracujících do sítě 25. 12. 2014 04:00 hod

Rozvodna	Generátor	P	Q
		[MW]	[MVar]
BNT	TG28	-5,503	-1,092
CML	TG10	-36,680	3,173
	TG20	-13,401	-3,876
SAKO	TG23	-9,536	0,280
Suma		-65,120	-1,515

Z naměřených hodnot je zřejmé, že i přes velký přetok jalového výkonu v síti, synchronní generátory nevyužívají své schopnosti pracovat v podbuzeném stavu a spotřebovávat tak jalovou energii, naopak generátor TG28 v uzlu BNT a generátor TG20 v uzlu CML pracují v přebuzeném stavu a dodávají tak jalovou energii do sítě. Z tabulky je dále zřejmé, že systém regulace ASRU na generátoru TG23 v rozvodném uzlu SAKO stále není v provozu. Generátor TG10 v rozvodném uzlu CML sice pracuje v podbuzeném stavu, ale potenciál regulace není využit naplno.

7.1.5 Kompenzační tlumivky

Přebytky jalového výkonu lze snadno regulovat připnutím kompenzačních tlumivek na terciální vinutí transformátorů 400/110 kV. V rozvodném uzlu CNT se nachází dvě tlumivky, každá o výkonu 45 MVar. Tlumivky jsou však instalovány na transformátorech T402 a T403. Oblast Brna byla v danou dobu napájena z transformátoru T401, tudíž nebylo možné jejich regulační schopnost využít. V rozvodném uzlu SO je tlumivka o výkonu 90 MVar instalovaná pouze na transformátoru T401, což je transformátor 400/220 kV, a v daném časovém řezu nebyla provozována.

7.1.6 Příspěvky ze sítě 22 kV

Největší podíl na přetoku jalového výkonu mají příspěvky ze sítě 22 kV, v níž jsou zahrnuty i příspěvky ze sítě NN a příspěvky jednotlivých odběrů. Celkovou hodnotu jalového výkonu přenášenou z napěťové úrovně 22 kV do napěťové úrovně 110 kV získáme součtem jalových výkonů na transformátorech 110/22 kV zaznamenaných v tabulce *Tab. 6-7*. Výsledná hodnota všech příspěvků ze sítě 22 kV pak činí:

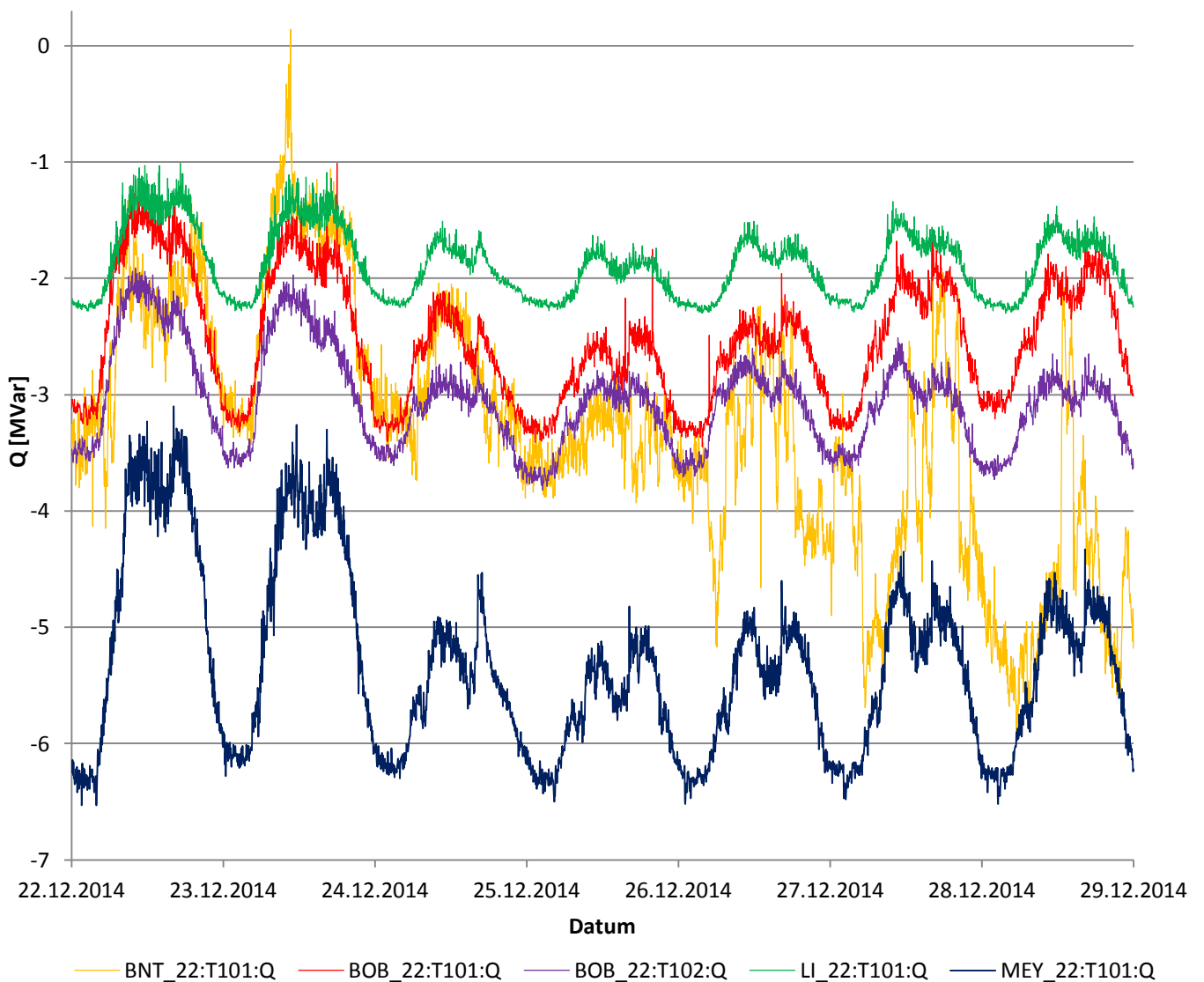
$$Q_{22} = -30,51 \text{ MVar}$$

Z tabulky *Tab. 6-7* bylo dále určeno 5 transformátorů, které se největší mírou negativně podílí na přetoku jalového výkonu. V tabulce jsou označeny červenou barvou. Jedná se o tyto transformátory:

- T101 v rozvodném uzlu BNT, jmenovitý výkon $S_{nt} = 40 \text{ MVA}$
- T101 v rozvodném uzlu BOB, jmenovitý výkon $S_{nt} = 40 \text{ MVA}$
- T102 v rozvodném uzlu BOB, jmenovitý výkon $S_{nt} = 40 \text{ MVA}$
- T101 v rozvodném uzlu LI, jmenovitý výkon $S_{nt} = 40 \text{ MVA}$
- T101 v rozvodném uzlu MEY, jmenovitý výkon $S_{nt} = 40 \text{ MVA}$

Velký přetok jalového výkonu je také zaznamenaný na transformátorech T101 a T102 v rozvodném uzlu HUV, ty ale nebudou v dalším postupu uvažovány, jelikož rozvodna HUV nemá instalováno měření P a Q na vývodech vedení 22 kV.

Všechny uvedené transformátory slouží k napájení rozsáhlých kabelových sítí, které disponují vysokými nabíjecími výkony, proto na nich zpravidla bývá přetok jalového výkonu. Pro ověření, zda se nejedná o nahodilé hodnoty, byl sestaven týdenní diagram přetoku jalového výkonu na těchto vybraných transformátorech v týdnu zahrnujícím i daný časový řez (*Obr. 7-2*). Z tohoto diagramu je patrné, že k přetoku jalového výkonu ze sítě 22 kV do sítě 110 kV dochází neustále. Nejhorší situace nastává v nočních hodinách, ale i v denních hodinách je přetok značně vysoký. Pro ověření trvalého přetoku můžeme použít hodnoty zatížení transformátorů v době zimního maxima (*Tab. 6-3*). Měření bylo prováděno v denních hodinách při vysokém zatížení, tudíž by měl být přetok jalového výkonu minimální. Z tabulky je však patrné, že k přetoku jalového výkonu docházelo na všech výše uvedených transformátorech, avšak v menší míře. Nejhorší situace nastala opět u transformátoru T101 v rozvodném uzlu MEY, kdy přetok jalového výkonu v řezu zimního maxima činil $Q_{2t} = -3,45 \text{ MVar}$



Obr. 7-2 Týdenní diagram Q vybraných transformátorů 110/22 kV

Pro vybrané transformátory bylo pro daný časový řez v řídicím systému provedeno měření jednotlivých vedení, napájených z těchto transformátorů, dále pak dopočteny jejich nabíjecí proudy dle vztahu (3.7).

Kabelové sítě ve městě Brně bývají zpravidla tvořeny kabely s hliníkovým jádrem o průřezu 240 mm^2 . Pro zjednodušení výpočtu budeme uvažovat, že se jiné typy kabelů v síti nevyskytují. Hodnota měrné kapacity kabelu byla převzata z katalogu výrobce kabelů Draka Kabely, s.r.o, literatura [11].

Pro výpočet byla uvažována měrná kapacita kabelu $C_k = 0,44 \text{ } \mu\text{F/km}$ a vztažné napětí $U = 22 \text{ kV}$. Z vypočtených hodnot nabíjecích proudů I_C pak byly určeny nabíjecí výkony Q_C . Následně byla vypočtena diference změřeného a vypočteného jalového výkonu pro určení ztrát jalového výkonu na transformátorech a spotřeby v síti NN. Změřené a vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách (Tab. 7-2 až 7-6).

Transformátor T101 v uzlu MEYTab. 7-2 Měření P , Q vývodů transformátoru MEY T101

Rozvodna Transformátor	Vedení	Délka	P	Q	I_c	Q_c	Q_{ztd}
		[m]	[MW]	[MVar]	[A]	[MVar]	[MVar]
MEY T101	V1245	30314	1,949	-1,548	53,22	-2,03	0,48
	V1249	14105	1,154	-0,509	24,76	-0,94	0,44
	V1279	12795	-	-	22,46	-0,86	-
	V1280	2232	-	-	3,92	-0,15	-
	V1296	18629	0,709	-0,356	32,71	-1,25	0,89
	V1339	47696	2,371	-2,126	83,74	-3,19	1,06
	V246	18855	-	-	33,10	-1,26	-
	V247	7975	0,531	-0,160	14,00	-0,53	0,37

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, přes transformátor MEY T101 přetéká nejvíce jalového výkonu do sítě 110 kV ze všech transformátorů v zadané oblasti. Důvodem tohoto přetoku je, že transformátor slouží pro napájení kabelových sítí městských částí Medlánky, Komín, Bystrc, Řečkovice, které jsou značně rozsáhlé. Výsledný součet nabíjecích výkonů vedení napájených z transformátoru MEY T101 pak je:

$$Q_c = -10,21 \text{ MVar}$$

Přetok jalového výkonu na transformátoru MEY T101 v daném časovém řezu byl:

$$Q_{zt} = -6,25 \text{ MVar}$$

Z těchto hodnot je možné určit hodnotu jalového výkonu, který byl spotřebován na distribučních transformátorech 22/0,4 kV a v síti NN.

$$Q_{ztd} = Q_{zt} - Q_c = -6,25 - (-10,21) = 3,96 \text{ MVar}$$

Obdobným způsobem určíme tuto hodnotu i pro další vybrané transformátory.

Transformátor T101 v uzlu BOBTab. 7-3 Měření P , Q vývodů transformátoru BOB T101

Rozvodna Transformátor	Číslo vedení	Délka	P	Q	I_c	Q_c	Q_{ztd}
		[m]	[MW]	[MVar]	[A]	[MVar]	[MVar]
BOB T101	V1274	19936	2,403	-0,653	35,00	-1,33	0,68
	V1278	42099	1,871	-1,189	73,91	-2,82	1,63
	V1299	4966	0,000	-0,235	8,72	-0,33	0,10
	V1367	3598	0,655	-0,081	6,32	-0,24	0,16
	V236	5254	2,360	-0,400	9,22	-0,35	-0,05

Výsledný součet nabíjecích výkonů vedení napájených z transformátoru BOB T101 pak je:

$$Q_c = -5,07 \text{ MVar}$$

Přetok jalového výkonu na transformátoru BOB T101 v daném časovém řezu byl:

$$Q_{2t} = -3,34 \text{ MVar}$$

Z těchto hodnot je možné určit hodnotu jalového výkonu, který byl spotřebován na distribučních transformátorech 22/0,4 kV a v síti NN.

$$Q_{ztd} = Q_{2t} - Q_C = -3,34 - (-5,07) = 1,73 \text{ MVar}$$

Transformátor T102 v uzlu BOB

Tab. 7-4 Měření P, Q vývodů transformátoru BOB T102

Rozvodna Transformátor	Číslo vedení	Délka	P	Q	I _c	Q _C	Q _{ztd}
		[m]	[MW]	[MVar]	[A]	[MVar]	[MVar]
BOB T102	V1230	13848	0,671	-0,674	24,31	-0,93	0,25
	V1231	13853	0,684	-0,786	24,32	-0,93	0,14
	V1300	12761	1,432	-0,488	22,40	-0,85	0,37
	V1337	12912	2,064	-0,280	22,67	-0,86	0,58
	V1224	5974	0,318	-0,401	10,49	-0,40	0,00
	V232	20875	1,267	-1,059	36,65	-1,40	0,34

Výsledný součet nabíjecích výkonů vedení napájených z transformátoru BOB T102 pak je:

$$Q_C = -5,37 \text{ MVar}$$

Přetok jalového výkonu na transformátoru BOB T102 v daném časovém řezu byl:

$$Q_{2t} = -3,69 \text{ MVar}$$

Z těchto hodnot je možné určit hodnotu jalového výkonu, který byl spotřebován na distribučních transformátorech 22/0,4 kV a v síti NN.

$$Q_{ztd} = Q_{2t} - Q_C = -3,69 - (-5,37) = 1,68 \text{ MVar}$$

Transformátor T101 v uzlu LI

Tab. 7-5 Měření P, Q vývodů transformátoru LI T101

Rozvodna Transformátor	Číslo vedení	Délka	P	Q	I _c	Q _C	Q _{ztd}
		[m]	[MW]	[MVar]	[A]	[MVar]	[MVar]
LI T101	V1237	4717	0,223	-0,188	8,28	-0,32	0,13
	V1238	4408	0,419	-0,125	7,74	-0,29	0,17
	V1239	4663	0,223	-0,143	8,19	-0,31	0,17
	V1240	4940	0,286	-0,171	8,67	-0,33	0,16
	V1254	1881	0,009	-0,098	3,30	-0,13	0,03
	V1344	3730	0,000	-0,188	6,55	-0,25	0,06
	V1255	33379	1,813	-1,349	58,60	-2,23	0,88

Výsledný součet nabíjecích výkonů vedení napájených z transformátoru LI T101 pak je:

$$Q_C = -3,86 \text{ MVar}$$

Přetok jalového výkonu na transformátoru LI T101 v daném časovém řezu byl:

$$Q_{2t} = -2,24 \text{ MVar}$$

Z těchto hodnot je možné určit hodnotu jalového výkonu, který byl spotřebován na distribučních transformátorech 22/0,4 kV a v síti NN.

$$Q_{ztd} = Q_{2t} - Q_C = -2,24 - (-3,86) = 1,62 \text{ MVar}$$

Tab. 7-6 Měření P, Q vývodů transformátoru BNT T101

Rozvodna Transformátor	Číslo vedení	Délka	P	Q	I _c	Q _C	Q _{ztd}
		[m]	[MW]	[MVar]	[A]	[MVar]	[MVar]
BNT T101	V1340	6076	1,617	-0,041	10,67	-0,41	0,37
	V195	16965	1,421	-0,451	29,79	-1,13	0,68
	V204	3838	0,479	-0,228	6,74	-0,26	0,03
	V207	2999	0,459	-0,156	5,27	-0,20	0,04
	V227	10219	1,401	-0,296	17,94	-0,68	0,39
	V231	13694	0,689	-0,270	24,04	-0,92	0,65
	V240	3875	0,753	-0,069	6,80	-0,26	0,19
	V249	553	0,178	0,000	0,97	-0,04	0,04
	V252	1017	0,261	-0,028	1,79	-0,07	0,04
	V253	1097	0,438	0,082	1,93	-0,07	0,16
	V254	606	0,000	0,000	1,06	-0,04	0,04
	V259	7668	0,910	-0,242	13,46	-0,51	0,27
	V258	8863	0,605	-0,421	15,56	-0,59	0,17

Výsledný součet nabíjecích výkonů vedení napájených z transformátoru BNT T101 pak je:

$$Q_C = -5,18 \text{ MVar}$$

Přetok jalového výkonu na transformátoru BOB T101 v daném časovém řezu byl:

$$Q_{2t} = -3,38 \text{ MVar}$$

Z těchto hodnot je možné určit hodnotu jalového výkonu, který byl spotřebován na distribučních transformátorech 22/0,4 kV a v síti NN.

$$Q_{ztd} = Q_{2t} - Q_C = -3,38 - (-5,18) = 1,80 \text{ MVar}$$

Výsledek analýzy sítě 22 kV

Příspěvky jalového výkonu produkované vedením 22 kV a odběr jalového výkonu transformátorů 22/0,4 kV nám dohromady tvoří jalový výkon, který byl v daném časovém řezu transformován z napěťové úrovně VN do napěťové úrovně VVN. Pokud by transformátory pro svoji funkci nespotřebovávaly žádnou jalovou energii, byl by veškerý nabíjecí výkon vedení 22 kV vytlačován do sítě 110 kV. Z hodnot vypočtených v Tab. 7-7 lze usoudit, že spotřeba jalového výkonu transformátorů VN / NN + odběr sítě NN snižují přetok jalového výkonu do sítě 110 kV přibližně o 31 – 42%. Výsledný přetok jalového výkonu do sítě 110 kV pak tvoří přibližně 58 – 69% z nabíjecího výkonu vedení 22 kV. Rozmezí výsledných hodnot je závislé na rozsahu sítě VN, NN i počtu transformátorů VN / NN v dané části sítě.

Tab. 7-7 Rozdělení toku jalového výkonu v síti 22 kV

Transformátor	MEY T101	BOB T101	BOB T102	LI T101	BNT T101
Nabíjecí výkon vedení [MVar]	-10,21	-5,07	-5,37	-3,86	-5,18
Spotřeba transformátorů VN / NN a odběr sítě NN [MVar]	3,96	1,73	1,68	1,62	1,80
Přetok na transformátorech VVN / VN [MVar]	-6,25	-3,34	-3,69	-2,24	-3,38
Procentní podíl transformátorů VN/NN [%]	-38,8	-34,1	-31,3	-42,0	-34,7
Přetok na transformátorech VVN/VN [%]	61,2	65,9	68,7	58,0	65,3

Na základě výsledků z analýzy synchronních generátorů je známo, že v daném časovém řezu bylo ve výrobnách celkově produkováno $Q_{vyr} = -1,52$ MVar. Tato hodnota je již však zahrnuta v příspěvku jalového výkonu ze sítě 22 kV (mimo transformace v uzlech CNT a SO), který činil $Q_{s22} = -31,48$ MVar.

Příspěvek ze sítě 22 kV napájené mimo transformátory v uzlech CNT a SO pak lze určit rozdílem těchto dvou hodnot.

$$Q_{s22b} = Q_{s22} - Q_{vyr} = -31,48 - (-1,52) = -29,96 \text{ MVar}$$

Celkový příspěvek ze sítě 22 kV je pak možné určit součtem příspěvků na transformátorech 110/22 kV v uzlech CNT a SO a vypočtenou hodnotou Q_{s22b} . Výsledný příspěvek ze sítě VN a NN bez uvažování příspěvku výroben pak činí:

$$Q_{VN} = -28,99 \text{ MVar}$$

7.2 Výsledky analýzy přetoku jalového výkonu

V předchozí kapitole (7.1) bylo analyzováno, jakou částí se podílí jednotlivé prvky sítě na přetoku jalového výkonu ze sítě 22 kV do sítě 110 kV a následně do přenosové soustavy, tedy sítě 400 kV. Rozdělení toku jalového výkonu je možné vyjádřit poměrem vzhledem k celkovému přetoku, rozdělení je provedeno v tabulce (Tab. 7-8).

Tab. 7-8 Rozdělení toku jalového výkonu v síti

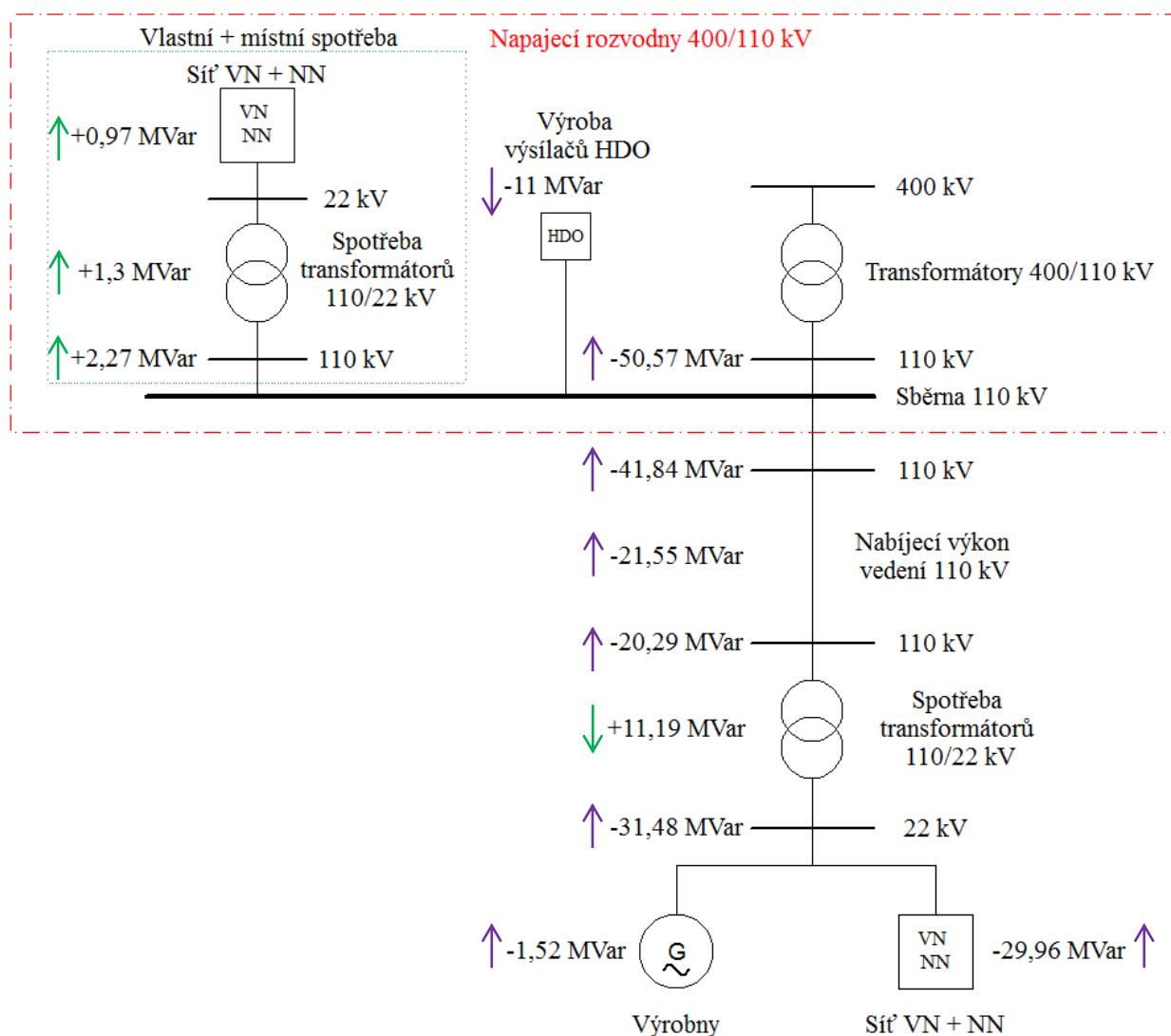
	Prvek	Q	Q
		[MVar]	[%]
Spotřeba jalového výkonu	Přetok z úrovně VVN do ZVN	50,57	80,2
	Transformátory 110/22 kV	12,49	19,8
	Suma	63,06	100,00
Výroba jalového výkonu	Vedení venkovní 110 kV	-11,27	17,9
	Vedení kabelové 110 kV	-10,28	16,3
	Vysílače HDO	-11,00	17,4
	Výrobný	-1,52	2,4
	Síť VN + NN	-28,99	46,0
	Suma	-63,06	100,00

Z výsledků v tabulce Tab. 7-8 je zřejmé, že do přenosové soustavy přetévalo pouze 80% jalového výkonu, který byl v síti a dalších jejích prvcích vyroben. Zbývajících 20% jalového výkonu bylo spotřebováno transformátory 110/22 kV. Největší podíl na výrobě jalového výkonu mají

příspěvky ze sítě VN a NN, ty činí 46% z celkově vyráběného jalového výkonu. Nezanedbatelný podíl na přetoku mají vedení VVN, ty v součtu tvoří 34%. Dalším velkým přispěvatelem jalového výkonu jsou vysílače HDO, které produkují téměř 17% jalového výkonu. Posledním zdrojem jalového výkonu jsou synchronní generátory ve výrobnách. Jejich příspěvek, který dle tabulky *Tab. 7-1* činí 1,52 MVar, tvoří pouze 2,4% z celkově vyráběného jalového výkonu. Pro situaci, která v daném časovém řezu nastala, by však bylo mnohem výhodnější, kdyby měly výrobný charakter spotřeby jalového výkonu.

V daném časovém řezu tedy docházelo k celkovému přetoku jalového výkonu o hodnotě $Q = -50,57$ MVar. Tato hodnota je však vztažná k síti 110 kV. Do přenosové soustavy však přeteklo jalového výkonu méně, z důvodu spotřeby jalové energie na transformátorech 400/110 kV. Nicméně přetok jalového výkonu je stále znatelný a má velký vliv na velikost napětí v síti.

Pro představu, jakým způsobem se jalový výkon v síti pohybuje, kde se vytváří a kde spotřebovává, je možné si vytvořit jednopólové bilanční schéma sítě. Pro zjednodušení a přehlednost byly všechny prvky uvažovány jako jedna ucelená soustava a nebylo zde uvažováno rozdělení napájení mezi rozvodné uzly CNT a SO. Nejedná se tedy o skutečné zapojení sítě, ale pouze o bilanční rozdělení toku výkonu na jednotlivých prvcích v síti. Bilanční schéma dané sítě je znázorněno na *Obr. 7-3*.



Obr. 7-3 Rozdělení toku jalového výkonu v síti

7.3 Návrh opatření pro minimalizaci přetoku jalového výkonu

V řídicím systému RIS bylo zobrazeno aktuální zapojení sítě 22 kV i sítě 110 kV v čase 25. 12. 2014 v 04:00 hod. Z tohoto schématu je možné určit, jakým způsobem pracovaly do sítě generátory, ke kterým transformátorům byly připojeny, a na základě těchto informací je dále možné určit, zda bylo zapojení sítě a nastavení buzení generátorů správné, případně navrhnout provozní opatření.

Ze schématu bylo zjištěno, že generátor TG28 v rozvodném uzlu BNT byl v dané době připojen do sběrný společně s transformátorem T101, na kterém docházelo k přetoku jalového výkonu do sítě 110 kV. Jak již bylo zmíněno v kapitole 7.1.4, generátor v dané době pracoval v přebuzeném stavu a dodával tak do sběrný jalový výkon, čímž zvyšoval přebytky jalového výkonu. Na základě této skutečnosti bylo doporučeno zadavatelské společnosti E.ON, aby byl generátor provozován v podbuzeném stavu, případně ke generátoru instalována automatika regulace P, Q, U.

Stejný problém byl analyzován u generátorů TG10 a TG20 v rozvodném uzlu CML. Dle tabulky (*Tab. 6-8*) je zřejmé, že značná část vyráběného výkonu byla po lince 5055 přenášena do rozvodného uzlu MEY. Tato linka je navíc kabelového typu a má vysoký nabíjecí výkon, což má za následek, že do rozvodného uzlu MEY přitékal další jalový výkon. Kdyby oba generátory ve výrobně CML pracovaly v podbuzeném stavu, mohly by tak kompenzovat nabíjecí výkony kabelů 5053 a 5055 a navíc i spotřebovávat část jalové energie, kterou vytlačoval transformátor T101 v rozvodně MEY do sítě 110 kV, a snížil by se tak přetok jalového výkonu do napájecí rozvodny CNT. Tím by došlo i k odlehčení linky 5553, což by vedlo k menším ztrátám na vedení. Na základě této skutečnosti bylo doporučeno zadavatelské společnosti E.ON, aby byly oba generátory v nočních hodinách a ve stavech přetoku jalového výkonu do přenosové soustavy provozovány v podbuzeném stavu, případně instalována automatika regulace P, Q, U.

Generátor T23 ve výrobně SAKO byl v daném zapojení připojen do sběrný v rozvodně BNC, ke které je přiřazen transformátor T102. Z tabulky (*Tab. 6-8*) lze vidět, že v analyzovaném časovém řezu transformátor T102 odebíral ze sítě 110 kV jalový výkon $Q = 0,69$ MVar. Transformátor T102 je však napájen ze stejné sběrný 110 kV jako transformátor T101, který do sítě 110 kV dodával jalový výkon o hodnotě $Q = -1,82$ MVar. Generátor by tak mohl v podbuzeném stavu spotřebovávat více jalové energie, aby pokryl tento přetok, který nastal v rozvodném uzlu BNC. Na základě této skutečnosti bylo doporučeno zadavatelské společnosti E.ON, aby byl generátor provozován v podbuzeném stavu, případně začít plně využívat systém regulace ASRU, který je již instalován.

Další návrh opatření pro minimalizaci přetoku jalového výkonu do přenosové soustavy spočívá v zapojení transformátorů 400/110 kV v rozvodném uzlu CNT. Oblast Brna, ve které se nachází velké množství kabelových vedení s vysokými nabíjecími výkony, by pro svoje napájení měla využívat přednostně transformátory T402 a T403, které jsou vybaveny kompenzačními tlumivkami zapojenými na terciální vinutí transformátorů. Transformátor T401 by pak sloužil pro napájení sítí mimo oblast Brna.

Posledním návrhem pro minimalizaci přetoku jalového výkonu je instalace kompenzačních tlumivek s automatikou ladění k terciálním vinutím transformátorů 110/22 kV. Terciální vinutí na transformátorech mají schopnost přenášet až třetinu výkonu, což by bylo pro hladiny přetoku jalového výkonu zcela dostačující.

7.4 Vliv minimalizace přetoku jalového výkonu na činné ztráty v síti

Posouzení vlivu přetoku jalového výkonu na velikost činných ztrát lze například určit numerickým výpočtem. Jako vstupní hodnoty je možné uvažovat parametry na začátku jednotlivých vedení a činné odpory jednotlivých vedení. Vypočtené hodnoty ztrát výkonu na vedení jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7-9).

Tab. 7-9 Posouzení vlivu přetoku jalového výkonu na činné ztráty

Vedení	R _l	Začátek vedení				Q = 100 %		Q = 50%		Q = 25%	
		U _l	δ _l	P _{lv}	Q _{lv}	I _{lv}	ΔP	I _{lv}	ΔP	I _{lv}	ΔP
Linka	[Ω]	[kV]	[°]	[MW]	[MVar]	[A]	[kW]	[A]	[kW]	[A]	[kW]
510	0,62	120,50	-0,93	-16,69	2,51	80,9	12,16	80,2	11,96	80,0	11,91
513	0,62	119,84	-3,15	-19,11	-2,86	93,1	16,12	92,3	15,85	92,1	15,79
514	0,58	120,01	-2,78	-17,14	2,76	83,5	12,14	82,7	11,91	82,5	11,85
515	0,54	120,01	-2,78	-10,56	1,91	51,6	4,32	51,0	4,22	50,9	4,19
521	2,31	119,92	-0,71	-7,92	6,84	50,4	17,59	41,5	11,95	39,0	10,55
522	1,32	119,92	-0,71	-8,01	7,04	51,3	10,44	42,1	7,03	39,5	6,17
	1,91	120,07	-0,88	0,00	0,32	1,5	0,01	0,8	0,00	0,4	0,00
	0,96	120,07	-0,88	-8,00	6,30	49,0	6,90	41,3	4,92	39,2	4,43
528	2,25	119,74	-3,13	-0,26	1,92	9,3	0,59	4,8	0,16	2,6	0,05
537	2,37	120,01	-2,78	-7,83	1,15	38,1	10,31	37,8	10,14	37,7	10,10
538	2,38	120,01	-2,78	-8,13	0,59	39,2	10,98	39,1	10,94	39,1	10,93
539	0,91	120,34	-1,02	-1,31	-8,36	40,6	4,50	21,0	1,21	11,8	0,38
5051	0,13	120,66	-0,80	-19,12	-0,57	91,5	3,27	91,5	3,27	91,5	3,26
5053	0,10	120,68	-0,77	-29,33	3,04	141,1	5,97	140,5	5,92	140,4	5,91
5055	0,30	120,68	-0,77	-20,77	-3,76	101,0	9,18	99,8	8,96	99,5	8,90
5059	0,07	120,50	-0,93	-0,62	0,35	3,4	0,00	3,1	0,00	3,0	0,00
5531	0,38	120,17	-1,00	-0,22	-0,11	1,2	0,00	1,1	0,00	1,1	0,00
5532	0,38	120,17	-1,00	-0,22	-0,11	1,2	0,00	1,1	0,00	1,1	0,00
5541	0,54	119,81	-3,15	-0,26	1,32	6,5	0,07	3,4	0,02	2,0	0,01
5542	0,31	119,84	-3,15	-0,14	-1,40	6,8	0,04	3,4	0,01	1,8	0,00
5543	0,36	119,91	-3,02	-3,17	-0,32	15,3	0,25	15,3	0,25	15,3	0,25
5544	0,59	120,50	-0,93	-10,39	-4,89	55,0	5,36	51,1	4,63	50,1	4,45
5545	0,30	119,91	-3,02	-0,50	-0,81	4,6	0,02	3,1	0,01	2,6	0,01
5547	0,30	120,17	-1,00	-0,02	0,01	0,1	0,00	0,1	0,00	0,1	0,00
5548	0,30	119,81	-3,15	-0,02	0,01	0,1	0,00	0,1	0,00	0,1	0,00
5549	0,50	119,95	-2,93	-9,69	1,49	47,2	3,34	46,8	3,28	46,7	3,27
5553	1,07	119,92	-0,71	-1,29	13,91	67,3	14,52	34,1	3,72	17,9	1,02
5554	2,17	119,92	-0,71	-5,70	7,64	45,9	13,71	33,0	7,10	28,9	5,45
5556	0,64	120,50	-0,93	-8,02	0,01	38,4	2,84	38,4	2,84	38,4	2,84
5557	0,28	120,50	-0,93	-0,07	1,54	7,4	0,05	3,7	0,01	1,9	0,00
5558	1,42	120,68	-0,77	-6,05	-0,18	29,0	3,57	28,9	3,57	28,9	3,57
5559	0,16	119,90	-3,02	-0,74	-0,42	4,1	0,01	3,7	0,01	3,6	0,01
5560	0,16	119,90	-3,02	-0,74	-0,42	4,1	0,01	3,7	0,01	3,6	0,01
5561	3,02	119,90	-2,99	-0,99	0,79	6,1	0,34	5,1	0,24	4,9	0,21
Suma							168,60		134,14		125,52

Vypočtené hodnoty proudu vedením uvažují počáteční hodnoty činného a jalového výkonu na vedení a jeho napětí. Proud vedením byl vypočítán pro tři názorné příklady:

- původní stav - $Q = 100\%$
- jalový výkon kompenzován na 50% původní hodnoty - $Q = 50\%$
- jalový výkon kompenzován na 25% původní hodnoty - $Q = 25\%$

Z vypočtených proudů vedení byly dále dle vztahu (3.9) vypočteny hodnoty činných ztrát na jednotlivých vedeních. Celková suma těchto ztrát odpovídá celkovým ztrátám činného výkonu v síti 110 kV. V nekompensované síti s vysokým přetokem jalového výkonu do přenosové soustavy činily ztráty v síti $\Delta P = 168,6$ kW.

Při zavedení opatření, která by snížila přetoky jalového výkonu v síti na 50%, by činné ztráty klesly na $\Delta P = 134,14$ kW. Zavedením tohoto opatření by ztráty klesly o 34,46 kW.

Při zavedení opatření, která by snížila přetoky jalového výkonu v síti na 25%, by činné ztráty klesly na $\Delta P = 125,52$ kW. Zavedením tohoto opatření by ztráty klesly o 43,08 kW.

Úspora činného výkonu je v tomto případě tak nízká, že by se investice do zlepšení poměrů jalového výkonu v síti nevyplatila.

8 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo provedení výpočtu ustáleného chodu sítě, určení nejlepší možné optimalizace provozu z hlediska stanovení činných ztrát na vedení, dále pak rozbor a analýza zatížení sítě a příspěvky jalového výkonu z úrovně VN do VVN v dané oblasti sítě. V případě zjištění nedostatků navrhnout opatření pro snížení přetoku jalového výkonu a zhodnocení vlivu přetoku jalového výkonu na činné ztráty v síti.

V teoretické části byl proveden popis jednotlivých složek výkonu, účinníku a především rozložení toku jalového výkonu na všech napěťových hladinách distribuční soustavy a mezi přenosovou a distribuční soustavou. Dále byl proveden rozbor jednotlivých dílčích vlivů, které ve svém konečném důsledku vedou k nechtěným přetokům jalové energie mezi jednotlivými napěťovými úrovněmi.

V druhé teoretické části byl proveden rozbor několika možných metod výpočtu chodu sítě, způsobu jejich výpočtu a na jednoduchém příkladu byl znázorněn konkrétní výpočet číselných hodnot. Přesný výpočet proměnných veličin chodu sítě by byl velice obtížný, proto se v praxi používají různé iterační metody. V této práci byly popsány základní dvě metody, a to Gauss-Seidlova iterační metoda a Newtonova iterační metoda. Druhá zmíněná je využívána výpočetním programem PAS DAISY, ve kterém byl výpočet ustáleného chodu sítě proveden.

V praktické části práce byl proveden výpočet chodu sítě na zadané části sítě E.ON, jedná se o oblast Brna, konkrétně oblast mezi rozvodnami Čebín a Sokolnice. Výpočet byl proveden pro dva časové řezy, které byly určeny zadavatelskou společností na základě vyhodnocení ročního diagramu P a Q na transformátorech 400/110 kV v uzlových napájecích rozvodnách. Následně byla provedena analýza přetoků jalového výkonu vycházející z měření činného a jalového výkonu v časovém řezu zimního minima, kdy docházelo k největšímu přetoku jalového výkonu do přenosové soustavy. Nakonec bylo provedeno posouzení situace a návrh provozních opatření s ohledem na přetok jalového výkonu a velikost činných ztrát v síti.

Jak již bylo zmíněno, výpočet ustáleného chodu sítě byl proveden pro dva časové řezy – časový řez zimního maxima a zimního minima. Pro obě varianty byla provedena kontrola uzlových napětí a zhodnocení zatížení transformátorů a vedení. Z výsledků těchto výpočtů bylo usouzeno, že napětí v uzlových rozvodnách jsou v dovolených mezích a provozovány u horní hranice dovolených mezí tak, aby docházelo k co nejnižším činným ztrátám na vedení. Výpočty zatížení transformátorů a vedení v síti prokázaly, že žádný z prvků v síti není přetížen a disponují velkou rezervou pro případné rozšíření sítě či zatížení v důsledku poruchových stavů. Z hlediska činných ztrát na vedení je tedy síť optimalizována správně a autorem nebyly navrženy žádné úpravy v zapojení sítě.

V následující kapitole byla pro časový řez zimního minima provedena analýza přetoku jalového výkonu v síti, jejíž součástí byl i rozbor podílu jednotlivých zdrojů a spotřebičů jalového výkonu na celkový přetok jalového výkonu v síti. Bylo zjištěno, že do přenosové soustavy přetévalo pouze 80% jalového výkonu, který byl v síti a dalších jejích prvcích vyprodukován. Zbývajících 20% jalového výkonu bylo spotřebováno transformátory 110/22 kV. Největší podíl na výrobě jalového výkonu mají příspěvky ze sítě VN a NN, ty činí 46% z celkově vyráběného jalového výkonu. Nezanedbatelný podíl na přetoku mají vedení VVN, ty v součtu tvoří 34%. Dalším velkým přispěvatelem jalového výkonu jsou vysílače HDO, které produkují téměř

17% jalového výkonu. Celkový přetok jalového výkonu z distribuční soustavy do přenosové soustavy pak činil $Q = -50,57$ MVar. V další kapitole (7.3) bylo podrobně popsáno, jakým způsobem bylo nastaveno buzení synchronních generátorů v daném časovém řezu, přičemž bylo zjištěno, že generátory v době největšího přetoku jalového výkonu nepracovaly tak, jak by bylo nejvýhodnější pro situaci, která v síti nastala. Na základě těchto zjištěných skutečností byly autorem doporučeny zadavatelské společnosti E.ON návrhy a opatření pro snížení přetoku jalového výkonu. Dále bylo autorem navrženo, aby pro napájení oblasti Brna bylo v rozvodném uzlu CNT využíváno pouze transformátorů T402 a T403, neboť jsou vybaveny kompenzačními tlumivkami.

V poslední části práce bylo provedeno posouzení vlivu přetoku jalového výkonu na velikost činných ztrát v síti. Pro toto posouzení byly uvažovány tři stavy, z nichž prvním stavem byla situace, která nastala v časovém řezu zimního minima. Pro druhý a třetí stav bylo předpokládáno stejné zatížení sítě činným výkonem jako v časovém řezu zimního minima, ale jalový výkon kompenzován na 50%, případně 25%. Z vypočtených hodnot činných ztrát v síti bylo usouzeno, že kritérium snížení činných ztrát v síti nemá z hlediska investic do kompenzace přetoků jalového výkonu příliš velký význam. Investice do kompenzace jalového výkonu (instalace kompenzačních tlumivek, automatiky regulace výkonu, atd.) by byla nutná, pokud by se provozovatel přenosové soustavy rozhodl společnost E.ON penalizovat za přetok jalového výkonu do přenosové soustavy a udržovat tak účinnost sítě v daných mezích, stejně jako to společnost E.ON vyžaduje od svých zákazníků.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TOMAN, P., DRÁPELA J., MIŠÁK S., ORSÁGOVÁ J., PAAR M., TOPOLÁNEK D. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] HALUZÍK, E.: *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Učební texty. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 126 s.
- [3] BLAŽEK, V., SKALA, P.: *Distribuce elektrické energie*, Brno: VUT 2005.
- [4] KUČERA, D.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. 3. vyd. Brno: VUT, 1989, 198 s. ISBN 8021400560.
- [5] BLAŽEK, V., PAAR, M.: *Přenosové sítě*, Brno: VUT 2007.
- [6] KOLCUN, M, Chladný V, Varga L. *Počítačová analýza elektrizačnej sústavy*. Technická univerzita Košice: -, 2006. ISBN 80-8073-453-4.
- [7] KOŠTÁL, J. Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku. *Kompenzace elektrického jalového výkonu*. 2009, č. 03. DOI: 1210-0889.
- [8] ŽÁČEK, J. Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku. *Účinník v teorii a praxi*. 2004, č. 12, s. 4-6. DOI: 1210-0889.
- [9] HRADÍLEK, Z. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. Ostrava: Vydala VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008, 364 s. ISBN 978-80-7225-291-6.
- [10] Pravidla provozování distribučních soustav. In: *Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. 2011. Dostupné z: http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/regulations/PPDS_Dodatek_4_2011.pdf
- [11] Draka Kabely s.r.o. 2015. *Kabely pro vysoké napětí: 22-AXEKCY 12,7/22 (25)kV* [online]. [cit.2015-05-06]. Dostupné z: http://www.vodice-kabely.cz/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=211&cf_id=50