

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**

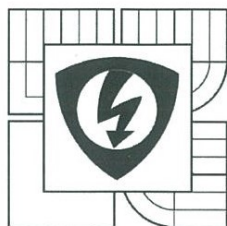
**USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY
V SÍTI 110 KV E.ON NAPÁJENÉ
Z TRANSFORMOVNY ČEBÍN**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

PETR KRUTIŠ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Petr Krutiš

Ročník: 2

ID: 134343

Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

**Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené
z transformovny Čebín**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV.
2. Teorie výpočtu zkratových poměrů v síti 110 kV.
3. Výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů v zadané síti 110 kV napájené z rozvodny 110 kV Čebín.
4. Vyhodnocení výpočtu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

dle pokynu vedoucího

Termín zadání: 9. 2. 2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Konzultanti diplomové práce:



doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

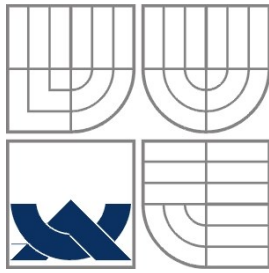
Bibliografická citace práce:

KRUTIŠ, P. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z transformovny Čebín*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 74 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc..

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

.....

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Petrovi Jandovi za konzultace a za poskytnutí podkladů pro vypracování diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat doc. Ing. Vladimírovi Blažkovi, CSc. za vstřícnost a podporu.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

**Ustálený chod a zkratové poměry
v síti 110 kV E.ON napájené
z transformovny Čebín**

Petr Krutiš

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

**Steady state and short-circuit
conditions in 110 kV E.ON network
fed from Čebín transformer station**

by

Petr Krutiš

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2015

Brno

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výpočtem ustáleného chodu a zkratových poměrů v uzlové oblasti 110 kV Čebín. V první části práce je teoretický popis výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů. Dále je popsána uzlová oblast 110 kV Čebín.

V praktické části práce jsou provedeny výpočty. Zkoumány jsou dva způsoby provozu transformátorů T401 a T402. V prvním případě pracují transformátory samostatně, ve druhém případě pracují paralelně. Na základě výpočtu jsou kontrolována napětí v rozvodnách, zatížení vedení a transformátorů v uzlové oblasti 110 kV Čebín, vyhodnoceny jsou ztráty činného výkonu a zkratové odolnosti rozveden. V závěru praktické části jsou porovnané výsledky z obou způsobů provozu.

KLÍČOVÁ SLOVA: Distribuční síť 110 kV; rozvodna 110 kV; ustálený chod; zkratové poměry; uzlová oblast Čebín.

ABSTRACT

Master's thesis deals with computation of steady state and short-circuit conditions in 110 kV nodal area of Čebín. The first part of thesis is theoretical. There is described computation of steady state and short-circuit conditions. There is description of 110 kV nodal area of Čebín too.

There are made computations in the practical part. Two types of operation of transformers T401 and T402 are evaluated. The transformers operate independent at first, then they are connected in parallel. Voltage conditions in substations, load of lines and transformers, power losses and short-circuit resistance of substations in 110 kV nodal area of Čebín are evaluated based on the computations. There are compared the both types of operation of transformers in the end of practical part.

KEY WORDS: 110 kV distribution network; 110 kV substation; steady state; short-circuit conditions; nodal area of Čebín.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	11
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	17
2 CÍL PRÁCE.....	18
3 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČR	19
3.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA	19
3.2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA.....	20
3.2.1 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA 110 kV	21
4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ 110 kV.....	23
4.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA	23
4.1.1 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU	25
4.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA.....	25
4.2.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	26
4.3 KLASIFIKACE UZLŮ SÍTĚ	30
5 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV	31
5.1 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU	31
5.2 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU.....	33
5.3 VÝPOČET ZKRATOVÝCH PROUDŮ	34
5.3.1 METODA EKVIVALENTNÍHO NAPĚŤOVÉHO ZDROJE	34
5.3.2 METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	35
6 POPIS SÍTĚ 110 kV E.ON NAPÁJENÉ Z TRANSFORMOVNY ČEBÍN	41
6.1 UZLOVÁ OBLAST 110 kV ČEBÍN.....	42
6.1.1 OBLAST NAPÁJENÁ Z TRANSFORMÁTORU T401	42
6.1.2 OBLAST NAPÁJENÁ Z TRANSFORMÁTORU T402	44
6.1.3 ZKRATOVÁ ODOLNOST ROZVODEN V UO ČEBÍN.....	46
7 TRANSFORMÁTORY T401 A T402 PRACUJÍCÍ SAMOSTATNĚ.....	48
7.1 USTÁLENÝ CHOD V UO 110 kV ČEBÍN	49
7.1.1 KONTROLA VELIKOSTI NAPĚTÍ V ROZVODNÁCH	49
7.1.2 KONTROLA PROUDOVÉHO ZATÍŽENÍ VEDENÍ.....	50
7.1.3 KONTROLA PROUDOVÉHO ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ	52
7.1.4 ZTRÁTY ČINNÉHO VÝKONU	54
7.2 ZKRATOVÉ POMĚRY V UO 110 kV ČEBÍN.....	56
8 TRANSFORMÁTORY T401 A T402 PRACUJÍCÍ PARALELNĚ	58
8.1 USTÁLENÝ CHOD V UO 110 kV ČEBÍN	59
8.1.1 KONTROLA VELIKOSTI NAPĚTÍ V ROZVODNÁCH.....	59

8.1.2 KONTROLA PROUDOVÉHO ZATÍŽENÍ VEDENÍ.....	60
8.1.3 KONTROLA PROUDOVÉHO ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	61
8.1.4 ZTRÁTY ČINNÉHO VÝKONU	62
8.1.5 ZKRATOVÉ POMĚRY V UO 110 kV ČEBÍN.....	63
9 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PŘI SAMOSTATNÉM A PARALELNÍM CHODU TRANSFORMÁTORŮ.....	65
9.1 USTÁLENÝ CHOD V UO 110 kV ČEBÍN.....	65
9.1.1 SROVNÁNÍ VELIKOSTI NAPĚTÍ V ROZVODNÁCH.....	65
9.1.2 SROVNÁNÍ PROUDOVÉHO ZATÍŽENÍ VEDENÍ.....	66
9.1.3 SROVNÁNÍ PROUDOVÉHO ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	67
9.1.4 SROVNÁNÍ ZTRÁT ČINNÉHO VÝKONU	68
9.2 ZKRATOVÉ POMĚRY V UO 110 kV ČEBÍN.....	69
10 ZÁVĚR.....	71
POUŽITÁ LITERATURA.....	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3- 1: Zjednodušené schéma elektrizační soustavy [3]</i>	19
<i>Obr. 3- 2: Schéma sítí 400 a 220 kV [8]</i>	20
<i>Obr. 3- 3: Rozdělení distribučních sítí v ČR [3]</i>	21
<i>Obr. 5- 1: Průběh zkratového proudu [3]</i>	32
<i>Obr. 5- 2: Rázová subtranzitní složka [3]</i>	32
<i>Obr. 5- 3: Přejídná tranzitní složka [3]</i>	33
<i>Obr. 5- 4: Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými [3]</i>	35
<i>Obr. 5- 5: Jednofázový zkrat ve fázi A [3]</i>	38
<i>Obr. 5- 6: Trojfázový zkrat [3]</i>	39
<i>Obr. 7- 1: Schéma UO 110 kV Čebín při samostatně pracujících transformátorech T401 a T402</i>	48
<i>Obr. 7- 2: Činný výkon a jeho ztráty v UO 110 kV Čebín při samostatně pracujících</i> <i>transformátorech T401 a T402</i>	55
<i>Obr. 8- 1: Schéma UO 110 kV Čebín při paralelně pracujících transformátorech T401 a T402</i> .	58
<i>Obr. 8- 2: Toky činného výkonu a jeho ztráty v UO 110 kV Čebín při paralelně pracujících</i> <i>transformátorech T401 a T402</i>	63
<i>Obr. 9- 1: Srovnání velikosti napětí v rozvodnách v UO 110 kV Čebín</i>	65
<i>Obr. 9- 2: Srovnání proudového zatížení vedení v UO 110 kV Čebín</i>	66
<i>Obr. 9- 3: Srovnání proudového zatížení transformátorů T401 a T402</i>	67
<i>Obr. 9- 4: Srovnání proudového zatížení transformátorů v UO 110 kV Čebín</i>	68
<i>Obr. 9- 5: Srovnání počátečních rázových zkratových výkonů při trojfázovém zkratu</i>	69
<i>Obr. 9- 6: Srovnání počátečních rázových zkratových výkonů při jednofázovém zkratu</i>	70

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3- 1: Délka vedení distribuční soustavy v ČR</i>	21
<i>Tab. 4- 1: Znaménka výkonů pro odběr a dodávku [1]</i>	25
<i>Tab. 6- 1: Nadřazené transformační stanice PS/110 kV napájející území E.ON Distribuce [11]</i>	41
<i>Tab. 6- 2: Zkratová odolnost rozvodů 110 kV v UO Čebín</i>	47
<i>Tab. 7- 1: Činné výkony přenášené vedením 400 kV v době výpočtu</i>	49
<i>Tab. 7- 2: Napětí v rozvodnách UO 110 kV Čebín napájených transformátorem T401</i>	49
<i>Tab. 7- 3: Napětí v rozvodnách UO 110 kV Čebín napájených transformátorem T402</i>	50
<i>Tab. 7- 4: Vypočtené hodnoty pro vedení 110 kV napájené transformátorem T401</i>	51
<i>Tab. 7- 5: Vypočtené hodnoty pro vedení 110 kV napájené transformátorem T402</i>	51
<i>Tab. 7- 6: Vypočtené hodnoty pro transformátory 400/110 kV pracujících samostatně</i>	52
<i>Tab. 7- 7: Vypočtené hodnoty pro transformátory v oblasti napájené transformátorem T401</i>	53
<i>Tab. 7- 8: Vypočtené hodnoty pro transformátory v oblasti napájené transformátorem T402</i>	53
<i>Tab. 7- 9: Dodávky činného výkonu do uzlové oblasti 110 kV Čebín</i>	54
<i>Tab. 7- 10: Ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín</i>	54
<i>Tab. 7- 11: Zkratové poměry v rozvodnách napájených transformátorem T401</i>	56
<i>Tab. 7- 12: Zkratové poměry v rozvodnách napájených transformátorem T402</i>	56
<i>Tab. 8- 1: Napětí v rozvodnách UO 110 kV Čebín napájených z transformátorů T401 a T402</i>	59
<i>Tab. 8- 2: Vypočtené hodnoty pro vedení 110 kV napájená z transformátorů T401 a T402</i>	60
<i>Tab. 8- 3: Vypočtené hodnoty pro transformátory 400/110 kV pracující paralelně</i>	61
<i>Tab. 8- 4: Vypočtené hodnoty pro transformátory v UO napájené z T401 a T402</i>	61
<i>Tab. 8- 5: Dodávky činného výkonu do UO 110 kV Čebín při paralelní spolupráci T401 a T402</i>	62
<i>Tab. 8- 6: Ztráty činného výkonu v UO 110 kV Čebín při paralelní spolupráci T401 a T402</i>	62
<i>Tab. 8- 7: Zkratové poměry v rozvodnách napájených z paralelně pracujících transformátorů T401 a T402</i>	64

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
E	modul napětí ekvivalentního zdroje	V
$\bar{E}_{(1)}, \bar{E}_{(2)}, \bar{E}_{(0)}$	sousledná, zpětná a netočivá složka napětí zdroje	V
\bar{I}	fázor proudu	A
\bar{I}^*	komplexně sdružený fázor proudu	A
$\bar{I}_{(1)}, \bar{I}_{(2)}, \bar{I}_{(0)}$	sousledná, zpětná a netočivá složka proudu	A
$\bar{I}_A, \bar{I}_B, \bar{I}_C$	fázory proudu ve fázích A, B, C	A
$\bar{I}_k^{//}$	fázor počátečního rázového zkratového proudu	A
$I_k^{//}$	počáteční rázový zkratový proud	A
$^{(1)}I_k^{//}$	počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu	A
$^{(2)}I_k^{//}$	počáteční rázový zkratový proud při dvoufázovém zkratu	A
$^{(3)}I_k^{//}$	počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu	A
I_k	ustálený zkratový proud	A
I_{ke}	ekvivalentní oteplovací proud	A
I_{km}	nárazový zkratový proud	A
I_{nT}	jmenovitý proud transformátoru	A
I_T	proud tekoucí přes transformátor	A
I_V	proud tekoucí vedením	A
I_{Vmax}	maximální dovolený proud vedení	A
I_{vyp}	souměrný zkratový vypínací proud	A
J	Jakobián	1
P	činný výkon	W
P_i	činný výkon dodávaný (odebíraný) v i-tém uzlu	W
P_T	činný výkon transformátoru	W
P_V	činný výkon přenášený vedením	W
Q	jalový výkon	VAr
Q_i	jalový výkon dodávaný (odebíraný) v i-tém uzlu	VAr
Q_T	jalový výkon transformátoru	VAr
Q_V	jalový výkon přenášený vedením	VAr

\bar{S}	fázor komplexního výkonu	VA
\bar{S}^*	komplexně sdružený fázor komplexního výkonu	VA
S	zdánlivý výkon	VA
$^{(1)}S_k^{//}$	počáteční rázový zkratový výkon při jednofázovém zkratu	VA
$^{(3)}S_k^{//}$	počáteční rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu	VA
$S_{k \max}^{//}$	zkratová odolnost rozvodny	VA
$T_k^{//}$	subtranzitní časová konstanta	s
$T_k^/$	tranzitní časová konstanta	s
\bar{U}	fázor napětí	V
\bar{U}^*	komplexně sdružený fázor napětí	V
U_n	jmenovité sdružené napětí	V
$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	fázory napětí fází A, B, C	V
$\bar{U}_{(1)}, \bar{U}_{(2)}, \bar{U}_{(0)}$	sousledná, zpětná a netočivá složka napětí	V
\bar{Y}	fázor admitance	S
$Z_{(1)}, Z_{(2)}, Z_{(0)}$	modul sousledné, zpětné a netočivé impedance	Ω
$\bar{Z}_{(1)}, \bar{Z}_{(2)}, \bar{Z}_{(0)}$	fázor sousledné, zpětné a netočivé složky impedance	Ω
\bar{a}	operátor natočení	1
c	napětřový součinitel	1
f	obecná funkce	1
$i_k^{//}(t)$	rázová subtranzitní složka zkratového proudu	A
$i_k^/ (t)$	přechodná tranzitní složka zkratového proudu	A
$i_k(t)$	ustálená složka zkratového proudu	A
$i_{d.c.}(t)$	stejnoseměrná složka zkratového proudu	A
i_T	poměrné proudové zatížení transformátoru	%
i_V	poměrné proudové zatížení vedení	%
j	imaginární jednotka	1
k_e	koeficient ekvivalentního oteplovacího proudu	1
n	počet uzlů	1
t	čas	s
x, y, ϕ	obecné proměnné	1

α	úhel natočení fázoru proudu	°
δ	úhel natočení fázoru napětí	°
κ	součinitel nárazového zkratového proudu	1
φ	fázový posun napětí a proudu	°
ω	úhlová rychlost	rad·s ⁻¹
ΔP_T	ztráty činného výkonu na transformátoru	W
ΔP_V	ztráty činného výkonu na vedení	W

Zkratka	Význam
AD	rozvodna Adamov
BK	rozvodna Blansko
BKD	rozvodna Blansko ČD
BNP	rozvodna Brno Příkop
BNT	rozvodna Teplárna Brno
BO	rozvodna Boskovice
BOB	rozvodna Bohunice
BYP	rozvodna Bystřice nad Pernštejnem
CML	rozvodna Červený mlýn
ČR	Česká republika
DS	distribuční soustava
ES	elektrizační soustava
HUV	rozvodna Husovice
KPO	rozvodna Královopolská Brno
KV	rozvodna Komárov
LI	rozvodna Líšeň
MEY	rozvodna Medlánky
MOB	rozvodna Brno Moravany
MZR	rozvodna Žďár nad Sázavou
NAO	rozvodna Náměšť nad Oslavou
OS	rozvodna Oslavany
PS	přenosová soustava
PTA	rozvodna Ptáčov
RIP	rozvodna Řípov
RON	rozvodna Dolní Rožinka

SHH	rozvodna Slévárna Horní Heršpice
UO	uzlová oblast
VBT	rozvodna Velká Bíteš
VMA	rozvodna Výtopna Maloměřice
VMZ	rozvodna Velké Meziříčí
VOP	rozvodna Velké Opatovice
vvv	velmi vysoké napětí

1 ÚVOD

Elektrická energie je nedílnou součástí života ve vyspělých zemích. Přestože od objevu prvního zdroje elektrického proudu uběhlo více než 200 let, nepodařilo se doposud uspokojivě vyřešit otázku skladování elektrické energie. Žádná možnost ukládání zatím není vhodná pro dlouhodobou a ekonomicky výhodnou akumulaci velkého množství elektřiny. Základní rovnicí elektroenergetiky proto je:

$$\text{výroba} = \text{spotřeba} \quad (1.1)$$

Veškerá vyrobená elektrická energie musí být spotřebována. Nástrojem k řešení této rovnice je elektrizační soustava, což je soubor vzájemně propojených zařízení, která se mimo jiné starají o výrobu elektřiny a její dopravu do místa spotřeby.

Rozvod elektrické energie z přenosové soustavy ke koncovým uživatelům zajišťuje distribuční síť, která je v České republice tvořena zařízeními s napětím 110 kV a nižším. Síť musí být navržena tak, aby byla zajištěna bezpečnost, hospodárnost a spolehlivost dodávky elektrické energie.

Při návrhu sítě se provádí kontrola správnosti volby prvků podle mnoha kritérií. Mezi nejdůležitější z nich patří dovolená odchylka napětí, oteplení vodičů provozním proudem a odolnost zařízení proti účinkům zkratových proudů. Z toho důvodu je nezbytná znalost tzv. ustáleného chodu. Síť je v ustáleném chodu, jsou-li všechny veličiny charakterizující její stav v rovnováze. Dojde-li k narušení ustáleného chodu, dochází k přechodnému stavu soustavy. Po utlumení přechodných jevů přechází soustava do nového ustáleného chodu. Nejčastějšími poruchami, které způsobují přechodný stav sítě, jsou zkraty.

2 CÍL PRÁCE

Hlavním úkolem práce je provedení výpočtu ustáleného stavu a zkratových poměrů v uzlové oblasti 110 kV napájené z rozvodny 110 kV Čebín. Elektrická energie je do uzlové oblasti dodávána z přenosové soustavy přes transformátory 400/110 kV. V transformovně Čebín jsou instalovány tři transformátory 400/110 kV s označením T401, T402 a T403. Při normálním stavu jsou v provozu transformátory T401 a T402. Transformátor T403 slouží jako záloha.

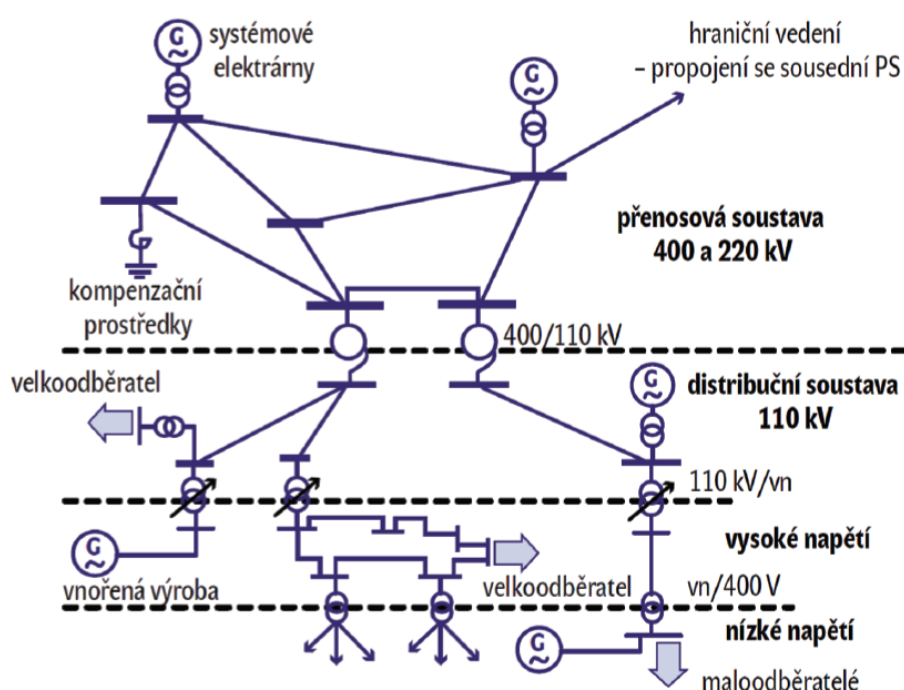
Práce se zabývá dvěma případy. Prvním z nich je samostatný provoz transformátorů T401 a T402, kdy každý transformátor je připojen na samostatnou přípojnici v rozvodně 110 kV Čebín, odkud jsou napájeny další rozvodny v uzlové oblasti. V druhém případě pracují transformátory T401 a T402 paralelně. Přípojnice v rozvodně 110 kV Čebín jsou propojeny a rozvodny v uzlové oblasti jsou napájeny z obou transformátorů zároveň.

Po výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v uzlové oblasti 110 kV Čebín, je provedena kontrola velikosti napětí v rozvodnách 110 kV, proudového zatížení vedení 110 kV a transformátorů, vyhodnoceny jsou ztráty činného výkonu a zkratová odolnost rozvoden 110 kV.

3 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA ČR

Základními prvky elektrizační soustavy jsou:

- výroby,
- přenosová soustava,
- distribuční soustava,
- spotřebiče,
- další zařízení sloužící k ovládání, měření, chránění a monitorování ES.



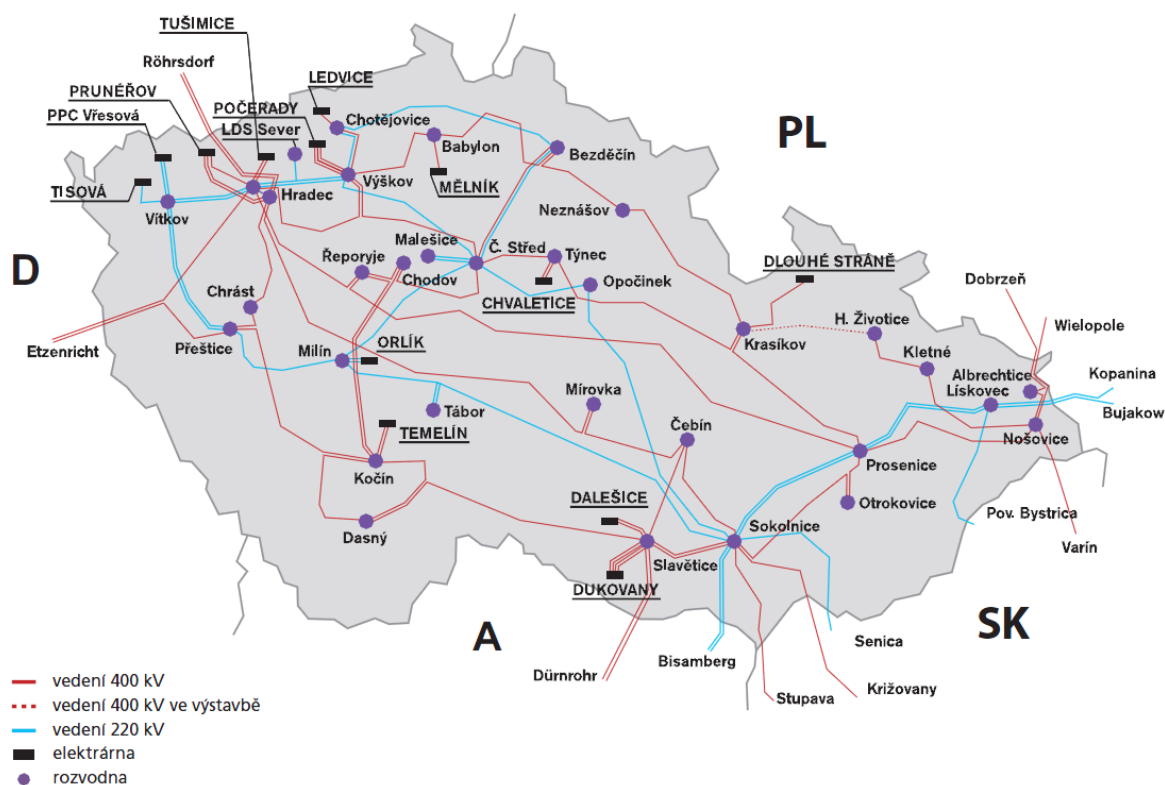
Obr. 3- 1: Zjednodušené schéma elektrizační soustavy [3]

3.1 Přenosová soustava

V České republice je instalovaný výkon elektráren 21 079 MW¹. Do přenosové soustavy jsou připojeny tzv. systémové elektrárny, které tvoří přibližně polovinu celkového instalovaného výkonu. Druhou polovinu tvoří tzv. vnořené zdroje, které jsou připojeny do distribuční soustavy. Systémové elektrárny jsou soustředěny do několika oblastí, ať už jde o naše dvě jaderné elektrárny, nebo o elektrárny v severních Čechách. Hlavním úkolem přenosové soustavy je přenesení výkonu z těchto oblastí do dalších částí České republiky, případně do zahraničí. Naše přenosová soustava je tvořena vedením o napětí 400 kV, 220 kV a část 110 kV, což umožňuje přenos na velké vzdálenosti s přijatelnými ztrátami. Na obrázku 3-2 je schéma sítí 400 a 220 kV

¹ Platí k 31.12.2013 viz [8].

spolu s elektrárnami, které jsou připojeny do přenosové soustavy. Autorem obrázku je akciová společnost ČEPS, která je zároveň jediným provozovatelem přenosové soustavy v České republice.



Obr. 3- 2: Schéma sítě 400 a 220 kV [8]

3.2 Distribuční soustava

K rozvodu elektrické energie z přenosové soustavy nebo z vnořených elektráren slouží distribuční soustava, která je tvořena napětovými hladinami 110 kV a nižšími. Distribuci ke koncovým zákazníkům, kterými jsou velkoodběratelé nebo maloodběratelé, zajišťují tři akciové společnosti (obr 3-3). Provozovatelem distribuční soustavy na jižní Moravě a v Jižních Čechách je E.ON Distribuce, a.s., zbylou část České republiky kromě Prahy provozuje ČEZ Distribuce, a.s. V Praze se o provoz distribuční soustavy stará PREdistribuce, a.s. V tabulce 3-1 jsou uvedeny délky vedení jednotlivých napětových hladin v distribuční soustavě. Porovnáme-li hodnoty s obvodem zeměkoule, který je 40 000 km, získáme představu o rozlehlosti distribuční sítě.

Tab. 3- 1: Délka vedení distribuční soustavy v ČR²

	ČEZ Distribuce	E.ON Distribuce	PREdistribuce
vedení vvn [km]	9782,0	3876,1	206,4
vedení vn [km]	50482,0	21745,0	3872,0
vedení nn [km]	100650,0	38837,1	7833,8



Obr. 3- 3: Rozdělení distribučních sítí v ČR [3]

3.2.1 Distribuční soustava 110 kV

V úvodní části jsme se seznámili s hlavními prvky, které tvoří elektrizační soustavu. Nyní se zaměříme pouze na distribuční soustavu 110 kV, která je předmětem této diplomové práce.

Na hladině velmi vysokého napětí 110 kV je v České republice provozováno 13 864,5 km vedení, které spadá do distribuční soustavy (viz tabulka 3-1), a 84 km vedení, které řadíme

² Hodnoty jsou převzaté z webových stránek provozovatelů distribučních soustav (www.cezdistribuce.cz, www.eon-distribuce.cz, www.predistribuce.cz). V tabulce jsou uvedeny celkové vzdálenosti venkovního a kabelového vedení. Detailnější informace jsou na zmíněných webech.

do přenosové soustavy [8]. Síť 110 kV slouží k přenosu elektrické energie do transformoven vysokého napětí. Distribuční soustava vvn může být napájena těmito způsoby:

- z přenosové soustavy transformátory 400/110 kV,
- z přenosové soustavy transformátory 220/110 kV,
- z přenosové soustavy vedením 110 kV,
- z vnořených zdrojů.

Ve většině distribučních soustav se síť 110 kV provozují jako samostatně pracující oblasti. Tyto oblasti lze rozdělit do dvou základních kategorií:

- uzlová oblast čistě spotřební,
- uzlová oblast převážně spotřební.

Do první kategorie patří oblasti, které jsou napájeny z přenosové soustavy. Zdroje pracující do oblastí jsou malé a příliš se nepodílejí na pokrytí spotřeby. Druhá kategorie jsou oblasti s významným zdrojem, který je napojen do uzlu 110 kV. Tento zdroj pokrývá velkou část spotřeby. Zbývající část odebíraného výkonu je hrazena z transformátoru PS/110 kV.

K transformaci napětí ze 400 kV na 110 kV se nejčastěji používají transformátory s instalovaným výkonem 250 MVA a 350 MVA. Pro transformaci 220/110 kV jsou to pak stroje s výkonem 200 MVA. Obvykle je samostatně pracující oblast napájena jedním transformátorem PS/110 kV, v ojedinělých případech dvěma nebo třemi transformátory. V optimálně dimenzovaných oblastech lze nahradit výpadek transformátoru PS/110 kV přivedením výkonu z jiné oblasti. V řadě případů to však provést nelze.

Distribuční síť 110 kV jsou v drtivé většině tvořeny venkovním vedením, jen velmi malou část tvoří vedení kabelové. Pro zajištění dodávky ze dvou nebo více stran je snaha provozovatelů konstruovat danou síť jako kruhovou. Při poruše pak není přerušena dodávka elektřiny. Venkovní vedení jsou nejčastěji v dvojitém provedení. Na našem území se také provozují vedení jednoduchá, trojitá a čtyřnásobná. Možnost vedení elektrické energie více cestami je důležité nejen při poruše, ale například i v zimních měsících, kdy se na vedení tvoří námraza. Postižené vedení se odpojí, na konci se zkratuje a vyhřívá se proudem dokud námraza neodpadne. Mezi tím je dodávka elektrické energie zajištěna jinou cestou. Nevýhodou kruhových sítí je jejich chránění. Jeho náročnost roste se složitostí sítě.

4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ 110 kV

Pro určení správnosti chodu a návrhu sítě nás zajímá její ustálený stav. Síť je v ustáleném stavu, pokud v ní neprobíhají krátkodobé přechodné děje. Kdybychom šli do detailů, zjistili bychom, že ustálený stav v síti prakticky nenastává vůbec. Je to vlivem změny zatížení spotřebitelů, ale i zdrojů. Tyto změny jsou však pomalé, a proto se neuvažují.

Při výpočtu ustáleného chodu elektrizační soustavy určujeme rozdělení činných a jalových výkonů, ztráty na prvcích soustavy, úroveň napětí v jednotlivých uzlech, maximální možnou zatížitelnost prvků sítě a maximální přenášený výkon při zachování stability soustavy. Řešením ustáleného chodu zjistíme [7]:

- možnost přenosu vypočítaných výkonů od zdrojů až k spotřebitelům,
- napětí v jednotlivých uzlech je v dovolených mezích (pro 110 kV je dovolené $\pm 10\%$),
- dovolené hodnoty proudů protékající přes jednotlivé prvky.

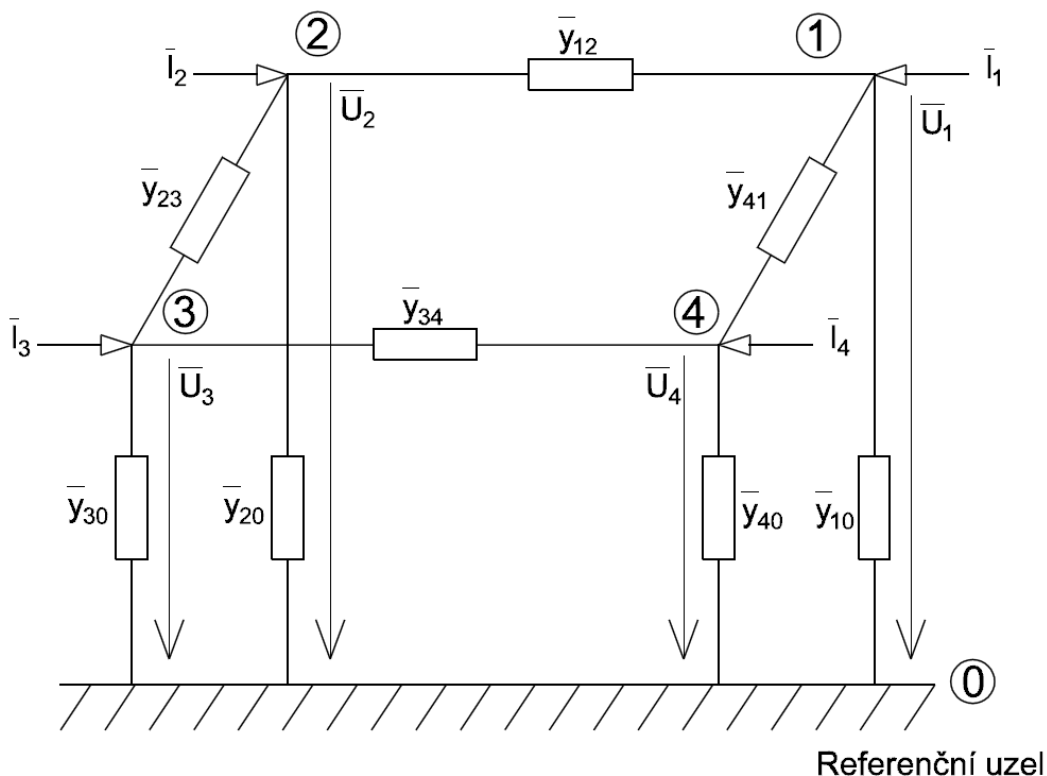
Výpočet ustáleného chodu je důležitý nejen pro řízení provozu, ale i pro navrhování dalšího rozvoje elektrizační soustavy, řešení přechodných dějů a řady optimalizačních úloh, mezi které patří hospodárné rozdělování výroby, regulace napětí nebo hodnocení spolehlivosti elektrizační soustavy.

V praxi jsou odběry a dodávky zadávány činnými a jalovými výkony. Proto nemůžeme popsat chod sítě soustavou lineárních rovnic, ale musíme řešit soustavu nelineárních rovnic. Využitím některé z iteračních metod dojdeme k výsledkům. V zásadě používáme dvě iterační metody. První je Gauss-Seidelova metoda, která má poměrně krátkou dobu výpočtu a jednoduchý algoritmus výpočtu, ale u málo zauzlených sítí pomale konverguje. Druhou iterační metodou je Newtonova, kterou se budeme podrobněji zabývat v dalších kapitolách.

Úlohu lze v některých případech linearizovat. Jsou to zejména výpočty, kde není nutná velká přesnost. Příkladem může být dlouhodobé plánování rozvoje elektrizační soustavy nebo výpočty spolehlivosti.

4.1 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Předpokladem pro výpočet ustáleného chodu jako lineární úlohy je zadání odebíraných a dodávaných proudů do uzlů sítě. Prvky elektrizační soustavy jsou určeny jejich podélnými a příčnými admitancemi. Vedení se nahrazují Π články, transformátory Γ nebo Π články. Předpokládáme, že všechny parametry jsou přepočítány na jedno vztažné napětí. Příčné admitance jsou mezi příslušným uzlem sítě a uzlem referenčním o nulovém potenciálu, kterým je „zem“.



Obr. 4- 1: Náhradní schéma [1]

Pomocí metody uzlových napětí lze síť na obr. 4-1 matematicky popsat:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

kde $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3, \bar{U}_4$ jsou neznámá uzlová napětí a $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$ jsou zadané uzlové proudy, u nichž rozlišujeme dodávky a odběry. Dodávané proudy jsou s kladným znaménkem, odběrové proudy se záporným znaménkem.

Prvky admítanční matice jsou sestaveny podle druhého Kirchhoffova zákona:

- i -tý diagonální prvek \bar{Y}_{ii} je součtem admítancí všech větví končících v i -tém uzlu,
- mimodiagonální prvek \bar{Y}_{ij} je záporně vzatým součtem admítancí všech větví spojujících i -tý uzel s j -tým uzlem.

Pokud v síti neuvažujeme příčné admittance, bude admítanční matice singulární a daná soustava rovnic bude závislá. Eliminací bilančního uzlu závislost odstraníme.

4.1.1 Eliminace bilančního uzlu

Bilančním uzlem rozumíme ten uzel, který hradí neznámé proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnává bilanci mezi dodávkami a odběry. Proud \bar{I}_1 v bilančním uzlu neznáme. Aby v soustavě rovnic (4.1) byl stejný počet neznámých a rovnic, je potřeba zadat napětí v bilančním uzlu. Pro jednoduchost a přehlednost se tento uzel značí číslem 1.

Díky znalosti napětí \bar{U}_1 v bilančním uzlu můžeme soustavu rovnic (4.1) přepsat do tvaru:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{21} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{31} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{41} \cdot \bar{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Vypuštěním rovnice pro bilanční uzel jsme eliminovali bilanční uzel. Soustavu rovnic lze řešit iteračními metodami nebo eliminační metodou. Výpočtem získáme neznámá uzlová napětí, následně určíme rozdělení proudů ve větvích náhradního schématu a poté i neznámý proud \bar{I}_1 v bilančním uzlu.

4.2 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

V praxi nebývají odběry a dodávky v uzlech sítě zadávány pomocí proudů, ale bývají zadány činné a jalové výkony, které jsou do uzlu dodávány, nebo z uzlu odebírány. Výpočet ustáleného chodu sítě vede na soustavu lineárních rovnic. Pro i -tý uzel platí:

$$\bar{S}_i = P_i + j \cdot Q_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (4.3)$$

kde \bar{I}_i^* je komplexně sdružený proud k proudu \bar{I}_i . Opět je potřeba rozlišovat znaménka pro odběr a dodávku (tab. 4-1).

Tab. 4- 1: Znaménka výkonů pro odběr a dodávku [1]

Fázový posun napětí a proudu	Zdroj $P > 0$	Odběr $P < 0$
induktivní $\varphi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
kapacitní $\varphi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$

Je-li v uzlu zdroj, činný výkon se do uzlu dodává. Pokud uvažujeme výrobu činného a jalového výkonu (proudu) s induktivním fázovým posunem, pak pro dodávaný zdánlivý výkon do uzlu sítě platí:

$$\begin{aligned} \bar{S} &= P + j \cdot Q = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = (U \angle \delta) \cdot (I \angle -\alpha) = U \cdot I \angle (\delta - \alpha) = U \cdot I \angle \varphi \\ \bar{S} &= S \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) \end{aligned} \quad (4.4)$$

kde φ značí fázový posun napětí a proudu. Je-li proud zpožděn za napětím, potom je $\varphi > 0$, $P > 0$ a $Q > 0$.

Vyjádřením proudu z rovnic (4.2) a (4.3) získáme:

$$\bar{I}_i = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - j \cdot Q_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4.5)$$

Protože jsou zadány výkony v uzlech sítě, napětí bilančního uzlu a admitance \bar{Y}_{ij} , vede výpočet neznámých napětí k řešení soustavy lineárních rovnic. Pomocí Newtonovy iterační metody vypočítáme uzlová napětí a následně toky výkonů v síti a výkonové ztráty.

4.2.1 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Řešíme soustavu nelineárních rovnic ve tvaru:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (4.6)$$

Pro nultou iteraci provedeme odhad kořenů $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Odhad kořenů se liší od přesných hodnot o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Přesná hodnota kořenů je tedy:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1^{(0)} + \Delta x_1 \\ x_2 &= x_2^{(0)} + \Delta x_2 \\ &\vdots \\ x_n &= x_n^{(0)} + \Delta x_n \end{aligned} \quad (4.7)$$

Soustavu rovnic (4.6) poté můžeme přepsat do tvaru:

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (4.8)$$

Rozepsáním 1. rovnice (obdobně platí pro ostatní) v Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$ získáme:

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi_1 = y_1 \quad (4.9)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ a ϕ_1 reprezentuje členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ a druhé a vyšší derivace funkce f_1 . Člen ϕ_1 můžeme zanedbat, protože pro odhady kořenů blízké přesné hodnotě se blíží nule.

Výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ si označíme jako $y_1^{(0)}$. Potom rovnice (4.9) bude mít tvar:

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \quad (4.10)$$

kde $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$, kterou získáme dosažením odhadu kořenů do rovnice (4.9).

Provedeme-li obdobné kroky i pro zbývající rovnice z (4.8), získáme soustavu lineárních rovnic pro výpočet diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$:

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Soustavu můžeme zapsat i v následujícím maticovém tvaru:

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (4.12)$$

kde $[J]$ představuje matici parciálních derivací a nazývá se Jakobíán.

Ze soustavy rovnic (4.11) určíme vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určíme kořeny první iterace:

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.13)$$

kteří použijeme pro výpočet v druhé iteraci. Obecně lze iterační proces vyjádřit rovnicemi:

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}] \quad (4.14)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \quad (4.15)$$

kde horní index v závorce určuje, o kolikátou iteraci se jedná.

Nyní se vrátíme k rovnici (4.5), která popisuje ustálený chod sítě. Rovnice přepíšeme do tvaru:

$$P_i - j \cdot Q_i = \bar{U}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4.16)$$

Vektory napětí a admitancí si vyjádříme v polárním tvaru, potom dostáváme:

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}), \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4.17)$$

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

kde δ značí úhel napětí a α je úhel admitance. Při odvozování jsme využili vztahy pro goniometrické funkce:

$$\cos(-x) = \cos x \quad (4.18)$$

$$\sin(-x) = -\sin x$$

Získali jsme soustavu rovnic pro neznámá napětí a jejich úhly. Uvažujeme, že ve všech uzlech jsou zadané dodávané nebo odebírané činné a jalové výkony. V bilančním uzlu máme zadáno napětí U_1 s úhlem δ_1 , který obvykle bývá 0° .

Pro iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ podle soustavy (4.11) a s využitím rovnic (4.17) dostaneme soustavu:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Zkrácený a přehlednější zápis matic je:

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

V soustavě značí ΔU diferenci odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnic (2.17). Nejedná se tedy o úbytek napětí.

Derivováním rovnic (4.17) podle jednotlivých proměnných vypočítáme prvky Jacobiánu.

1. Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right]$:

- diagonální prvky $i = j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.21)$$

- mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.22)$$

2. Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]$:

- diagonální prvky $i = j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.23)$$

- mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.24)$$

3. Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right]$:

- diagonální prvky $i = j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.25)$$

- mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.26)$$

4. Výpočet prvků matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right]$:

- diagonální prvky $i = j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.27)$$

- mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.28)$$

4.3 Klasifikace uzlů sítě

Ustálený chod jednoznačně určují čtyři uzlové veličiny:

- absolutní hodnota napětí U ,
- úhel napětí δ ,
- činný výkon P ,
- jalový výkon Q .

Podle zadaných uzlových veličin dělíme uzly do tří základních tříd:

- bilanční uzel,
- regulační uzel,
- uzly se zdroji nebo odběrové uzly.

Bilanční uzel značíme číslem 1. Známe v něm napětí a jeho úhel. Bilanční uzel má hradit případnou nerovnováhu v bilanci uzlových výkonů a ztráty v síti. V regulačních uzlech je zadaný činný výkon a absolutní hodnota napětí. Úkolem tohoto uzlu je udržet zadanou hodnotu napětí pomocí dodávaného nebo odebíraného jalového výkonu. Uzly se zadaným činným výkonem mohou být buď uzly se zdroji nebo odběrové uzly. Hledanými veličinami těchto uzlů je napětí a jeho úhel.

5 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV

Soustava je v ustáleném chodu, jsou-li všechny veličiny charakterizující její stav v rovnováze. Při narušení ustáleného chodu dochází k přechodnému stavu soustavy. Po utlumení přechodných jevů přechází soustava do nového ustáleného chodu. Přechodné děje rozdělujeme na:

- pomalé,
- středně rychlé,
- rychlé.

Mezi pomalé přechodné děje patří změny zatížení a výkonů zdrojů, nebo změny zatížení spotřebitelů. Jedná se o přechodné děje elektromechanické. Druhou skupinou jsou středně rychlé děje. Jsou to elektromagnetické děje, které jsou způsobeny zkratovou poruchou. Rychlé přechodné děje jsou způsobeny úderem blesku. Nejrozšířenějšími poruchami v elektrizační soustavě jsou zkrat.

Jedna z definic zkratu říká, že se jedná o „náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“ [10]. Zkratové proudy tekoucí obvodem jsou obvykle několikanásobkem běžných provozních proudů. Zkrat se projevuje především těmito efekty:

- tepelné působení,
- mechanické působení,
- pokles napětí,
- indukované napětí do jiných zařízení,
- přepětí v souvislosti s vypínáním zkratových proudů,
- vznik elektrického oblouku u nedokonalých zkratů.

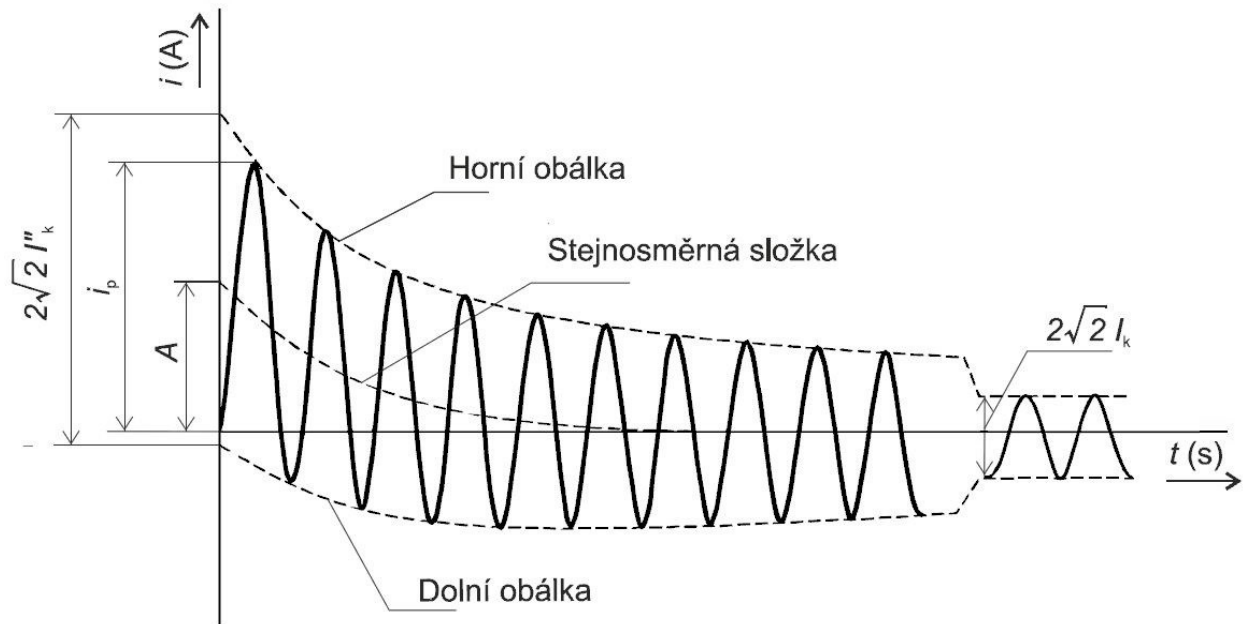
Podle způsobu zatěžování třífázových zdrojů dělíme zkrat na:

- souměrné,
- nesouměrné.

Mezi souměrné patří trojfázový zkrat, který nastává při spojení všech tří fází. Dvoufázový zkrat, dvoufázový zemní zkrat a jednofázový zkrat patří do kategorie nesouměrných zkratů.

5.1 Průběh zkratového proudu

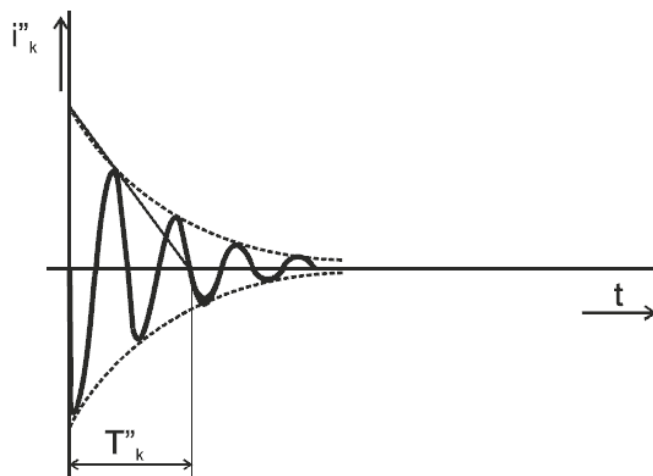
Náhlá změna impedance obvodu při zkratu vyvolá přechodný děj v prvcích elektrizační soustavy. Zkratový proud má nejvyšší hodnoty v prvních okamžicích vzniku poruchy. S časem postupně klesá, až se ustálí na harmonickém průběhu, jak můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 5- 1: Průběh zkratového proudu [3]

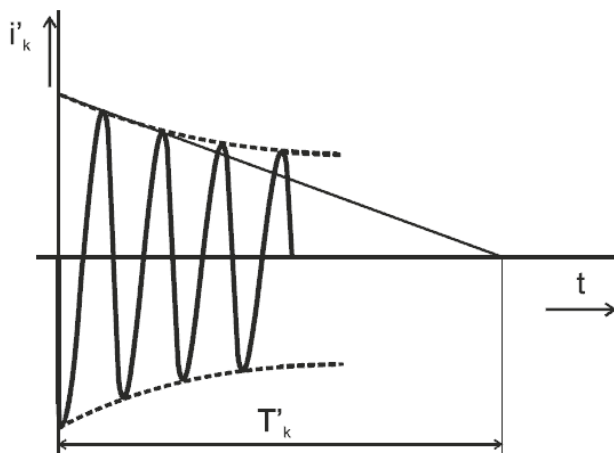
Reálný časový průběh zkratového proudu tvoří [3]:

- rázová subtranzitní složka $i_k''(t)$,
- přechodná tranzitní složka $i_k'(t)$,
- ustálená složka $i_k(t)$,
- stejnosměrná (aperiodická) složka $i_{d.c.}(t)$.



Obr. 5- 2: Rázová subtranzitní složka [3]

Rázová složka zkratového proudu má sinusový průběh s frekvencí soustavy. Projevuje se zejména na začátku zkratu, ale poté rychle doznívá. Její amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k'' . Průběh rázové subtranzitní složky je na obr. 5-2.



Obr. 5- 3: Přechodná tranzitní složka [3]

Přechodná tranzitní složka má sinusový průběh o kmitočtu soustavy. Doba zániku je delší než u rázové složky. Amplituda tranzitní složky klesá s časovou konstantou T_k' . Průběh tranzitní složky je na obr. 5-3.

Ustálená složka má sinusový průběh, frekvenci soustavy a konstantní amplitudu. Stejnoseměrná složka je exponenciálně klesající stejnosměrný proud, jak je vidět na obr. 5-1.

5.2 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Charakteristické hodnoty jsou důležité zejména pro dimenzování elektrických zařízení a pro chránění. Není potřeba znát celý časový průběh zkratového proudu. Mezi charakteristické hodnoty patří:

- počáteční rázový zkratový proud I_k'' - efektivní hodnota souměrného střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratového proudu;
- nárazový zkratový proud I_{km} - maximální vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává v prvním maximu zkratového proudu;
- souměrný zkratový vypínací proud I_{vyp} - efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vypnutí zkratu;
- ustálený zkratový proud I_k - efektivní hodnota souměrného zkratového proudu po odeznění přechodných jevů;
- ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{ke} - fiktivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky jako skutečný zkratový proud.

Nárazový zkratový proud I_{km} slouží ke kontrole silových účinků zkratového proudu, které jsou největší právě v prvním maximu zkratového proudu. V praxi se nárazový zkratový proud I_{km} určuje pomocí počátečního rázového zkratového proudu I_k'' podle vzorce:

$$I_{km} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (5.1)$$

kde κ je součinitel nárazového zkratového proudu.

Pro kontrolu tepelných účinků zkratových proudů slouží ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} , který rovněž získáme z počátečního rázového zkratového proudu I_k'' a pomocí koeficientu k_e :

$$I_{ke} = k_e \cdot I_k'' \quad (5.2)$$

5.3 Výpočet zkratových proudů

Pro výpočet parametrů zkratových proudů se vypracovalo několik postupů, které jsou více či méně zjednodušené. Pro výpočet nesouměrných zkratů se používá metoda rozkladu do souměrných složkových soustav (sousedné, zpětné a netočivé). Při standardních výpočtech podle norem se používá metoda ekvivalentního napěťového zdroje. Obě metody si blíže rozebereme v následujících kapitolách.

5.3.1 Metoda ekvivalentního napěťového zdroje

Metoda je založena na úvaze, že v soustavě je pouze jeden zdroj napětí situovaný v místě zkratu. Ostatní prvky jsou nahrazeny svými zkratovými impedancemi. Tento zdroj se nazývá ekvivalentní. Jeho napětí je odvozeno ze jmenovitého napětí sítě v místě zkratu U_n :

$$E = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.3)$$

Za U_n se dosazuje sdružená hodnota. Ve vzorci vystupuje veličina c , která se nazývá napěťový součinitel. Podle [10] je součinitel používán kvůli kolísání napětí v závislosti na čase a místě, přepínání odboček transformátoru, zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí a chování generátorů a motorů při přechodném ději. V normě jsou doporučené hodnoty napěťového součinitele 1,05 a 1,10.

Při výpočtu se nejdříve určí zkratové impedance jednotlivých prvků sítě. Výpočet lze provést v poměrných nebo skutečných hodnotách. Při výpočtu ve skutečných hodnotách si musíme dát pozor, aby všechny impedance byly přepočteny na vztažnou napěťovou hladinu. Ta se obvykle volí podle místa zkratu. Z vypočtených impedancí se sestaví náhradní schéma. Pro trojfázový zkrat je schéma sestaveno jen ze sousledných složek. Při nesymetrických zkratech se uplatňuje navíc zpětná a netočivá složka. Náhradní schéma se zjednoduší na výslednou zkratovou impedanci. Na závěr se vypočte počáteční rázový zkratový proud I_k'' .

Norma [10] udává pro trojfázový zkrat vzorec:

$${}^{(3)}I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{(1)}} \quad (5.4)$$

kde $Z_{(1)}$ je modul výsledné sousledné impedance.

Pro jednofázový zkrat platí [10]:

$${}^{(1)}I_k'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}} \quad (5.5)$$

kde $Z_{(2)}$ je modul výsledné zpětné impedance a $Z_{(0)}$ je modul výsledné netočivé impedance.

Pro dvoufázový zkrat platí [10]:

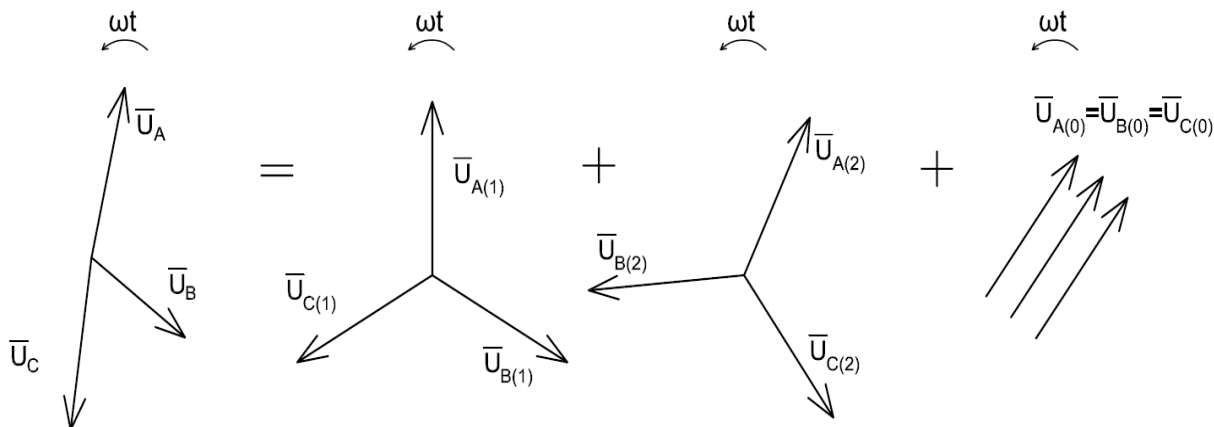
$${}^{(2)}I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{Z_{(1)} + Z_{(2)}} \quad (5.6)$$

Při dvoufázovém zemním zkratu je potřeba rozlišovat proudy tekoucí v poškozených fázích a proud tekoucí zemí (viz [10]).

Pro elektricky vzdálený zkrat platí $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$. Elektricky vzdáleným zkratem rozumíme takový zkrat, který je dostatečně elektricky vzdálený od zdrojů zkratového proudu, jakými jsou synchronní stroje, nebo pokud je podíl asynchronních motorů na počátečním zkratovém proudu zanedbatelný (do 5 %) [6].

5.3.2 Metoda souměrných složek

Každou nesymetrickou trojici fázorů lze nahradit složením symetrických fázorů sousledné, zpětné a netočivé soustavy (obr. 5-4).



Obr. 5- 4: Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými [3]

Pro nesymetrické fázory platí:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{A(1)} + \bar{U}_{A(2)} + \bar{U}_{A(0)} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{B(1)} + \bar{U}_{B(2)} + \bar{U}_{B(0)} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{C(1)} + \bar{U}_{C(2)} + \bar{U}_{C(0)}\end{aligned}\quad (5.7)$$

Fázory napětí ve fázích A, B, C vyjádříme v soustavě souměrných složek, pokud jako referenční fázi uvažujeme fázi A:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^{-2} \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\quad (5.8)$$

Pro proudy v jednotlivých fázích platí obdobné vztahy:

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} \\ \bar{I}_B &= \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} \\ \bar{I}_C &= \bar{a} \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)}\end{aligned}\quad (5.9)$$

Indexy (1), (2) a (0) reprezentují souslednou, zpětnou a netočivou složku. Pro operátory natočení platí:

$$\begin{aligned}\bar{a} &= 1 \angle 120^\circ \\ \bar{a}^{-2} &= 1 \angle -120^\circ \\ \bar{a}^{-3} &= 1 \\ 1 + \bar{a} + \bar{a}^{-2} &= 0\end{aligned}\quad (5.10)$$

Chceme-li vyjádřit fázory souměrných složek napětí pomocí fázorů napětí jednotlivých fází, použijeme následující rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a} \cdot \bar{U}_B + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{U}_B + \bar{a} \cdot \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C)\end{aligned}\quad (5.11)$$

Pro proudy platí obdobně:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + \bar{a} \cdot \bar{I}_B + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_C) \\ \bar{I}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_B + \bar{a} \cdot \bar{I}_C) \\ \bar{I}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C)\end{aligned}\tag{5.12}$$

Mějme symetrickou trojfázovou soustavu s alternátorem [2]. Souměrné složky vnitřního napětí alternátoru si označíme $\bar{E}_{(1)}$, $\bar{E}_{(2)}$, $\bar{E}_{(0)}$, souměrné složky napětí v místě zkratu $\bar{U}_{(1)}$, $\bar{U}_{(2)}$, $\bar{U}_{(0)}$, složkové proudy $\bar{I}_{(1)}$, $\bar{I}_{(2)}$, $\bar{I}_{(0)}$ a složkové impedance $\bar{Z}_{(1)}$, $\bar{Z}_{(2)}$, $\bar{Z}_{(0)}$. Potom platí rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{(1)} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{I}_{(1)} \\ \bar{E}_{(2)} &= \bar{U}_{(2)} + \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(2)} \\ \bar{E}_{(0)} &= \bar{U}_{(0)} + \bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(0)}\end{aligned}\tag{5.13}$$

Alternátor je zdrojem pouze sousledné složky napětí, proto rovnice (5.13) mají tvar:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{(1)} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{I}_{(1)} \\ 0 &= \bar{U}_{(2)} + \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(2)} \\ 0 &= \bar{U}_{(0)} + \bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(0)}\end{aligned}\tag{5.14}$$

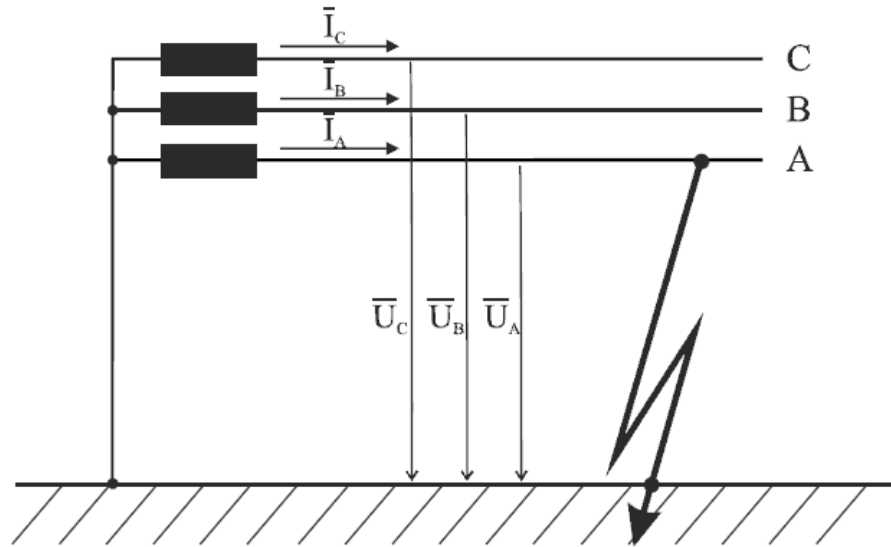
Při výpočtu zkratu určujeme složkové proudy a souměrné složky napětí v místě zkratu, celkem se jedná o 6 neznámých. Proto musíme rovnice (5.14) doplnit o další tři rovnice podle uvažovaného zkratu.

Metoda souměrných složek se využívá zejména pro výpočet nesouměrných zkratů [6]. Nejčastějším nesouměrným zkratem je zkrat jednofázový. Podle [2] je pravděpodobnost jeho výskytu u sítí 110 kV až 91 %. Daleko méně pravděpodobný je výskyt trojfázového zkratu, při kterém na rozdíl od jednofázového zkratu dochází k mechanickým účinkům zkratového proudu. V následující kapitole si tedy ukážeme obecný výpočet jednofázového a trojfázového zkratu pomocí metody souměrných složek. Výpočty dalších druhů nesouměrných zkratů lze najít např. v [3].

5.3.2.1 Výpočet jednofázového zkratu

Uvažujme, že soustava byla před poruchou ve stavu naprázdno. Zkrat nastal ve fázi A. Pro situaci na obr. 5-5 platí následující rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= 0 \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_C = 0\end{aligned}\tag{5.15}$$



Obr. 5- 5: Jednofázový zkrat ve fázi A [3]

Když rovnice (5.15) dosadíme do (5.8) a (5.9), získáme:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = 0 \\ \bar{I}_B &= \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} = 0 \\ \bar{I}_C &= \bar{a} \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} = 0\end{aligned}\tag{5.16}$$

Odečtením posledních dvou rovnic dojdeme na tvar:

$$\left(\bar{a} - \bar{a}^2\right) \cdot \bar{I}_{(1)} + \left(\bar{a}^2 - \bar{a}\right) \cdot \bar{I}_{(2)} = 0\tag{5.17}$$

z kterého vyplývá:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)}\tag{5.18}$$

Dosazením do rovnice (5.9) vyjde:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)}\tag{5.19}$$

Rovnice (5.14) přejdou na tvar:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{(1)} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{Z}_{(1)} \cdot \bar{I}_{(1)} \\ 0 &= \bar{U}_{(2)} + \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(1)} \\ 0 &= \bar{U}_{(0)} + \bar{Z}_{(0)} \cdot \bar{I}_{(1)}\end{aligned}\tag{5.20}$$

Jejich sečtením a využitím rovnice (5.16) dostáváme vztah:

$$\bar{E}_{(1)} = \left(\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}\right) \cdot \bar{I}_{(1)}\tag{5.21}$$

odkud:

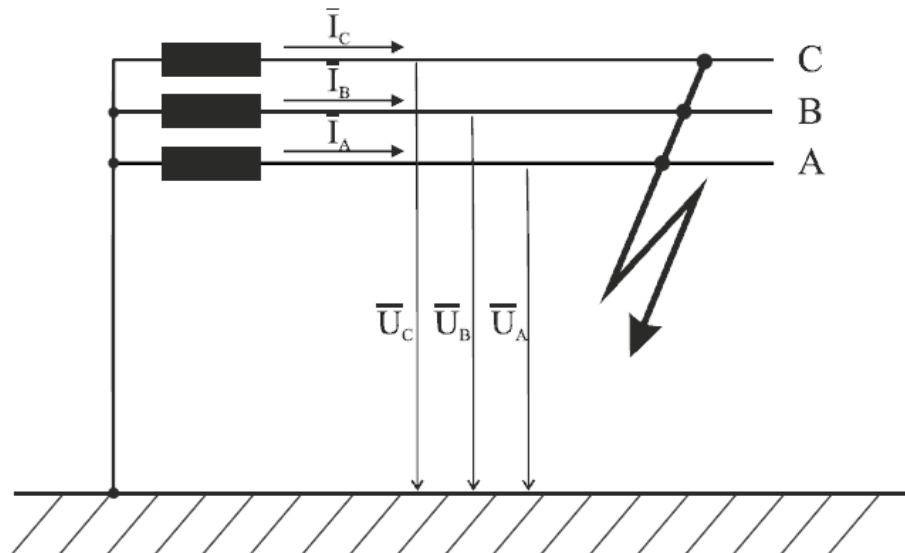
$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{\bar{E}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \quad (5.22)$$

Výsledný zkratový proud ve fázi A bude:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} = \frac{3 \cdot \bar{E}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \quad (5.23)$$

5.3.2.2 Výpočet trojfázového zkratu

Opět uvažujeme, že soustava byla před poruchou ve stavu naprázdno. Situace je znázorněna na obr. 5-6.



Obr. 5- 6: Trojfázový zkrat [3]

Napětí v místě zkratu jsou nulová:

$$\bar{U}_A = \bar{U}_B = \bar{U}_C = 0 \quad (5.24)$$

Rovnice (5.8) potom mají tvar:

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = 0 \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = 0 \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = 0 \end{aligned} \quad (5.25)$$

Z těchto rovnic vypočítáme složková napětí:

$$\bar{U}_{(0)} = \bar{U}_{(1)} = \bar{U}_{(2)} = 0 \quad (5.26)$$

Dosazením do rovnic (5.14) dostaneme:

$$\begin{aligned}\bar{I}_{(1)} &= \frac{\bar{E}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)}} \\ \bar{I}_{(0)} &= \bar{I}_{(2)} = 0\end{aligned}\tag{5.27}$$

Nyní můžeme z rovnice (5.9) vypočítat proudy v jednotlivých fázích:

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \frac{\bar{E}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)}} \\ \bar{I}_B &= a^{-2} \cdot \frac{\bar{E}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)}} \\ \bar{I}_C &= a \cdot \frac{\bar{E}_{(1)}}{\bar{Z}_{(1)}}\end{aligned}\tag{5.28}$$

6 POPIS SÍTĚ 110 kV E.ON NAPÁJENÉ Z TRANSFORMOVNY ČEBÍN

E.ON Distribuce je jednou ze tří akciových společností, které zajišťují distribuci elektrické energie na území České republiky. E.ON Distribuce provozuje distribuční síť na jižní Moravě a v jižních Čechách. Jedná se o napěťové hladiny velmi vysokého napětí (110 kV), vysokého napětí (22 kV) a nízkého napětí (0,4 kV).

Distribuční síť ve správě E.ON Distribuce je napájena ze závodních elektráren a výroben, nebo z dalších lokálních zdrojů na jihu Moravy a Čech, ale zejména z přenosové soustavy. Jediným provozovatelem přenosové soustavy v České republice je akciová společnost ČEPS, která je zároveň majitelem nadřazených transformačních stanic PS/110 kV.

Tab. 6- 1: Nadřazené transformační stanice PS/110 kV napájející území E.ON Distribuce [11]

Transformační stanice	Transformace [kV]	Počet transformátorů [-]
Čebín	400/110	3
Otrokovice	400/110	3
Slavětice	400/110	2
Sokolnice	400/220/110	4
Dasný	400/110	2
Kočín	400/110	2
Tábor	220/110	1

V tabulce 6-1 jsou uvedeny transformační stanice, které zajišťují napájení zásobovacího území E.ON Distribuce. V transformační stanici Čebín jsou instalovány 3 transformátory 400/110 kV, z nichž dva transformátory mají výkon 350 MVA a jeden má výkon 250 MVA. Obdobná situace je v Otrokovicích. Ve Slavěticích jsou dva transformátory s výkonem 250 MVA. V transformační stanici Sokolnice je jeden transformátor s převodem 400/220 kV o výkonu 400 MVA, jeden transformátor s převodem 400/110 kV o výkonu 350 MVA a dva transformátory s převodem 220/110 kV každý s výkonem 200 MVA. V Dasném jsou instalovány dva transformátory s výkonem 250 MVA, stejně tak v Kočíně. V Táboře je jeden transformátor 220/110 kV s výkonem 200 MVA. V tabulce není uvedena transformační stanice Mírovka, která leží mimo území E.ON Distribuce, ale jsou zde vyčleněny dva transformátory pro jeho zásobování. Oba transformátory mají převod 400/110 kV a výkon 250 MVA.

Oblast E.ON Distribuce je rozdělena na dvě části (obr. 3-3). V oblasti východ je síť 110 kV provozována v devíti (v zimním období v jedenácti) oddělených systémech, které jsou napájeny jednotlivými transformátory 400/110 kV nebo 220/110 kV. V oblasti západ je napájení zajištěno převážně transformátory 400/110 kV zapojenými paralelně [11]. Do východní oblasti spadají nadřazené transformační stanice Čebín, Otrokovice, Slavětice a Sokolnice. Do východní oblasti patří transformační stanice Dasný, Kočín a Tábor.

6.1 Uzlová oblast 110 kV Čebín

Na obr. 3-2 můžeme vidět, že transformovna Čebín je na přenosovou soustavu napojena třemi vedeními 400 kV. Vedení propojující Čebín a Mírovku má číslo 422, vedení vedoucí do Sokolnic má číslo 423 a vedení přicházející ze Slavetic má číslo 434.

Napětí 400 kV je následně transformováno na 110 kV. K tomu slouží 3 transformátory 400/110 kV, které jsou v Čebíně instalovány. Transformátory s označením T401 a T402 mají výkon 350 MVA, transformátor T403 má výkon 250 MVA. Transformátory T401 a T402 jsou provozovány samostatně a pracují během celého roku. Transformátor T403 je záložní.

Rozvodna 110 kV Čebín je vybavena trojitým systémem přípojnic. Při normálním provozu je transformátor T401 připojen na přípojnicí A, z které jsou dále napájeny rozvodny Medlanky (MEY), Červený mlýn (CML), Brno Příkop (BNP), Teplárna Brno (BNT), Bohunice (BOB), Brno Moravany (MOB), Komárov (KV), Adamov (AD), Husovice (HUV), Královopolská Brno (KPO), Výtopna Maloměřice (VMA), Slévárna Horní Heršpice (SHH) a Líšeň (LI). Transformátor T402 je připojen na přípojnicí B, z které jsou napájeny rozvodny Bystřice nad Pernštejnem (BYP), Dolní Rožínka (RON), Velké Meziříčí (VMZ), Ptáčov (PTA), Velká Bíteš (VBT), Náměšť nad Oslavou (NAO), Řípov (RIP), Oslavany (OS), Boskovice (BO), Velké Opatovice (VOP), Blansko (BK) a Blansko ČD (BKD).

Rozvodny ŽĎAS (ZDAS) a Žďár nad Sázavou (MZR) jsou za normálního provozu napájeny z rozvodny 110 kV Mírovka. Protože právě probíhají práce na vedeních 1309 a 1310, která tyto rozvodny s Mírovkou propojují, je napájení zajištěno z rozvodny Čebín. Konkrétně z přípojnice B, která je napájena transformátorem T402.

Transformátory T401 a T402 lze provozovat i paralelně. Jedná se o tzv. můstkové zapojení, kterého docílíme propojením přípojnice A a přípojnice B příčným spínačem přípojnic. Potom jsou výše uvedené rozvodny napájeny z obou transformátorů zároveň.

V další části této kapitoly si popíšeme jednotlivé rozvodny v uzlové oblasti Čebín. Zejména se zaměříme na konkrétní vedení 110 kV, kterými jsou jednotlivé rozvodny propojeny, a na distribuční transformátory, které transformují napětí ze 110 kV na nižší úroveň.

6.1.1 Oblast napájená z transformátoru T401

Z transformátoru T401 je napájeno Brno. Významným zdrojem elektrické energie v této oblasti je paroplynová teplárna Červený mlýn, která má celkový maximální výkon 95 MW.

Schéma oblasti napájené z transformátoru T401 je na obr. 7-1 zvýrazněno červeně.

Medlanky (MEY)

Rozvodna Medlanky je propojena kabelovým vedením 5055 s Červeným mlýnem, venkovním vedením 5553 s rozvodnou Čebín (přípojnice A) a vedením 5558 s rozvodnou Brno Moravany. K rozvodně jsou připojeny transformátory T101 a T102 s převodem 110/22 kV a výkonem 40 MVA.

Červený mlýn (CML)

Do rozvodny 110 kV je vyveden výkon z paroplynové teplárny Červený mlýn. Generátor poháněný plynovou turbínou je připojen přes transformátor T10, generátor poháněný parní turbínou je připojen přes transformátor T20. Celkový maximální elektrický výkon teplárny je

95 MW. Rozvodna Červený mlýn je napojena kabelovým vedením 5055 na rozvodnu Medlánky a kabelovým vedením 5053 na rozvodnu Brno Příkop [12].

Brno Příkop (BNP)

Rozvodna je propojena kabelovými vedeními 5053 a 5051 s rozvodnami Červený mlýn a Teplárna Brno. K rozvodně jsou připojeny dva transformátory 110/22 kV. Transformátor T101 i T102 má výkon 40 MVA.

Bohunice (BOB)

Rozvodna Bohunice je propojena s přípojnici A v rozvodně Čebín pomocí vedení 5554 a vedením 5556 s rozvodnou Komárov. Připojené transformátory T101 a T102 mají výkon 40 MVA a převod 110/22 kV.

Brno Moravany (MOB)

Rozvodna je propojena vedením 5558 s rozvodnou Medlánky a vedením 5557 s rozvodnou Komárov. Provozovány jsou zde dva transformátory 110/22 kV, jejichž označení je T101 a T102. Výkon obou transformátorů je 40 MVA.

Komárov (KV)

Rozvodna s dvojitým systémem přípojníc. Přípojnice A je napájena ze Sokolnic. Přípojnice B patří k uzlové oblasti Čebín a je propojena vedením 510 s rozvodnou Teplárna Brno, vedením 5556 s Bohunicemi, vedením 5557 s rozvodnou Brno Moravany, vedením 5544 s Líšní a vedením 5059 se Slévárnou Horní Heršpice.

Adamov (AD)

Rozvodna Adamov je napojena vedením 522 na rozvodnu Čebín a rozvodnu Husovice. V provozu je jeden distribuční transformátor 110/22 kV o výkonu 16 MVA.

Husovice (HUV)

V rozvodně je dvojitý systém přípojníc. Přípojnice A je propojena vedením 521 a 522 s rozvodnami Čebín a Adamov, vedením 5548 s Výtopnou Maloměřice, vedeními 5532 a 5531 s rozvodnou Královopolská Brno a vedením 539 s rozvodnou Líšeň. K přípojnici A jsou připojeny dva distribuční transformátory 110/22 kV. Transformátor T101 i T102 má výkon 40 MVA. Přípojnice B patří k uzlové oblasti Sokolnice.

Královopolská Brno (KPO)

Rozvodna je připojena vedeními 5531 a 5532 o délce 2,5 km k rozvodně Husovice. V provozu je distribuční transformátor T101 s převodem 110/22 kV a výkonem 25 MVA.

Výtopna Maloměřice (VMA)

Do rozvodny je zaústěno vedení 5548, které je přímo připojeno na transformátor T102 o výkonu 16 MVA. V rozvodně 6 kV Maloměřice je instalován generátor o výkonu 4,5 MW. Tento výkon lze přes transformátor T102 110/6,3 kV a vedení 5548 vyvést do uzlové oblasti 110 kV Čebín.

Slévárna Horní Heršpice (SHH)

Rozvodna je připojena vedením 5059 k rozvodně Komárov. V provozu je transformátor T1 o výkonu 16 MVA.

Líšeň (LI)

Rozvodna s dvojitým systémem přípojníc. Přípojnice A patří k uzlové oblasti Čebín a je připojena vedením 539 k rozvodně Husovice a vedením 5544 k rozvodně Komárov. V provozu jsou dva transformátory 110/22 kV. Transformátor T101 i T102 má výkon 40 MVA.

6.1.2 Oblast napájená z transformátoru T402

Transformátor T402 je v rozvodně 110 kV Čebín připojen k přípojnicí B. Přímou z ní je napájen distribuční transformátor 110/22 kV T101 s výkonem 40 MVA a transformátory T1 a T2, které jsou ve vlastnictví Českých drah. Transformátory T1 a T2 pracují paralelně a mají výkon 13,3 MVA.

Transformátor T402 napájí rozvodny v okolí Brna, na Třebíčsku a na Žďáarsku. Do této oblasti kromě transformátoru T402 dodává energii ještě transformátor T102 v rozvodně Dolní Rožínka, kde je nedaleko uranový důl Rožná s fotovoltaickou elektrárnou o instalovaném výkonu 4,3 MW.

Oblast napájená z transformátoru T402 je na obr 7-1 zvýrazněna modře.

Bystřice nad Pernštejnem (BYP)

Rozvodna s dvojitým systémem přípojníc. V provozu je pouze přípojnice B, která je propojena vedeními 507 a 508 s Čebínem, dále vedením 5538 s Dolní Rožínkou a vedením 509 se Žďárem nad Sázavou. V provozu je transformátor T102, který má převod 110/22 kV a výkon 40 MVA. Vedení 509 je za normálního provozu vypnuté. Z důvodu probíhajících prací na vedeních 1309 a 1310, musí být vedení 509 v provozu, aby zajistilo dodávku elektrické energie do Žďáru nad Sázavou.

Dolní Rožínka (RON)

Do rozvodny Rožínka je připojeno vedení 5537, které vede do Čebína, a vedení 5538, které vede do Bystřice nad Pernštejnem. V rozvodně jsou instalovány dva distribuční transformátory 110/22 kV. Transformátory T101 i T102 mají výkon 40 MVA.

Velké Meziříčí (VMZ)

Rozvodna Velké Meziříčí je napojena na Čebín vedením 5534 a vedením 516 na rozvodnu Říčov. V rozvodně jsou v provozu dva transformátory 110/22 kV. Transformátor T101 má výkon 40 MVA a transformátor T102 má výkon 25 MVA.

Ptáčov (PTA)

V rozvodně je v provozu jeden transformátor T102 s převodem 110/22 kV a s výkonem 40 MVA. Vedení 5525 vede do Řípova a vedení 5539 do rozvodny ve Velké Bíteši.

Velká Bíteš (VBT)

Rozvodnu Velká Bíteš propojuje vedení 5533 s Čebínem a vedení 5539 s Ptáčovem. V rozvodně je v provozu jeden trojvintuřový distribuční transformátor 110/22/6 kV. Transformátor T102 má výkon 40 MVA.

Náměšť nad Oslavou (NAO)

Vedení 502 propojuje rozvodnu Náměšť nad Oslavou s rozvodnami Řípy a Oslavany. V rozvodně pracuje transformátor T101. Tento transformátor 110/22 kV má výkon 25 MVA.

Řípy (RIP)

Rozvodna Řípy je vybavena dvojitým systémem přípojníc. Přípojnice A patří do uzlové oblasti Čebín. Vedením 516 je propojena s Velkým Meziříčím, vedením 5525 s Ptáčovem a vedeními 502 a 503 s Náměští nad Oslavou a Oslavany. Druhá přípojnice v rozvodně Řípy je napájena ze Slavetic.

Oslavany (OS)

V rozvodně Oslavany je dvojitý systém přípojníc. Jedna přípojnice je napájena ze Sokolnic, druhá z Čebína. Přípojnice A je propojena s Čebínem vedeními 505 a 506. Vedení 502 a 503 vedou do rozvodny Náměšť nad Oslavou a Řípy. V rozvodně jsou v provozu tři distribuční transformátory 110/22 kV. Transformátor T101 má výkon 25 MVA, transformátory T102 a T103 mají výkon 40 MVA.

Boskovice (BO)

Rozvodna v Boskovicích je propojena s Čebínem vedením 5597. Dále je propojena s rozvodnami Blansko a Velké Opatovice pomocí vedení 525 a 5593. V rozvodně jsou v provozu transformátory T101 a T102, které mají převod 110/22 kV a výkon 40 MVA.

Velké Opatovice (VOP)

Rozvodna Velké Opatovice patří do uzlové oblasti Čebín, ale je zde možnost propojení pomocí vedení 1147 s rozvodnou společností ČEZ v Moravské Třebové. Při normálním provozu je toto vedení odpojeno, naopak je v provozu vedení 526, které vede do Čebína, a vedení 5593, které vede do Boskovic. V rozvodně je v provozu distribuční transformátor T101 s převodem 110/22 kV a výkonem 25 MVA.

Blansko (BK)

Do rozvodny je zaústěno celkem 5 vedení. S Čebínem je rozvodna Blansko propojena vedeními 523 a 524, s Boskovicemi vedením 525 a propojení s Blanskem ČD je provedeno vedeními 5526 a 5527. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory 110/22 kV. Transformátory T101 i T102 mají výkon 40 MVA.

Blansko ČD (BKD)

Rozvodna je propojena vedeními 5526 a 5527 a slouží k napájení dvou transformátorů Českých drah. Transformátory T1 a T2 mají výkon 13,3 MVA.

Žďár nad Sázavou (MZR)

Za normálního provozu je Žďár nad Sázavou napájen z rozvodny Mírovka vedením 1310. Protože je toto vedení mimo provoz, musí být napájení zajištěno z Čebína. K tomuto účelu slouží vedení 509, které propojuje Žďár nad Sázavou s rozvodnou Bystřice nad Pernštejnem. Žďár nad Sázavou je navíc propojen vedením 5536 s rozvodnou ŽĎAS. V provozu jsou distribuční transformátory T101 a T102 s převodem 110/22 kV a výkonem 40 MVA.

ŽĎAS (ZDAS)

Stejně jako žďárská rozvodna je i rozvodna ŽĎAS za normálního provozu napájena z rozvodny Mírovka. Vedení 1309 a 1310, která slouží k napájení těchto dvou rozveden, jsou mimo provoz. Rozvodna Žďár nad Sázavou je proto připojena do uzlové oblasti Čebín přes vedení 509. Rozvodna ŽĎAS je propojena se Žďárem pomocí vedení 5536. V provozu jsou transformátory T101 a T102 s výkonem 25 MVA.

6.1.3 Zkratová odolnost rozveden v UO Čebín

Rozvodná zařízení jsou dimenzována tak, aby působením zkratu nedošlo k poškození silového vybavení v rozvodně. Při jednofázovém zkratu je vybavení tepelně namáháno, při trojfázovém zkratu se navíc musí počítat s mechanickým namáháním.

Rozvodny 110 kV v uzlové oblasti Čebín jsou dimenzovány na zkratový výkon při trojfázovém zkratu. Pro posouzení zkratové odolnosti platí podmínka:

$$S_{k \max}'' \geq {}^{(3)}S_k'' \quad (6.1)$$

kde $S_{k \max}''$ je zkratová odolnost rozvodny a ${}^{(3)}S_k''$ je počáteční rázový zkratový výkon, který se počítá podle vzorce:

$${}^{(3)}S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot {}^{(3)}I_k'' \quad (6.2)$$

V rovnici značí U_n jmenovité napětí rozvodny a ${}^{(3)}I_k''$ počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu, který se vypočítá podle (5.4).

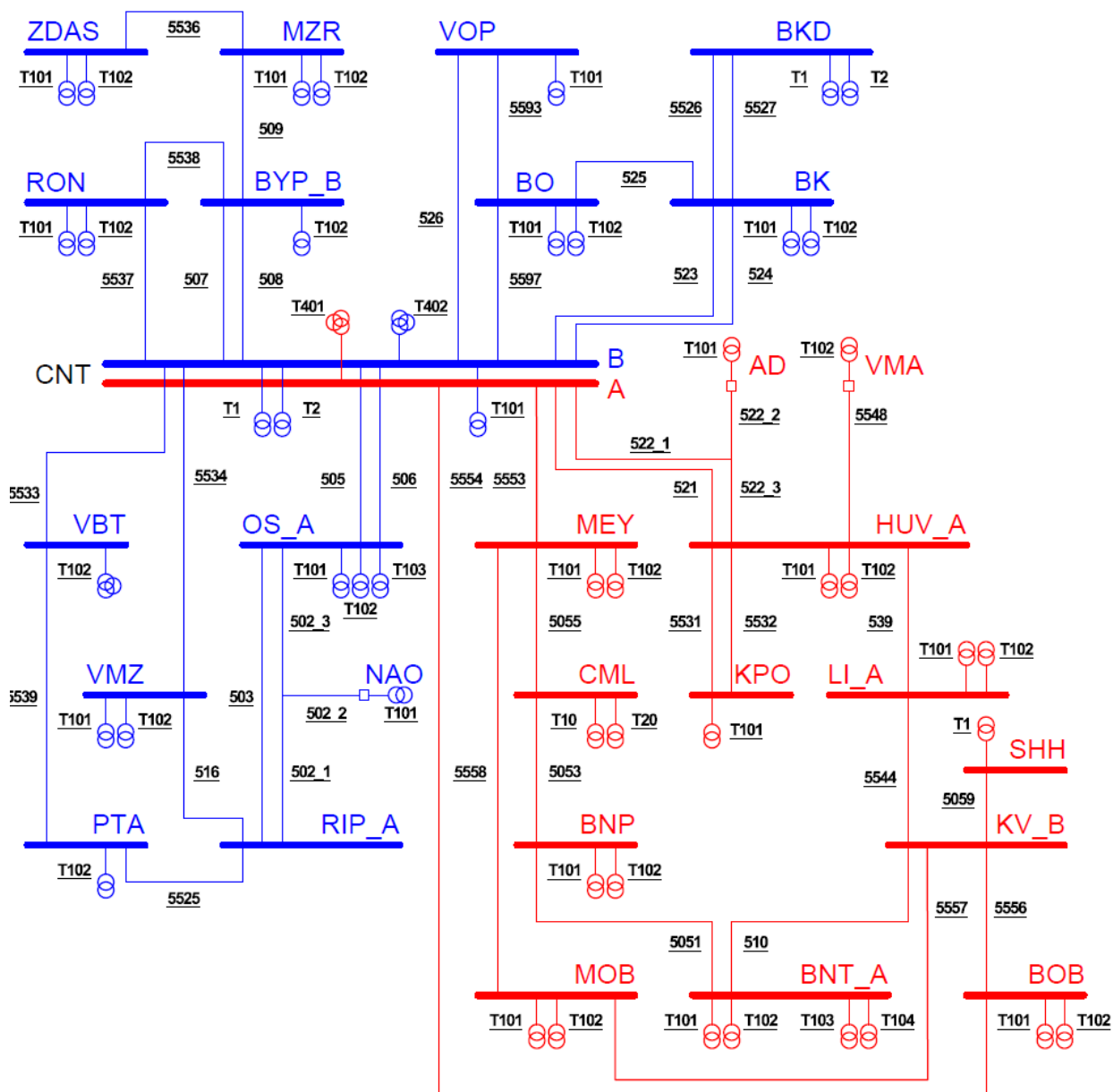
V tab. 6-2 jsou uvedeny zkratové odolnosti rozveden 110 kV, které patří do uzlové oblasti Čebín. Nechybí ani rozvodny Žďár nad Sázavou a ŽĎAS, které za normálního provozu náleží k uzlové oblasti Mírovka.

Tab. 6- 2: Zkratová odolnost rozvoden 110 kV v UO Čebín

Rozvodna	Zkratka	S''_{kmax} [MVA]
Čebín	CNT	5000
Medlánky	MEY	3500
Červený mlýn	CML	3500
Brno Příkop	BNP	5000
Teplárna Brno	BNT	3500
Bohunice	BOB	3500
Brno Moravany	MOB	5000
Komárov	KV	3500
Adamov	AD	3500
Husovice	HUV	3500
Královopolská Brno	KPO	3500
Výtopna Maloměřice	VMA	2500
Slévárna Horní Heršpice	SHH	3500
Líšeň	LI	3500
Bystřice nad Pernštejnem	BYP	3500
Dolní Rožinka	RON	2500
Velké Meziříčí	VMZ	3500
Ptáčov	PTA	3500
Velká Bíteš	VBT	3500
Náměšť nad Oslavou	NAO	2500
Říčov	RIP	3500
Oslavany	OS	2500
Boskovice	BO	3500
Blansko	BK	3500
Blansko ČD	BKD	2500
Velké Opatovice	VOP	3500
Žďár nad Sázavou	MZR	3500
ŽĎAS	ZDAS	3500

7 TRANSFORMÁTORY T401 A T402 PRACUJÍCÍ SAMOSTATNĚ

Tato kapitola se věnuje ustálenému stavu a zkratovým poměrům v uzlové oblasti 110 kV Čebín při samostatném chodu transformátorů T401 a T402. Za normálního provozu je transformátor T401 připojen k přípojnici A a transformátor T402 k přípojnici B. Přípojnice nejsou propojeny příčným spínačem. Transformátor T403 není v provozu a slouží jako záloha. Z rozvodny Čebín jsou potom napájeny rozvodny 110 kV, které jsou popsány v kapitole 6. Schéma uzlové oblasti 110 kV Čebín napájené ze samostatně pracujících transformátorů je na obr. 7-1. Červeně jsou značené rozvodny napájené z transformátoru T401 a modře rozvodny napájené z transformátoru T402.



Obr. 7- 1: Schéma UO 110 kV Čebín při samostatně pracujících transformátorech T401 a T402

Ustálený stav a zkratové poměry jsou řešeny pomocí systému Sinaut Spectrum, který používá společnost E.ON. Výstupem ze systému jsou textové soubory s vypočtenými hodnotami. Soubory jsou součástí přílohy. Výpočet byl proveden 20.3.2015 v 8:30.

7.1 Ustálený chod v UO 110 kV Čebín

Transformovna Čebín je na přenosovou soustavu napojena třemi vedeními 400 kV. V tabulce 7-1 vidíme, že výkon je do Čebína dodáván z rozveden 400 kV Mírovka a Slavětice. Část výkonu je přenášena vedením 423 z Čebína do Sokolnice. Součtem hodnot zjistíme, že transformátory T401 a T402 napájející UO Čebín odebírají v době výpočtu z přenosové soustavy 282,7 MW.

Tab. 7- 1: Činné výkony přenášené vedením 400 kV v době výpočtu

Vedení	Rozvodny		P_v [MW]
422	Mírovka	Čebín	98,5
423	Sokolnice	Čebín	-44,5
434	Slavětice	Čebín	228,7

Při ustáleném chodu byla provedena kontrola velikosti napětí v rozvodnách 110 kV, proudového zatížení vedení 110 kV a transformátorů a vyhodnoceny byly ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín.

7.1.1 Kontrola velikosti napětí v rozvodnách

Hodnota napětí v rozvodnách se udržuje v předepsaném rozmezí. V sítích 110 kV je dovolená odchylka $\pm 10 \%$ od jmenovitého napětí, což odpovídá rozmezí 99 až 121 kV. V tabulkách 7-2 a 7-3 jsou uvedeny vypočtené velikosti napětí v jednotlivých rozvodnách U a jejich úhel δ .

Tab. 7- 2: Napětí v rozvodnách UO 110 kV Čebín napájených transformátorem T401

Rozvodna	Zkratka	U [kV]	δ [°]
Čebín (přípojnice A)	CNT_A	118,8	-2,16
Medlánky	MEY	118,9	-3,21
Červený mlýn	CML	119,0	-3,23
Brno Příkop	BNP	118,9	-3,30
Teplárna Brno (A)	BNT_A	118,8	-3,34
Bohunice	BOB	118,8	-3,27
Brno Moravany	MOB	118,7	-3,37
Komárov (B)	KV_B	118,8	-3,32
Adamov	AD	118,7	-2,68
Husovice (A)	HUV_A	118,6	-2,99
Královopolská Brno	KPO	118,6	-3,00
Výtopna Maloměřice	VMA	118,6	-2,99
Slévárna Horní Heršpice	SHH	118,8	-3,33
Líšeň (A)	LI_A	118,6	-3,24

Tab. 7- 3: Napětí v rozvodnách UO 110 kV Čebín napájených transformátorem T402

Rozvodna	Zkratka	U [kV]	δ [°]
Čebín (přípojnice B)	CNT_B	118,6	-3,39
Bystřice nad Pernštejnem (B)	BYP_B	118,0	-4,02
Dolní Rožínka	RON	118,2	-3,90
Žďár nad Sázavou	MZR	116,9	-5,17
ŽĎAS	ZDAS	116,9	-5,20
Velké Meziříčí	VMZ	117,9	-4,11
Ptáčov	PTA	118,1	-3,96
Velká Bíteš	VBT	118,2	-3,80
Náměšť nad Oslavou	NAO	118,0	-4,00
Říčov (A)	RIP_A	118,1	-3,99
Oslavany (A)	OS_A	118,1	-3,88
Boskovice	BO	118,0	-3,90
Blansko	BK	118,2	-3,72
Blansko ČD	BKD	118,2	-3,72
Velké Opatovice	VOP	118,0	-3,88

Z obou tabulek je zřejmé, že se velikost napětí U v rozvodnách udržuje na vyšší hodnotě, než je jmenovitých 110 kV. Zároveň však není překročena dovolená mez a všechna napětí jsou v rozmezí 99 až 121 kV.

7.1.2 Kontrola proudového zatížení vedení

Při kontrole proudového zatížení vedení se vychází z maximálního dovoleného proudu vedení $I_{V\max}$ a ze skutečného proudu I_V , který vedením teče. Musí platit podmínka:

$$I_{V\max} \geq I_V \quad (7.1)$$

Poměrné proudové zatížení i_V nám udává, na kolik procent maximálního dovoleného proudu je vedení zatíženo. Vypočítá se jako:

$$i_V = \frac{I_V}{I_{V\max}} \cdot 100\% \quad (7.2)$$

V tabulkách 7-4 a 7-5 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro jednotlivá vedení. Kromě proudů I_V jsou vypočteny i přenášený činný výkon P_V , jalový výkon Q_V a činné ztráty na vedení ΔP_V .

Rozvodna Adamov je napájena přes odbočku na vedení 522. Ve výstupu ze systému Sinaut Spectrum je vedení rozděleno na 3 části (522_1, 522_2 a 522_3). Každá část představuje úsek od rozvodny (CNT_A, AD, HUV_A) k místu odbočení. Obdobná situace je u rozvodny Náměšť nad Oslavou napájené z odbočky na vedení 502.

Tab. 7- 4: Vypočtené hodnoty pro vedení 110 kV napájené transformátorem T401

Číslo vedení	Rozvodny		I_{Vmax} [A]	I_V [A]	i_V [%]	P_V [MW]	Q_V [MVAr]	ΔP_V [MW]
5553	CNT_A	MEY	820	197,5	24,1	39,4	10,0	-0,125
5554	CNT_A	BOB	680	116,9	17,2	23,5	5,1	-0,088
521	CNT_A	HUV_A	530	128,0	24,2	25,7	5,6	-0,113
522_1	CNT_A	-	530	132,6	25,0	26,6	5,9	-0,069
522_2	AD	-	120	6,8	5,7	1,4	0,0	-0,000
522_3	HUV_A	-	530	124,7	23,5	25,1	5,1	-0,045
5548	HUV_A	VMA	180	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,000
539	HUV_A	LI_A	455	116,3	25,6	22,1	9,0	-0,037
5531	HUV_A	KPO	455	4,1	0,9	0,7	0,4	-0,000
5532	HUV_A	KPO	455	4,1	0,9	0,7	0,4	-0,000
5544	LI_A	KV_B	530	47,3	8,9	6,0	7,7	-0,004
5556	KV_B	BOB	680	21,4	3,1	4,4	0,6	-0,001
5557	KV_B	MOB	680	41,2	6,1	8,4	1,1	-0,001
5059	KV_B	SHH	1000	10,0	1,0	2,1	0,0	-0,000
510	KV_B	BNT_A	455	30,6	6,7	0,1	6,3	-0,002
5051	BNT_A	BNP	960	216,4	22,5	44,4	3,7	-0,021
5053	CML	BNP	720	320,0	44,4	65,8	3,7	-0,030
5055	CML	MEY	720	44,7	6,2	2,8	8,8	-0,001
5558	MOB	MEY	680	32,5	4,8	6,4	1,8	-0,005

Tab. 7- 5: Vypočtené hodnoty pro vedení 110 kV napájené transformátorem T402

Číslo vedení	Rozvodny		I_{Vmax} [A]	I_V [A]	i_V [%]	P_V [MW]	Q_V [MVAr]	ΔP_V [MW]
505	CNT_B	OS_A	455	56,7	12,5	11,6	0,3	-0,043
506	CNT_B	OS_A	455	56,7	12,5	11,6	0,3	-0,043
507	CNT_B	BYP_B	455	66,1	14,5	13,6	0,1	-0,059
508	CNT_B	BYP_B	455	66,1	14,5	13,6	0,1	-0,059
523	CNT_B	BK	455	68,9	15,1	14,0	1,7	-0,034
524	CNT_B	BK	455	68,9	15,1	14,0	1,7	-0,034
526	CNT_B	VOP	530	41,0	7,7	8,4	1,1	-0,025
5597	CNT_B	BO	530	59,3	11,2	12,0	2,3	-0,038
5533	CNT_B	VBT	530	68,5	12,9	14,0	1,6	-0,034
5534	CNT_B	VMZ	530	56,0	10,6	11,4	1,1	-0,049
5537	CNT_B	RON	360	57,2	15,9	11,7	0,4	-0,034
509	BYP_B	MZR	455	158,7	34,9	32,3	2,5	-0,258
5538	BYP_B	RON	360	40,5	11,3	8,2	1,2	-0,006
5536	MZR	ZDAS	455	42,4	9,3	8,5	1,2	-0,002
516	RIP_A	VMZ	530	19,3	3,6	3,7	1,4	-0,003
502_1	RIP_A	-	455	0,6	0,1	0,1	0,1	-0,000
502_2	NAO	-	180	15,7	8,7	3,1	0,8	-0,000
502_3	OS_A	-	455	15,7	3,5	3,1	0,9	-0,000
503	RIP_A	OS_A	455	9,3	2,0	1,4	1,3	-0,001
5525	RIP_A	PTA	480	11,8	2,5	2,4	0,5	-0,000
5539	VBT	PTA	530	12,3	2,3	2,4	0,7	-0,002
525	BO	BK	290	20,2	7,0	4,1	0,7	-0,009
5593	BO	VOP	450	5,4	1,2	1,1	0,1	-0,000
5526	BK	BKD	240	1,4	0,6	0,3	0,1	-0,004
5527	BK	BKD	240	1,4	0,6	0,3	0,1	-0,004

Žádným vedením neprotéká větší proud než maximální dovolený proud I_{Vmax} . Největší poměrné zatížení je u vedení 5053, které přenáší výkon 65,8 MW z Červeného mlýna

do rozvodny Brno Příkop. Jeho hodnota je 44,4 %. Ostatní vedení jsou zatížena na méně než 40 %.

7.1.3 Kontrola proudového zatížení transformátorů

Stejně jako vedení i transformátory se kontrolují, zda nejsou za ustáleného chodu přetíženy. Musí platit podmínka:

$$I_{nT} \geq I_T \quad (7.3)$$

kde I_{nT} je jmenovitý proud transformátoru a I_T je skutečný proud tekoucí transformátorem. Pro poměrné proudové zatížení transformátoru platí vztah:

$$i_T = \frac{I_T}{I_{nT}} \cdot 100\% \quad (7.4)$$

V tabulkách s vypočtenými hodnotami pro transformátory jsou kromě proudů i údaje o činných a jalových výkonech a o ztrátách činného výkonu transformátoru ΔP_T . Transformátory buď výkon do uzlové oblasti dodávají, nebo ho z oblasti odebírají. V tabulkách je tato skutečnost respektována znaménkem. Kladná hodnota výkonu značí dodávku elektrické energie, záporná hodnota značí odběr elektrické energie.

Tab. 7- 6: Vypočtené hodnoty pro transformátory 400/110 kV pracujících samostatně

Rozvodna	Transformátor	I_{nT} [A]	I_T [A]	i_T [%]	P_T [MW]	Q_T [MVar]	ΔP_T [MW]
CNT_A	T401	1837	575,0	31,3	115,2	-26,6	-0,033
CNT_B	T402	1837	815,4	44,4	167,1	11,7	-0,073

V tabulce 7-6 jsou vypočtené hodnoty pro transformátory T401 a T402. Transformátory jsou zatíženy na 31,3 %, respektive na 44,4 %. V případě výpadku jednoho z nich je v záloze připraven transformátor T403, avšak z vypočtených hodnot je patrné, že by celou oblast zvládl napájet jeden transformátor s jmenovitým výkonem 350 MVA.

Tab. 7- 7: Vypočtené hodnoty pro transformátory v oblasti napájené transformátorem T401

Rozvodna	Transformátor	I_{nT} [A]	I_T [A]	i_T [%]	P_T [MW]	Q_T [MVA _r]	ΔP_T [MW]
MEY	T101	210	104,0	49,5	-21,3	2,6	-0,100
MEY	T102	210	42,4	20,2	-8,7	0,3	-0,046
CML	T10	525	233,3	44,4	47,8	5,3	-0,137
CML	T20	210	76,1	36,2	15,3	3,6	-0,055
BNP	T101	210	60,0	28,6	-12,3	-0,8	-0,029
BNP	T102	210	44,3	21,1	-9,1	-1,1	-0,023
BOB	T101	210	33,1	15,8	-6,3	2,5	-0,023
BOB	T102	210	62,0	29,5	-12,7	1,0	-0,032
MOB	T101	210	5,3	2,5	-1,1	0,2	-0,021
MOB	T102	210	67,6	32,2	-13,8	-1,9	-0,031
AD	T101	84	6,8	8,1	-1,4	0,0	-0,026
HUV A	T101	210	76,3	36,3	-15,6	1,0	-0,049
HUV A	T102	210	55,7	26,5	-11,4	-0,3	-0,039
KPO	T101	131	7,7	5,9	-1,5	0,6	-
VMA	T102	84	0,5	0,6	0,0	-0,1	-0,020
BNT A	T101	210	42,6	20,3	-8,3	2,7	-0,025
BNT A	T102	210	108,5	51,7	-22,2	-2,2	-0,058
BNT A	T103	210	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,019
BNT A	T104	210	66,6	31,7	-13,7	0,2	-0,034
LI A	T101	210	33,8	16,1	-6,8	1,4	-0,042
LI A	T102	210	45,3	21,6	-9,3	-0,2	-0,023
SHH	T1	84	13,8	16,4	-2,1	-2,0	-

Tab. 7- 8: Vypočtené hodnoty pro transformátory v oblasti napájené transformátorem T402

Rozvodna	Transformátor	I_{nT} [A]	I_T [A]	i_T [%]	P_T [MW]	Q_T [MVA _r]	ΔP_T [MW]
CNT B	T101	210	135,1	64,3	-26,5	-8,4	-0,094
CNT B	T1	70	11,8	16,9	-2,3	-0,7	-
CNT B	T2	70	11,8	16,9	-2,3	-0,7	-
BYP B	T102	210	14,7	7,0	-2,9	-0,8	-0,025
RON	T101	210	20,7	9,9	-4,2	-0,7	-
RON	T102	210	3,8	1,8	0,7	0,4	-
MZR	T101	210	57,7	27,5	-11,6	-1,7	-0,042
MZR	T102	210	59,1	28,1	-12,0	-0,5	-0,042
ZDAS	T101	131	28,9	22,1	-5,6	-1,6	-
ZDAS	T102	131	13,7	10,5	-2,8	-0,2	-
VMZ	T101	210	22,5	10,7	-4,2	-1,8	-0,023
VMZ	T102	131	55,2	42,1	-10,9	-3,0	-0,055
PTA	T102	210	1,2	0,6	0,0	-0,2	-0,037
VBT	T102	210	58,4	27,8	-11,5	-3,1	-0,027
NAO	T101	131	15,8	12,1	-3,1	-0,8	-0,021
OS	T101	131	36,2	27,6	-7,3	-1,3	-0,023
OS	T102	210	43,3	20,6	-8,4	-2,7	-0,030
OS	T103	210	15,3	7,3	-3,0	-0,9	-0,031
BO	T101	210	47,4	22,6	-9,5	-1,8	-0,028
BO	T102	210	38,7	18,4	-7,6	-2,3	-0,024
BK	T101	210	14,6	7,0	-3,0	-0,5	-0,021
BK	T102	210	102,4	48,8	-20,5	-4,4	-0,095
BKD	T1	70	7,7	11,0	-0,3	-1,6	-
BKD	T2	70	6,3	9,0	-0,3	1,3	-
VOP	T101	131	34,7	26,5	-6,7	-2,3	-0,025

Celková hodnota činného výkonu dodávaného do uzlové oblasti 110 kV Čebín z přenosové soustavy přes transformátory T401 a T402 je 282,3 MW. Při samostatném provozu je větší výkon odebírán transformátorem T402, který napájí přípojnicí B v Čebíně a odtud další rozvodny v okolí Brna, na Třebíčsku a na Žďarsku. Transformátor T402 napájí i rozvodny Žďár nad Sázavou a ŽĎAS, které jsou za normálního provozu napájeny z rozvodny Mírovka. Z tabulky 7-8 zjistíme, že tyto dvě rozvodny odebírají z UO Čebín činný výkon 32 MW.

Podle vypočtených hodnot v tabulce 7-7 vidíme, že u všech transformátorů napájených transformátorem T401 byla splněna podmínka (7.3) a nedošlo tedy k jejich přetížení. Transformátory jsou zatíženy nejvýše na 51,7 %. Největší výkon odebírá transformátor T102 v rozvodně Teplárna Brno (BNT) a to 22,2 MW. Transformátory T10 a T20 (CML) jsou napájeny z paroplynové teplárny Červený mlýn a do UO 110 kV Čebín dodávají celkový výkon 63,1 MW.

V tabulce 7-8 jsou uvedeny vypočtené hodnoty pro transformátory v oblasti napájené z transformátoru T402. Podmínka (7.3) je splněna všude. Transformátory jsou zatíženy nanejvýš na 64,3 % jmenovitého proudu. Největší odběr představuje transformátor T101 napojený na přípojnicí B v Čebíně (CNT_B), který odebírá 26,5 MW. Transformátor T102 v rozvodně Dolní Rožínka (RON) dodává do oblasti výkon 0,7 MW.

7.1.4 Ztráty činného výkonu

V tabulce 7-9 jsou uvedeny transformátory, které dodávají výkon do uzlové oblasti 110 kV Čebín. Celkový dodávaný výkon je 346,1 MW.

Tab. 7- 9: Dodávky činného výkonu do uzlové oblasti 110 kV Čebín

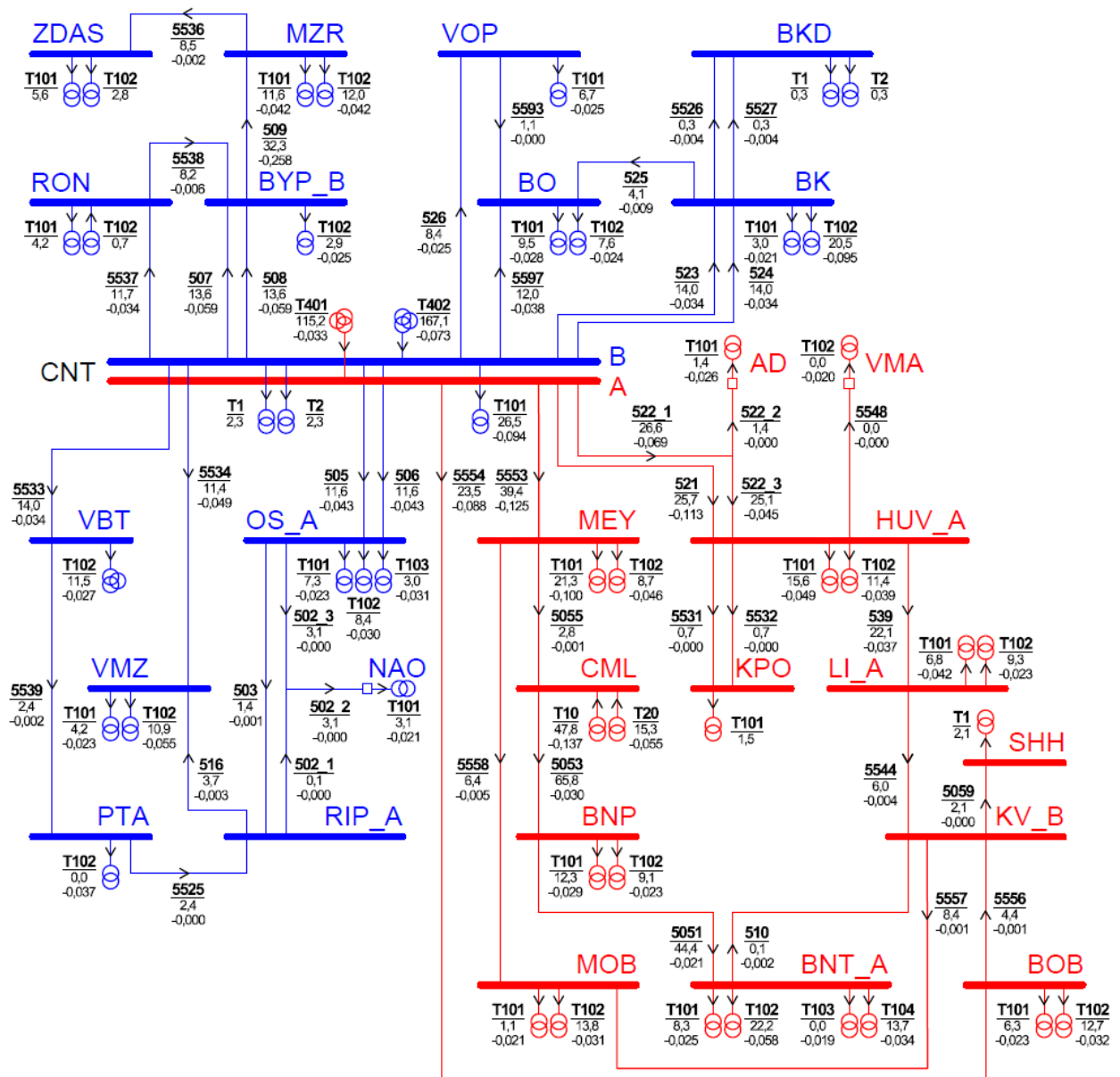
Rozvodna	Transformátor	P_T [MW]
CNT_A	T401	115,2
CNT_B	T402	167,1
CML	T10	47,8
CML	T20	15,3
RON	T102	0,7

System Sinaut Spectrum počítá ztráty na vedení i na transformátorech. Tyto hodnoty jsou pro jednotlivé prvky v uzlové oblasti uvedeny v tabulkách 7-4 až 7-8. Celkové ztráty v UO 110 kV Čebín uvádí tabulka 7-10. Ztráty na transformátorech 400/110 kV vychází z tabulky 7-6, ztráty na ostatních transformátorech jsou vypočteny z tabulek 7-7 a 7-8, ztráty na vedení uvádí tabulky 7-4 a 7-5. Celkové ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín jsou 2,864 MW, což představuje 0,83 % z výkonu dodávaného do oblasti.

Tab. 7- 10: Ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín

Ztráty	ΔP [MW]
na transformátorech 400/110 kV	0,106
na ostatních transformátorech	1,475
na vedení	1,283

Na obrázku 7-2 jsou uvedeny toky a ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín. Označení vedení a transformátorů je v obrázku podtrženo a zvýrazněno tučně. Pod označením příslušného prvku následuje údaj o přenášeném činném výkonu u vedení, nebo o odebíraném (dodávaném) činném výkonu transformátorem. Další hodnota je údaj o ztrátách činného výkonu na daném prvku. Obě uváděné hodnoty jsou v MW. U některých transformátorů je uvedena jen hodnota odebíraného činného výkonu, protože systém Sinaut Spectrum nepočítal jejich ztráty. V tabulkách 7-7 a 7-8 jsou příslušná políčka vyplněna pomlčkou (-). Z tohoto důvodu musíme brát výpočet ztrát v uzlové oblasti 110 kV Čebín s určitou rezervou.



Obr. 7- 2: Činný výkon a jeho ztráty v UO 110 kV Čebín při samostatně pracujících transformátorech T401 a T402

7.2 Zkratové poměry v UO 110 kV Čebín

Kromě ustáleného chodu byl proveden výpočet i pro jednofázový a trojfázový zkrat. Systém Sinaut Spectrum počítá zkraty pomocí metody ekvivalentního napěťového zdroje. Napěťový součinitel má hodnotu $c = 1,1$. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 7-11 a 7-12.

Tab. 7- 11: Zkratové poměry v rozvodnách napájených transformátorem T401

Rozvodna	S''_{kmax} [MVA]	$^{(1)}S''_k$ [MVA]	$^{(1)}I''_k$ [kA]	$^{(3)}S''_k$ [MVA]	$^{(3)}I''_k$ [kA]
CNT_A	5000	2644,3	13,9	2714,2	14,2
MEY	3500	2597,8	13,6	1936,3	10,2
CML	3500	2678,6	14,1	1948,8	10,2
BNP	5000	2679,6	14,1	1928,3	10,1
BNT	3500	2690,2	14,1	1915,5	10,1
BOB	3500	1675,5	8,8	1581,6	8,3
MOB	5000	1965,4	10,3	1703,3	8,9
KV	3500	2338,0	12,3	1895,4	9,9
AD	3500	1619,3	8,5	1134,7	6,0
HUV	3500	2026,7	10,6	1838,2	9,6
KPO	3500	1808,9	9,5	1715,8	9,0
VMA	2500	1656,6	8,7	1614,7	8,5
SHH	3500	2214,5	11,6	1801,7	9,5
LI	3500	1945,4	10,2	1746,3	9,2

Tab. 7- 12: Zkratové poměry v rozvodnách napájených transformátorem T402

Rozvodna	S''_{kmax} [MVA]	$^{(1)}S''_k$ [MVA]	$^{(1)}I''_k$ [kA]	$^{(3)}S''_k$ [MVA]	$^{(3)}I''_k$ [kA]
CNT_B	5000	2950,7	15,5	2576,7	13,5
BYP	3500	1983,5	10,4	1403,2	7,4
RON	2500	1345,0	7,1	1273,1	6,7
VMZ	3500	936,0	4,9	950,1	5,0
PTA	3500	935,4	4,9	978,8	5,1
VBT	3500	982,5	5,2	1172,2	6,2
NAO	2500	812,3	4,3	898,1	4,7
RIP	3500	1045,7	5,5	1091,0	5,7
OS	2500	1441,4	7,6	1376,3	7,2
BO	3500	1503,3	7,9	1527,5	8,0
BK	3500	2521,3	13,2	1748,1	9,2
BKD	2500	2463,2	12,9	1729,1	9,1
VOP	3500	1246,5	6,5	1521,8	8,0
MZR	3500	777,6	4,1	704,5	3,7
ZDAS	3500	705,8	3,7	668,3	3,5

Rozvodny 110 kV v uzlové oblasti Čebín jsou dimenzovány na zkratový výkon při trojfázovém zkratu. V případě, že je splněna podmínka (6.1), odolá rozvodna mechanickým a

tepelným účinkům trojfázového zkratového proudu. U všech rozvodů v tabulkách 7-11 a 7-12 byla tato podmínka splněna.

Při výpočtu zkratového výkonu při jednofázovém zkratu počítá systém Sinaut Spectrum podle následujícího vzorce:

$${}^{(1)}S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot {}^{(1)}I_k'' \quad (7.5)$$

V případě, že je hodnota ${}^{(1)}S_k''$ vyšší než $S_{k\max}''$, systém na ni upozorní. Ve vztahu (7.5) je počítán rázový zkratový výkon ${}^{(1)}S_k''$, jako by proud ${}^{(1)}I_k''$ tekł všemi třemi fázemi. Ve skutečnosti při jednofázovém zkratu teče počáteční rázový zkratový proud ${}^{(1)}I_k''$ pouze jednou fází a proud v dalších dvou fázích je nulový. Zkratový proud má v tomto případě pouze tepelné účinky, na které musí být rozvodné zařízení dimenzováno.

Výpočty byly provedeny v systému Sinaut Spectrum 20.3.2015 v 8:30. Textové soubory, které jsou výstupem ze systému, jsou v příloze práce.

8.1 Ustálený chod v UO 110 kV Čebín

Stejně jako v předchozí kapitole byla při ustáleném chodu provedena kontrola velikosti napětí v rozvodnách 110 kV, proudového zatížení vedení 110 kV a transformátorů a vyhodnoceny byly ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín.

8.1.1 Kontrola velikosti napětí v rozvodnách

Tab. 8- 1: Napětí v rozvodnách UO 110 kV Čebín napájených z transformátorů T401 a T402

Rozvodna	Zkratka	U [kV]	δ [°]
Čebín	CNT	118,7	-2,76
Medlánky	MEY	118,9	-3,82
Červený mlýn	CML	118,9	-3,83
Brno Příkop	BNP	118,8	-3,90
Teplárna Brno (A)	BNT_A	118,8	-3,94
Bohunice	BOB	118,7	-3,87
Brno Moravany	MOB	118,7	-3,97
Komárov (B)	KV_B	118,7	-3,92
Adamov	AD	118,6	-3,28
Husovice (A)	HUV_A	118,5	-3,60
Královopolská Brno	KPO	118,5	-3,60
Výtopna Maloměřice	VMA	118,5	-3,60
Slévárna Horní Heršpice	SHH	118,7	-3,93
Líšeň (A)	LI_A	118,5	-3,84
Bystřice nad Pernštejnem (B)	BYP_B	118,1	-3,39
Dolní Rožínka	RON	118,3	-3,27
Žďár nad Sázavou	MZR	117,0	-4,53
ŽĎAS	ZDAS	117,0	-4,56
Velké Meziříčí	VMZ	117,9	-3,47
Ptáčov	PTA	118,2	-3,33
Velká Bíteš	VBT	118,3	-3,17
Náměšť nad Oslavou	NAO	118,1	-3,36
Řípov (A)	RIP_A	118,2	-3,36
Oslavany (A)	OS_A	118,2	-3,25
Boskovice	BO	118,0	-3,26
Blansko	BK	118,3	-3,08
Blansko ČD	BKD	118,3	-3,08
Velké Opatovice	VOP	118,0	-3,23

V tabulce 8-1 je přehled vypočtených hodnot napětí v rozvodnách při paralelním zapojení transformátorů T401 a T402. Vidíme, že všechna napětí jsou v toleranci $\pm 10 \%$ od jmenovité hodnoty 110 kV.

8.1.2 Kontrola proudového zatížení vedení

Tab. 8- 2: Vypočtené hodnoty pro vedení 110 kV napájená z transformátorů T401 a T402

Číslo vedení	Rozvodny		I_{Vmax} [A]	I_V [A]	i_V [%]	P_V [MW]	Q_V [MVAr]	ΔP_V [MW]
5553	CNT_A	MEY	820	198,2	24,2	39,4	10,4	-0,125
5554	CNT_A	BOB	680	117,2	17,2	23,5	5,2	-0,088
521	CNT_A	HUV_A	530	128,2	24,2	25,7	5,7	-0,113
522 1	CNT_A	-	530	132,7	25,0	26,6	6,0	-0,069
522 2	AD	-	120	7,1	5,9	1,4	0,4	0,000
522 3	HUV_A	-	530	124,9	23,6	25,1	5,2	-0,045
5548	HUV_A	VMA	180	0,1	0,1	0,0	0,0	0,000
539	HUV_A	LI_A	455	116,7	25,6	22,1	9,2	-0,037
5531	HUV_A	KPO	455	4,1	0,9	0,7	0,4	0,000
5532	HUV_A	KPO	455	4,1	0,9	0,7	0,4	0,000
5544	LI_A	KV_B	530	48,1	9,1	6,0	7,9	-0,004
5556	KV_B	BOB	680	21,5	3,2	4,4	0,7	-0,001
5557	KV_B	MOB	680	41,2	6,1	8,4	1,1	-0,002
5059	KV_B	SHH	1000	10,0	1,0	2,1	0,0	-0,001
510	KV_B	BNT_A	455	32,2	7,1	0,1	6,6	-0,002
5051	BNT_A	BNP	960	216,7	22,6	44,4	3,9	-0,018
5053	CML	BNP	720	320,3	44,5	65,8	4,0	-0,032
5055	CML	MEY	720	46,7	6,5	2,8	9,2	-0,003
5558	MOB	MEY	680	32,6	4,8	6,4	1,9	-0,005
505	CNT_B	OS_A	455	56,6	12,4	11,6	0,3	-0,043
506	CNT_B	OS_A	455	56,6	12,4	11,6	0,3	-0,043
507	CNT_B	BYP_B	455	66,1	14,5	13,6	0,1	-0,059
508	CNT_B	BYP_B	455	66,1	14,5	13,6	0,1	-0,059
523	CNT_B	BK	455	69,1	15,2	14,1	1,9	-0,034
524	CNT_B	BK	455	69,1	15,2	14,1	1,9	-0,034
526	CNT_B	VOP	530	41,4	7,8	8,3	1,8	-0,026
5597	CNT_B	BO	530	59,5	11,2	11,9	2,7	-0,039
5533	CNT_B	VBT	530	68,5	12,9	14,0	1,6	-0,034
5534	CNT_B	VMZ	530	55,9	10,5	11,4	1,1	-0,049
5537	CNT_B	RON	360	57,2	15,9	11,8	0,4	-0,034
509	BYP_B	MZR	455	158,6	34,9	32,3	2,5	-0,257
5538	BYP_B	RON	360	40,5	11,3	8,2	1,2	-0,006
5536	MZR	ZDAS	455	42,4	9,3	8,5	1,2	-0,002
516	RIP_A	VMZ	530	19,3	3,6	3,7	1,4	-0,003
502 1	RIP_A	-	455	0,6	0,1	0,1	0,1	0,000
502 2	NAO	-	180	15,7	8,7	3,1	0,8	0,000
502 3	OS_A	-	455	15,6	3,4	3,1	0,9	-0,002
503	RIP_A	OS_A	455	9,3	2,0	1,4	1,3	-0,001
5525	RIP_A	PTA	480	11,8	2,5	2,4	0,5	0,000
5539	VBT	PTA	530	12,5	2,4	2,4	0,9	-0,002
525	BO	BK	290	20,3	7,0	4,1	0,4	-0,009
5593	BO	VOP	450	6,1	1,4	1,1	0,7	0,000
5526	BK	BKD	240	1,5	0,6	0,3	0,2	0,000
5527	BK	BKD	240	1,4	0,6	0,3	0,1	0,000

V tabulce 8-2 jsou vypočtené hodnoty pro vedení 110 kV v uzlové oblasti Čebín při paralelní spolupráci transformátorů T401 a T402. U všech vedení je splněna podmínka (7.1). Nejvíce zatížené je vedení 5053, které zároveň přenáší největší činný výkon. Poměrné proudové zatížení vedení 5053 je 44,5 %. Ostatní vedení jsou zatížena na méně než 40 %.

8.1.3 Kontrola proudového zatížení transformátorů

Tab. 8- 3: Vypočtené hodnoty pro transformátory 400/110 kV pracující paralelně

Rozvodna	Transformátor	I_{nT} [A]	I_T [A]	i_T [%]	P_T [MW]	Q_T [MVA _r]	ΔP_T [MW]
CNT_A	T401	1837	715,9	39,0	144,8	-26,3	-0,051
CNT_B	T402	1837	671,6	36,6	137,5	11,9	-0,050

Tab. 8- 4: Vypočtené hodnoty pro transformátory v UO napájené z T401 a T402

Rozvodna	Transformátor	I_{nT} [A]	I_T [A]	i_T [%]	P_T [MW]	Q_T [MVA _r]	ΔP_T [MW]
MEY	T101	210	104,1	49,6	-21,3	2,6	-0,100
MEY	T102	210	42,5	20,2	-8,7	0,3	-0,046
CML	T10	525	233,6	44,5	47,8	5,7	-0,137
CML	T20	210	76,4	36,4	15,3	3,8	-0,055
BNP	T101	210	60,1	28,6	-12,3	-0,8	-0,029
BNP	T102	210	44,3	21,1	-9,1	-1,1	-0,023
BOB	T101	210	33,2	15,8	-6,3	2,5	-0,023
BOB	T102	210	62,0	29,5	-12,7	1,0	-0,032
MOB	T101	210	5,3	2,5	-1,1	0,2	-0,021
MOB	T102	210	67,6	32,2	-13,8	-1,9	-0,031
AD	T101	84	6,9	8,2	-1,4	0,0	-0,026
HUV_A	T101	210	76,3	36,3	-15,6	1,0	-0,049
HUV_A	T102	210	55,7	26,5	-11,4	-0,3	-0,039
KPO	T101	131	7,7	5,9	-1,5	0,6	-
VMA	T102	84	0,5	0,6	0,0	0,1	-0,020
BNT_A	T101	210	42,8	20,4	-8,3	2,8	-0,026
BNT_A	T102	210	108,6	51,7	-22,2	-2,2	-0,058
BNT_A	T103	210	0,1	0,0	0,0	0,0	-0,019
BNT_A	T104	210	66,6	31,7	-13,7	0,2	-0,034
LI_A	T101	210	33,8	16,1	-6,8	1,4	-0,042
LI_A	T102	210	45,3	21,6	-9,3	-0,2	-0,023
SHH	T1	84	13,8	16,4	-2,1	-2,0	-
CNT_B	T101	210	135,0	64,3	-26,5	-8,4	-0,094
CNT_B	T1	70	11,8	16,9	-2,3	-0,7	-
CNT_B	T2	70	11,8	16,9	-2,3	-0,7	-
BYP	T102	210	14,7	7,0	-2,9	-0,8	-0,025
RON	T101	210	20,7	9,9	-4,2	-0,7	-
RON	T102	210	3,8	1,8	0,7	0,4	-
MZR	T101	210	57,6	27,4	-11,6	-1,7	-0,042
MZR	T102	210	59,1	28,1	-12,0	-0,5	-0,042
ZDAS	T101	131	28,8	22,0	-5,6	-1,6	-
ZDAS	T102	131	13,7	10,5	-2,8	-0,2	-
VMZ	T101	210	22,5	10,7	-4,2	-1,8	-0,023
VMZ	T102	131	55,2	42,1	-10,9	-3,0	-0,055
PTA	T102	210	1,2	0,6	0,0	-0,2	-0,037
VBT	T102	210	58,4	27,8	-11,5	-3,1	-0,027
NAO	T101	131	15,7	12,0	-3,1	-0,8	-0,021
OS	T101	131	36,2	27,6	-7,3	-1,3	-0,023
OS	T102	210	43,3	20,6	-8,4	-2,7	-0,030
OS	T103	210	15,3	7,3	-3,0	-0,9	-0,031
BO	T101	210	47,4	22,6	-9,5	-1,8	-0,028
BO	T102	210	38,7	18,4	-7,6	-2,3	-0,024
BK	T101	210	14,6	7,0	-3,0	-0,5	-0,021
BK	T102	210	102,3	48,7	-20,5	-4,4	-0,095
BKD	T1	70	7,7	11,0	-0,3	-1,6	-
BKD	T2	70	6,3	9,0	-0,3	1,3	-
VOP	T101	131	34,7	26,5	-6,7	-2,3	-0,025

V tabulkách 8-3 a 8-4 jsou vypočtené hodnoty pro transformátory v uzlové oblasti 110 kV Čebín. Všechny transformátory splňují podmínku (7.3). Poměrné proudové zatížení je největší u transformátoru T101 v rozvodně Čebín, který je zatížený na 64,3 % svého jmenovitého proudu.

8.1.4 Ztráty činného výkonu

V tabulce 8-5 je přehled transformátorů, které dodávají výkon do uzlové oblasti 110 kV Čebín. Celkový výkon dodávaný do soustavy je 346,1 MW. Při paralelní spolupráci dodává transformátor T401 do oblasti výkon 144,8 MW a transformátor T402 137,5 MW. Přípojnice A a B v rozvodně Čebín jsou propojeny přes spojku s příčným spínačem (SP), kterou prochází výkon 29,6 MW. Spojkou teče proud o velikosti 143,9 A.

Tab. 8- 5: Dodávky činného výkonu do UO 110 kV Čebín při paralelní spolupráci T401 a T402

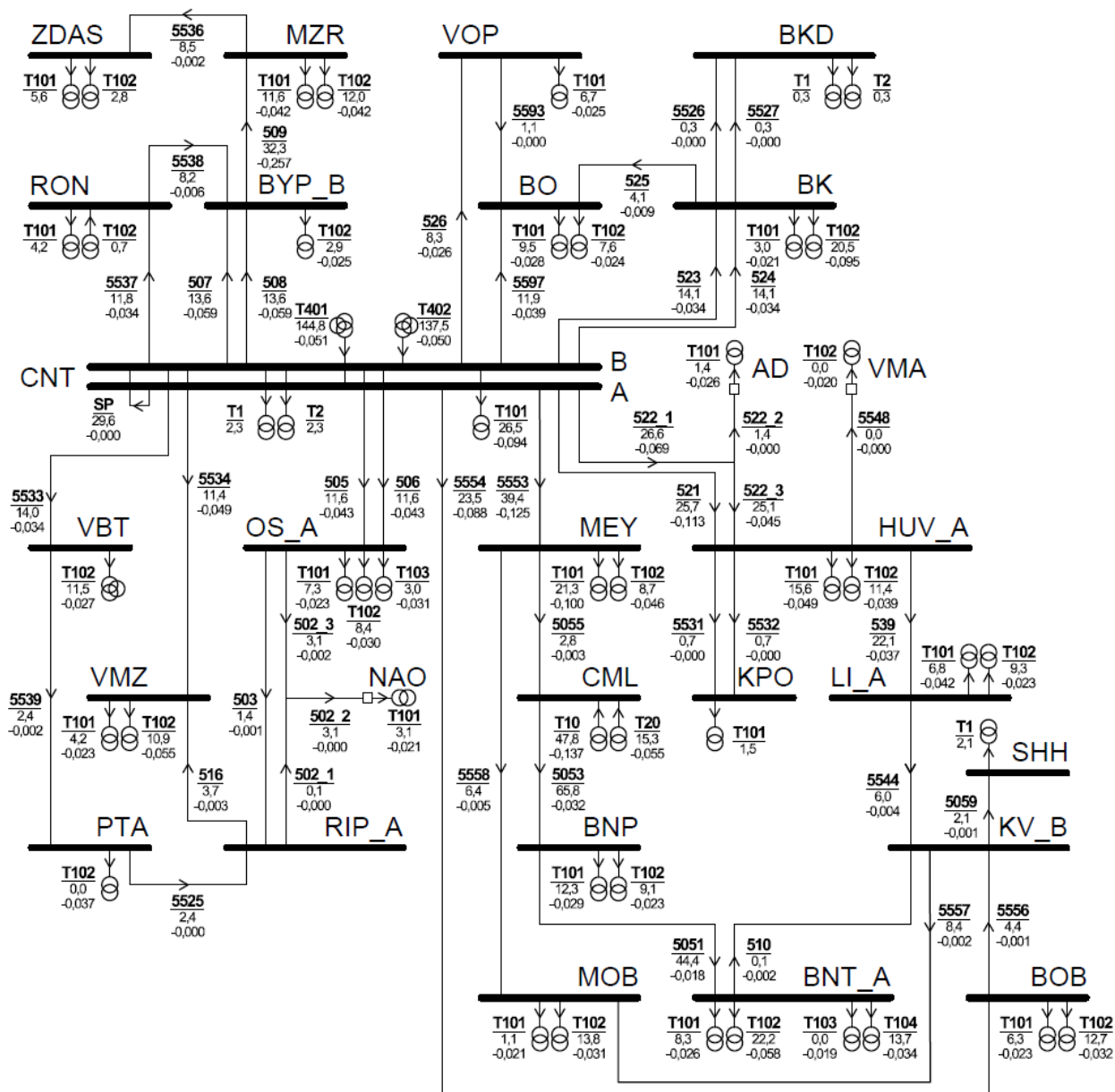
Rozvodna	Transformátor	P_T [MW]
CNT_A	T401	144,8
CNT_B	T402	137,5
CML	T10	47,8
CML	T20	15,3
RON	T102	0,7

V tabulkách 8-2, 8-3 a 8-4 jsou uvedeny ztráty pro jednotlivé prvky v uzlové oblasti. Přehled celkových ztrát na vedení a transformátorech je uveden v tabulce 8-6. Celkové ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín při paralelně pracujících transformátorech T401 a T402 jsou 2,858 MW. Ztráty tvoří 0,83 % výkonu dodávaného do oblasti.

Tab. 8- 6: Ztráty činného výkonu v UO 110 kV Čebín při paralelní spolupráci T401 a T402

Ztráty	ΔP [MW]
na transformátorech 400/110 kV	0,101
na ostatních transformátorech	1,476
na vedení	1,281

Na obrázku 8-2 jsou uvedeny toky a ztráty činného výkonu při paralelní spolupráci transformátorů T401 a T402. Pod označením prvku je uvedena hodnota činného výkonu v MW a ztráty činného výkonu v MW. U některých transformátorů je jen jedna hodnota, protože systém Sinaut Spectrum u nich nevyhodnotil ztráty, a proto je uveden jen odebíraný činný výkon transformátorem z uzlové oblasti.



Obr. 8- 2: Toky činného výkonu a jeho ztráty v UO 110 kV Čebín při paralelně pracujících transformátorech T401 a T402

8.1.5 Zkratové poměry v UO 110 kV Čebín

Zkratů jsou počítány metodou ekvivalentního napětového zdroje. Napětový součinitel je $c = 1,1$. V tabulce 8-7 jsou uvedeny vypočtené hodnoty systémem Sinaut Spectrum.

Tab. 8- 7: Zkratové poměry v rozvodnách napájených z paralelně pracujících transformátorů T401 a T402

Rozvodna	S''_{kmax} [MVA]	${}^{(1)}S''_k$ [MVA]	${}^{(1)}I''_k$ [kA]	${}^{(3)}S''_k$ [MVA]	${}^{(3)}I''_k$ [kA]
CNT	5000	5115,3	26,8	4644,1	24,4
MEY	3500	3267,3	17,1	2506,3	13,2
CML	3500	3371,9	17,7	2508,1	13,2
BNP	5000	3377,0	17,7	2477,3	13,0
BNT_A	3500	3397,6	17,8	2459,2	12,9
BOB	3500	1978,6	10,4	1984,0	10,4
MOB	5000	2346,1	12,3	2148,5	11,3
KV_B	3500	2906,6	15,3	2469,3	13,0
AD	3500	1910,6	10,0	1349,9	7,1
HUV_A	3500	2576,6	13,5	2467,4	13,0
KPO	3500	2233,0	11,7	2250,0	11,8
VMA	2500	2003,1	10,5	2078,7	10,9
SHH	3500	2716,0	14,3	2312,3	12,1
LI_A	3500	2371,4	12,4	2261,9	11,9
BYP	3500	2562,6	13,5	1843,3	9,7
RON	2500	1594,3	8,4	1625,3	8,5
MZR	3500	852,3	4,5	798,5	4,2
ZDAS	3500	766,8	4,0	752,2	3,9
VMZ	3500	1052,3	5,5	1132,3	5,9
PTA	3500	1051,6	5,5	1173,1	6,2
VBT	3500	1125,2	5,9	1464,5	7,7
NAO	2500	897,5	4,7	1056,9	5,5
RIP_A	3500	1193,1	6,3	1338,1	7,0
OS_A	2500	1746,7	9,2	1795,1	9,4
BO	3500	1748,0	9,2	1913,7	10,0
BK	3500	3472,5	18,2	2442,4	12,8
BKD	2500	3362,8	17,7	2405,0	12,6
VOP	3500	1379,3	7,2	1813,2	9,5

U všech rozvodn je splněna podmínka (6.1), která zaručuje odolnost rozvodny proti účinkům třífázového zkratu.

Vypočtený počáteční rázový zkratový výkon při jednofázovém zkratu má u rozvodny Čebín hodnotu ${}^{(1)}S''_k = 5115,3 \text{ MVA}$. Tato hodnota je vyšší než zkratová odolnost rozvodny S''_{kmax} , a proto na ni systém Sinaut Spectrum upozornil. Přestože je hodnota počátečního rázového zkratového výkonu počítána, jako by proud ${}^{(1)}I''_k$ tekl všemi třemi fázemi (viz vztah 7.5), ve skutečnosti teče pouze jednou fází, a proto nemá žádné mechanické účinky. V tomto případě bude problém s tepelným namáháním v rozvodně, které je způsobeno průchodem proudu ${}^{(1)}I''_k$ při jednofázovém zkratu.

9 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PŘI SAMOSTATNÉM A PARALELNÍM CHODU TRANSFORMÁTORŮ

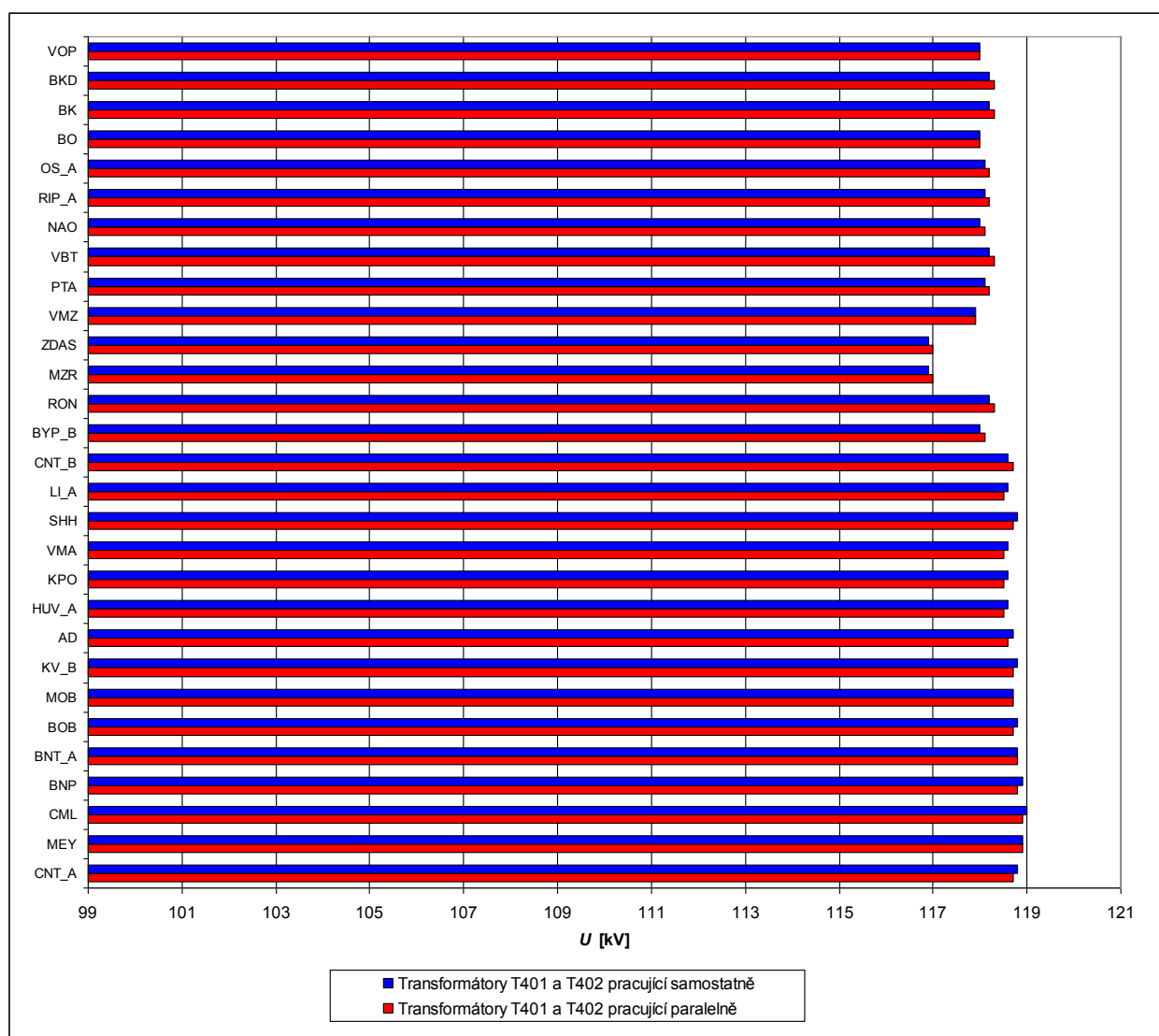
V této kapitole srovnáme vypočtené hodnoty při samostatně pracujících transformátorech T401 a T402 s vypočtenými hodnotami při jejich paralelní spolupráci.

9.1 Ustálený chod v UO 110 kV Čebín

Transformovna Čebín je na přenosovou soustavu napojena třemi vedeními 400 kV, která v době výpočtu přenášela činné výkony uvedené v tabulce 7-1. V obou případech odebíraly transformátory T401 a T402 z přenosové soustavy výkon 282,7 MW.

9.1.1 Srovnání velikosti napětí v rozvodnách

Vypočtené hodnoty napětí v rozvodnách při samostatně pracujících transformátorech T401 a T402 jsou uvedeny v tabulkách 7-2 a 7-3. Při jejich paralelní spolupráci byly vypočteny hodnoty uvedené v tabulce 8-1.

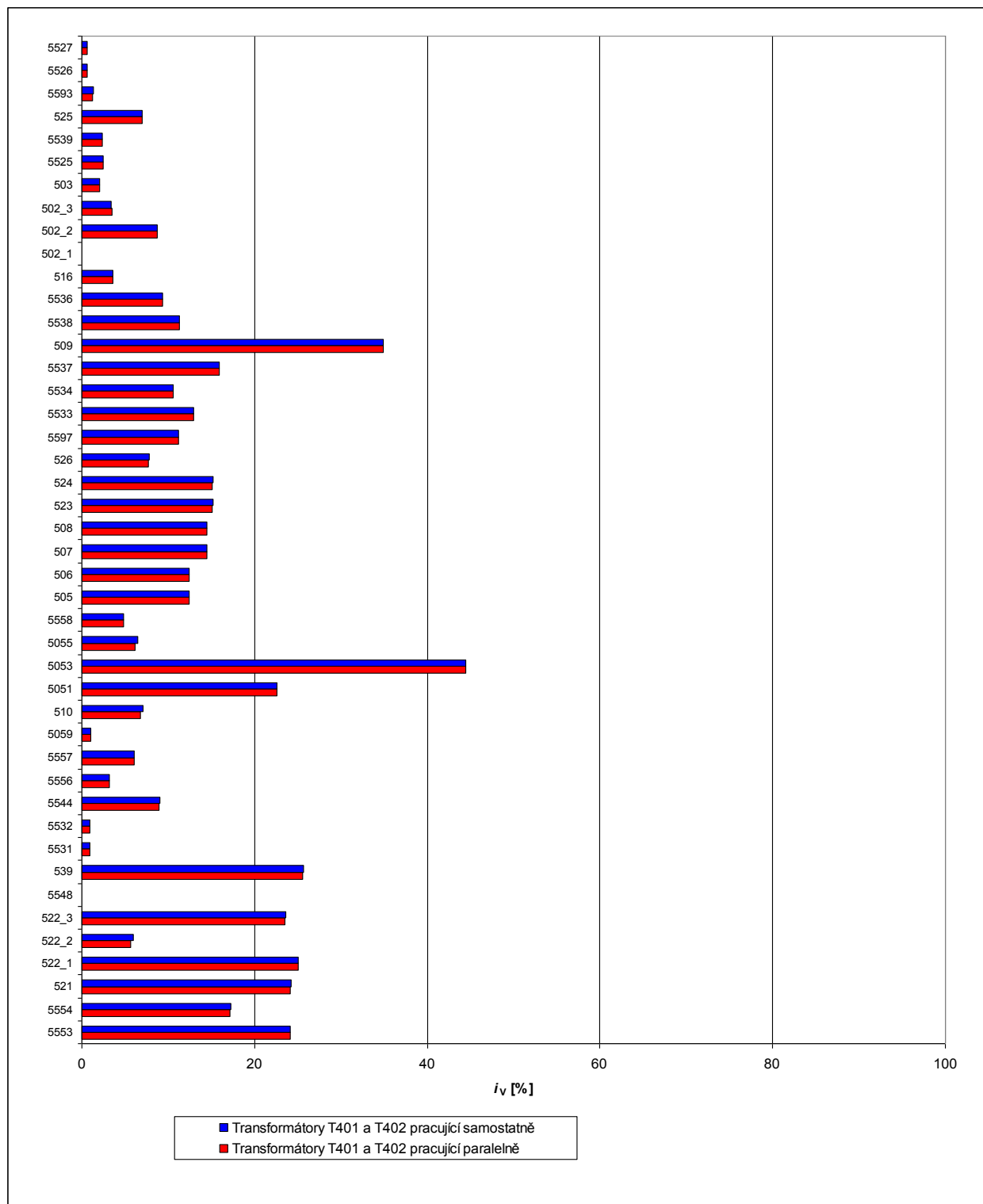


Obr. 9- 1: Srovnání velikosti napětí v rozvodnách v UO 110 kV Čebín

Na obrázku 9-1 je graf, který srovnává napětí v rozvodnách pro oba případy. Pro přehlednost je na ose x zvolen rozsah 99 až 121 kV, což jsou zároveň meze, v kterých by se mělo pohybovat napětí v rozvodnách 110 kV. Vidíme, že tomu tak je u všech rozveden.

Velikost napětí je při samostatně a paralelně pracujících transformátorech téměř stejná. V několika rozvodnách došlo ke změně o 0,1 kV, v ostatních se velikost napětí nezměnila vůbec.

9.1.2 Srovnání proudového zatížení vedení



Obr. 9- 2: Srovnání proudového zatížení vedení v UO 110 kV Čebín

Na obrázku 9-2 je srovnání poměrného proudového zatížení vedení i_v pro oba případy. Graf vychází z hodnot v tabulkách 7-4, 7-5 a 8-2. Všechna vedení splňují podmínku (7.1), která zaručuje, že žádné vedení není přetížené.

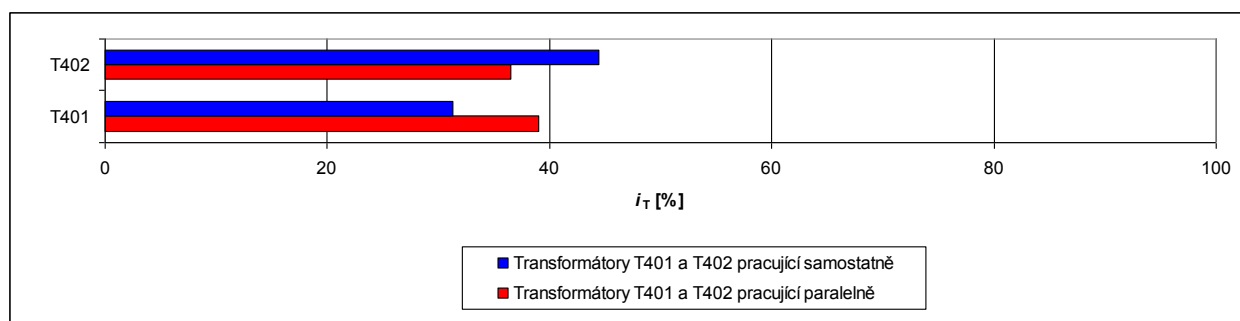
Nejvíce zatížené je v obou provozních stavech vedení 5053, které spojuje rozvodny Červený mlýn a Brno Příkop. Je to jediné vedení, které je zatíženo proudem na více než 40 % maximálního dovoleného proudu.

Poměrné zatížení vedení se při samostatně pracujících transformátorech a při paralelní spolupráci téměř neliší. Největší změna nastane u vedení 510, které spojuje rozvodny Teplárna Brno a Komárov. Při samostatné práci transformátorů je poměrné zatížení vedení 6,7 % a při paralelní spolupráci je vedení 510 zatíženo na 7,1 % svého maximálního dovoleného proudu.

9.1.3 Srovnání proudového zatížení transformátorů

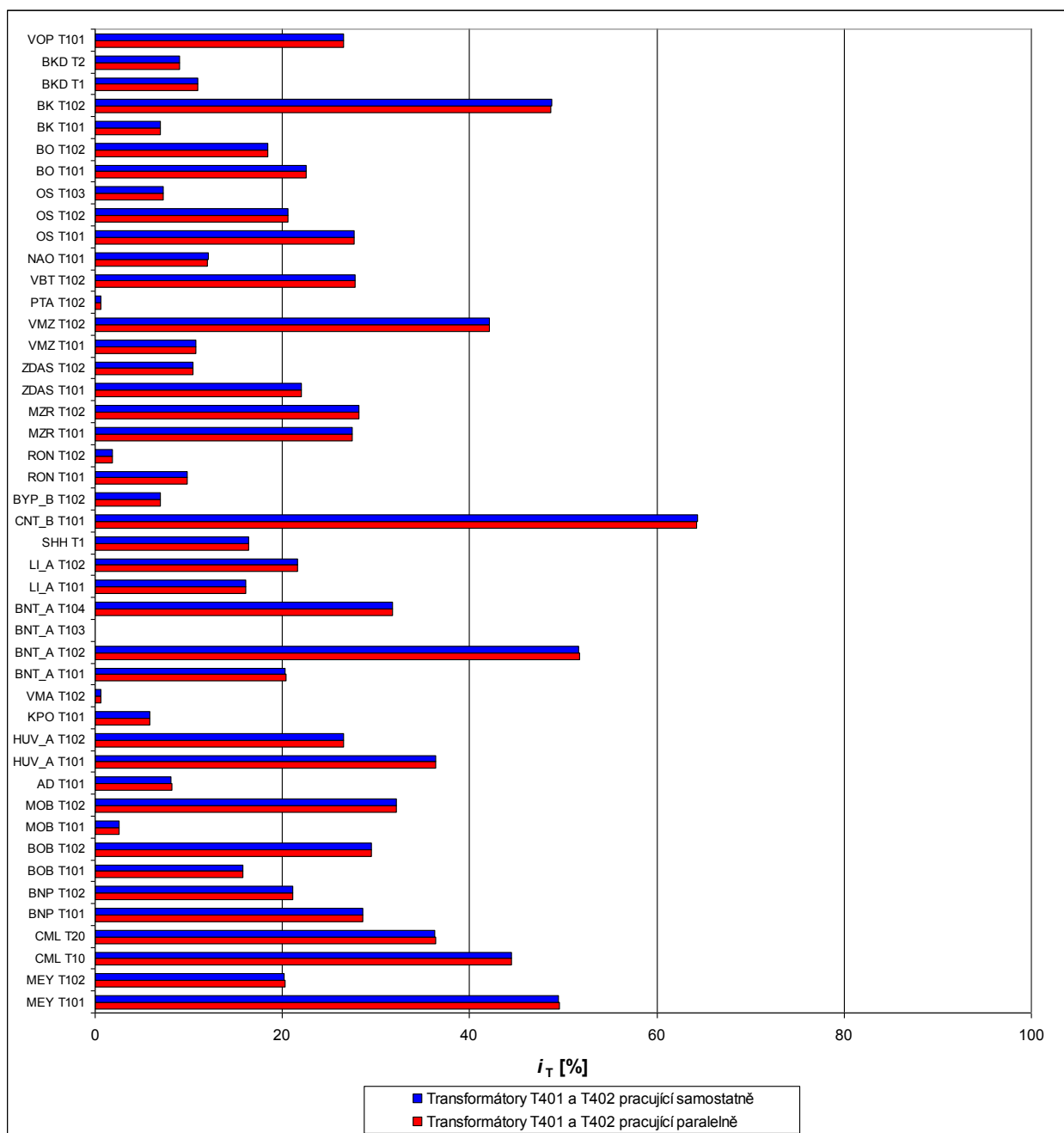
Na obrázku 9-3 vidíme srovnání proudového zatížení transformátorů T401 a T402 při jejich samostatném a paralelním provozu. Graf vychází z tabulek 7-6 a 8-3. V případě, kdy transformátory pracovaly samostatně, byl více zatížen transformátor T402, který dodával do uzlové oblasti činný výkon 167,1 MW. Jeho poměrné proudové zatížení bylo 44,4 %. Transformátor T401 dodával do uzlové oblasti činný výkon 115,2 MW a jeho poměrné proudové zatížení bylo 31,3 %. Větší zatížení transformátoru T402 bylo způsobeno většími požadavky na odebranou energii v rozvodnách, které napájí.

Při paralelním chodu transformátorů se o dodávku elektrické energie do všech rozvodů v uzlové oblasti starají oba transformátory zároveň. Větší výkon dodával v tomto případě transformátor T401 a to 144,8 MW. Poměrné proudové zatížení transformátoru bylo 39,0 %. Transformátor T402 dodával do uzlové oblasti 137,5 MW a byl zatížen na 36,6 % svého jmenovitého proudu.



Obr. 9- 3: Srovnání proudového zatížení transformátorů T401 a T402

Na obrázku 9-4 je srovnání poměrného proudového zatížení transformátorů i_v v uzlové oblasti Čebín při napájení samostatně pracujícími transformátory T401 a T402 a při jejich paralelní spolupráci. Graf vychází z tabulek 7-7, 7-8 a 8-4. Žádný z transformátorů není přetížen. Nejvíce zatížen je transformátor T101 připojený na přípojnicí B v rozvodně Čebín (CNT_B), jehož poměrné zatížení je 64,3 %. Druhým nejvíce zatíženým transformátorem je T102 v rozvodně Teplárna Brno, jehož poměrné proudové zatížení je 51,7 %. Ostatní transformátory v uzlové oblasti Čebín nejsou zatíženy na více než 50 % svého jmenovitého proudu.



Obr. 9- 4: Srovnání proudového zatížení transformátorů v UO 110 kV Čebín

Z grafu na obrázku 9-4 je zřejmé, že způsob provozu transformátorů T401 a T402 nemá vliv na poměrné proudové zatížení distribučních transformátorů v uzlové oblasti 110 kV Čebín.

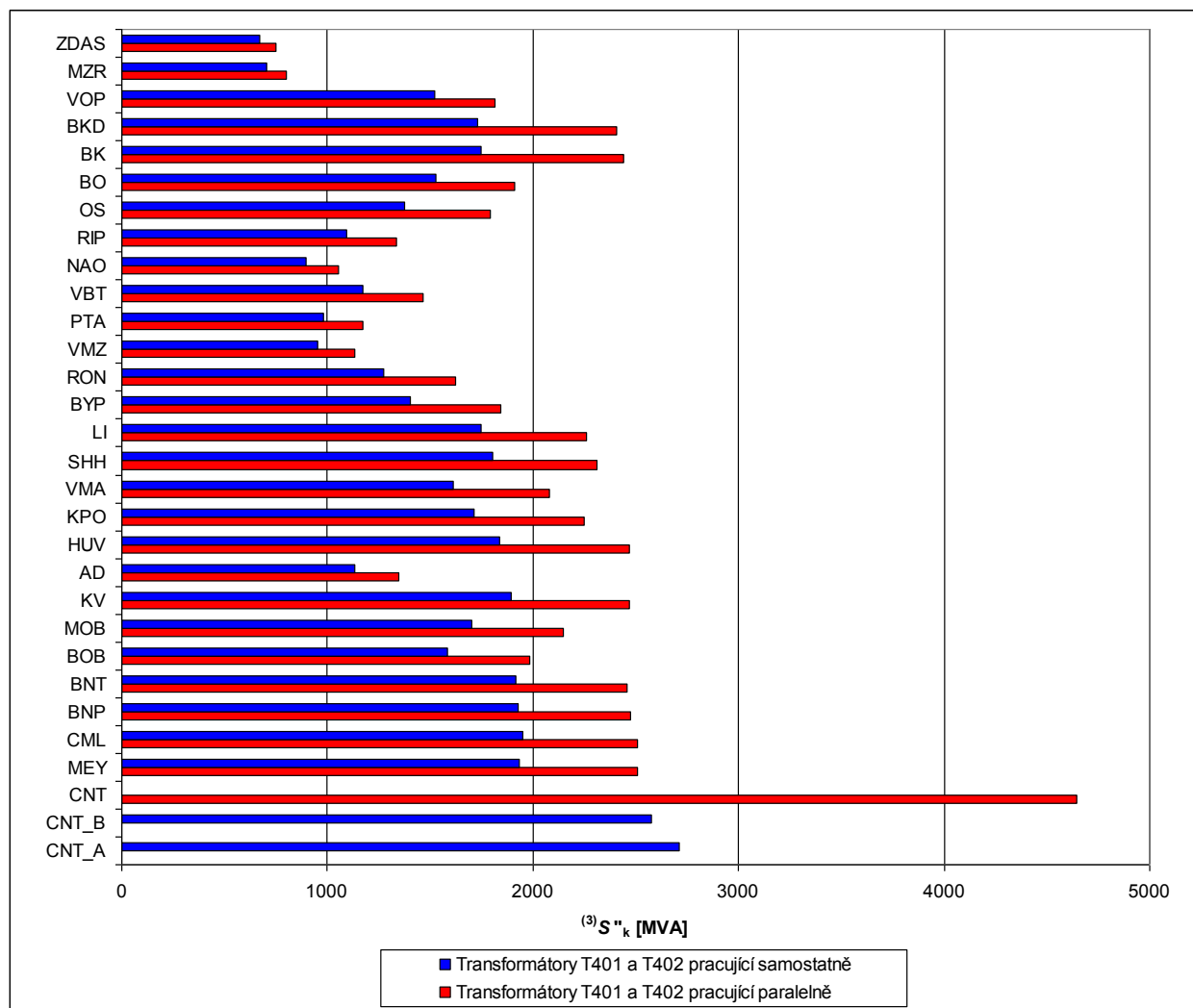
9.1.4 Srovnání ztrát činného výkonu

Činné ztráty pro jednotlivé prvky v uzlové soustavě 110 kV Čebín jsou uvedeny v tabulkách 7-4 až 7-8 a 8-2 až 8-4 a na obrázcích 7-2 a 8-2. Přehled celkových ztrát je uveden v tabulce 7-10 a 8-6. V případě, kdy transformátory T401 a T402 pracují samostatně, jsou celkové ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 2,864 MW. Při paralelní spolupráci transformátorů T401 a T402 jsou celkové ztráty činného výkonu 2,858 MW. V obou případech byl celkový činný výkon dodávaný do soustavy 346,1 MW a ztráty tak tvoří 0,83 %. Program Sinaut Spectrum

nevyhodnotil ztráty u všech transformátorů a tak musíme počítat s tím, že skutečné ztráty v uzlové oblasti budou o něco vyšší.

9.2 Zkratové poměry v UO 110 kV Čebín

Hodnoty počátečních rázových zkratových proudů a počátečních rázových zkratových výkonů jsou pro jednofázové a trojfázové zkraty uvedeny v tabulkách 7-11, 7-12 a 8-7. Na základě těchto hodnot jsou sestrojeny grafy na obrázcích 9-5 a 9-6.



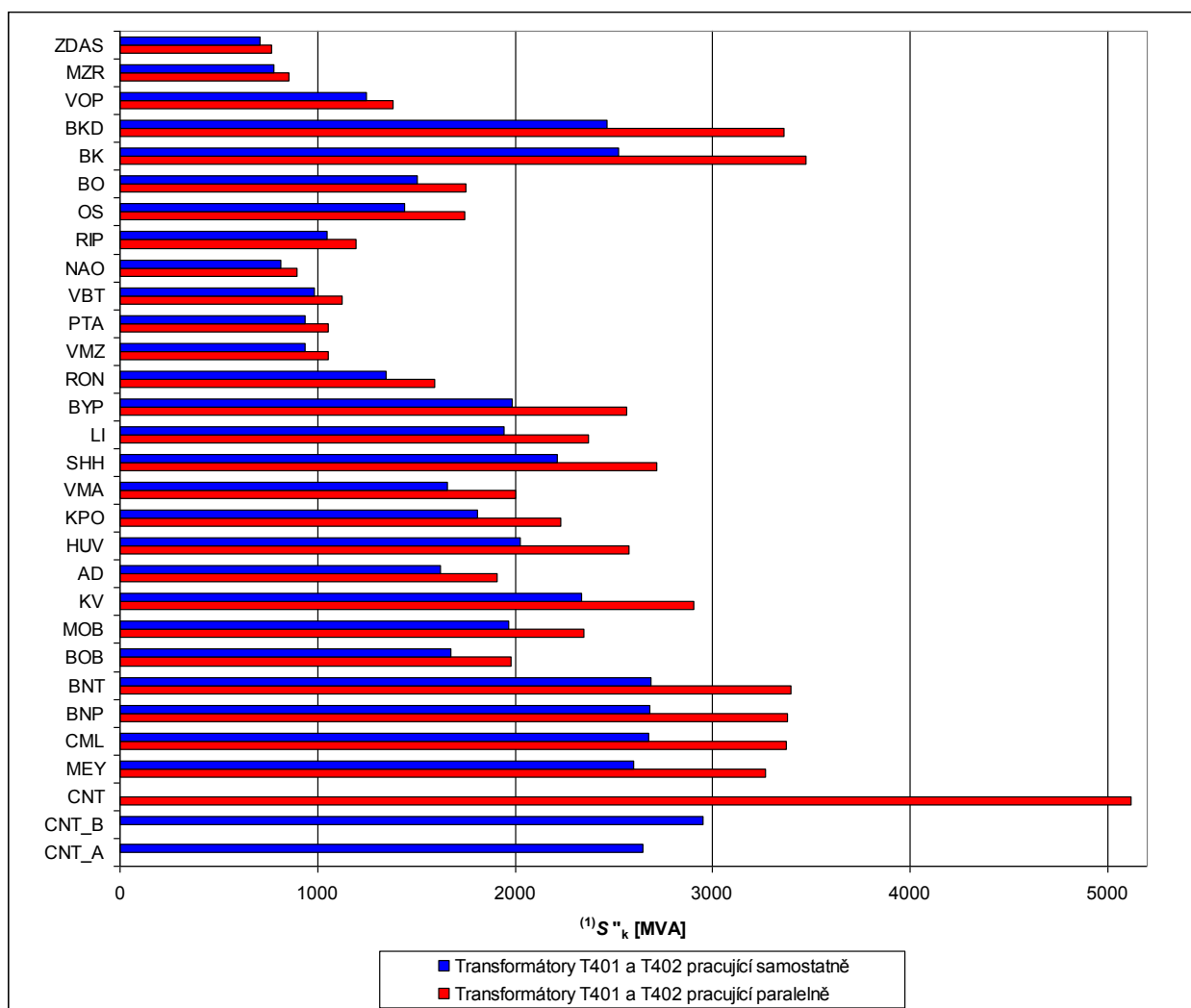
Obr. 9- 5: Srovnání počátečních rázových zkratových výkonů při trojfázovém zkratu

Při trojfázovém zkratu je rozvodné zařízení namáháno mechanicky a tepelně. V předchozích kapitolách bylo ověřeno, že všechny rozvodny vyhoví podmínce (6.1). Nyní se podíváme, jak se změní počáteční rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu v závislosti na způsobu provozování transformátorů T401 a T402.

Na obrázku 9-5 je srovnání počátečních rázových zkratových výkonů při trojfázovém zkratu pro případ, kdy jsou transformátory T401 a T402 provozovány samostatně (modrá barva), a pro případ, kdy pracují paralelně (červená barva). Vidíme, že v druhém případě jsou počáteční rázové zkratové výkony ve všech rozvodnách vyšší. Největší nárůst je v rozvodně Čebín (CNT),

kde při samostatném provozu byl počáteční rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu na přípojnici A roven 2714,2 MVA a na přípojnici B 2576,7 MVA. Při paralelním provozu transformátorů T401 a T402 jsou přípojnice A a B propojeny a počáteční rázový zkratový výkon v rozvodně se zvýší na 4644,1 MVA.

Při jednofázovém zkratu nemá zkratový proud mechanické účinky, ale rozvodné zařízení je namáháno tepelně. Na obrázku 9-6 je srovnání počátečních rázových zkratových výkonů při jednofázovém zkratu pro oba případy provozu transformátorů T401 a T402. Opět dochází při paralelním provozu k nárůstu počátečního rázového zkratového výkonu v rozvodnách. Systém Sinaut Spectrum počítá tento výkon podle vzorce (7.5) a následně ho srovnává se zkratovou odolností rozvodny $S_{k_{\max}}^{//}$. Pokud je spočítaný výkon vyšší než zkratová odolnost rozvodny, systém na ni upozorní. Tato situace nastala v rozvodně Čebín (CNT), jejíž zkratová odolnost je 5000 MVA, ale při paralelním provozu transformátorů T401 a T402 dosáhl počáteční rázový zkratový výkon hodnoty 5115,3 MVA.



Obr. 9- 6: Srovnání počátečních rázových zkratových výkonů při jednofázovém zkratu

10 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá výpočtem ustáleného chodu a zkratových poměrů v uzlové oblasti 110 kV Čebín. V první části práce je teoretický výklad, v druhé části práce je proveden výpočet pomocí systému Sinaut Spectrum.

V teoretické části je nejdříve popsána elektrizační soustava České republiky. Krátce je popsána přenosová soustava, ale především je kladen důraz na distribuční soustavu 110 kV. V dalších teoretických kapitolách je popsán výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů.

Ustálený chod v síti nastává, jsou-li všechny veličiny charakterizující její stav v rovnováze. Jsou-li odběry a dodávky v uzlech sítě zadány pomocí proudů, lze ustálený chod počítat jako lineární úlohu. Jsou-li odběry a dodávky v uzlech zadány pomocí výkonů, vede výpočet na systém nelineárních rovnic. K určení hledaných veličin v uzlech slouží iterační metody a to buď Gauss-Seidelova, nebo Newtonova. V práci je detailněji popsán výpočet pomocí Newtonovy iterační metody.

Pátá kapitola se věnuje zkratům, které se řadí mezi středně rychlé přechodné děje. Je zde popsán průběh zkratového proudu a jeho složky, dále jsou uvedeny charakteristické hodnoty zkratového proudu a vztahy pro výpočet počátečního rázového zkratového proudu metodou ekvivalentního napěťového zdroje. Pro výpočet nesouměrných zkratů se používá metoda rozkladu do souměrných složkových soustav. V závěru kapitoly je uvedeno odvození výpočtu zkratového proudu při jednofázovém a trojfázovém zkratu.

Na teoretickou část navazuje praktická část práce, která byla provedena ve spolupráci s firmou E.ON, jež je provozovatelem distribuční soustavy na jihu Moravy a Čech. V šesté kapitole je popsána síť 110 kV E.ON napájená z transformovny Čebín, která je předmětem diplomové práce. Jsou zde popsány jednotlivé rozvodny 110 kV, vedení 110 kV a distribuční transformátory, které spadají do uzlové oblasti Čebín. Celkové schéma distribuční sítě 110 kV E.ON je v příloze práce.

V transformovně Čebín jsou instalovány tři transformátory 400/110 kV s označením T401, T402 a T403. V práci jsou zkoumány dva způsoby provozu transformátorů T401 a T402. V obou případech není transformátor T403 v provozu a slouží jako záloha.

První způsob provozu transformátorů je na obr. 7-1. Transformátory T401 a T402 pracují samostatně. Transformátor T401 je připojen na přípojnicí A v rozvodně 110 kV Čebín, odkud jsou dále napájeny rozvodny Medlánky, Červený mlýn, Brno Příkop, Teplárna Brno, Bohunice, Brno Moravany, Komárov, Adamov, Husovice, Královopolská Brno, Výtopna Maloměřice, Slévárna Horní Heršpice a Líšeň. Transformátor T402 je v rozvodně 110 kV Čebín připojen na přípojnicí B, z které jsou napájeny rozvodny Bystřice nad Pernštejnem, Dolní Rožinka, Velké Meziříčí, Ptáčov, Velká Bíteš, Náměšť nad Oslavou, Říčov, Oslavany, Boskovice, Velké Opatovice, Blansko, Blansko ČD, Žďár nad Sázavou a ŽĎAS. Rozvodny Žďár nad Sázavou a ŽĎAS jsou za normálního provozu napájeny z rozvodny 110 kV Mírovka. Protože právě probíhají práce na vedeních 1309 a 1310, musí být napájení těchto dvou rozvodů zajištěno z uzlové oblasti Čebín.

Druhý způsob provozu transformátorů T401 a T402 je na obr. 8-1. Přípojnice A a B jsou v rozvodně Čebín spojeny příčným spínačem a transformátory pracují paralelně. Všechny rozvodny v uzlové oblasti Čebín jsou napájeny z obou transformátorů zároveň.

Výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů v uzlové oblasti 110 kV Čebín proběhl 20.3.2015 v 8:30 pomocí systému Sinaut Spectrum. Výstupem ze systému jsou textové soubory, které jsou v příloze práce. V kapitolách 7, 8 a 9 jsou výsledky výpočtů zpracovány a je provedeno srovnání obou způsobů provozu transformátorů T401 a T402.

Při ustáleném chodu sítě byla provedena kontrola velikosti napětí v rozvodnách 110 kV, proudového zatížení vedení 110 kV a transformátorů a vyhodnoceny jsou ztráty činného výkonu v uzlové oblasti 110 kV Čebín.

Velikost napětí v rozvodnách je udržována na vyšší hodnotě, než je jmenovitých 110 kV. Zároveň však není překročena dovolená odchylka $\pm 10 \%$ od 110 kV. Všechna napětí v rozvodnách jsou v rozmezí 99 až 121 kV. Tato skutečnost je dobře vidět na obrázku 9-1, kde je také zřejmé, že způsob provozu transformátorů T401 a T402 nemá téměř žádný vliv na velikost napětí v rozvodnách v uzlové oblasti 110 kV Čebín.

Aby vedení nebylo přetíženo, nesmí proud tekoucí vedením překročit jeho maximální dovolenou hodnotu. V uzlové oblasti Čebín při obou způsobech provozu transformátorů T401 a T402 bylo nejvíce zatíženo vedení 5053, kterým jsou propojeny rozvodny Červený mlýn a Brno Příkop. Toto vedení bylo zatíženo v jednom případě na 44,4 %, ve druhém případě na 44,5 % svého maximálního dovoleného proudu. Všechna ostatní vedení byla zatížena na méně než 40 %. Z obrázku 9-2 je patrné, že způsob provozu transformátorů T401 a T402 nemá vliv na proudové zatížení vedení 110 kV v uzlové oblasti.

Proudové zatížení bylo zkoumáno i u transformátorů. Zvláště byly vyhodnoceny transformátory 400/110 kV a ostatní distribuční transformátory. V případě, kdy transformátory T401 a T402 pracovaly samostatně, byl více zatížen transformátor T402, který zajišťoval dodávku i do rozveden Žďár nad Sázavou a ŽDAS, které za normálního provozu nepatří do uzlové oblasti 110 kV Čebín. Transformátor T401 byl zatížen na 44,4 % svého jmenovitého proudu, transformátor T402 na 31,3 %. Při paralelním provozu se zatížení transformátoru T401 zvýšilo na 39,0 %, u transformátoru T402 proudové zatížení kleslo na 36,6 %.

Žádný z distribučních transformátorů v uzlové oblasti Čebín nebyl během ustáleného chodu sítě přetěžován. Nejvíce byl zatížen transformátor T101, který je připojen v rozvodně Čebín na přípojnicí B. Jeho poměrné proudové zatížení bylo 64,3 %. Na obrázku 9-4 je vidět, že způsob provozu transformátorů T401 a T402 nemá vliv na zatížení distribučních transformátorů v uzlové oblasti.

System Sinaut Spectrum vyhodnocuje ztráty činného výkonu u jednotlivých prvků, které patří společnosti E.ON. V oblasti jsou však distribuční transformátory, které mají jiného majitele a tak u nich nejsou ztráty vyhodnoceny. Přesto nám výsledky výpočtu dávají poměrně přesnou představu o hospodárnosti provozu uzlové oblasti Čebín.

Kromě transformátorů T401 a T402 byl výkon do oblasti dodáván z paroplynové teplárny Červený mlýn a přes transformátor T102 v rozvodně Dolní Rožínka. V obou případech byl celkový činný výkon dodávaný do soustavy 346,1 MW. Při samostatném provozu transformátorů T401 a T402 byly ztráty činného výkonu v oblasti 2,864 MW, při paralelní spolupráci transformátorů T401 a T402 byly ztráty činného výkonu 2,858 MW. V obou případech ztráty představují 0,83 % celkového dodávaného činného výkonu do oblasti.

Z výše uvedeného vyplývá, že způsob provozu transformátorů T401 a T402 nemá zásadní vliv na velikost napětí v rozvodnách 110 kV, na zatížení vedení 110 kV, na zatížení distribučních transformátorů ani na ztráty činného výkonu v oblasti. Z hlediska zajištění dodávky elektrické

energie je výhodnější provozovat transformátory T401 a T402 paralelně. V případě výpadku jednoho z transformátorů nedojde k přerušení dodávky elektrické energie v oblasti, protože napájení bude zajištěno transformátorem bez poruchy.

Při vyhodnocování zkratových poměrů v uzlové oblasti 110 kV Čebín byla provedena kontrola zkratových odolností jednotlivých rozvodů. Systém Sinaut Spectrum počítá počáteční rázové zkratové proudy při jednofázovém a trojfázovém zkratu.

Srovnání počátečních rázových zkratových výkonů při trojfázovém zkratu je na obrázku 9-5, kde je vidět, že při paralelním provozu transformátorů je zkratový výkon vyšší než při samostatném provozu transformátorů. Největší změna nastane v rozvodně 110 kV Čebín. Přesto je ve všech případech splněna podmínka, že počáteční rázový zkratový výkon není větší než zkratová odolnost rozvodny. Všechny rozvodny odolají tepelnému a mechanickému namáhání při trojfázovém zkratu.

Při paralelním provozu transformátorů se zvýší i počáteční rázový zkratový výkon v případě jednofázového zkratu. Uvážíme-li, že způsob provozu transformátorů T401 a T402 neměl zásadní vliv na parametry sítě při ustáleném chodu, jeví se samostatný provoz transformátorů jako lepší volba, protože zařízení rozvodů není při zkratu tolik namáháno.

Pokud by se v budoucnu uvažovalo o paralelním provozu transformátorů T401 a T402, bude nutné přezbrojit rozvodnu 110 kV Čebín, kde by při současném vybavení mohlo dojít v případě jednofázového zkratu k nedovolenému tepelnému namáhání rozvodny.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALUZÍK, E. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. 1. Vyd. Praha: SNTL, 1983, 125 s.
- [2] BLAŽEK, V., PAAR, M., *Přenosové sítě*. Brno: VUT v Brně, 2007, 123s.
- [3] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] BLAŽEK, V., SKALA, P., *Distribuce elektrické energie*. Brno: VUT v Brně. 138s.
- [5] MÁŠLO, Karel a kol. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. SUNGATE s.r.o., 2013, 272 s. ISBN 978-80-260-44671-1.
- [6] VOKÁL, Josef. Výpočty zkratů v technické praxi. *Energetika*. 2013, Ročník 63, č. 1, s. 539-559.
- [7] KOLCUN, M. *Riadenie elektrizačných sústav – Príklady*. Technická Univerzita v Košiciach. 1992. 86 s.
- [8] ČEPS, A.S. Výukový materiál. *Data do kapsy 2013*.
- [9] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. Ostrava: Vydala VŠB-TU Ostrava ve vydavatelství Montanex, 2008, 364 s. ISBN 978-80-7225-291-6.
- [10] ČSN EN 60909-0 (33 3022): 2002, *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 0: Výpočet proudů*.
- [11] E.ON DISTRIBUCE, A.S. *Popis distribuční soustavy E.ON* [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/technical_information/EON-popis_ds.pdf
- [12] TEPLÁRNY BRNO, A.S. Výukový materiál. *Paroplynová teplárna Červený mlýn*.