

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 ROZVODNY
110 KV ČEBÍN V ROCE 2011**

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADIM CHRÁSTEK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Radim Chrástek

ID: 73022

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

**Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV
Čebín v roce 2011**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Teorie výpočtu ustáleného chodu sítí vvn a zvn.
- 2) Teorie výpočtu zkratových poměrů.
- 3) Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV napájené z rozvodny 110 kV Čebín pro dvě varianty zapojení dvou napájecích transformátorů 400/110 kV v transformovně Čebín: samostatné a můstkové.
- 4) Výpočet zkratových poměrů při jednopólovém a třípólovém zkratu v síti 110 kV pro dvě varianty zapojení transformátorů 400/110 kV.
- 5) Vyhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro dvě varianty zapojení transformátorů 400/110 kV.
- 6) Návrh provozních a technických opatření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

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

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

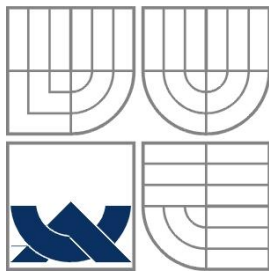
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

CHRÁSTEK, R. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV Čebín v roce 2011*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 91 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110kV E.ON napájené z rozvodny 110kV Čebín v roce 2011

Bc. Radim Chrástek

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

Master's Thesis

**Stabilized operation and short -
circuit conditions within E.ON 110 kV
power network supplied from Čebín
110kV switching station, during the
period of 2011**

by

Bc. Radim Chrástek

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2011

Brno

ABSTRAKT

Cílem této práce je navrhnout provoz tzv. můstkového zapojení v distribuční soustavě 110 kV v uzlové oblasti Čebín. Hlavním úkolem je kontrola splnění tolerancí napětí v rozvodnách 110 kV, kontrola zatížení transformátorů (400/110 kV, 110/VN kV) a vedení 110 kV, a kontrola zkratových odolností. Příslušné výpočty jsou provedeny s využitím dispečerského řídicího systému, který pracuje s aktuálními parametry všech zařízení distribuční soustavy.

Teoretická část diplomové práce je věnována způsobu výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV a způsobu výpočtu zkratových poměrů.

V praktické části je nejprve provedena analýza ustáleného chodu a zkratových poměrů DS 110 kV při současném provozu. V další části se věnujeme návrhu můstkového zapojení a analýze jeho provozu. Provoz můstkového zapojení je prověřen i při zvláštních stavech (poruchové stavy, zvýšené zatížení). Všechny vypočítané výsledky jsou zhodnoceny. Nejprve se věnujeme zhodnocení současného provozu a navrhovaného – můstkového zapojení. Dále provádíme zhodnocení provozu můstkového zapojení při zvláštních provozních stavech. Nakonec zhodnotíme ztráty v DS 110 kV.

Pokud z výpočtů ustáleného chodu či zkratových poměrů DS 110 kV zjistíme, že některé její prvky jsou přetíženy, navrhujeme změny, které zajistí bezpečný a spolehlivý provoz DS 110 kV.

KLÍČOVÁ SLOVA: Čebín, napěťové poměry, ustálený chod sítě, zkrat, zkratové poměry.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to project an operation of bridge connection in distribution network in Čebín's nodal area. The main task is to check a fulfilment of voltage tolerance in distribution substations 110 kV, load transformer control (400/110 kV, 110/VN kV), distribution power line 110 kV control and short - circuit conditions control. Relevant calculations are performed by dispatching control system, which works with the actual parameters of all distribution network's 110 kV facilities.

The theoretical part of this thesis is devoted to the way of the calculation of stabilized operation and the short-circuit conditions.

In practical part, first we perform an analyse of stabilized operation and the short-circuit conditions of distribution network 110 kV in actual operation. Next step deals with bridge connection design and analysing its operation. The operation of bridge connection is veriflicated even in specific conditions (disturbance state, increased load). The next section evaluates the results of the calculations. First we deal with actual operations evaluation and proposed the bridge connection. In the next section we evaluate the operation of the bridge connection in the specific operating conditions. Finally, we evaluate the losses in the distribution network 110 kV.

If the calculations of the stabilized operation or the short-circuit conditions of distribution network discovers that some of its elements are overloaded, we propose changes to ensure safe and reliable operation of the distribution network.

KEY WORDS: Čebín, voltage tolerance, stabilized operation, short-circuit, short-circuit conditions.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	11
SEZNAM SYMBOLŮ	13
SEZNAM ZKRATEK.....	17
1 ÚVOD.....	19
2 CÍL PRÁCE	20
3 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ.....	21
3.1 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ 110 kV	21
3.1.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY	21
3.1.2 KLASIFIKACE UZLŮ A PODMÍNKY URČITOSTI CHODU SÍTĚ	22
3.1.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA	23
3.1.4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA.....	25
3.1.5 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	27
3.2 ZKRATY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	30
3.2.1 PŘECHODOVÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	30
3.2.2 DRUHY ZKRATŮ	31
3.2.3 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATU	33
3.2.4 NÁSLEDKY ZKRATU	34
3.2.5 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU.....	35
3.2.6 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU.....	37
3.2.7 METODIKA VÝPOČTU ZKRATOVÝCH POMĚRŮ	38
4 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO PROVOZU DS 110 kV UO ČEBÍN	46
4.1 DS 110 kV UO ČEBÍN	47
4.1.1 OBLAST NAPÁJENÁ Z TRANSFORMÁTORU T401	47
4.1.2 OBLAST NAPÁJENÁ Z TRANSFORMÁTORU T402	48
4.1.3 OBLAST NAPÁJENÁ Z TRANSFORMÁTORU T403	50
5 ŘEŠENÍ SOUČASNÉHO PROVOZU DS 110 kV UO ČEBÍN	51
5.1 USTÁLENÝ CHOD DS 110 kV UO ČEBÍN.....	51
5.1.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V DS 110 kV	51
5.1.2 TRANSFORMÁTORY.....	52
5.1.3 VEDENÍ 110 kV.....	53
5.2 ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 kV UO ČEBÍN.....	55
6 ŘEŠENÍ PROVOZU DS 110 kV UO ČEBÍN PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ	57
6.1 POPIS MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ	58
6.2 USTÁLENÝ CHOD DS 110 kV UO ČEBÍN PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ.....	58
6.2.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V DS 110 kV	58
6.2.2 TRANSFORMÁTORY.....	59
6.2.3 VEDENÍ 110 kV.....	60

6.3 ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 kV UO ČEBÍN PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ.....	61
6.4 ZVLÁŠTNÍ PROVOZNÍ STAVY PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ	62
6.4.1 VÝPADEK PŘÍPOJNICE A V R 110 kV CNT	62
6.4.2 MŮSTKOVÉ ZAPOJENÍ - ZVÝŠENÉ ZATÍŽENÍ.....	66
6.4.3 MŮSTKOVÉ ZAPOJENÍ - ZVÝŠENÉ ZATÍŽENÍ (VÝPADEK V506 A V507)	69
6.5 SPÍNAČ PŘÍPOJNIC - SP	72
7 VYHODNOCENÍ ŘEŠENÍ SOUČASNÉHO PROVOZU A MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ.....	73
7.1 VYHODNOCENÍ SOUČASNÉHO PROVOZU A MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ	73
7.1.1 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ DS 110 kV UO ČEBÍN	73
7.1.2 ZKRATOVÉ POMĚRY DS 110 kV UO ČEBÍN	76
7.2 VYHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ PŘI ZVLÁŠTNÍCH PROVOZNÍCH STAVECH.....	77
7.3 VYHODNOCENÍ ZTRÁT ČINNÉHO VÝKONU V DS 110 kV UO ČEBÍN	84
8 NÁVRH PROVOZNÍCH OPATŘENÍ.....	86
9 ZÁVĚR.....	87
POUŽITÁ LITERATURA	90

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Náhradní schéma sítě pro výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha.....	23
Obr. 3-2 Fázorový diagram napětí a proudu.....	25
Obr. 3-3 Náhradní Π - členek.....	26
Obr. 3-4 Třífázový zkrat.....	32
Obr. 3-5 Třífázový zemní zkrat.....	32
Obr. 3-6 Dvoufázový zkrat.....	33
Obr. 3-7 Dvoufázový zemní zkrat.....	33
Obr. 3-8 Jednofázový zkrat.....	33
Obr. 3-9 Průběh zkratového proudu s maximální stejnosměrnou složkou.....	36
Obr. 3-10 Průběh zkratového proudu s nulovou stejnosměrnou složkou.....	37
Obr. 3-11 Náhradní schéma pro souslednou složku.....	42
Obr. 3-12 Náhradní schéma pro zpětnou složku.....	43
Obr. 3-13 Náhradní schéma pro netočivou složku.....	43
Obr. 3-14 Třífázový zemní zkrat.....	43
Obr. 3-15 Jednofázový zkrat.....	44
Obr. 4-1 DS 110 kV UO Čebín při současném provozu.....	46
Obr. 6-1 DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení.....	57
Obr. 6-2 DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení – výpadek přípojnice A.....	63
Obr. 6-3 DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení – zvýšené zatížení.....	66
Obr. 7-1 Grafický přehled napěťových poměrů při můstkovém zapojení.....	79
Obr. 7-2 Grafický přehled zatížení transformátorů 400/110 kV při můstkovém zapojení.....	80
Obr. 7-3 Grafický přehled zatížení vedení 110 kV při můstkovém zapojení.....	83

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Orientace výkonu P , Q ve zdrojových a odběrových uzlech	26
Tab. 3-2 Pravděpodobnost výskytu poruch na venkovních vedeních 110 kV	33
Tab. 5-1 Napěťové poměry v uzlech DS 110 kV – současný provoz	51
Tab. 5-2 Transformátory 400/110 kV – současný provoz.....	52
Tab. 5-3 Transformátory 110/VN kV – současný provoz.....	53
Tab. 5-4 Vedení 110 kV – současný provoz	54
Tab. 5-5 Zkratové poměry – současný provoz	55
Tab. 6-1 Napěťové poměry uzlech DS 110 kV – můstkové zapojení	59
Tab. 6-2 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení.....	59
Tab. 6-3 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení.....	60
Tab. 6-4 Vedení 110 kV – můstkové zapojení	61
Tab. 6-5 Zkratové poměry – můstkové zapojení.....	62
Tab. 6-6 Napěťové poměry v uzlech – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A)	64
Tab. 6-7 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A).....	64
Tab. 6-8 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A).....	64
Tab. 6-9 Vedení 110 kV – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A)	65
Tab. 6-10 Napěťové poměry v uzlech – můstkové zapojení (zvýšené zatížení)	67
Tab. 6-11 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení)	67
Tab. 6-12 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení)	68
Tab. 6-13 Vedení 110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení).....	68
Tab. 6-14 Napěťové poměry v uzlech – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadkem V506 a V507).....	69
Tab. 6-15 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadky vedení V506 a V507).....	70
Tab. 6-16 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadkem vedení V506 a V507).....	70
Tab. 6-17 Vedení 110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadkem vedení V506 a V507)	71
Tab. 6-18 Přehled zatížení spínače přípojníc	72
Tab. 7-1 Přehled napěťových poměrů v rozvodnách 110 kV.....	73
Tab. 7-2 Přehled zatížení transformátorů 400/110 kV	74
Tab. 7-3 Přehled zatížení transformátorů 110/VN kV	75
Tab. 7-4 Přehled zatížení vedení 110 kV	76

<i>Tab. 7-5 Přehled zkratových poměrů při třífázovém zkratu</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 7-6 Přehled zkratových poměrů při jednofázovém zkratu</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 7-7 Přehled napěťových poměrů při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 7-8 Přehled zatížení transformátorů 400/110 kV při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 7-9 Přehled zatížení transformátorů 110/VN kV při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech.....</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 7-10 Přehled zatížení vedení 110 kV při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech.....</i>	<i>82</i>
<i>Tab. 7-11 Přehled ztrát v DS 110 kV UO Čebín</i>	<i>85</i>

SEZNAM SYMBOLŮ

ΔI_{dodv}	změna velikosti proudu na konci vedení	A
ΔI_{zt}	změna velikosti proudového zatížení transformátoru	A
ΔP_c	celkové ztráty činného výkonu	W
ΔP_t	ztráty činného výkonu v transformátorech	W
ΔP_v	ztráty činného výkonu na vedení	W
ΔU_R	změna velikosti napětí	V
$\Sigma \Delta P_c$	celkové ztráty činného výkonu v DS 110 kV	W
$\Sigma \Delta P_v$	celkové ztráty činného výkonu na vedeních 110 kV	W
$\Sigma \Delta P_{t,400}$	celkové ztráty činného výkonu v transformátorech 400/110 kV	W
$\Sigma \Delta P_{t,110}$	celkové ztráty činného výkonu v transformátorech 110/VN kV	W
ΣP_{dod}	celkový činný výkon dodávaný do DS 110 kV (strana 110 kV)	W
ΣP_{odb}	celkový činný výkon odebíraný z DS 110 kV (strana 110 kV)	W
$^{(1)}I_k''$	efektivní hodnota zkratového proudu – jednofázového	A
$^{(3)}I_k''$	efektivní hodnota zkratového proudu – třífázového	A
$^{(1)}S_k''$	počáteční rázový zkratový výkon při jednofázovém zkratu	VA
$^{(3)}S_k''$	počáteční rázový zkratový výkon při třífázovém zkratu	VA
B_k	kapacitní susceptance vedení na jednotku délky	S
$\overline{E}_{(0)}$	fázor netočivé složky vnitřního napětí alternátoru	V
$\overline{E}_{(1)}$	fázor sousledné složky vnitřního napětí alternátoru	V
$\overline{E}_{(2)}$	fázor zpětné složky vnitřního napětí alternátoru	V
G_k	konduktance vedení na jednotku délky	S
$\overline{I}$	fázor proudu	A
$\overline{I}^*$	fázor proudu, komplexně sdružený	A
$\overline{I}_A$	fázor proudu fáze A	A
$\overline{I}_B$	fázor proudu fáze B	A
I_b	střídavou složku vypínacího zkratového proudu	A

I_{bdc}	stejnosemřná složka vypínacího zkratového proudu	A
$\bar{I}_{\text{C}}$	fázor proudu fáze C	A
I_{dodv}	proud dodávaný vedením (proud na konci vedení)	A
I_{dyn}	dynamický zkratový proud	A
I_{k}''	počáteční rázový zkratový proud	A
I_{k}'	efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu	A
I_{k}	efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu	A
I_{nSP}	jmenovitý proud spínače přípojníc	A
I_{nt}	jmenovitý proud transformátoru	A
I_{nv}	jmenovitý proud vedení	A
I_{nvyyp}	jmenovitý vypínací proud	A
I_{th}	ekvivalentní oteplovací proud	A
I_{thr}	jmenovitý krátkodobý proud	A
I_{zSP}	proudové zatížení spínače přípojníc	A
I_{zt}	proud tekoucí transformátorem (strana transformátoru - 110 kV)	A
$\bar{I}_{(0)}$	fázor netočivé složky proudu souměrné složkové soustavy	A
$\bar{I}_{(1)}$	fázor sousledné složky proudu souměrné složkové soustavy	A
$\bar{I}_{(2)}$	fázor zpětné složky proudu souměrné složkové soustavy	A
$[J]$	matice parciálních derivací, tzv. Jakobián	-
P	činný výkon	W
P_{dodt}	činný výkon dodávaný transformátorem (strana transformátoru - 110 kV)	W
P_{dodv}	činný výkon dodávaný vedením do uzlu (na konci vedení)	W
P_{odbt}	činný výkon odebíraný transformátorem (strana transformátoru - 110 kV)	W
P_{odbv}	činný výkon odebíraný vedením z uzlu (na začátku vedení)	W
Q	jalový výkon	VAr
Q_{dodt}	jalový výkon dodávaný transformátorem (strana transformátoru - 110 kV)	VAr
Q_{dodv}	jalový výkon dodávaný vedením do uzlu (na konci vedení)	VAr
Q_{odbt}	jalový výkon odebíraný transformátorem (strana transformátoru - 110 kV)	VAr
Q_{odbv}	jalový výkon odebíraný vedením z uzlu (na začátku vedení)	VAr

R_k	rezistance vedení na jednotku délky	Ω
$\bar{S}$	zdánlivý výkon	VA
S_{T401}	celkový dodávaný zdánlivý výkon transformátorem T401	VA
S_{T403}	celkový dodávaný zdánlivý výkon transformátorem T403	VA
S_{celk}	celkový dodávaný zdánlivý výkon	VA
$S_{celk,A}$	celkový odebíraný zdánlivý výkon z přípojnice A	VA
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon	VA
$S_{n,SP}$	zdánlivý jmenovitý výkon spínače přípojnic	VA
S_{nt}	zdánlivý jmenovitý výkon transformátoru	VA
S_{nvyp}	jmenovitý vypínací zkratový výkon	VA
$\bar{U}_A$	fázor sdruženého napětí fáze A	V
$\bar{U}_B$	fázor sdruženého napětí fáze B	V
$\bar{U}_C$	fázor sdruženého napětí fáze C	V
$\bar{U}_f$	fázor fázového napětí	V
$[\bar{U}_N]$	matice nesouměrné soustavy fázorů	V
U_n	jmenovité napětí (sdružené)	V
U_R	velikost napětí v rozvodně - sdružené	V
$[\bar{U}_s]$	matice souměrné soustavy fázorů	V
U_{vz}	sdružené vztažné napětí soustavy	V
$\bar{U}_{(0)}$	fázor netočivé složky napětí souměrné složkové soustavy	V
$\bar{U}_{(1)}$	fázor sousledné složky napětí souměrné složkové soustavy	V
$\bar{U}_{(2)}$	fázor zpětné složky napětí souměrné složkové soustavy	V
U_1	velikost napětí na začátku vedení (sdružené)	V
U_2	velikost napětí na konci vedení (sdružené)	V
$\bar{Y}_k$	fázor příčné admitance vedení	S
X_k	induktivní reaktance vedení	Ω
$\bar{Z}_k$	fázor podélné impedance vedení	Ω
$\bar{Z}_{(0)}$	fázor netočivé impedance souměrné složkové soustavy	Ω

$\bar{Z}_{(1)}$	fázor sousledné impedance souměrné složkové soustavy	Ω
$\bar{Z}_{(2)}$	fázor zpětné impedance souměrné složkové soustavy	Ω
$\bar{a}$	operátor natočení	-
$\bar{a}^{-2}$	operátor natočení	-
c	napěťový součinitel	-
f	síťová frekvence	Hz
i_{ka}	okamžitá hodnota stejnosměrné (aperiodické) složky zkratového proudu	A
i_{ks}	okamžitá hodnota střídavého (souměrného) zkratového proudu	A
i_k	okamžitá hodnota (nesouměrného) zkratového proudu	A
i_p	nárazový zkratový proud	A
l	délka vedení	km
m	součinitel pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu	-
n	součinitel pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu	-
t	čas	s
$\bar{y}$	fázor admitance jednotlivých větví	S
α	fázový posun proudu	°
δ	fázový posun napětí	°
δ_1	fázový posun napětí na začátku vedení	°
δ_2	fázový posun napětí na konci vedení	°
κ	součinitel vyjadřující poměr R/X	-
τ_d''	subtranzitní časová konstanta subtranzitní složky zkratového proudu	s
τ_d'	tranzitní časová konstanta tranzitní složky zkratového proudu	s
τ_s	časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu	s
φ	fázový posun napětí a proudu	°
φ_k	úhel impedance obvodu zkratového proudu	°
∂	parciální derivace	-

SEZNAM ZKRATEK

AD	Adamov
BK	Blansko
BKD	Blansko-ČD
BO	Boskovice
BOB	Bohunice
BYP	Bystřice n. Perštejnem
CML	Červený Mlýn
CNT - A	Čebín - A
CNT - B	Čebín - B
CNT - C	Čebín - C
DS	distribuční soustava
HUV	Husovice
KPO	Královopolská
KV	Komárov
LI	Líšeň
MEY	Medlánky
MZR	Žďár n. Sázavou
NAO	Náměšť n. Oslavou
NN	nízké napětí
OS	Oslavany
OVD	Ostrov n. Oslavou-ČD
PTA	Ptáčov
R	rozvodna
RIP	Řípov
RON	Dolní Rožínka
SL	Šlapánov
SP	spínač přípojníc
UO	uzlová oblast
VB	Velká Bíteš
VN	vysoké napětí
VMA	Maloměřice
VMZ	Velké Meziříčí
VOP	Velké Opatovice
VVN	velmi vysoké napětí

ZVN	zvlášť vysoké napětí
ZDA	Žďár, ŽďAS
ZET	Zetor

1 ÚVOD

Při popisu elektrizační soustavy uvažujeme tuto soustavu jako dynamický systém, tj. systém, v němž okamžitá hodnota vnitřních veličin závisí na okamžitých hodnotách řízení a na tzv. stavu systému v daném okamžiku.

Základním provozním stavem každého dynamického systému je rovnovážný stav, charakterizovaný neměnností stavových veličin systému. Odpovídajícím provozním stavem elektrizační soustavy je její **ustálený chod**. Ustálený chod elektrizační soustavy lze považovat za rovnovážný stav z toho důvodu, že všechny základní provozní parametry elektrizační soustavy, které určují všechny fyzikální procesy probíhající v soustavě (např. rozdělování energií) se v ustáleném chodu nemění. Jsou to například efektivní hodnoty proudů a napětí, střední hodnoty výkonů nebo momenty na hřídeli. Ustálený chod elektrizační soustavy popisujeme soustavou algebraických nelineárních rovnic, kterou vzhledem k rozsáhlosti dnešních elektrizačních soustav řešíme za pomoci výpočetní techniky.

Teprve jakákoliv změna základních provozních parametrů má za následek narušení ustáleného chodu. Vzniká tak **přechodový děj**, po němž elektrizační soustava přejde do nového ustáleného chodu, nebo během něhož některý z provozních parametrů roste nade všechny meze a dojde k narušení stability chodu elektrizační soustavy. Přechodové jevy nelze popsat jako dynamický systém. Musíme proto provést hlubší analýzu a rozlišit, kdy můžeme elektrizační soustavu modelovat jako dynamický systém se soustřednými parametry a kdy jako dynamický systém s rozloženými parametry. Toto rozlišení vychází z hlediska rychlosti průběhu přechodového děje, tedy doby trvání, a dělí přechodové děje do tří skupin (pomalé, středně rychlé a rychlé).

Z našeho hlediska jsou důležité středně rychlé (elektromagnetické) přechodové jevy, jejichž velmi častou příčinou jsou **zkraty**. Při vzniku zkratu v elektrizační soustavě se mnohdy několikanásobně zmenšuje impedance obvodu mezi místem zkratu a napěťovými zdroji. To má za následek vzrůst proudů ve větvích a pokles napětí v uzlech, zvláště v uzlech elektricky blízkých místu zkratu. Působení zkratu je sice krátkodobé, ale vzhledem k velikostem zkratových proudů mohou být jejich tepelné a mechanické účinky nebezpečné pro elektrická zařízení. Proto je potřeba elektrická zařízení vhodně dimenzovat na účinky zkratových proudů. Zkrat může mít několik příčin, jako jsou nedokonalosti a vady elektrických zařízení, poškození cizími zásahy a povětrnostními vlivy, chybnou manipulací a přepětím.

2 CÍL PRÁCE

Cílem této práce je návrh tzv. můstkového zapojení v distribuční soustavě (DS) 110 kV v uzlové oblasti (UO) Čebín pro zajištění vyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie v této oblasti se zaměřením na výpočet ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů. Práce je zpracovaná pro chod DS 110 kV E.ON v zimním provozu.

Hlavním úkolem je návrh nového – můstkového zapojení v DS 110 kV a následná kontrola splnění tolerancí napětí v rozvodnách DS 110 kV, kontrola proudového zatížení transformátorů (400/110 kV a 110/VN kV) a vedení 110 kV. Také je potřeba prověřit zkratovou odolnost výkonových vypínačů v rozvodnách 110 kV. Provoz můstkového zapojení musí být prověřen i při zvláštních provozních stavech (např. poruchové stavy).

Pokud z výpočtů ustáleného chodu sítě či zkratových poměrů DS zjistíme, že některé její prvky jsou přetíženy, navrhujeme změny, které zajistí bezpečný a spolehlivý provoz DS.

3 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ

3.1 Ustálený chod sítě 110 kV

Následující kapitoly popisující ustálený chod sítě 110 kV jsou převzaty z [4] a [1].

Znalost činných a jalových výkonů, ztrát a napětových poměrů v jednotlivých prvcích (větvích) a uzlech elektrizační soustavy je nutná pro navrhování dalšího rozvoje elektrizační soustavy. Řešení ustáleného chodu se současně doplňuje o kontrolu, zda není některý z prvků elektrizační soustavy přetížen. V praxi se ovšem odběry a dodávky zadávají činnými a jalovými výkony. Z toho plyne, že chod sítě nelze popsat soustavou lineárních rovnic. Matematická formulace ustáleného chodu sítě vede k soustavě nelineárních rovnic. Pro jejich řešení používáme iterační metody.

Při sestavení základních rovnic ustáleného chodu můžeme použít metodu řešení lineárních obvodů – metodu uzlových napětí. Metoda uzlových napětí se v praxi nejčastěji používá pro jednoduchý algoritmus výpočtu vlastních a vzájemných uzlových admitancí (případně impedancí) a snadné zakódování konfigurace (propojení jednotlivých větví) sítě.

3.1.1 Zjednodušující předpoklady

Z důvodu rozlehlosti a velmi vysokého napětí v sítích 110 kV musíme při výpočtech uvažovat i s proudy v příčném směru přenosu (konduktancí a kapacitami vodičů). Tyto proudy jsou totiž řádově srovnatelné s proudy odběrů a mají tedy vliv na ztráty výkonu a úbytky napětí. Při řešení ustáleného chodu musíme tedy uvažovat oba parametry vedení a to podélnou impedanci $\bar{Z}_k$ a příčnou admitanci $\bar{Y}_k$. [1]

$$\bar{Z}_k = (R_k + j \cdot X_k) \cdot l \quad (3.1)$$

$$\bar{Y}_k = (G_k + j \cdot B_k) \cdot l$$

kde R_k je rezistance vedení na jednotku délky,
 X_k je induktivní rektance vedení na jednotku délky,
 G_k je konduktance vedení na jednotku délky,
 B_k je kapacitní susceptance vedení na jednotku délky,
 l je délka vedení.

Při řešení ustáleného chodu sítě 110 kV je uvažujeme následující zjednodušující podmínky:

- trojfázová soustava je souměrná v parametrech prvků, ve zdrojích i ve spotřebičích,
- napětí a proudy jsou harmonickými funkcemi času s konstantním kmitočtem $f = 50\text{Hz}$,
- prvky sítě s homogenně rozloženými parametry nahrazujeme:
 - vedení nahrazujeme obvykle Π - články,
 - transformátory Γ - články nebo Π - články,
- parametry vedení, transformátorů a ostatních prvků elektrizační soustavy jsou konstanty nezávislé na velikosti proudu a napětí,

- odběry jsou zadány pomocí výkonů, kde proudy nejsou závislé na napětí,
- parametry všech prvků jsou přepočítány na jedno vztažné napětí,
- napětí zdrojů a proudy odběrů neobsahují vyšší harmonické,
- elektrizační soustava se skládá ze souměrných zdrojů, souměrných přenosových (distribučních) prvků a odběrů. Pak ji můžeme řešit jako jednofázovou (souměrnou) síť. [1]

3.1.2 Klasifikace uzlů a podmínky určitosti chodu sítě

Ustálený chod je určen znalostí čtyř uzlových veličin:

- absolutní hodnoty napětí U
- úhlu napětí δ
- činným výkonem P
- jalovým výkonem Q

Z hlediska těchto čtyř veličin se uzly rozlišují podle toho, které z nich jsou zadány a které jsou pomocí rovnic ustáleného chodu dopočítávány. Zpravidla uzly dělíme podle zadávaných uzlových veličin na:

Bilanční uzel – třída U, δ : je to uzel pevně značený číslem 1, ve kterém je zadáno napětí U a jeho úhel δ . Jako neznámé jsou dopočítávány činný P a jalový Q výkon. Tento uzel má za úkol hradit případnou nerovnováhu v bilanci uzlových výkonů a navíc musí hradit ztráty činného a jalového výkonu v síti, které jsou známy až po ukončení výpočtu a určení výkonové bilance. V bilančním uzlu by měl být k dispozici zdroj výkonu.

Odběrový a zdrojový uzel – třída P, Q : jsou uzly se zadaným činným a jalovým výkonem buď dodávaným do uzlu (zdrojový uzel) nebo, odebíraný v uzlu (odběrový uzel). Dodávky a odběry odlišujeme znaménky $\pm$. Jako neznámé jsou dopočítávány napětí U a jeho úhel δ .

Regulační a kompenzační uzel – třída U, P : jsou uzly se zadaným činným výkonem P a absolutní hodnotou napětí U . Při výpočtu řešíme, jak velký jalový výkon musíme do tohoto uzlu dodat nebo odebrat, aby byla dodržena zadaná hodnota napětí. Další dopočítávaná neznámá je úhel napětí δ .

Volby známých a neznámých veličin U, δ, P, Q , které charakterizují uzel, nemůžou být libovolné. Je nutné dodržet zásadu, že chod sítě nemůže být přeurčen a ani neurčitý. Při praktických výpočtech vystačíme s volbou základních tří kombinací uzlů:

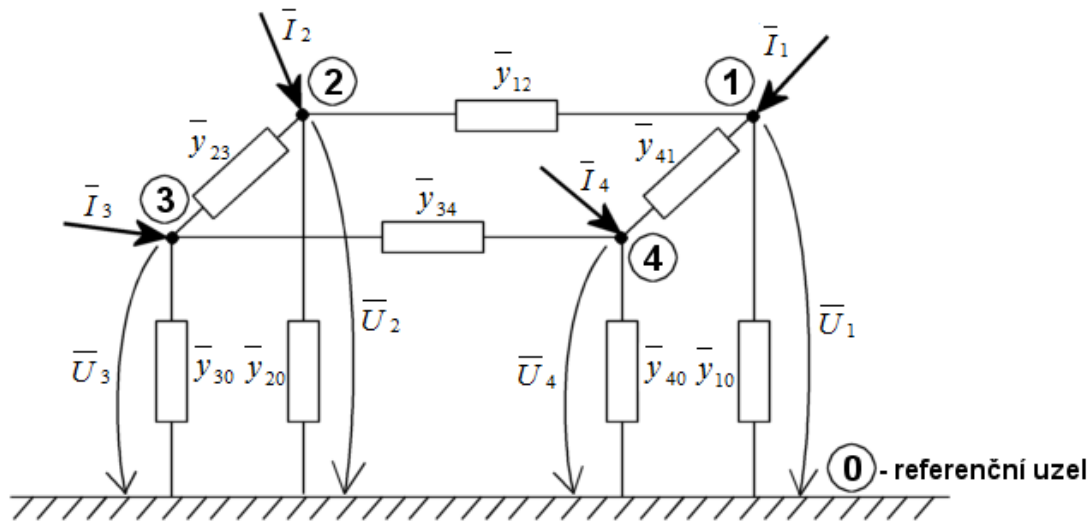
- jeden bilanční uzel (U, δ)
- k uzlů (P, Q)
- $(n - k - 1)$ uzlů (U, P), neboť pro řešení máme k dispozici $2 \cdot (n - 1)$ rovnic popisující ustálený chod.

Rychlost konvergence zvolené iterační metody při výpočtu chodu sítě závisí na konfiguraci sítě, volbě umístění bilančního uzlu se zdrojem a na volbě počtu a umístění uzlů třídy (P, Q) a (U, P). Praktické výpočty ukazují, že je vhodné volit umístění **bilančního uzlu** v „elektrickém

středu“ sítě. Většinou je to uzel s největší vlastní admitancí – největší diagonální prvek v admitanční uzlové matici. Ne vždy je však v tomto uzlu „volný“ generátor (na krytí ztrát), ale je možné volit tento generátor jako zdroj i v jiném uzlu, případně rozdělit krytí ztrát mezi všechny generátory pracující v soustavě příslušným dílem. To však matematické řešení komplikuje, proto se přednostně volí pouze uzly uvedených tří základních tříd.

3.1.3 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Při výpočtu ustáleného chodu sítě předpokládáme, že jsou **zadány odebírané a dodávané proudy** do uzlů sítě. Prvky elektrizační soustavy jsou zadány jejich podélnými a příčnými admitancemi. Přenosová a distribuční vedení se nejčastěji nahrazují Π – články, transformátory Γ nebo Π – články. Příčné admitance se připojují mezi příslušný uzel sítě a uzel referenční („zem“). Za předpokladu, že všechny prvky jsou přepočítány na jedno vztažné napětí, můžeme elektrizační soustavu nahradit galvanickým spojením prvků např. podle Obr. 3-1.



Obr. 3-1 Náhradní schéma sítě pro výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Síť na Obr. 3-1 můžeme matematicky popsat pomocí metody uzlových napětí soustavou rovnic (první řádky jednotlivých matic odpovídají uzlu 1, druhé řádky uzlu 2 atd.):

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

kde $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3, \bar{U}_4$ jsou neznámá uzlová napětí,

$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$ zadáné uzlové proudy, kde znaménko + označuje dodávky a znaménko – odběry.

Soustavu rovnic 3.2 můžeme zkráceně napsat

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{U}] \quad (3.3)$$

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

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

Předpokládáme přitom, že větve nemají vzájemné induktivní vazby. Takže např. pro prvek v síti, jejíž schéma nám znázorňuje Obr. 3-1, platí:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{22} &= \bar{y}_{12} + \bar{y}_{23} + \bar{y}_{20} \\ \bar{Y}_{21} &= \bar{Y}_{12} = -\bar{y}_{12}\end{aligned}\tag{3.4}$$

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

Soustavu rovnic 3.3 můžeme také zapsat ve tvaru

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i=1,2,3,\dots,n\tag{3.5}$$

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

3.1.3.1 Eliminace bilančního uzlu

Soustava rovnic 3.2 sestavená na základě II.Kirchhoffova zákona pro síť na Obr. 3-1 je nezávislá, tj. matice $[\bar{Y}]$ je regulární. Avšak jeden z uzlů sítě musí nahradit neznámé proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnávat tak bilanci mezi dodávkami a odběry. Tento uzel s neznámým uzlovým proudem budeme nazývat **bilanční uzel**. Aby v rovnicích 3.2, 3.3 a 3.5 byl stejný počet neznámých jako rovnic, je nutné v bilančním uzlu zadat známé napětí. Pro zjednodušení budeme bilanční uzel označovat číslem 1.

Vzhledem k tomu, že máme v bilančním uzlu zadáno napětí $\bar{U}_1$, můžeme soustavu rovnic 3.2 přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{21} \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{31} \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{41} \bar{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix}\tag{3.6}$$

a analogicky rovnici 3.5

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1} \bar{U}_1 + \sum_{j=2}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i=2,3,\dots,n\tag{3.7}$$

Po vypočítání neznámých napětí $\bar{U}_2, \bar{U}_3, \dots, \bar{U}_n$ dopočítáme neznámý proud $\bar{I}_1$ v bilančním uzlu při určení proudů v jednotlivých větvích sítě. Vynechání rovnice pro bilanční uzel ve vztazích 3.6 a 3.7 označujeme jako eliminace bilančního uzlu. Soustavu rovnic řešíme eliminační metodou nebo iteračními metodami s přímou inverzí admitanční uzlové matice řádu $(n-1)$. Po výpočtu neznámých uzlových napětí určíme rozdělení proudů ve větvích náhradního schématu podle vztahu

$$\bar{i}_{pq} = \bar{y}_{pq} \cdot (\bar{U}_p - \bar{U}_q) \quad (3.8)$$

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

3.1.4 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

V následujících úvahách bude **trojfázová síť nahrazena jednofázovým ekvivalentem**, a tedy všechny rovnice platí pouze pro fázové hodnoty napětí a výkon přenášený jednou fází.

V praxi však bývají odběry a dodávky v uzlech **zadávány činnými a jalovými výkony**. Takže pro i-tý uzel platí

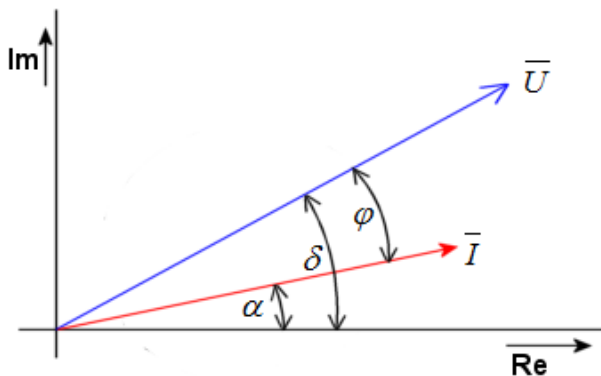
$$\bar{S}_i = P_i + j \cdot Q_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (3.9)$$

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

Znaménko u činného a jalového výkonu podle rovnice 3.9 určíme z diagramu napětí a proudu (viz Obr. 3-2) v uzlu se zdrojem, tj. činný výkon je dodáváný do sítě. Fázorový diagram znázorňuje výrobu činného a jalového výkonu (proudu) s induktivním fázovým posunem. Pak dodávaný zdánlivý výkon do uzlu sítě je:

$$\bar{S} = P + j \cdot Q = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = U \angle \delta \cdot I \angle -\alpha = U \cdot I \angle \varphi = S \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) \quad (3.10)$$

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



Obr. 3-2 Fázorový diagram napětí a proudu

Tab. 3-1 Orientace výkonu P , Q ve zdrojových a odběrových uzlech

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

Pro odběrový uzel uvažujme proud záporně. To má za následek změnu znaménka u činného a jalového výkonu oproti uzlu s dodávkou. To je nejlépe vidět v Tab. 3-1 [4] při uvažované orientaci toku výkonu (proudu) šipkou směrem do uzlu.

Z rovnice 3.9 vyjádříme proud

$$\bar{I}_i = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} \quad (3.11)$$

Pak po dosazení do rovnice 3.7 získáme

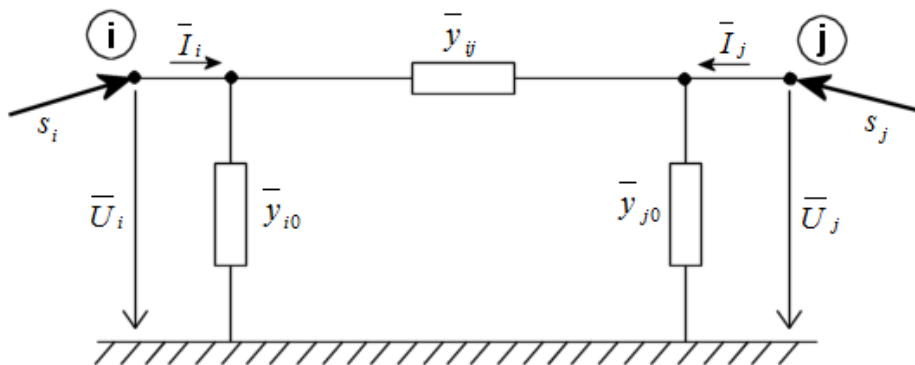
$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.12)$$

Z rovnic 3.7 a 3.12 je zřejmé, že byla provedena eliminace bilančního uzlu, a tedy volba napětí U_1 . Bilanční uzel v tomto případě, kdy jsou zadány uzlové výkony, hradí rozdíl mezi dodávkami a odběry a navíc ztráty činného a jalového výkonu v síti.

Pro řešení soustavy rovnic 3.12 se nejčastěji používají dvě iterační metody – **Gauss-Seidlova** a **Newtonova**. Vzhledem k tomu, že jsou zadány výkony v uzlech sítě (dodávky a odběry), napětí bilančního uzlu a admitance $\bar{Y}_{ij}$ vede výpočet neznámých napětí k řešení soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic 3.12. Po výpočtu neznámých - hledaných uzlových napětí - se určí toky výkonů v síti a výkonové ztráty.

Jsou-li jednotlivé prvky sítě nahrazeny Π – články (Obr. 3-3), pak proud tekoucí do uzlu i je určen rovnicí:

$$\bar{I}_i = (\bar{U}_i - \bar{U}_j) \cdot \bar{y}_{ij} + \bar{U}_i \cdot \bar{y}_{i0} \quad (3.13)$$

Obr. 3-3 Náhradní Π - článek

a výkon

$$\bar{S}_i = P_i + j \cdot Q_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (3.14)$$

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

Analogicky vyjádříme proud a výkon tekoucí do uzlu j

$$\bar{I}_j = (\bar{U}_j - \bar{U}_i) \cdot \bar{y}_{ij} + \bar{U}_j \cdot \bar{y}_{j0} \quad (3.15)$$

$$\bar{S}_j = P_j + j \cdot Q_j = \bar{U}_j \cdot \bar{I}_j^*$$

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

$$\Delta P_{ij} = P_i + P_j \quad (3.16)$$

$$\Delta Q_{ij} = Q_i + Q_j$$

3.1.5 Výpočet ustáleného chodu sítě Newtonovou iterační metodou

Máme řešit soustavu nelineárních rovnic ve tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3.17)$$

Nejdříve provedeme odhad kořenů v nulté iteraci

$$x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} \quad (3.18)$$

Odhady kořenů se liší od jejich přesné hodnoty o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$.

Přesná hodnota kořenů je tedy

$$x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2 \dots x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n \quad (3.19)$$

Původní soustavu rovnic 3.17 můžeme přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3.20)$$

Každou rovnici ze soustavy rovnic 3.20 můžeme rozepsat v Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$, například vybereme 1. rovnici:

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi_1 = y_1 \quad (3.21)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ atd.,

ϕ_1 zahrnuje členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \dots, \Delta x_n$ a druhé vyšší derivace funkce f_1 .

Jsou-li odhady kořenů blízké přesné hodnotě, jsou pak difference Δx_i malé a všechny členy s vyššími mocninami Δx_i můžeme zanedbat neboť $\phi_1 \rightarrow 0$.

Označíme-li výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$ pak rovnici 3.21 můžeme upravit do tvaru

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \quad (3.22)$$

kde $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$ určené dosazením odhadu kořenů do rovnice 3.21.

Analogickým postupem můžeme upravit i zbývající rovnice soustavy 3.20, čímž obdržíme soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Soustavu můžeme zapsat i v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Nebo zkráceně

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (3.24)$$

kde matice $[J]$ parciálních derivací je tzv. Jacobián. Ze soustavy rovnic 3.23 nebo 3.24 vypočítáme vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určíme nové, opravené odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.25)$$

kteřé použijeme pro výpočet v další iteraci. Je však potřeba brát v úvahu, že vypočítané hodnoty diferencí Δx_i nejsou zcela přesné, protože jsme v Taylorově rozvoji uvažovali pouze první derivace.

Iterační proces postupného zpřesňování kořenů soustavy 3.17 můžeme zapsat úpravou rovnic 3.24 a 3.25 do iteračního tvaru

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}] \quad (3.26)$$

a potom

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \quad (3.27)$$

kde horní index k určuje k -tou iteraci.

Předpokládáme, že existují spojité derivace $\partial f_i / \partial x_j$ pro $i, j=1, 2, \dots, n$, jednoznačnost řešení soustavy rovnic 3.24 a konvergence iteračního postupu, což v praktických úlohách výpočtu ustáleného chodu sítí bývá většinou splněno.

Nyní tuto metodu aplikujeme na rovnice 3.12 popisující ustálený chod sítí. Rovnice přepíšeme do tvaru podle 3.17

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \cdot \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.28)$$

Pravou stranu rovnice 3.28 rozepíšeme na reálnou a imaginární část. Toto můžeme provést například zápisem fázorů napětí a komplexních admitancí v polárním tvaru.

$$\begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot U_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot U_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \end{aligned} \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.29)$$

což je soustava $2 \cdot (n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jich úhlů. Pro iterační výpočet diferencí ΔU_i (diference odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty) a jeho úhel $\Delta \delta_i$ podle rovnic 3.23 s použitím rovnic 3.29 dostáváme (při zkráceném zápisu matic rozdělených na pole):

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Nyní si vyjádříme prvky Jacobiánu derivováním rovnic 3.29 podle jednotlivých proměnných.

- Výpočet prvku matice $\partial P / \partial U$:

- diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.31)$$

- mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.32)$$

- Výpočet prvku matice $\partial P / \partial \delta$:

- diagonální prvky

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

- mimodiagonální prvky

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

- Výpočet prvku matice $\partial Q / \partial U$:

- diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3.35)$$

- mimodiagonální prvky

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

- Výpočet prvku matice $\partial Q / \partial \delta$:

- diagonální prvky

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

- mimodiagonální prvky

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

Newtonova metoda velmi rychle konverguje a obvykle potřebný počet iterací závisí při zadané přesnosti ε málo na velikosti řešené sítě. Nevýhodou metody je poměrně náročný výpočet diferencí kořenů, co do početního rozsahu, který značně prodlužuje čas potřebný na výpočet jedné iterace a tím i celý výpočet.

3.2 Zkratky v elektrizační soustavě

3.2.1 Přechodové jevy v elektrizační soustavě

Převzato z [8]. Příčinou přechodného stavu soustavy jsou nenormální jevy vznikající za provozu přímo v hlavním obvodu v důsledku náhlého porušení izolace (vlivem stárnutí, cizího zavinění, úderem blesku apod.) nebo v ovládání soustavy (chybná ruční nebo automatická manipulace s vypínacími prvky atd.). Důsledkem je přechodný stav soustavy, ve kterém přechodné složky veličin chodu elektrizační soustavy zanikají nejčastěji formou tlumených vlastních oscilací a soustava tak přechází do nového ustáleného stavu. Z hlediska rozdělení

přechodných dějů v elektrizační soustavě a volby zjednodušujících předpokladů při jejich řešení je důležité srovnání doby trvání zániku přechodných složek veličin chodu a jejich periody s periodou proudu se jmenovitým kmitočtem.

Přechodné děje dělíme na:

- **Pomalé (elektromechanické)** – perioda přechodných složek je tak velká, že se v přechodném ději uplatňují i setrvačné hmoty velkých rotačních strojů v soustavě. V elektrické části soustavy je vzhledem k délce periody použito náhrady pomocí soustředných parametrů.
- **Středně rychlé (elektromagnetické)** – perioda přechodných složek je srovnatelná s periodou proudu se jmenovitým kmitočtem. Vliv setrvačných hmot rotačních strojů se zanedbává a elektrická část se řeší za pomoci soustředných parametrů.
- **Rychlé** – perioda přechodných složek je podstatně menší než u proudu se jmenovitým kmitočtem. Vliv setrvačných hmot je také zanedbatelný a elektrická část se řeší pomocí náhradních obvodů s homogenně rozloženými parametry.

Do první skupiny patří přechodné děje související s náhlou změnou zatížení zdrojů, při které vzniká nerovnováha mezi elektrickým a mechanickým momentem na hřídeli generátorů, která ohrožuje synchronní chod. Příčinou těchto přechodných jevů mohou být změny ve spojení sítě uskutečňované obsluhou nebo automatikami podle provozních požadavků (velikost zatížení, odstavování pro kontrolu a údržbu apod.), porušení izolace v důsledku jejího stárnutí, vzniku nepředpokládaného přepětí (úder blesku), méně často také náhlou změnou výkonů odběrů.

Příčinou elektromagnetických přechodných dějů je **zkratová porucha**, tj. náhlá změna izolačního odporu mezi fázovými vodiči, nebo mezi fází a středním vodičem či zemí v uzemněné soustavě.

Nejrychlejší přechodné děje vznikají při úderu blesku do některého z prvků elektrizační soustavy či do jejich těsné blízkosti, nebo jsou vyvolány spínacími pochody.

Toto rozdělení přechodných jevů podle doby periody přechodných složek veličin chodu má význam pouze z hlediska způsobu řešení – možnosti zjednodušení matematického modelu děje. Dělení nemá smysl z hlediska příčin přechodného děje, protože jedna příčina může způsobit všechny ostatní děje – úder blesku vyvolá nebezpečné přepětí, následnou zkratovou poruchu a elektromechanický přechodný děj.

3.2.2 Druhy zkratů

Převzato z [8]. Zkrat patří mezi nejrozšířenější poruchy v elektrizační soustavě. Vzniká vzájemným spojením fází nebo fáze a země v soustavě s účinně uzemněným uzlem. Tím dochází k vzniku nežádoucích proudů.

Při zkratu se celková impedance sítě, která je zkratem postižená, zmenšuje. Proudů se zvětšují a tím ohrožují zařízení elektrizační soustavy svými dynamickými (silovými) a tepelnými účinky. Napětí v místě zkratu klesne na nepatrnou velikost (při dokonalém zkratu teoreticky až na nulu), takže celé vnitřní napětí zdroje se spotřebuje na úbytky napětí v alternátorech, transformátorech, venkovních, popř. kabelových vedení, nebo dalších prvcích sítě. V celém postiženém obvodu se projeví pokles napětí, který vzrůstá od zdrojů až k místu zkratu.

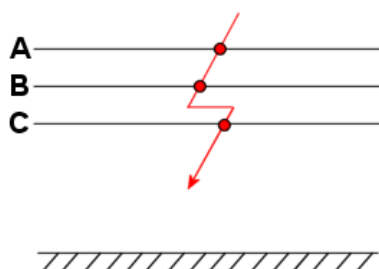
Obvykle v místě zkratu vznikají přechodné odpory (odpor vzniklého oblouku a odpory ostatních částí cesty poruchového proudu). Podle přechodového odporu v místě poruchy rozeznáváme zkraty **dokonalé** (kovové), se zanedbatelným přechodovým odporem (dokonalý styk kovových vodičů) a zkraty **nedokonalé** s hořícím obloukem (nedokonalý styk vodičů), které ohrožují místo poruchy a jeho okolí požárem.

Přesné určení velikosti těchto přechodných odporů je velice obtížné. A vzhledem k tomu, že dokonalé zkraty způsobují největší tepelné a silové namáhání prvků elektrizační soustavy, a tedy je nelze vyloučit, jsou pro dimenzování elektrických zařízení rozhodující.

Dále podle způsobu zatěžování třífázových zdrojů při zkratech rozlišujeme zkraty **souměrné** a **nesouměrné**.

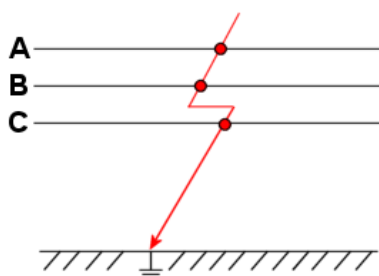
Zkraty souměrné:

- **třífázový zkrat** – nastane při spojení všech tří fází elektrizační soustavy v jednom místě (Obr. 3-4),



Obr. 3-4 Třífázový zkrat

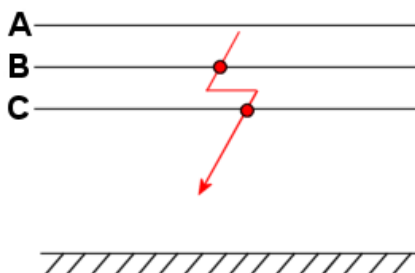
- **třífázový zemní zkrat** – nastane při spojení všech tří fází navzájem a jejich současném spojení se zemí (Obr. 3-5),



Obr. 3-5 Třífázový zemní zkrat

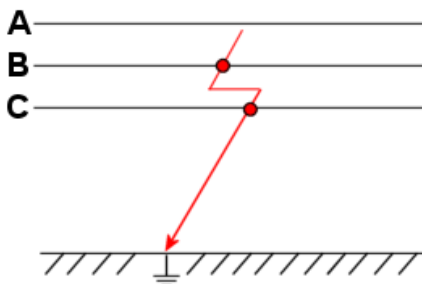
Zkraty nesouměrné:

- **dvoufázový zkrat** – nastane při spojení dvou libovolných fází trojfázové soustavy v jednom místě (Obr. 3-6),



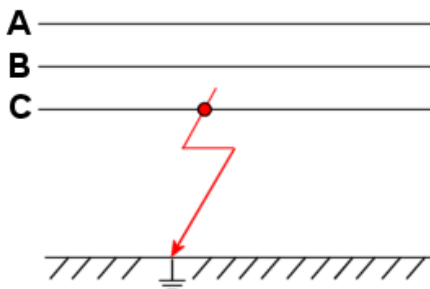
Obr. 3-6 Dvoufázový zkrat

- **dvoufázový zemní zkrat** – nastane, jsou-li dvě spojené fáze současně spojeny se zemí (Obr. 3-7),



Obr. 3-7 Dvoufázový zemní zkrat

- **jednofázový zkrat** – nastává při spojení jedné fáze se zemí nebo středním vodičem, pokud se jedná o soustavu se středním vodičem (Obr. 3-8).



Obr. 3-8 Jednofázový zkrat

U venkovních vedení je četnost výskytu jednofázových zkratů 90 % a více. U kabelových vedení převažují výrazně třífázové a třífázové zemní zkraty. Tab. 3-2 [5] obsahuje s jakou pravděpodobností může vzniknout zkratová porucha na vedeních 110 kV.

Tab. 3-2 Pravděpodobnost výskytu poruch na venkovních vedeních 110 kV

Druh poruchy	Pravděpodobnost výskytu (%)
	110 kV
třífázový zkrat	0,5
dvoufázový zkrat	4,8
dvoufázový zemní zkrat	3,8
jednofázový zkrat	91

3.2.3 Příčiny vzniku zkratu

Převzato z [7]. K dokonalému zkratu dochází poměrně zřídka. Je většinou způsoben zapomenutým kovovým náradím na živých částech (přípojnicích), neodstraněnou zkratovací soustavou po práci na elektrickém zařízení, porušením kabelu kovovým předmětem při výkopových pracích apod. Často se také změní v obloukový zkrat. Ostatní příčiny vedou obvykle k obloukovému (nedokonalému) zkratu.

Poměrně častou příčinou vzniku zkratů jsou nedokonalosti a vady elektrických zařízení. A to především **nedokonalá izolace** vzniklá z nevhodných výrobních materiálů či technologických postupů. Další příčinou nedokonalé izolace může být špatná montáž (nepředpisové pokládání kabelů, nedodržení technologie při montáži kabelových spojek, koncovek atd.). Zhoršení kvality izolace může způsobit i dlouhodobé přetěžování kabelových vedení.

Nejčastěji zkraty vznikají poškozením elektrického zařízení **cizími zásahy**. Projevuje se to především u kabelových rozvodů umístěných v zemi při různých stavebních pracích, kdy jsou kabely poškozovány stavební technikou. Neméně časté jsou poruchy vzniklé cizími zásahy na venkovních vedeních. Jsou často způsobeny **povětrnostními a přírodními vlivy** (pády stromu a větví, dotyky větví vedení při větru).

Velmi častou příčinou zkratů je **přepětí**. Způsobuje zkraty hlavně v zařízeních s nedostatečnou izolací a s nedostatečnými vzduchovými doskokovými vzdálenostmi nebo v prostorech se ztíženými klimatickými podmínkami (nadmořská výška nad 1000 m, kondenzace par při poklesu teploty apod.). Přepětí jsou buď atmosférická (vnější) nebo provozní (vnitřní). Atmosférická přepětí vznikají ve venkovních vedeních elektrostatickou indukcí při výbojích mimo vedení nebo přímým úderem blesku do vedení. Proti atmosférickým přepětím se bránímebleskojiskami. Provozní přepětí vznikají při poruchových stavech, při určitých spínacích pochodech, při náhlé ztrátě zatížení a při nesouměrných stavech.

Není-li elektrické zařízení dostatečně dimenzováno s ohledem na tepelné a silové účinky zkratových proudů, může mít již jednou vzniklý zkrat za následek **poškození zařízení na jiném místě**, které vyvolá další zkrat, blíže ke zdroji.

Uvedené příčiny vzniku zkratu nemusí působit jednotlivě. Velmi často se stává, že zkrat je způsoben současným působením dvou nebo i několika uvedených příčin.

3.2.4 Následky zkratu

Převzato z [7]. Zkraty se projevují četnými nepříznivými následky, které mohou ohrozit bezpečnost provozu, bezpečnost zařízení, ale vážně ohrožují i bezpečnost obsluhujících pracovníků. Proto je nutno elektrická zařízení dimenzovat nejen na provozní podmínky, ale také na poměry nastávající při zkratech.

Účinky zkratových proudů jsou: dynamické, tepelné, elektrický oblouk, přepětí, indukovaná napětí, pokles napětí ve zkratovaném obvodu a ohrožení stability přenosů elektrické energie.

Dynamické síly jsou způsobeny elektromagnetickým působením proudů v sousedních vodičích a jsou jim přímo úměrné. Největší silový ráz je způsoben první amplitudou zkratového proudu, tzv. nárazový zkratový proud i_p (blíže popsán v části 3.2.6). Dosahuje takových hodnot, že může vážně poškodit elektrická zařízení, pokud nejsou na něj dostatečně dimenzována. Dynamické síly na venkovních vedeních VVN způsobují výkyvy vodičů, kterými se mohou zmenšit vzdálenosti mezi vodiči natolik, že mezi nimi dojde k přeskoku.

Tepelné účinky zkratového proudu jsou v nedostatečně dimenzovaných zařízeních neméně ničivé. Průchodem ekvivalentního zkratového proudu (I_{th} - blíže popsán v části 3.2.6) zkratovým obvodem nastává nadměrné oteplení všech částí zkratového obvodu se všemi nepříznivými následky. Během krátké doby trvání zkratu nemůže být teplo odvedeno do okolního prostředí a způsobuje velké oteplení. Nastává předčasné stárnutí izolace vodičů, strojů a přístrojů.

Obloukový zkrat se může vytvořit prakticky ve všech případech. V rozvodných zařízeních, kde musíme především počítat s ohrožením bezpečnosti obsluhujících osob, dochází k obloukovému zkratu většinou chybnou manipulací s odpojovači. Účinky elektrického oblouku jsou způsobovány především jeho zářením a tlakem, vyvolaným energií oblouku a tepelným a světelným zářením.

Zkratové proudy se projevují **indukčními účinky** na sousedním vedení indukovaným napětím. Jsou to zejména slaboproudá, sdělovací a jisticí. Podél těchto vedení se mohou indukovat značná napětí, zejména když se zkratový proud vrací zpět zemi, tj. u zkratů jednofázových, dvoufázových zemních a simultánních.

Nepříznivý vliv mají zkraty na **stabilitu chodu** alternátorů, elektráren a rozvodných soustav tím, že způsobují náhlou změnu zatížení a pokles napětí na svorkách alternátorů.

Zkraty jsou dále provázeny vznikem **přepětí**, nebezpečným zejména při vypínání zkratů. Nebezpečná je zejména strmost přepětí (zotavné napětí). Pokud je jeho strmost větší, než je rychlost zotavující se elektrické pevnosti vypínací dráhy příslušného vypínače, dochází k opětovnému zapálení oblouku ve vypínači a tím přerušení vypínacího procesu.

Uvedené následky zkratových proudů jsou velmi závažné, obzvláště proto, že se obvykle v praxi projevují současně. Lze je pochopitelně snížit omezením zkratových proudů. Pokud dojde ke zkratu, nelze je vyloučit. Dynamické, tepelné a přepětíové účinky lze zvládnout dostatečným dimenzováním elektrických zařízení a rozvodů. Vznik elektrického oblouku se může do jisté míry omezit použitím kvalitních a dostatečně dimenzovaných přístrojů, vodičů a odborným provedením elektromontážních prací. Nelze však vyloučit příčiny, dané hrubým lidským selháním.

3.2.5 Průběh zkratového proudu

Převzato z [1]. Náhlá změna impedance na svorkách zdrojů při zkratové poruše má za následek přechodný děj ve všech prvcích elektrizační soustavy. Velkým zkratovým proudem se poruší rovnováha mezi polem magnetickým a elektrickým v prostoru elektrizační soustavy a do nového rovnovážného stavu přechází soustava pomocí přechodných (zanikajících) složek proudu a napětí s vlastní periodou příslušných obvodů. Stanovení časového průběhu napětí a proudu při zkratu se obvykle zjednodušuje – zanedbávají se příčné admitance prvků elektrizační soustavy včetně odběrů. Vyloučí se tak vliv elektrického pole a přechodné složky a přechodné složky proudu a napětí mají frekvenci zdrojů a nebo jsou aperiodické. Rozložení energie magnetického pole v náhradním obvodu bez příčných admitancí a odběrů se proti stavu před zkratem změní. Tato změna je po dobu zkratové poruchy spojitá. Při stálém buzení synchronních zdrojů zkratového proudu se vlivem reakce kotvy zmenšuje energie magnetického pole v nich.

Energie v ostatních pasivních prvcích elektrizační soustavy se zvětšuje v důsledku zvětšujícího se proudu. V náhradním obvodu se pomocí přechodných složek proudu transformuje přebytek energie magnetických polí ve zdrojích do ostatních prvků náhradního obvodu. Kdyby nedošlo k přerušení zkratového proudu, trval by přechodný děj až do zániku přechodných složek a vzniku nového rovnovážného stavu se stejnou celkovou hodnotou energie magnetického pole v prvcích náhradního obvodu, avšak s rozložením, které odpovídá ustálenému zkratovému proudu.

Za zjednodušujících předpokladů (stálé buzení, prvky elektrizační soustavy jsou nahrazeny pouze podélnou impedancí induktivního charakteru) je okamžitá hodnota zkratového proudu

neharmonickou funkcí času se třemi přechodnými složkami, které exponenciálně zanikají – vyjádřeno rovnicí 3.39.

$$i_k(t) = \sqrt{2} \cdot \left\{ \left[(I_k'' - I_k') \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta - \varphi_k) - I_k'' \cdot e^{-\frac{t}{\tau_s}} \cdot \sin(\delta - \varphi_k) \right\} = \quad (3.39)$$

$$= i_{ks} + i_{ka}$$

Kde: δ je počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy ($t = 0$), který je mírou okamžité hodnoty napětí u_0 na začátku poruchy:

$$u_0 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t + \delta), \quad t = 0: u_0 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\delta) \quad (3.40)$$

φ_k je úhel impedance obvodu zkratového proudu (impedance mezi působištěm vnitřního napětí zdroje a místem poruchy),

I_k'' je počáteční efektivní hodnota subtranzitního zkratového proudu – počáteční rázový zkratový proud,

I_k' je efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu,

I_k je efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu,

τ_d'', τ_d' jsou subtranzitní a tranzitní časová konstanta subtranzitní a tranzitní složky zkratového proudu,

τ_s je časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu,

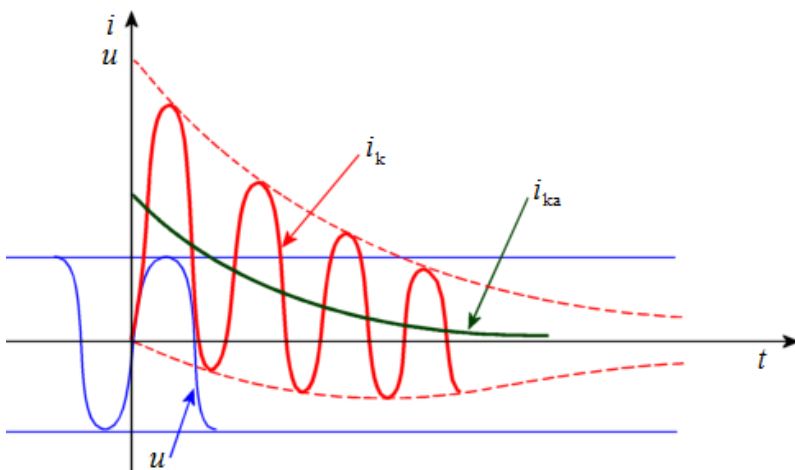
i_{ks} je okamžitá hodnota střídavého (souměrného) zkratového proudu,

i_{ka} je okamžitá hodnota stejnosměrné (aperiodické) složky zkratového proudu,

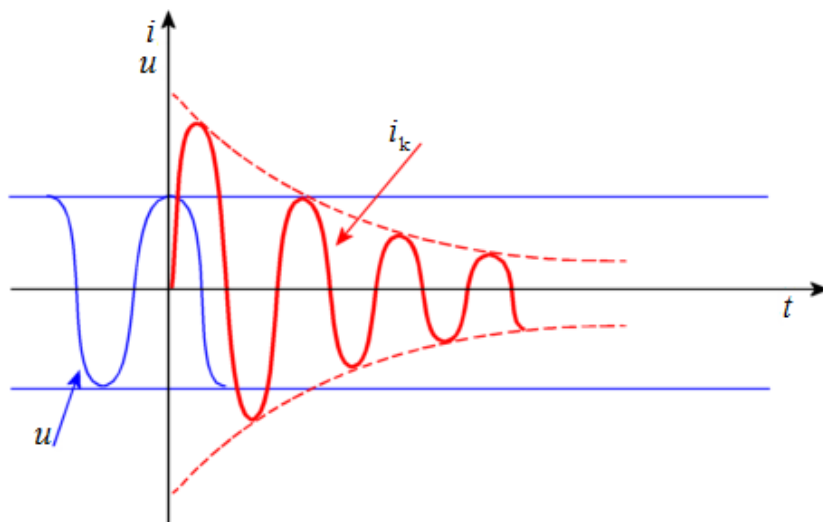
i_k je okamžitá hodnota nesouměrného zkratového proudu.

Velikost střídavého zkratového proudu je ovlivněna velikostí **stejnosemné složky** a je závislá na hodnotě **napětí** při vzniku zkratové poruchy, tj. na úhlu δ . Z tohoto hlediska nastávají dva krajní případy:

- napětí v okamžiku vzniku zkratu prochází **nulou** - stejnosměrná (aperiodická) složka je **maximální** (Obr. 3-9, převzatý z [1]),
- napětí v okamžiku vzniku zkratu má **maximální** hodnotu - stejnosměrná (aperiodická) složka je **nulová** (Obr. 3-10, převzatý z [1]).



Obr. 3-9 Průběh zkratového proudu s maximální stejnosměrnou složkou



Obr. 3-10 Průběh zkratového proudu s nulovou stejnosměrnou složkou

Silové namáhání elektrických zařízení při zkratu je třeba uvažovat pro nejméně příznivé podmínky. Proto se při kontrole elektrických zařízení na účinky zkratového proudu uvažuje stav, kdy je stejnosměrná (aperiodická) složka zkratového proudu **maximální**.

3.2.6 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Pro potřeby dimenzování elektrických zařízení na působení zkratového proudu $i_k(t)$ není potřeba znát jeho celý časový průběh. Postačí nám jen tzv. charakteristické hodnoty zkratového proudu.

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' : [3]

Je to efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu a určí se podle vztahu 3.41 (pro 3 fázový zkrat) a podle 3.42 (pro 1 fázový zkrat).

$$^{(3)}I_k'' = \frac{c \cdot U_{vz}}{\sqrt{3} \cdot |\bar{Z}_{(1)}|} \quad (3.41)$$

$$^{(1)}I_k'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_{vz}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \quad (3.42)$$

kde U_{vz} sdružené vztažné napětí (obvykle se volí napětí v místě zkratu),
 c napěťový součinitel stanovený normou zahrnující odhad vnitřního napětí zdrojů v okamžiku vzniku zkratu, jeho velikost určíme z Tabulky 1 v [3],
 $\bar{Z}_{(1)}, \bar{Z}_{(2)}, \bar{Z}_{(0)}$ impedance prvků souměrné složkové soustavy (sousedná, zpětná a netočivá).

Nárazový zkratový proud i_p : [3]

Je největší vrcholová hodnota střídavého zkratového proudu, která nastává při prvním maximu po vzniku zkratu (v čase $t = 0,01$ s). Jeho velikost lze určit z rovnice 3.43. Jeho velikost závisí na okamžiku vzniku zkratu, tj. na velikosti stejnosměrné složky zkratového proudu (viz část 3.2.5).

$$i_p = i_k(t = 0,01) = \sqrt{2} \cdot \left[I_k'' \cdot e^{-\frac{0,01}{\tau_s}} + (I_k'' - I_k') \cdot e^{-\frac{0,01}{\tau_d}} + (I_k'' - I_k') \cdot e^{-\frac{0,01}{\tau_d}} + I_k' \right] \quad (3.43)$$

Nárazový zkratový proud se používá pro kontrolu silových účinků zkratového proudu. Výrobci elektrických zařízení udávají tzv. dynamický zkratový proud I_{dyn} jako proudový náraz při zkratu, kterému jejich zařízení odolávají. Při dimenzování musí být tedy splněna podmínka, že $i_p \leq I_{dyn}$. V praktických zkratových výpočtech se proud i_p určuje z proudu I_k'' dle vztahu:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (3.44)$$

Kde součinitel κ je poměr R/X a musí se určit z obrázku 15 v [3] nebo vypočítat ze vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}} \quad (3.45)$$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} : [3]

Je efektivní hodnota fiktivního proudu harmonického průběhu, který za dobu trvání zkratu T_k vyvine při průchodu odporem stejné množství tepla jako časově proměnný zkratový proud s největší možnou stejnosměrnou složkou. Z praktického hlediska je důležitý pro dimenzování elektrických zařízení na tepelné účinky zkratových proudů. Výrobci elektrických zařízení udávají jmenovitý krátkodobý proud - I_{thr} , který určuje jakým skutečným proudem lze dané zařízení po dobu zkratu zatížit, aniž by došlo k poškození tohoto zařízení. Platí tedy podmínka:

$$I_{th} \leq I_{thr} \quad (3.46)$$

Velikost ekvivalentního oteplovacího proudu určíme z proudu I_k'' dle rovnice:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (3.47)$$

kde m je součinitel pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu, jehož hodnotu určíme podle Obrázek 21 v [3];

n je součinitel pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu, jeho hodnotu určíme podle Obrázek 22 v [3].

Souměrný vypínací zkratový proud I_b : [3], [6]

Rozlišujeme střídavou složku vypínacího zkratového proudu I_b a stejnosměrnou složku vypínacího zkratového proudu I_{bdc} . Z hlediska výkonových vypínačů je rozhodující údaj výrobce, tzv. jmenovitý vypínací proud I_{nvyp} , který udává maximální zkratový proud, který vypínací zařízení bezpečně vypne a mělo by platit, že $I_b \leq I_{nvyp}$.

3.2.7 Metodika výpočtu zkratových poměrů

Pro jednodušší výpočet zkratů v rozsáhlých sítích je třeba zavést zjednodušující podmínky. Takto zjednodušené výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků i přesto, že pro reálné

soustavy neodpovídají plně skutečnosti. Pro výpočet nesouměrných i souměrných zkratů je vhodné použít metodu souměrných složek.

3.2.7.1 Zjednodušující předpoklady výpočtu zkratových proudů

Převzato z [1]. Pro jednodušší výpočet zkratů v rozsáhlých sítích je třeba zavést následující zjednodušující podmínky:

- Za zdroje zkratového proudu uvažujeme pouze větší synchronní stroje o výkonu vyšším než 0,5 MVA. Napětí u všech zdrojů jsou soufázová a co do velikosti stejná.
- Zkrat uvažujeme z chodu zdrojů zkratového proudu naprázdno nebo při jejich jmenovitém zatížení.
- Impedance odběrů zanedbáváme.
- Všechny prvky elektrizační soustavy se nahrazují pouze podélnými impedancemi, proudy příčnými admitancemi se zanedbávají. U generátorů, transformátorů a vedení VVN a ZVN se uvažují pouze podélné reaktance. U transformátorů VN/NN, soustav NN a kabelů NN uvažujeme jejich celou impedanci, protože hodnota činného odporu již není zanedbatelná.
- Zdroje zkratového proudu se uvažují pomocí subtranzitní reaktance, tj. reaktance zdroje před zkratovou poruchou (ve skutečnosti se reaktance stroje v průběhu trvání zkratové poruchy značně mění).
- Charakteristika podélné impedance všech prvků se předpokládá lineární. Parametry prvků elektrizační soustavy se během zkratu nemění.
- Uvažuje se dokonalý (kovový) zkrat.
- Charakteristické hodnoty zkratového proudu se uvažují při největší možné stejnosměrné složce.
- Pro dimenzování elektrického zařízení z hlediska zkratové odolnosti uvažujeme nejnepríznivější zkratové poměry, které se mohou v provozu vyskytnout.
- Během zkratu se nemění jeho druh (jednofázový zůstává jednofázovým, třífázový třífázovým).
- Soustava je před zkratem symetrická.

Za uvedených zjednodušujících předpokladů tvoří obvod zkratového proudu lineární schéma. Stejná harmonická vnitřní napětí zdrojů zkratového proudu jsou v tomto náhradním obvodu zkratového proudu připojena mezi referenční a jeden z uzlů schématu. Podstatou výpočetního postupu je transfigurace náhradních schémat sousledné, zpětné a netočivé složkové soustavy a určení zkratové impedance sousledné - $\bar{Z}_{(1)}$, zpětné - $\bar{Z}_{(2)}$ a netočivé - $\bar{Z}_{(0)}$ složky pro dané místo zkratu. Za pomoci těchto impedancí se stanoví počáteční rázový zkratový proud I_k'' jednotlivých druhů zkratů.

Takto zjednodušené výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků i přesto, že pro reálné soustavy neodpovídají plně skutečnosti. Pro výpočet nesouměrných i souměrných zkratů je výhodné použít metodu souměrných složek.

3.2.7.2 Metoda souměrných složek

Převzato z [6]. Je to metoda používaná pro výpočet nesouměrných zkratů. Princip metody spočívá v tom, že si nesouměrnou trojfázovou soustavu rozdělíme do tří symetrických složek:

- **sousledná složka** – tři fázory se stejnými moduly a fázovým posunem 120° v kladném směru, budeme ji značit indexem (1);
- **zpětná složka** – tři fázory se stejnými moduly a fázovým posunem 120° v záporném směru, budeme ji značit indexem (2);
- **netočivá složka** – tři fázory se stejnými moduly a nulovým fázovým posunem, budeme ji značit indexem (0).

Metodou souměrných složek lze řešit podrobný i zběžný výpočet. Uvažuje se trojfázová soustava s alternátorem jako zdrojem napětí sousledné složkové soustavy v provozu naprázdno. Zkratový obvod zahrnuje impedanci alternátoru a impedanci vnější části obvodu.

Transformace je definována následujícím vztahem:

$$[\bar{U}_N] = [\bar{T}] \cdot [\bar{U}_S] \quad (3.48)$$

kde nesouměrná soustava fázorů $\bar{U}_N$ a souměrná soustava fázorů $\bar{U}_S$ má tvar:

$$[\bar{U}_N] = \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

kde písmena A,B,C značí jednotlivé fáze,

$$[\bar{U}_S] = \begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Transformační matice $\bar{T}$ má tvar:

$$[\bar{T}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

kde $\bar{a}$ je operátor natočení, a je roven $\bar{a} = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$,

$\bar{a}^2$ je operátor natočení, a je roven $\bar{a}^2 = 1 \angle 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Po dosazení 3.49, 3.50 a 3.51 do 3.48 získáme:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Maticovou rovnici 3.52 si převedeme na soustavu rovnic:

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_{(0)} + \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{(0)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{(0)} + \bar{a} \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{(2)} \end{aligned} \quad (3.53)$$

Obdobně si vyjádříme fázory proudů:

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_{(0)} + \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)} \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{(0)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{(2)} \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{(0)} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_{(2)} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Souměrné složky fázorů napětí $\bar{U}_s$ při známých fázorech napětí nesouměrné soustavy $\bar{U}_N$ vypočítáme podle rovnice:

$$[\bar{U}_s] = [\bar{T}]^{-1} \cdot [\bar{U}_N] \quad (3.55)$$

Inverzní transformační matice má tvar:

$$[\bar{T}]^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Po dosazení rovnic 3.49, 3.50 a 3.56 do 3.55 získáme:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Rovnici 3.57 si převedeme na soustavu rovnic:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a} \cdot \bar{U}_B + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_B + \bar{a} \cdot \bar{U}_C) \\ \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \end{aligned} \quad (3.58)$$

Souměrné složky fázorů $(\bar{U}_{(1)}, \bar{U}_{(2)}, \bar{U}_{(0)})$ mají shodnou frekvenci s frekvencí fázorů původní nesouměrné soustavy $(\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C)$. Velikost zkratových proudů vypočítáme za pomoci vhodného matematického modelu. Tento model spočívá v náhradě třífázové soustavy soustavou jednofázovou, přičemž je třeba provést rozklad nesouměrné soustavy, která vznikla zkratem na tři souměrné soustavy. Pro tento model platí tyto rovnice:

$$\begin{aligned}\bar{E}_{(1)} &= \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{U}_{(1)} \\ \bar{E}_{(2)} &= \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} + \bar{U}_{(2)} \\ \bar{E}_{(0)} &= \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{3.59}$$

kde $\bar{E}_{(1),(2),(0)}$ jsou souměrné složky vnitřního napětí alternátoru,
 $\bar{U}_{(1),(2),(0)}$ jsou souměrné složky napětí v místě zkratu,
 $\bar{Z}_{(1),(2),(0)}$ jsou souměrné složky výsledných impedancí k místu zkratu,
 $\bar{I}_{(1),(2),(0)}$ jsou souměrné složky zkratového proudu.

Protože alternátor je vždy zdrojem jen sousledné složky napětí platí:

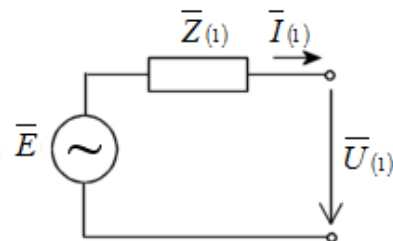
$$\begin{aligned}\bar{E}_{(1)} &= \bar{E} = c \cdot \bar{U}_f \\ \bar{E}_{(2)} &= 0 \\ \bar{E}_{(0)} &= 0\end{aligned}\tag{3.60}$$

kde $\bar{U}_f$ je fázor napětí na svorkách alternátoru a napěťový součinitel c je uveden v [3] a při chodu naprázdno je $c = 1$.

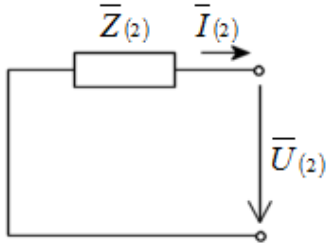
Výsledný stav poruchy po vyřešení jednotlivých souměrných složek napětí a proudů získáme zpětnou úpravou na třífázovou nesouměrnou soustavu za pomoci rovnic 3.53. Výše uvedené rovnice se zjednodušují, protože reálné zdroje napětí fází sousledné složky jsou vždy souměrné a hodnoty zpětné a netočivé složky jsou nulové, platí tedy:

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{U}_{(1)} \\ 0 &= \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} + \bar{U}_{(2)} \\ 0 &= \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{3.61}$$

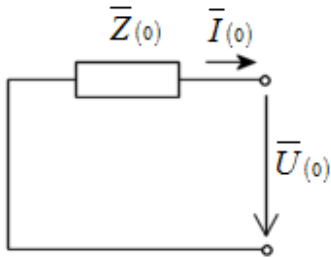
Na základě toho můžeme vytvořit tři složkové náhradní obvody pro řešení zkratů, viz Obr. 3-11, Obr. 3-12 a Obr. 3-13.



Obr. 3-11 Náhradní schéma pro souslednou složku



Obr. 3-12 Náhradní schéma pro zpětnou složku

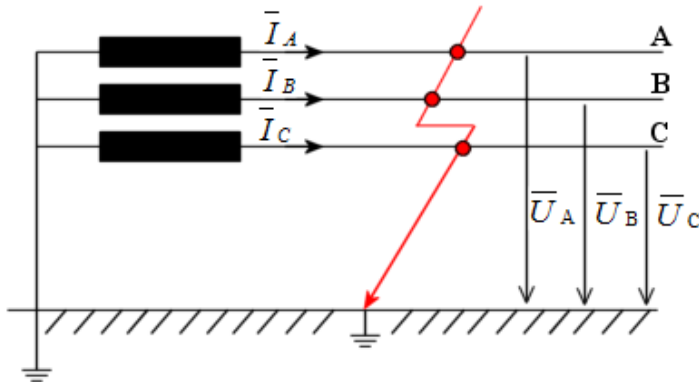


Obr. 3-13 Náhradní schéma pro netočivou složku

Vzájemným propojením těchto náhradních schémat získáme celkové náhradní schéma pro jednotlivé druhy zkratů. Z důvodu propojení nám tečou proudy i ve zpětném a netočivém schématu i přesto, že neobsahují zdroje napětí.

3.2.7.3 Třífázový zemní zkrat

Převzato z [2]. Třífázový zkrat je znázorněn na Obr. 3-14.



Obr. 3-14 Třífázový zemní zkrat

Pro tento typ zkratu poskytuje Obr. 3-14 v místě poruchy tři rovnice

$$\bar{U}_A = \bar{U}_B = \bar{U}_C = 0 \quad (3.62)$$

Z toho plyne podle rovnice 3.53

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_{(0)} + \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} = 0 \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{(0)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{U}_{(2)} = 0 \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{(0)} + \bar{a} \cdot \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{(2)} = 0 \end{aligned} \quad (3.63)$$

Součtem těchto rovnic zjistíme, že $\bar{U}_{(0)} = 0$. Uvážení této hodnoty při odečtení druhé rovnice od první dostáváme

$$\bar{U}_{(1)} = \bar{U}_{(2)} = \bar{U}_{(0)} = 0 \quad (3.64)$$

Dosazením do základních rovnic 3.61 dostaneme

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{(1)}}; \quad \bar{I}_{(2)} = 0; \quad \bar{I}_{(0)} = 0 \quad (3.65)$$

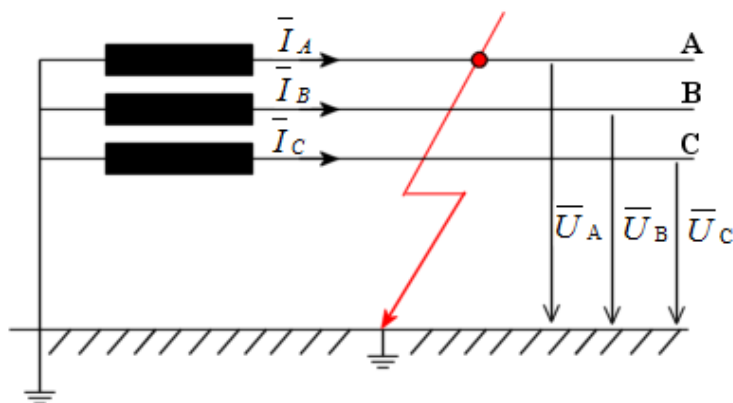
Dosazením do rovnice 3.54 a při respektování chodu naprázdno ($c=1$ a $\bar{E} = \bar{U}_f$) zjistíme hledané zkratové proudy v jednotlivých fázích

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{(1)}}; \quad \bar{I}_B = \bar{a}^{-2} \cdot \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{(1)}}; \quad \bar{I}_C = \bar{a} \cdot \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{(1)}} \quad (3.66)$$

Při třífázovém zkratu se tedy uplatní pouze **sousledná** složková soustava.

3.2.7.4 Jednofázový zkrat

Převzato z [2]. Jednofázový zkrat je znázorněn na Obr. 3-15, z něhož je patrné, že se jedná o zkrat ve fázi označené písmenem A.



Obr. 3-15 Jednofázový zkrat

Obr. 3-15 pro jednofázový zkrat poskytuje následující rovnice

$$\bar{U}_A = 0; \quad \bar{I}_B = \bar{I}_C = 0 \quad (3.67)$$

Podle rovnice 3.53 a 3.54 budou fázory napětí a proudů v místě poruchy

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_{(0)} + \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} = 0 \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{(0)} + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{(2)} = 0 \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{(0)} + \bar{a} \cdot \bar{I}_{(1)} + \bar{a}^{-2} \cdot \bar{I}_{(2)} = 0 \end{aligned} \quad (3.68)$$

Vzájemným odečtením posledních dvou rovnic získáme

$$\left(\bar{a} - \bar{a}^2\right) \cdot \bar{I}_{(1)} + \left(\bar{a}^2 - \bar{a}\right) \cdot \bar{I}_{(2)} = 0 \quad (3.69)$$

Z čehož vyplývá $\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)}$. Dosadíme-li toto do rovnice 3.54, zjistíme že $\bar{I}_{(0)} = \bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)}$. Základní rovnice 3.61 pak mají tvar

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} + \bar{U}_{(1)} \\ 0 &= \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(2)} + \bar{U}_{(2)} \\ 0 &= \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(0)} + \bar{U}_{(0)} \end{aligned} \quad (3.70)$$

A jejich sečtením a respektováním rovnice 3.68 je

$$\bar{E} = \bar{I}_{(1)} \cdot (\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}) \quad (3.71)$$

odkud

$$\bar{I}_{(0)} = \bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \frac{\bar{E}}{(\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)})} \quad (3.72)$$

Zkratový proud ve fázi A bude (za podmínky $c=1$ a tedy $\bar{E} = \bar{U}_f$)

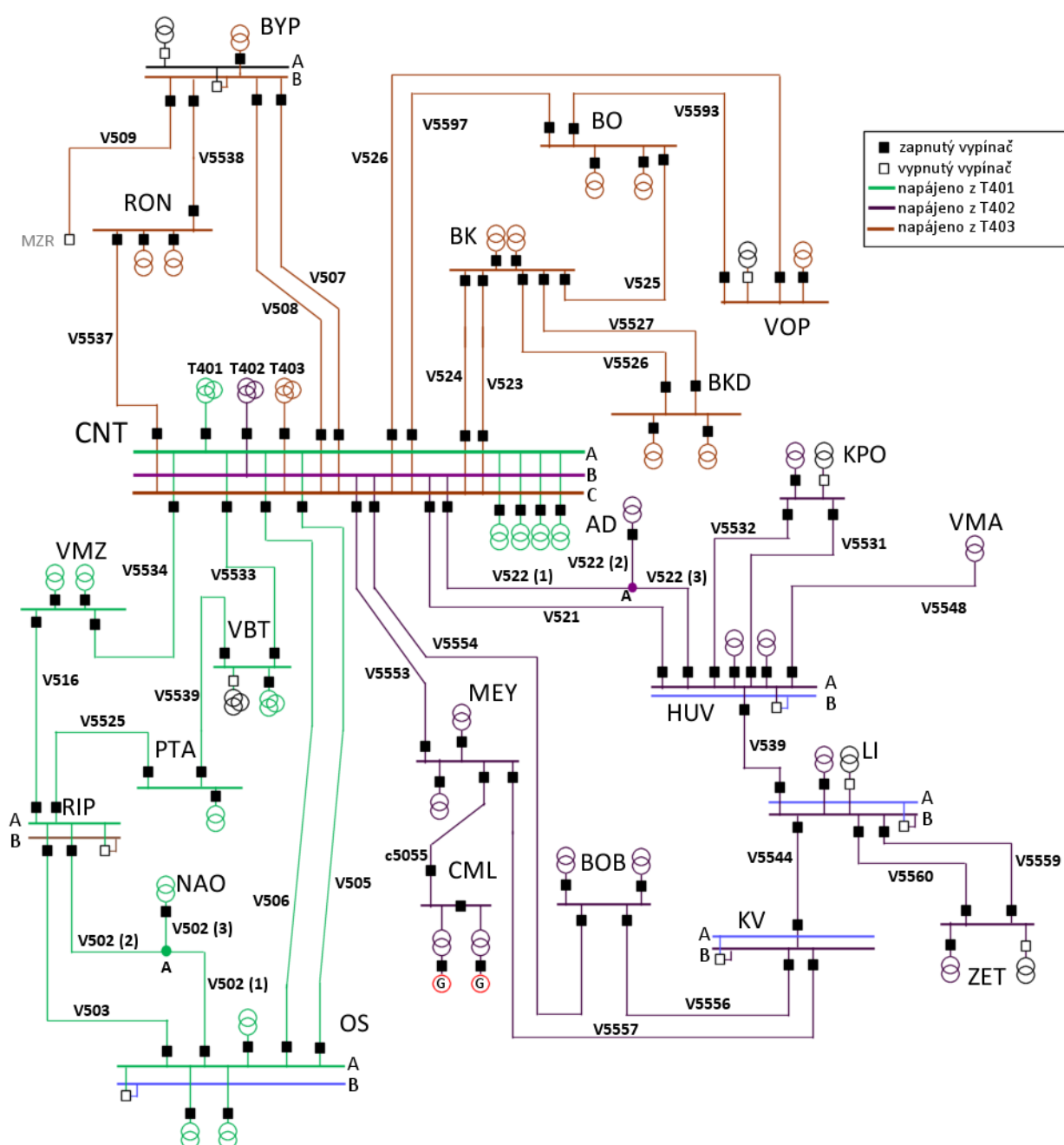
$$\bar{I}_A = \bar{I}_{(0)} + \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)} = \frac{3 \cdot \bar{U}_f}{(\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)})} \quad (3.73)$$

Při jednofázovém zkratu je třeba stanovit všechny tři složkové impedance – **souslednou, zpětnou a netočivou**.

4 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO PROVOZU DS 110 kV UO ČEBÍN

Společnost E.ON provozuje DS na napětové hladině velmi vysokého napětí (110 kV), vysokého napětí (22 kV) a nízkého napětí (0,4 kV). DS E.ON je převážně napájena z přenosové soustavy společnosti ČEPS, a.s. prostřednictvím nadřazených transformací 400/220/110 kV v majetku ČEPS, a.s.. DS je dále (částečně) napájena z výroben E.ON, závodních elektráren a ostatních lokálních zdrojů. [9]

Napájení distribuční sítě 110 kV je v oblasti východ zajištěno z nadřazené soustavy prostřednictvím těchto rozveden: Čebín, Otrokovice, Slavětice, Sokolnice a Mírovka (vyčleněný jeden transformátor 250 MVA pro zásobování části území E.ON východ). [9]



Obr. 4-1 DS 110 kV UO Čebín při současném provozu

DS 110 kV je v oblasti východ provozována v oddělených oblastech náležících jednotlivým transformátorům 400/110 kV (220/110 kV) s maximálně možným zkruhováním jednotlivých síťových celků. Rozpojovací místa jsou volena tak, že z hlediska ztrát se způsob provozu DS 110 kV blíží paralelnímu chodu. [9]

4.1 DS 110 kV UO Čebín

Současné zapojení DS 110 kV UO Čebín je uvedeno na Obr. 4-1. Úplné zapojení distribuční sítě 110 kV (oblast východ) provozované společností E.ON je uvedeno v příloze práce.

Rozvodna (R) Čebín (CNT) je propojena s nadřazenou přenosovou soustavou 400 kV pomocí vedení V434 (Čebín - Slavětice), V423 (Čebín - Sokolnice) a V422 (Čebín - Mírovka). Úroveň napětí v rozvodně 110 kV Čebín na straně 110 kV transformátorů 400/110 kV je regulováno na hodnotu stanovenou provozním předpisem provozovatele přenosové soustavy, společností ČEPS, a.s..

R 110 kV Čebín je tří systémová, vybavena dvěma kombinovanými příčnými spínači přípojníc a obsahuje jednu pomocnou přípojnicí. Na pomocnou přípojnicí nejsou vyvedeny odbočky vedení V523, V524 a transformátorů T101, T102, T1 a T2. DS 110 kV UO Čebín je napájena ze tří trojvinutových transformátorů 400/110 kV. Každý z těchto transformátorů je vyveden na samostatnou přípojnicí. Transformátor T401 na přípojnicí A, T402 na B a T403 na C. Každý transformátor dodává elektrickou energii do vzájemně od sebe oddělených oblastí.

4.1.1 Oblast napájená z transformátoru T401

Tato oblast je napájena z transformátoru 400/110 kV - **T401 ($S_n = 350$ MVA)**. V Obr. 4-1 jsou vedení, přípojnice a transformátory náležící to této UO označeny zelenou barvou ■.

Z T401 jsou přímo v rozvodně 110 kV Čebín napájeny distribuční transformátory T101, T102 (oba o výkonu $S_n = 40$ MVA) a transformátory zásobující České dráhy - T1 a T2 (oba o výkonu $S_n = 13,3$ MVA).

V této oblasti se dále nachází rozvodny:

- **Náměšť nad Oslavou (NAO)**

R 110 kV NAO není vybavena přípojníc 110 kV. R je vybavena jedním distribučním transformátorem T101 (110/22 kV, $S_n = 25$ MVA), který je přes výkonový vypínač propojen s vedením V502. Připojení vedení do sítě 110 kV je realizováno přes odbočku na vedení V502, které spojuje rozvodny 110 kV Říčov (RIP) a Oslavany (OS).

- **Oslavany (OS)**

R 110 kV OS je dvou systémová s příčným dělením přípojníc. Z R 110 kV Čebín je napájena přípojnice A. Do této přípojnice jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V502, V503, V505 a V506. Na přípojnicí A jsou připojeny tři distribuční transformátory T101 (110/22 kV, $S_n = 25$ MVA), T102 (110/22 kV, $S_n = 40$ MVA) a T103 (110/22 kV, $S_n = 40$ MVA). R 110 kV OS je vybavena příčným spínačem.

- **Ptáčov (PTA)**

Uspořádání R 110 kV PTA je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5525 a V5539. V provozu je zde jeden distribuční transformátor T102 (110/22 kV, $S_n = 40$ MVA).

- **Říčov (RIP)**

R 110 kV RIP je dvou systémová s příčným dělením přípojníc. Z R 110 kV Čebín je napájena přípojnice A. Do této přípojnice jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V502, V503, V516 a V5525. Na přípojnici A nejsou při současném provozu zapojeny žádné distribuční transformátory. R 110 kV RIP je vybavena příčným spínačem přípojníc.

- **Velká Bíteš (VBT)**

Uspořádání R 110 kV VBT je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5533 a V5539. R 110 kV VBT obsahuje dva trojvinutové distribuční transformátory 110/22/6 kV - T101 ($S_n = 40$ MVA) a T102 ($S_n = 10$ MVA). V provozu je pouze T101.

- **Velké Meziříčí (VMZ)**

Uspořádání R 110 kV VMZ je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5534 a V516. V provozu jsou zde dva distribuční transformátory T101 (110/22 kV, $S_n = 40$ MVA) a T102 (110/22 kV, $S_n = 25$ MVA).

4.1.2 Oblast napájená z transformátoru T402

Tato oblast je napájena z transformátoru 400/110 kV - **T402** ($S_n = 350$ MVA). V Obr. 4-1 jsou vedení, přípojnice a transformátory náležící to této UO označeny fialovou barvou ■.

- **Adamov (AD)**

R 110 kV AD není vybavena přípojníc 110 kV. R je vybavena jedním distribučním transformátorem T101 (110/22 kV, $S_n = 16$ MVA), který je přes výkonový vypínač propojen s vedením V522. Připojení vedení do sítě 110 kV je realizováno přes odbočku na vedení V522, které spojuje rozvodny 110 kV Čebín (CNT - B) a Husovice (HUV).

- **Bohunice (BOB)**

Uspořádání R 110 kV BOB je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5554 a V5556. V provozu jsou zde dva distribuční transformátory T101 (110/22 kV, $S_n = 40$ MVA) a T102 (110/22 kV, $S_n = 40$ MVA).

- **Červený Mlýn (CML)**

R 110 kV CML vyvádí výkon z elektrárny Červený Mlýn. Jedná se o paroplynovou elektrárnu v níž jsou instalovány dvě turbosoustrojí o celkovém instalovaném výkonu $S_n = 90$ MVA. Vyvedení výkonu elektrárny do hladiny 110 kV je realizováno pomocí transformátoru 110/10 kV T10 a transformátoru 110/6 kV T20. Z transformátorů je výkon vyveden přes kabel 110 kV (c5055) do R 110/22 kV Brno Medlánky (MEY). Celoročně je CML poskytovatelem podpůrných služeb typu Dispečerská záloha s rychlým startem pro provozovatele přenosové soustavy, společnost ČEPS, a.s..

- **Husovice (HUV)**

R 110 kV HUV je dvou systémová o 16-ti polích s podélným dělením přípojníc. Z R 110 kV CNT je v R 110 kV HUV napájena přípojnice A. Do přípojnice A v R 110 kV Husovice jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V521, V522, V539, V5531, V5532, V5547, V5548. Na přípojnici A jsou v provozu dva distribuční transformátory T101, T102 (oba 110/22 kV a $S_n = 40$ MVA). Distribuce v R HUV je prioritně napájena z R Čebín po V521, V522 z důvodu nižších ztrát na vedeních. R 110 kV HUV je vybavena příčným spínačem přípojníc.

- **Komárov (KV)**

R 110 kV KV je dvou systémová s příčným dělením přípojníc. Z R 110 kV Čebín je napájena přípojnice B. Do této přípojnice jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5544, V5556 a V5557. Na přípojnici B nejsou při současném provozu zapojeny žádné distribuční transformátory. R 110 kV RIP je vybavena příčným spínačem přípojníc.

- **Královopolská (KPO)**

V uspořádání R 110 kV KPO je užito H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5531 a V5532. Rozvodna obsahuje dva distribuční transformátory 110/22 kV, T101 a T102 (oba o výkonu $S_n = 25$ MVA).

- **Líšeň (LI)**

R 110 kV LI je dvou systémová s příčným dělením přípojníc. Z R 110 kV Čebín je napájena přípojnice B. Do této přípojnice jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V539, V5544, V5559 a V5560. V rozvodně se nachází dva distribuční transformátory 110/22 kV T101, T102 (oba o výkonu $S_n = 40$ MVA). V provozu je však pouze T102.

- **Maloměřice (VMA)**

Do R 110 kV VMA je v rámci DS 110 kV UO Čebín zaústěno vedení V5548. Vedení V5548 je v R VMA připojeno přímo na T101 (110/6,3 kV, $S_n = 16$ MVA). Vypínání transformátoru T101 VMA je realizováno výkonovým vypínačem v R 110 kV Husovice. R 110 kV VMA není vybavena přípojnící 110 kV. V R 6 kV Maloměřice je instalován a v provozu generátor o výkonu $S_n = 4,5$ MVA a $U_n = 6,3$ kV. Výkon tohoto zdroje je vyveden přes vedení V5548 do OU Čebín, a přes transformátor 110/6,3 kV T102 a vedení V5547 do OU Sokolnice. Stroj pracuje v teplotěnské režimu a zajišťuje výrobu tepla pro část města Brna.

- **Medlánky (MEY)**

Uspořádání R 110 kV MEY je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5553 a V5557 a kabel 110 kV c5055 z R CML. Rozvodna obsahuje dva distribuční transformátory 110/22 kV T101 a T102 (oba o výkonu $S_n = 40$ MVA).

- **Zetor (ZET)**

Uspořádání R 110 kV ZET je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5559 a V5560. R obsahuje dva distribuční transformátory

110/22 kV T101 a T102 (oba o výkonu $S_n = 40$ MVA). V provozu je však pouze T101.

4.1.3 Oblast napájená z transformátoru T403

Tato oblast je napájena z transformátoru 400/110 kV - **T403** ($S_n = 250$ MVA). V Obr. 4-1 jsou vedení, přípojnice a transformátory náležící to této UO označeny hnědou barvou ■.

- **Blansko (BK)**

R 110 kV BK je jedno systémová. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V523, V524, V525, V5526 a V5527. V R jsou v provozu dva distribuční transformátory 110/22 kV T101 ($S_n = 25$ MVA) a T102 ($S_n = 40$ MVA).

- **Blansko-ČD (BKD)**

Uspořádání R 110 kV BK-D je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5526 a V5527. V R jsou v provozu dva transformátory zásobující České dráhy - T1 a T2 (oba o výkonu $S_n = 13,3$ MVA).

- **Boskovice (BO)**

Uspořádání R 110 kV BO je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5597, V5593 a V525. V R jsou v provozu dva distribuční transformátory 110/22 kV T101 ($S_n = 25$ MVA) a T102 ($S_n = 40$ MVA).

- **Bystřice nad Pernštejnem (BYP)**

R 110 kV BYP je dvou systémová s příčným dělením přípojníc. Z R 110 kV Čebín mohou být napájeny obě přípojnice. Při současném provozu je však pod napětím pouze přípojnice B. Do této přípojnice (B) jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V507, V508, V519 a V5538. Vedení V509 je za normálního provozu vypnuté, slouží jako záloha pro případ propojení UO Čebín s UO Mírovka. R obsahuje dva distribuční transformátory 110/22 kV T101, T102 (oba o výkonu $S_n = 40$ MVA). V provozu je však pouze T102. R 110 kV BYP je vybavena příčným spínačem přípojníc. Do rozvodny BYP je na straně 22 kV vyveden výkon z vodní elektrárny Vír.

- **Dolní Rožínka (RON)**

Uspořádání R 110 kV RON je provedeno jako H - schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V5537 a V5538. V R jsou v provozu dva distribuční transformátory 110/22 kV T101 ($S_n = 40$ MVA) a T102 ($S_n = 40$ MVA).

- **Velké Opatovice (VOP)**

V uspořádání R 110 kV VOP je použito H – schéma. Do rozvodny jsou zaústěna vedení VVN 110 kV č. V526, V5593 a V1147. Vedení 1147 je za normálního provozu vypnuté, slouží jako záloha pro případ propojení UO Čebín se sítí společnosti ČEZ. R obsahuje dva distribuční transformátory 110/22 kV T101, T102 (oba o výkonu $S_n = 25$ MVA). V provozu je však pouze T101.

5 ŘEŠENÍ SOUČASNÉHO PROVOZU DS 110 kV UO ČEBÍN

Současný provoz DS je popsán v předchozí části (kap. 4). Nyní se zaměříme na:

- Napětíové poměry v uzlech (rozvodnách) v DS 110 kV.
- Zatížení transformátorů (400/110 kV a 110/VN kV) a vedení 110 kV.
- Zkratové poměry v DS 110 kV.

5.1 Ustálený chod DS 110 kV UO Čebín

Řešení ustáleného chodu sítě 110 kV je provedeno pomocí Dispečerského řídicího systému Sinaut Spectrum. Tento systém je používán společností E.ON jak pro řízení provozu sítě tak i pro vypracování studií. Systém pracuje s aktuálními údaji (např. parametry vedení a transformátorů) přímo z provozu sítě, proto není potřeba při řešení studií tyto údaje do systému zadávat. Systém vyřešené studie zaznamenává do speciálních datových souborů, jejichž tisková sestava je uvedena jako příloha práce.

Řešením ustáleného chodu DS 110 kV UO Čebín provedeme kontrolu, zda-li je velikost napětí v uzlech (rozvodnách) v dovolené toleranci $\pm 10\%$ od jmenovité hodnoty $U_n = 110$ kV (tolerance 99 kV - 121 kV). Dále je provedena kontrola proudového zatížení všech transformátorů (400/110 kV a 110/VN kV) a vedení 110 kV náležících do DS 110 kV OU Čebín. Za nejvyšší možnou hodnotu proudového zatížení uvažujeme jmenovitou hodnotou daného zařízení.

5.1.1 Napětíové poměry v DS 110 kV

Tab. 5-1 prezentuje vypočítané velikosti napětí a úhlu napětí v jednotlivých uzlech náležících do DS 110 kV UO Čebín. Barevné značení v Tab. 5-1 odpovídá Obr. 4-1. Symbol použitý tabulce Tab. 5-1 značí:

U_R velikost napětí v uzlu - rozvodně.

Tab. 5-1 Napětíové poměry v uzlech DS 110 kV – současný provoz

Rozvodna		U_R	δ
Označení	Název	kV	°
AD	Adamov	117,2	-1,9
BK	Blansko	115,6	-2,7
BK-D	Blansko-ČD	115,6	-2,7
BO	Boskovice	115,2	-3,0
BOB	Bohunice	116,9	-2,4
BYP	Bystřice n. Perštejnem	115,9	-2,7
CML	Červený Mlýn	117,9	-1,1
CNT - A	Čebín - A	117,2	-2,3
CNT - B	Čebín - B	117,6	-1,4
CNT - C	Čebín - C	116,1	-2,3
HUV	Husovice	117,0	-2,2
KPO	Královopolská	117,0	-2,2
KV	Komárov	117,0	-2,2
LI	Líšeň	116,9	-2,3
MEY	Medlánky	117,7	-1,3

NAO	Náměšť n. Oslavou	116,0	-3,4
OS	Oslavany	116,2	-3,2
PTA	Ptáčov	116,0	-3,5
RIP	Řípov	116,0	-3,5
RON	Dolní Rožínka	116,0	-2,7
VB	Velká Bíteš	116,6	-2,9
VMA	Maloměřice	117,0	-2,2
VMZ	Velké Meziříčí	115,8	-3,5
VOP	Velké Opatovice	115,3	-3,0
ZET	Zetor	116,9	-2,3

Z přehledu vypočítaných hodnot napětíových poměrů v R 110 kV UO Čebín (Tab. 5-1), je zřejmé, že ve všech uzlech jsou napětí v dovolených mezích (dovolená mez 99 kV - 121 kV).

5.1.2 Transformátory

Barevné značení zkratk rozveden odpovídá Obr. 4-1.

- Transformátory PS - 400/110 kV:**

Výsledky výpočtů pro transformátory 400/110 kV jsou uvedeny v Tab. 5-2. Symboly použité tabulce Tab. 5-2 značí:

- S_{nt} zdánlivý jmenovitý výkon transformátoru,
- I_{nt} jmenovitý proud transformátoru,
- P_{dodt} činný výkon dodávaný transformátorem (strana transformátoru - 110 kV),
- Q_{dodt} jalový výkon dodávaný transformátorem (strana transformátoru - 110 kV),
- ΔP_t ztráty činného výkonu v transformátoru,
- I_{zt} proud tekoucí transformátorem (strana transformátoru - 110 kV).

Tab. 5-2 Transformátory 400/110 kV – současný provoz

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{dodt}	Q_{dodt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVAr	MW	A	%
CNT - A	Čebín - A	T401	350	1837	119,4	17,5	0,035	594,2	32,35
CNT - B	Čebín - B	T402	350	1837	71,6	2,7	0,014	351,9	19,16
CNT - C	Čebín - C	T403	250	1312	91,1	3	0,016	453,9	34,60

Z Tab. 5-2 je patrné, že při současném provozu není žádný transformátor 400/110 kV přetížen.

- Distribuční transformátory 110/VN kV:**

Vypočítané hodnoty pro distribučních transformátorů 110/VN kV jsou uvedeny v Tab. 5-3. Symboly použité v tabulce Tab. 5-3 značí:

- P_{odbt} činný výkon odebíraný transformátorem z uzlu (strana transformátoru - 110 kV),
- Q_{odbt} jalový výkon odebíraný transformátorem z uzlu (strana transformátoru - 110 kV).

Z Tab. 5-3 je patrné, že při současném provozu není žádný distribuční transformátor 110/VN kV přetížen.

Tab. 5-3 Transformátory 110/VN kV – současný provoz

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{odbt}	Q_{odbt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVAr	MW	A	%
AD	Adamov	T101	16	84	-1,5	0,1	0,026	7,5	8,93
BK	Blansko	T101	25	131	-3,2	0	0,02	16,1	12,29
BK	Blansko	T102	40	210	-24,1	-7,1	0,12	125,6	59,81
BKD	Blansko-ČD	T1	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BKD	Blansko-ČD	T2	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BO	Boskovice	T101	25	131	-13,8	-2,9	0,072	70,5	53,82
BO	Boskovice	T102	40	210	-12,6	-2,2	0,031	64,3	30,62
BOB	Bohunice	T101	40	210	-28,4	-4,2	0,144	142	67,62
BOB	Bohunice	T102	40	210	-11,1	-0,9	0,058	54,8	26,10
BYP	Bystřice n. Perštejnem	T102	40	210	-16,6	-1	0,045	83,1	39,57
CML	Červený Mlýn	T10	100	525	52,4	5,2	0,155	258,2	49,18
CML	Červený Mlýn	T20	40	210	16	-2,2	0,056	79,3	37,76
CNT - A	Čebín - A	T101	40	210	-14	-5,1	0,046	73,6	35,05
CNT - A	Čebín - A	T102	40	210	-21,1	-6,4	0,092	108,5	51,67
CNT - A	Čebín - A	T1	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,6	20,86
CNT - A	Čebín - A	T2	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,6	20,86
HUV	Husovice	T101	40	210	-22,8	-2,2	0,071	112,9	53,76
HUV	Husovice	T102	40	210	-14,8	-1,8	0,046	73,8	35,14
KPO	Královopolská	T101	25	131	0	0	0	0	0,00
KPO	Královopolská	T102	25	131	0	0	0	0	0,00
LI	Líšeň	T102	40	210	-19,5	-2,2	0,046	97,2	46,29
MEY	Medlánky	T101	40	210	-24,7	-1,1	0,119	121,3	57,76
MEY	Medlánky	T102	40	210	-8,5	-1,1	0,046	42,3	20,14
NAO	Náměšř n. Oslavou	T101	25	131	-4,2	-0,5	0,022	21,2	16,18
OS	Oslavany	T101	25	131	-9,8	-3	0,05	50,7	38,70
OS	Oslavany	T102	40	210	-14,6	-3,6	0,042	74,9	35,67
OS	Oslavany	T103	40	210	-9,7	-1,8	0,038	49,2	23,43
PTA	Ptáčov	T102	40	210	-11,9	-2	0,055	59,8	28,48
RON	Dolní Rožínka	T101	40	210	-7,8	0,3	-	38,9	18,52
RON	Dolní Rožínka	T102	40	210	-0,2	2	-	9,8	4,67
VB	Velká Bíteš	T101	40	210	-11,1	-3,6	0,026	57,9	27,57
VMA	Maloměřice	T102	16	84	0	-0,1	0,019	0,4	0,48
VMZ	Velké Meziříčí	T101	40	210	-8,4	-2,2	0,026	43,4	20,67
VMZ	Velké Meziříčí	T102	25	131	-12,9	-4,4	0,069	67,7	51,68
VOP	Velké Opatovice	T101	25	131	-9,7	-2,3	0,032	50,1	38,24
ZET	Zetor	T101	40	210	-8,1	-1,0	-	40,3	19,19

5.1.3 Vedení 110 kV

Vypočítané hodnoty pro vedení 110 kV jsou uvedeny v Tab. 5-4. Symboly použité v tabulce Tab. 5-4 značí:

- U_1 velikost napětí na začátku vedení (sdružené),
- U_2 velikost napětí na konci vedení (sdružené),
- P_{odbv} činný výkon odebíraný vedením z uzlu (na začátku vedení),
- Q_{odbv} jalový výkon odebíraný vedením z uzlu (na začátku vedení),
- P_{dodv} činný výkon dodávaný vedením do uzlu (na konci vedení),
- Q_{dodv} jalový výkon dodávaný vedením do uzlu (na konci vedení),
- ΔP_v ztráty činného výkonu na vedení,

I_{nv} jmenovitý proud vedení,

I_{dodv} proud dodávaný vedením (proud na konci vedení).

Tab. 5-4 Vedení 110 kV – současný provoz

Název	Rozvodny		U_1	δ_1	U_2	δ_2	P_{odbv}	Q_{odbv}	P_{dodv}	Q_{dodv}	ΔP_v	I_{nv}	I_{dodv}	
Označení	Označení		kV	°	kV	°	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	A	A	%
V502 (1)	OS	502A	116,2	-3,2	116	-3,4	-5,6	0,9	5,6	-0,1	0,007	450	27,8	6,18
V502 (2)	502A	RIP	116	-3,4	116	-3,5	-1,4	0,6	1,4	0,3	0,000	450	6,9	1,53
V502 (3)	502A	NAO	116	-3,4	116	-3,4	-4,2	-0,5	4,2	0,5	0,000	450	21,2	4,71
V503	OS	RIP	116,2	-3,2	116	-3,5	-3,3	1,2	3,3	0,5	0,005	450	16,7	3,71
V505	CNT - A	OS	117,2	-2,3	116,2	-3,2	-21,7	-2,4	21,5	3,2	0,155	450	108,1	24,02
V506	CNT - A	OS	117,2	-2,3	116,2	-3,2	-21,7	-2,4	21,5	3,2	0,155	450	108,1	24,02
V507	CNT - C	BYP	116,1	-2,3	115,9	-2,7	-8,1	1,9	8,1	-0,9	0,022	450	40,5	9,00
V508	CNT - C	BYP	116,1	-2,3	115,9	-2,7	-8,1	1,9	8,1	-0,9	0,022	450	40,5	9,00
V509	BYP	MZR	115,9	-2,3	-	-	0,0	0,8	0,0	0,0	0,000	450	4,2	0,90
V516	RIP	VMZ	116	-3,5	115,8	-3,5	-2,0	-1,2	2,0	2,0	0,001	450	14,3	3,18
V521	CNT - B	HUV	117,6	-1,4	117,0	-2,2	-26,4	-1,2	26,3	1,6	0,117	450	130,1	28,91
V522 (1)	CNT - B	522A	117,6	-1,4	117,3	1,8	-27,4	-1	27,3	1,2	0,072	450	134,7	29,93
V522 (2)	522A	AD	117,3	-1,8	117,2	-1,9	-1,5	0,5	1,5	-0,1	0,000	450	7,5	1,67
V522 (3)	522A	HUV	117,3	-1,8	117,0	-2,2	-25,8	-1,7	25,8	1,9	0,047	450	127,4	28,31
V523	CNT - C	BK	116,1	-2,3	115,6	-2,7	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	93,1	20,69
V524	CNT - C	BK	116,1	-2,3	115,6	-2,7	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	93,1	20,69
V525	BK	BO	115,6	-2,7	115,2	-1,9	-6,9	1,0	6,8	-0,2	0,027	450	34,3	7,62
V526	CNT - C	VOP	116,1	-2,3	115,3	-3,0	-12,0	-1,7	11,9	3,0	0,054	455	61,5	13,52
V539	HUV	LI	117,0	-2,2	116,9	-2,3	-14,4	0,4	14,4	-0,2	0,014	450	71,2	15,82
V5055	CML	MEY	117,9	-1,1	117,7	-1,3	-68,5	-3,0	68,4	7,3	0,068	450	337,5	75,00
V5525	RIP	PTA	116	-3,5	116,0	-3,5	-2,6	0,4	2,6	-0,1	0,001	450	13,1	2,91
V5526	BK	BKD	115,6	-2,7	115,6	-2,7	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,000	450	7,9	1,76
V5527	BK	BKD	115,6	-2,7	115,6	-2,7	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,000	450	7,9	1,76
V5531	HUV	KPO	117,0	-2,2	117,0	-2,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,000	450	0,0	0,00
V5532	HUV	KPO	117,0	-2,2	117,0	-2,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,000	450	0,0	0,00
V5533	CNT - A	VBT	117,2	-2,3	116,6	-2,9	-20,5	-3,6	20,4	4,1	0,075	450	103,0	22,89
V5534	CNT - A	VMZ	117,2	-2,3	115,8	-3,5	-19,4	-3,4	19,3	4,5	0,146	450	98,6	21,91
V5537	CNT - C	RON	116,1	-2,3	116,0	-2,7	-8,4	1,8	8,4	-0,8	0,018	550	42,1	7,65
V5538	RON	BYP	116,0	-2,7	115,9	-2,7	-0,5	-1,5	0,5	1,9	0,000	550	7,7	1,40
V5539	VBT	PTA	116,6	-2,9	116,0	-3,5	-9,2	-0,5	9,2	2,0	0,032	450	46,9	10,42
V5544	KV	LI	117,0	-2,2	116,9	-2,3	-13,2	-3,0	13,2	3,3	0,008	450	67,4	14,98
V5548	HUV	VMA	117,0	-2,2	117,0	-2,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,000	450	0,5	0,11
V5553	MEY	CNT - B	117,7	-1,3	117,6	-1,4	-4,6	-1,2	4,6	2,1	0,002	450	24,7	5,49
V5554	CNT - B	BOB	117,6	-1,4	116,9	-2,4	-22,4	-2,5	22,3	3,6	0,080	450	111,6	24,80
V5556	KV	BOB	117,0	-2,2	116,9	-2,4	-17,2	-1,3	17,2	1,6	0,014	450	85,2	18,93
V5557	MEY	KV	117,7	-1,3	117,0	-2,2	-30,6	-3,9	30,4	4,3	0,116	455	151,7	33,34
V5559	LI	ZET	116,9	-2,3	116,9	-2,3	-4,1	-0,4	4,1	0,5	0,000	450	20,2	4,49
V5560	LI	ZET	116,9	-2,3	116,9	-2,3	-4,1	-0,4	4,1	0,5	0,000	450	20,2	4,49
V5593	VOP	BO	115,3	-3,0	115,2	-1,9	-2,2	-0,7	2,2	1,2	0,001	455	12,5	2,75
V5597	CNT - C	BO	116,1	-2,3	115,2	-1,9	-17,5	-3,3	17,4	4,1	0,084	450	89,5	19,89

Specifický zápis hodnot pro vedení 110 kV V502 a V522 v Tab. 5-4 je použit z důvodu odbočky na těchto vedeních. Vedení V502 spojuje tři R 110 kV – RIP, OS a NAO. Při vyhodnocení poměrů na vedení je použit uzel 502A (viz také Obr. 4-1) a vedení 502 je tím

rozděleno na 3 části: OS – 502A, 502A – RIP a 502A - NAO. Obdobné zobrazení výsledků je použito i pro vedení V522 spojující R 110 kV CNT, AD a HUV.

Z Tab. 5-4 je patrné, že při současném provozu není žádné vedení 110 kV v DS 110 kV UO Čebín přetíženo. Vedení 110 kV zároveň splňují bezpečnostní kritérium n-1 (při výpadku jednoho vedení 110 kV v UO Čebín, nedojde k přetížení ostatních vedení 110 kV, které jsou v provozu).

5.2 Zkratové poměry v DS 110 kV UO Čebín

Výpočet zkratových poměrů je proveden pro stejnou konfiguraci sítě jako při výpočtu ustáleného chodu (kapitola 5.1). Výpočet je opět proveden pomocí Dispečerského řídicího systému Sinaut Spectrum. Systémem vygenerované datové soubory jsou taktéž uvedeny jako příloha práce. Napěťový součinitel c je pro třífázový i jednofázový zkrat roven $c = 1,1$.

Výsledky výpočtů zkratových poměrů pro jednotlivé uzly v DS 110 kV UO Čebín jsou zobrazeny v Tab. 5-5. Při výpočtu je uvažován zkrat (třífázový a jednofázový) na hlavní přípojnici. Symboly použité v Tab. 5-5 značí:

- $^{(3)}S_k''$ - počáteční rázový zkratový výkon při třífázovém zkratu,
- $^{(3)}I_k''$ - počáteční rázový zkratový proud při třífázovém zkratu,
- $^{(1)}S_k''$ - počáteční rázový zkratový výkon při jednofázovém zkratu,
- $^{(1)}I_k''$ - počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu.

Tab. 5-5 Zkratové poměry – současný provoz

Zkratka	Rozvodna	Odolnost	$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$
-	-	MVA	MVA	kA	MVA	kA
AD	Adamov	3500	1093,2	5,738	1562,7	8,2
BK	Blansko	3500	1562,9	8,203	2262,5	11,88
BKD	Blansko-ČD	3500	1547,7	8,123	2215,7	11,63
BO	Boskovice	3500	1223,0	6,419	1261,6	6,62
BOB	Bohunice	3500	1391,7	7,305	1396,2	7,33
BYP	Bystřice n. Perštejnem	3500	1325,1	6,955	1875,2	9,84
CML	Červený Mlýn	3500	1654,1	8,682	1676,7	8,8
CNT-A	Čebín - A	5000	2233	11,72	2039,4	10,7
CNT-B	Čebín - B	5000	2562,1	13,447	2420	12,7
CNT-C	Čebín - C	5000	2285,9	11,998	2506,9	13,16
HUV	Husovice	3500	1691,4	8,878	1837,5	9,64
KPO	Královopolská	3500	1578,3	8,331	1656,9	8,7
KV	Komárov	3500	1556,8	8,171	1573,4	8,26
LI	Líšeň	3500	1544,5	8,106	1641,5	8,62
MEY	Medlánky	3500	1711,5	8,983	1789,6	9,39
NAO	Náměšť n. Oslavou	3500	854,5	4,485	778,8	4,09
OS	Oslavany	3500	1274,8	6,691	1315,7	6,91
PTA	Ptáčov	3500	926,5	4,863	889,5	4,67
RIP	Řípov	3500	1026,4	5,387	988,1	5,19
RON	Dolní Rožínka	3500	1204,4	6,322	1288,3	6,76
VBT	Velká Bíteš	3500	1097,5	5,76	896,8	4,71
VMA	Maloměřice	3500	1500,3	7,875	1530,1	8,03
VMZ	Velké Meziříčí	3500	900,7	4,728	890,3	4,67
VOP	Velké Opatovice	3500	1045,1	5,485	984,3	5,17
ZET	Zetor	3500	1496,9	7,857	1560,6	8,19

Odolnost rozvodny je určena dle vypínací schopnosti výkonových vypínačů v dané rozvodně. Vypínací schopnost výkonového vypínače určuje jmenovitý vypínací zkratový výkon - S_{nvyp} . Platí tedy, že pokud

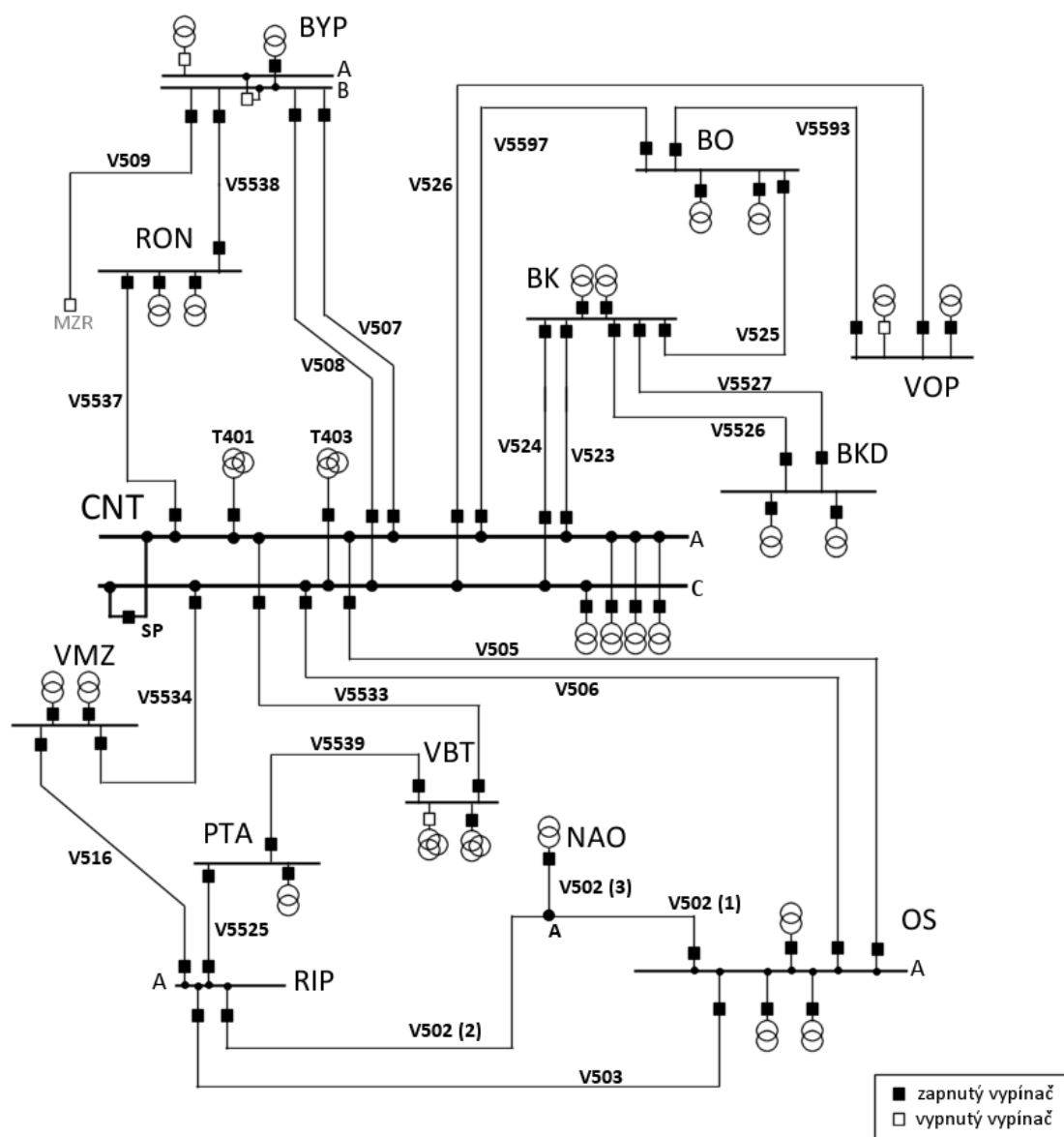
$$^{(3)}S_k'' \leq S_{nvyp}, \quad ^{(1)}S_k'' \leq S_{nvyp} \quad (5.1)$$

, tak rozvodna z hlediska zkratové odolnosti vyhovuje.

Z přehledu zkratových výkonů a proudů při třífázovém a jednofázovém zkratu v Tab. 5-5 je patrné, že při současném provozu není překročena odolnost žádného výkonového vypínače v rozvodnách DS 110 kV UO Čebín.

6 ŘEŠENÍ PROVOZU DS 110 kV UO ČEBÍN PŘI MŮSTKOVÉM ZAPOJENÍ

Při můstkovém zapojení budou řešeny oblasti napájené z přípojníc A a C (transformátory T401 a T403). Zapojení oblasti napájené z přípojnice B (transformátor T402) zůstává stejné jako při současném provozu a proto nebudeme tuto oblast ve výpočtech již dále uvažovat. Provoz DS 110 kV při můstkovém zapojení je znázorněn na Obr. 6-1.



Obr. 6-1 DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení

Hlavním úkolem je posouzení vlivu můstkového zapojení na chod DS 110 kV v UO Čebín napájené z transformátorů T401 (přípojnice A) a T403 (přípojnice C), při normálním i poruchovém provozu, se zaměřením na:

- Napěťové poměry v uzlech (rozvodnách) DS 110 kV.
- Zatížení transformátorů (400/110 kV a 110/VN kV) a vedení 110 kV.
- Zkratové poměry v DS 110 kV.

6.1 Popis můstkového zapojení

Schéma zapojení DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení je znázorněno na Obr. 6-1. Za můstkové zapojení považujeme paralelní chod transformátorů (v našem případě T401 a T403) přes příčně spojené přípojnice (A a C), pomocí spínače přípojníc (SP) v rozvodně 110 kV Čebín (CNT). Z těchto přípojníc je výkon (při můstkovém zapojení) vyveden (přes vedení) do jednotlivých oblastí tak, aby při případném výpadku jedné z přípojníc (A nebo C), či jednoho transformátoru (T401 nebo T403) byla zachována dodávka elektrické energie do všech oblastí. Při současném provozu R 110 kV Čebín by totiž při výpadku jedné z přípojníc, nebo jednoho z transformátorů (400/110 kV), byla celá oblast náležící pod odpojený prvek (transformátor nebo přípojnicí) bez dodávky elektrické energie. Můstkové zapojení tedy výrazně zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie.

V můstkovém zapojení je výhodnější provozovat transformátory stejných parametrů, ovšem transformátor T402 je potřeba pro zajištění dodávky elektrické energie v oblasti města Brna a tudíž nám v současné době v R 110 kV Čebín zbývá pouze transformátor T403.

Příklad použití můstkového zapojení:

Např. oblast rozvoden BK, BKD, BO a VOP je při současném provozu napájena z R 110 kV CNT přes přípojnicí C a transformátor T403 (viz Obr. 4-1). Pokud dojde k výpadku přípojnice C nebo T403 dojde zároveň i k výpadku všech rozvoden v této oblasti. Při zapojení do můstku (příčné propojení přípojníc A a C) však výpadek přípojnice C nebo T403 (viz Obr. 6-1) neznamená odpojení rozvoden BK, BKD, BO a VOP od DS 110 kV. Tyto rozvodny jsou stále zásobovány pomocí funkční přípojnice A a transformátoru T401, přes vedení V523 a V5597.

Popis zapojení transformátorů a vedení v R 110kV CNT:

Na **přípojnicí A** jsou připojeny:

- vedení - V5537, V507, V5597, V523, V505 a V5533,
- transformátory – T401, T102, T1 a T2.

Na **přípojnicí C** jsou připojeny:

- vedení - V5534, V506, V524, V526 a V508,
- transformátor – T403, T101.

6.2 Ustálený chod DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení

Řešení ustáleného chodu DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení je provedeno pro zapojení uvedené na Obr. 6-1. Řešení je opět provedeno pomocí Dispečerského řídicího systému Sinaut Spectrum. Systémem vyřešené studie, zaznamenané do datových souborů, jsou také uvedeny jako příloha práce.

Řešením ustáleného chodu DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení provedeme stejnou kontrolu jako při řešení současného provozu DS 110 kV UO Čebín v kapitole 5.1 (napět'ové poměry v uzlech, proudové zatížení všech vedení a transformátorů).

6.2.1 Napět'ové poměry v DS 110 kV

Tab. 6-1 prezentuje vypočítané velikosti napětí a úhlu napětí v jednotlivých uzlech náležících do DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení.

Tab. 6-1 Napěťové poměry uzlech DS 110 kV – můstkové zapojení

Rozvodna		U_R	δ
Označení	Název	kV	°
BK	Blansko	116,2	-2,7
BKD	Blansko-ČD	116,2	-2,7
BO	Boskovice	115,8	-3,0
BYP	Bystřice n. Perštejnem	116,5	-2,7
CNT - A	Čebín - A	116,7	-2,3
CNT - C	Čebín - C	116,7	-2,3
NAO	Náměšť n. Oslavou	115,5	-3,4
OS	Oslavany	115,6	-3,2
PTA	Ptáčov	115,5	-3,5
RIP	Řípov	115,5	-3,5
RON	Dolní Rožínka	116,6	-2,7
VB	Velká Bíteš	116,1	-2,9
VMZ	Velké Meziříčí	115,3	-3,5
VOP	Velké Opatovice	115,9	-3,0

Z přehledu vypočítaných hodnot napěťových poměrů v R 110 kV UO Čebín v Tab. 6-1 je zřejmé, že při můstkovém zapojení jsou napětí ve všech uzlech v dovolených mezích (dovolená mez 99 kV - 121 kV).

6.2.2 Transformátory

• Transformátory PS - 400/110 kV:

Výsledky výpočtů pro transformátory 400/110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-2.

Tab. 6-2 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{dodt}	Q_{dodt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVar	MW	A	%
CNT - A	Čebín - A	T401	350	1837	118,5	29,4	0,036	603,8	32,87
CNT - C	Čebín - C	T403	250	1312	92,1	-8,8	0,016	457,0	34,83

Vzhledem k tomu, že paralelně spojíme různé transformátory (rozdílné jmenovité výkony) nerozloží se na nich výkon rovnoměrně, ale větší zatížení převezme výkonově větší transformátor T401.

Z Tab. 6-2 je patrné, že při můstkovém zapojení není žádný transformátor 400/110 kV přetížen.

Dále je potřeba zkontrolovat, zda-li při výpadku jednoho z transformátorů T401 nebo T403 nedojde k přetížení druhého (zapojeného) transformátoru.

Celkový dodávaný zdánlivý výkon transformátory T401 a T403 do DS 110 kV je

$$S_{celk} = 211,6 \text{ MVA} \quad (6.1)$$

Zdánlivé jmenovité výkony transformátorů T401 a T403 jsou

$$S_{T401} = 350 \text{ MVA}, S_{T403} = 250 \text{ MVA} \quad (6.2)$$

A musí platit, že

$$S_{T401} \geq S_{celk}, S_{T403} \geq S_{celk} \quad (6.3)$$

$$350MVA \geq 213MVA, 250MVA \geq 213MVA \quad (6.4)$$

Podmínka je splněna a v případě výpadku jednoho z transformátorů (T401 nebo T403) zatížení převezme druhý transformátor, aniž by byl přetížen.

- **Distribuční transformátory 110/VN kV:**

Vypočítané hodnoty pro distribuční transformátory 110/VN kV jsou uvedeny v Tab. 6-3.

Tab. 6-3 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{odbt}	Q_{odbt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVar	MW	A	%
BK	Blansko	T101	25	131	-3,2	0	0,020	16	12,21
BK	Blansko	T102	40	210	-24,1	-7,1	0,119	124,9	59,48
BK-D	Blansko-ČD	T1	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BK-D	Blansko-ČD	T2	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BO	Boskovice	T101	25	131	-13,8	-2,9	0,072	70,1	53,51
BO	Boskovice	T102	40	210	-12,6	-2,2	0,031	63,9	30,43
BYP	Bystřice n. Perštejnem	T102	40	210	-16,6	-1	0,045	82,6	39,33
CNT - C	Čebín	T101	40	210	-14	-5,1	0,046	74	35,24
CNT - A	Čebín	T102	40	210	-21,1	-6,4	0,092	109	51,90
CNT - A	Čebín	T1	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,7	21,00
CNT - A	Čebín	T2	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,7	21,00
NAO	Náměšť n. Oslavou	T101	25	131	-4,2	-0,5	0,021	21,3	16,26
OS	Oslavany	T101	25	131	-9,8	-3	0,050	50,9	38,85
OS	Oslavany	T102	40	210	-14,6	-3,6	0,042	75,3	35,86
OS	Oslavany	T103	40	210	-9,7	-1,8	0,037	49,5	23,57
PTA	Ptáčov	T102	40	210	-11,9	-2	0,055	60,1	28,62
RON	Dolní Rožínka	T101	40	210	-7,8	0,3	-	38,7	18,43
RON	Dolní Rožínka	T102	40	210	-0,2	2	-	9,7	4,62
VBT	Velká Bíteš	T101	40	210	-11,1	-3,6	0,025	58,2	27,71
VMZ	Velké Meziříčí	T101	40	210	-8,4	-2,2	0,026	43,6	20,76
VMZ	Velké Meziříčí	T102	25	131	-12,9	-4,4	0,069	68	51,91
VOP	Velké Opatovice	T101	25	131	-9,7	-2,3	0,032	49,8	38,02

Z Tab. 6-3 je patrné, že při můstkovém zapojení není žádný distribuční transformátor 110/VN kV přetížen.

6.2.3 Vedení 110 kV

Vypočítané hodnoty pro vedení 110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-4.

Tab. 6-4 Vedení 110 kV – můstkové zapojení

Název	Rozvodny		U ₁	δ ₁	U ₂	δ ₂	P _{odbv}	Q _{odbv}	P _{dodv}	Q _{dodv}	ΔP _v	I _{nv}	I _{dodv}	
Označení	Označení		kV	°	kV	°	MW	MVAr	MW	MVAr	MW	A	A	%
V502 (1)	OS	502A	115,6	-3,2	115,5	-3,4	-5,6	0,9	5,6	-0,1	0,007	450	28,3	6,29
V502 (2)	502A	RIP	115,5	-3,4	115,5	-3,5	-1,4	0,6	1,4	0,3	0,001	450	7	1,56
V502 (3)	502A	NAO	115,5	-3,4	115,5	-3,4	-4,2	-0,5	4,2	0,5	0,001	450	21,3	4,73
V503	OS	RIP	115,6	-3,2	115,5	-3,5	-3,3	1,2	3,3	0,5	0,006	450	16,8	3,73
V505	CNT - A	OS	116,7	-2,3	115,6	-3,2	-21,7	-2,4	21,5	3,2	0,157	450	108,6	24,13
V506	CNT - C	OS	116,7	-2,3	115,6	-3,2	-21,7	-2,4	21,5	3,2	0,157	450	108,6	24,13
V507	CNT - A	BYP	116,7	-2,3	116,5	-2,7	-8,1	1,9	8,1	-0,9	0,022	450	40,3	8,96
V508	CNT - C	BYP	116,7	-2,3	116,5	-2,7	-8,1	1,9	8,1	-0,9	0,022	450	40,3	8,96
V509	BYP	MZR	116,5	-2,7	-	-	0,0	0,9	0,0	0,0	0,000	450	4,2	0,9
V516	RIP	VMZ	115,5	-3,5	115,3	-3,5	-2,0	-1,2	2,0	2,0	0,001	450	14,3	3,18
V523	CNT - A	BK	116,7	-2,3	116,2	-3,7	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	92,6	20,58
V524	CNT - C	BK	116,7	-2,3	116,2	-3,7	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	92,6	20,58
V525	BK	BO	116,2	-3,7	115,8	-3,0	-6,9	1,0	6,8	-0,2	0,027	450	34,0	7,56
V526	CNT - C	VOP	116,7	-2,3	115,9	-3,0	-12,0	-1,7	11,9	3,0	0,053	455	61,2	13,45
V5525	RIP	PTA	115,5	-3,5	115,5	-3,5	-2,6	0,4	2,6	-0,1	0,001	450	13,2	2,93
V5526	BK	BK-D	116,2	-3,7	116,2	-2,7	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,000	450	7,8	1,73
V5527	BK	BK-D	116,2	-3,7	116,2	-2,7	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,000	450	7,8	1,73
V5533	CNT - A	VBV	116,7	-2,3	116,1	-2,9	-20,5	-3,6	20,4	4,1	0,076	450	103,5	23,00
V5534	CNT - C	VMZ	116,7	-2,3	115,3	-3,5	-19,4	-3,4	19,3	4,5	0,148	450	99,0	22,00
V5537	CNT - A	RON	116,7	-2,3	116,6	-2,7	-8,4	1,8	8,4	-0,8	0,018	550	41,9	7,62
V5538	RON	BYP	116,6	-2,7	116,5	-2,7	-0,5	-1,5	0,5	1,9	0,000	550	9,5	1,73
V5539	VBV	PTA	116,1	-2,9	115,5	-3,5	-9,2	-0,5	9,2	2,0	0,033	450	47,2	10,49
V5593	VOP	BO	115,9	-3,0	115,8	-3,0	-2,2	-0,7	2,2	1,2	0,001	455	12,5	2,75
V5597	CNT - A	BO	116,7	-2,3	115,8	-3,0	-17,5	-3,3	17,4	4,1	0,083	450	89,0	19,78

Z Tab. 6-4 je patrné, že při můstkovém zapojení není žádné vedení 110 kV v DS 110 kV UO Čebín přetíženo. Vedení 110 kV zároveň splňují bezpečnostní kritérium n-1.

6.3 Zkratové poměry v DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení

Výpočet zkratových poměrů je proveden pro stejnou konfiguraci sítě jako při výpočtu ustáleného chodu (kapitola 6.1). Výpočet je opět proveden pomocí Dispečerského řídicího systému Sinaut Spectrum. Systémem vygenerované datové soubory jsou taktéž uvedeny jako příloha práce. Napěťový součinitel c je pro třífázový i jednofázový zkrat roven $c = 1,1$.

Výsledky výpočtů zkratových poměrů pro jednotlivé uzly v DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení jsou zobrazeny v Tab. 6-5. Při výpočtu je uvažován zkrat (třífázový a jednofázový) na hlavní přípojnicí. Odolnost rozveden je opět určena vypínací schopností výkonových vypínačů, jako v kapitole 5.2, a musí být splněna podmínka daná rovnicí 5.4.

Tab. 6-5 Zkratové poměry – můstkové zapojení

Zkratka	Rozvodna	Odolnost	$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$
-	-	MVA	MVA	kA	MVA	kA
BK	Blansko	3500	2165,2	11,364	3095,4	16,25
BK-D	Blansko - ČD	3500	2135,8	11,210	3008,0	15,79
BO	Boskovice	3500	1558,9	8,182	1496,9	7,86
BYP	Bystřice n. Perštejnem	3500	1732,3	9,092	2412,5	12,66
CNT - A	Čebín - A - T401	5000	3885,6	20,394	4104,7	21,54
CNT - C	Čebín - C - T403	5000	3885,6	20,394	4104,7	21,54
NAO	Náměšť n. Oslavou	3500	1013,8	5,321	874,2	4,59
OS	Oslavany	3500	1672,5	8,779	1654,7	8,68
PTA	Ptáčov	3500	1119,5	5,876	1018,9	5,35
RIP	Řípov	3500	1268,8	6,660	1151,2	6,04
RON	Dolní Rožínka	3500	1531,8	8,040	1572,8	8,02
VBT	Velká Bíteš	3500	1381,3	7,250	1079,1	5,66
VMZ	Velké Meziříčí	3500	1082,2	5,680	1019,6	5,35
VOP	Velké Opatovice	3500	1281,4	6,726	1125,4	5,91

Z přehledu vypočítaných hodnot počátečních rázových zkratových výkonů a proudů v Tab. 6-5 je patrné, že v rozvodnách DS 110 kV UO Čebín **nedojde** při můstkovém zapojení k překročení zkratové odolnosti.

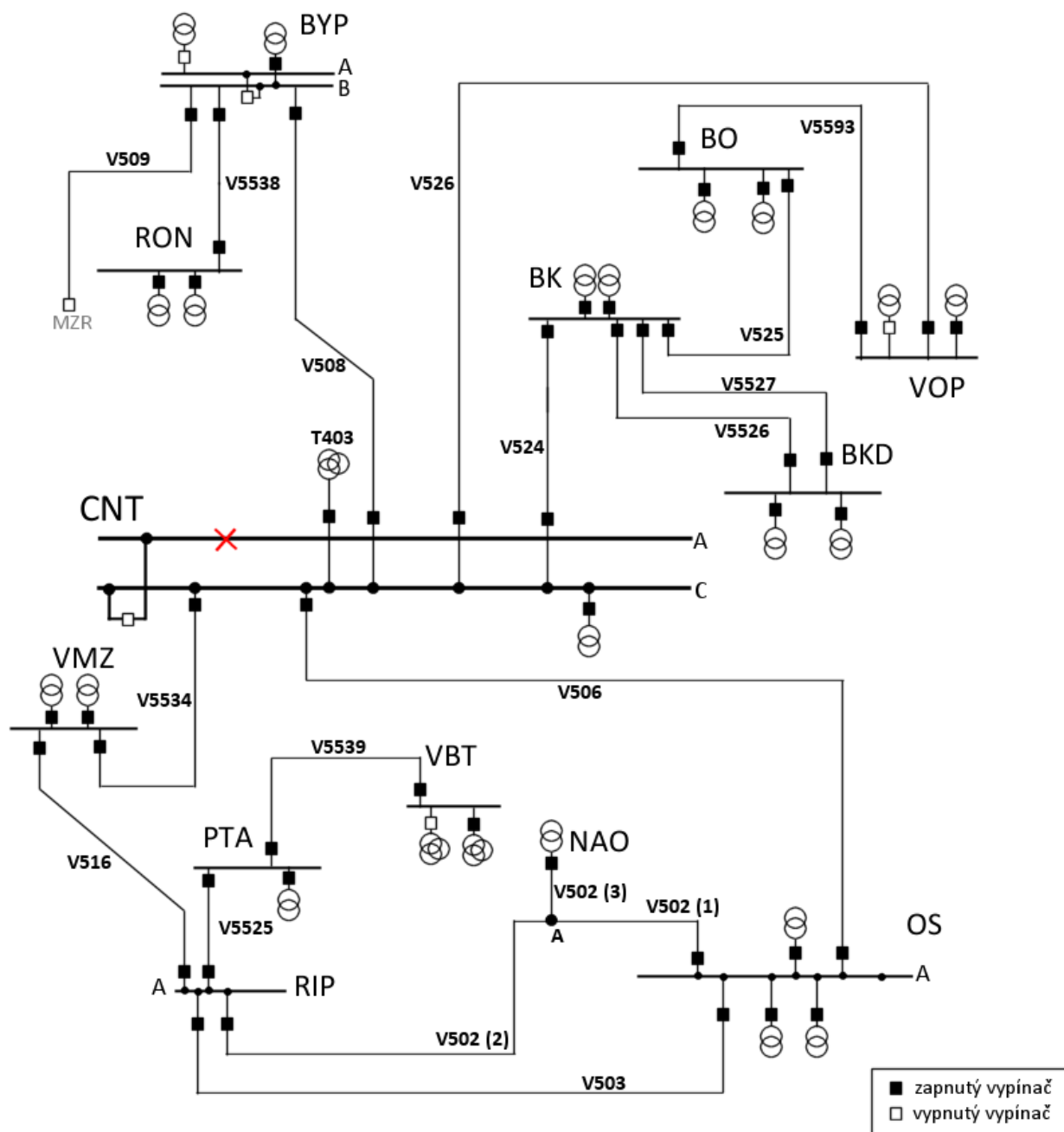
6.4 Zvláštní provozní stavy při můstkovém zapojení

Navržené můstkové zapojení prověříme při některých provozních stavech, které se mohou v DS 110 kV vyskytnout. Jako první prověříme můstkové zapojení při nejtěžším provozním stavu - výpadek přípojnice A v R 110 kV CNT (zároveň tím je odpojen i transformátor T401). Druhý testovaný provozní stav bude můstkové zapojení při zvýšeném zatížení, dále tento provozní stav také prověříme, jestli vedení 110 kV vyhovují bezpečnostnímu kritériu n-1.

6.4.1 Výpadek přípojnice A v R 110 kV CNT

Tento provozní stav je pro můstkové zapojení netěžší, protože dojde k výpadku přípojnice A v R 110 kV CNT a zároveň tím i výkonově většího transformátoru 400/110 kV. Při výpadku přípojnice A bude DS 110 kV napájena z přípojnice C a pro rozvodnu 110 kV VOP to znamená, že bude napájena přes dlouhé vedení V526 (může zde vlivem většího úbytku napětí na vedení nastat pokles napětí pod dovolenou mez). Oblast rozvoden 110 kV BYP a RON bude napájena pouze pomocí jednoho vedení V508, rozvodna 110 kV VBT bude napájena pouze přes vedení V5539 a lze v této rozvodně očekávat větší pokles napětí. Dále je potřeba věnovat pozornost

proudovému zatížení vedení 110 kV, která vyvádějí výkon z přípojnice C. Schéma zapojení DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení a výpadku přípojnice A je znázorněno na Obr. 6-2.



Obr. 6-2 DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení – výpadek přípojnice A

• Napěťové poměry v DS 110 kV

Tab. 6-6 prezentuje vypočítané velikosti napětí a úhlu napětí v jednotlivých rozvodnách náležících do DS 110 kV UO Čebín při zapojení dle Obr. 6-2.

Z přehledu vypočítaných hodnot napěťových poměrů v R 110 kV UO Čebín v Tab. 6-6 je zřejmé, že při můstkovém zapojení a výpadku přípojnice A jsou napětí ve všech rozvodnách 110 kV v dovolených mezích (dovolená mez 99 kV - 121 kV). Červenou barvou je označena odpojená přípojnice A.

Tab. 6-6 Napěťové poměry v uzlech – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A)

Rozvodna		U_{nR}	δ
Označení	Název	kV	°
BK	Blansko	113,2	-6,0
BK-D	Blansko-ČD	113,2	-6,0
BO	Boskovice	112,3	-6,6
BYP	Bystřice n. Perštejnem	113,9	-6,2
CNT - A	Čebín - A	-	-
CNT - C	Čebín - C	114,4	-4,9
NAO	Náměšť n. Oslavou	111,5	-7,5
OS	Oslavany	111,7	-7,1
PTA	Ptáčov	111,0	-8,0
RIP	Řípov	111,3	-7,6
RON	Dolní Rožínka	113,9	-6,3
VB	Velká Bíteš	110,1	-8,8
VMZ	Velké Meziříčí	111,7	-7,2
VOP	Velké Opatovice	112,7	-6,3

- Transformátory PS - 400/110 kV:**

Výsledky výpočtů pro transformátory 400/110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-7.

Tab. 6-7 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A)

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{dodt}	Q_{dodt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVar	MW	A	%
CNT - A	Čebín - A	T401	350	1837	-	-	-	-	-
CNT - C	Čebín - C	T403	250	1312	190	25,7	0,071	967,9	73,77

Z Tab. 6-7 je patrné, že při můstkovém zapojení a výpadku přípojnice A není transformátor T403 přetížen.

- Distribuční transformátory 110/VN kV:**

Vypočítané hodnoty pro distribuční transformátory 110/VN kV jsou uvedeny v Tab. 6-8. Výpadek přípojnice A v R 110 kV CNT znamená i výpadek transformátorů T102, T1 a T2 (červené značení).

Tab. 6-8 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A)

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{odbt}	Q_{odbt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVar	MW	A	%
BK	Blansko	T101	25	131	-3,2	0	0,019	16,4	12,52
BK	Blansko	T102	40	210	-24,1	-7,1	0,122	128,4	61,14
BK-D	Blansko-ČD	T1	13,3	70	-1,4	0,7	-	8	11,43
BK-D	Blansko-ČD	T2	13,3	70	-1,4	0,7	-	8	11,43
BO	Boskovice	T101	25	131	-13,8	-2,9	0,074	72,4	55,27
BO	Boskovice	T102	40	210	-12,6	-2,2	0,031	65,9	31,38
BYP	Bystřice n. Perštejnem	T102	40	210	-16,6	-1	0,045	84,5	40,24
CNT - C	Čebín	T101	40	210	-14	-5,1	0,046	75,5	35,95
CNT - A	Čebín	T102	40	210	-	-	-	-	-
CNT - A	Čebín	T1	13,3	70	-	-	-	-	-
CNT - A	Čebín	T2	13,3	70	-	-	-	-	-
NAO	Náměšť n. Oslavou	T101	25	131	-4,2	-0,5	0,020	22	16,79
OS	Oslavany	T101	25	131	-9,8	-3	0,050	52,7	40,23

OS	Oslavany	T102	40	210	-14,6	-3,6	0,042	78	37,14
OS	Oslavany	T103	40	210	-9,7	-1,8	0,036	51,2	24,38
PTA	Ptáčov	T102	40	210	-11,9	-2	0,054	62,5	29,76
RON	Dolní Rožínka	T101	40	210	-7,8	0,3	-	39,6	18,86
RON	Dolní Rožínka	T102	40	210	-0,2	2	-	10	4,76
VB	Velká Bíteš	T101	40	210	-11,1	-3,6	0,024	61,4	29,24
VMZ	Velké Meziříčí	T101	40	210	-8,4	-2,2	0,025	45	21,43
VMZ	Velké Meziříčí	T102	25	131	-12,9	-4,4	0,071	70,3	53,66
VOP	Velké Opatovice	T101	25	131	-9,7	-2,3	0,032	51,2	39,08

Z Tab. 6-8 je patrné, že při můstkovém zapojení a výpadku přípojnice A není žádný distribuční transformátor 110/VN kV přetížen.

• **Vedení 110 kV:**

Vypočítané hodnoty pro vedení 110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-9. Vedení napájená z odpojené přípojnice A jsou označena červenou barvou. Tato vedení jsou v rozvodně CNT vypnutá, ovšem z druhé strany jsou vedení stále zapnutá, a proto vedeními teče proud přibližně 5A (vedení je v chodu naprázdno, převažuje nabíjecí kapacitní výkon a vedení se stává zdrojem jalového výkonu).

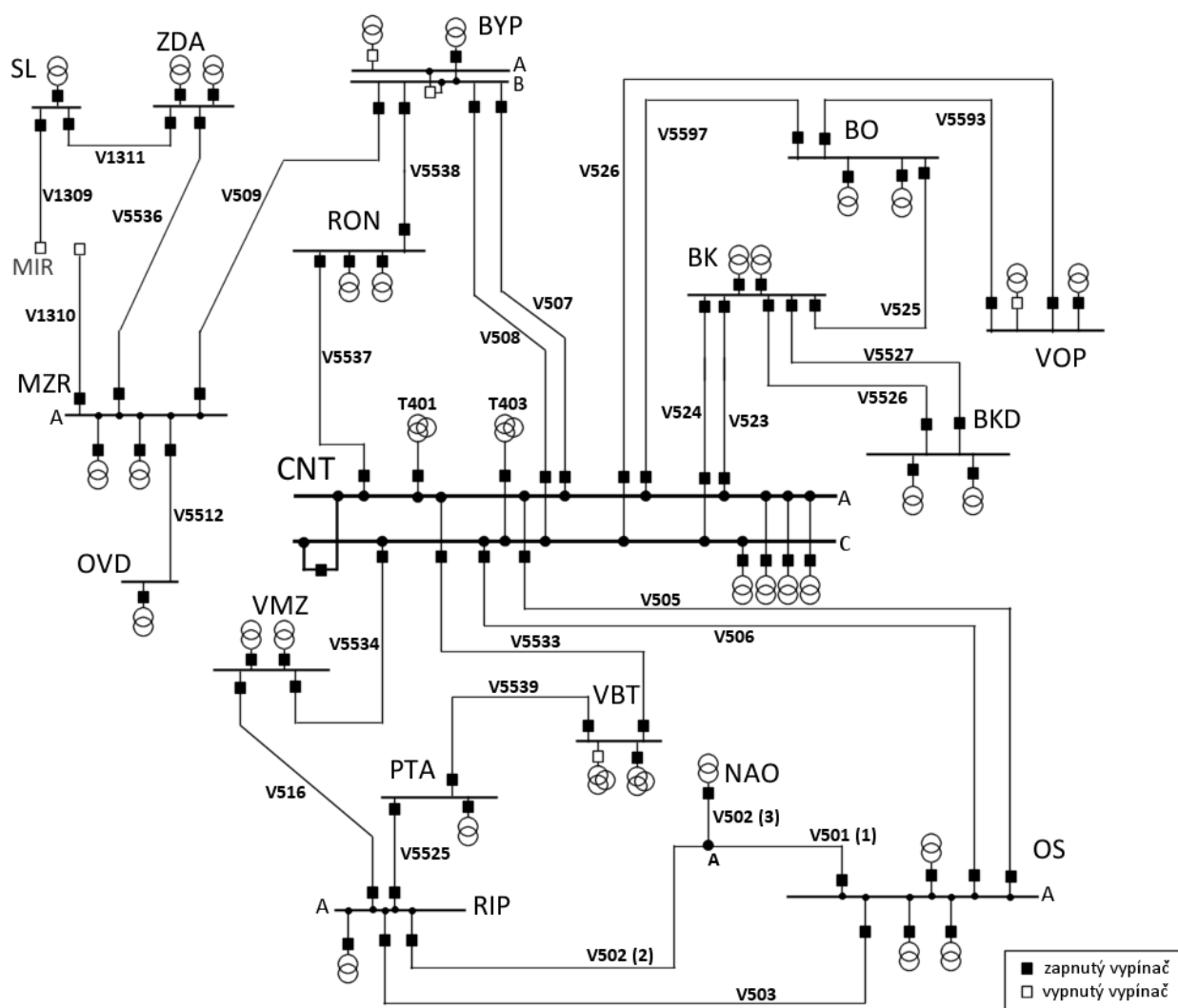
Tab. 6-9 Vedení 110 kV – můstkové zapojení (výpadek přípojnice A)

Název	Rozvodny		U ₁	δ ₁	U ₂	δ ₂	P _{odbv}	Q _{odbv}	P _{dodv}	Q _{dodv}	ΔP _v	I _{nv}	I _{dodv}	
Označení	Označení		kV	°	kV	°	MW	MVar	MW	MVar	MW	A	A	%
V502 (1)	OS	502A	111,7	-7,1	111,5	-7,4	-8,7	0,3	8,7	0,4	0,019	450	44,9	9,98
V502 (2)	502A	RIP	111,5	-7,4	111,3	-7,6	-4,4	0,1	4,4	0,7	0,006	450	23,3	5,18
V503 (3)	502A	NAO	111,5	-7,4	111,5	-7,5	-4,2	-0,5	4,2	0,5	0,001	450	22	4,89
V503	OS	RIP	111,7	-7,1	111,3	-7,6	-6,4	0,5	6,4	0,9	0,022	450	33,5	7,44
V505	CNT - A	OS	-	-	111,7	-7,1	0,0	0,0	0,0	1,0	0,000	450	5,3	1,18
V506	CNT - C	OS	114,4	-4,9	111,7	-7,1	-50,1	-7,7	49,2	6,6	0,879	450	256,6	57,02
V507	CNT - A	BYP	-	-	113,9	-6,2	0,0	0,0	0,0	1,1	0,000	450	5,5	1,22
V508	CNT - C	BYP	114,4	-4,9	113,9	-6,2	-24,8	5,1	24,6	-4,6	0,219	450	126,9	28,20
V509	BYP	MZR	113,9	-6,2	-	-	0,0	0,8	0,0	0,0	0,00	450	4,1	0,90
V516	VMZ	RIP	111,7	-7,2	111,3	-7,6	-12,3	-1,2	12,3	1,9	0,033	450	64,3	14,29
V523	CNT - A	BK	-	-	113,2	-6,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,000	450	2,8	0,62
V524	CNT - C	BK	114,4	-4,9	113,2	-6,0	-43,9	-5,1	43,6	4,8	0,354	450	223,6	49,69
V525	BK	BO	113,2	-6,0	112,3	-6,6	-13,4	0,4	13,3	0,3	0,109	450	68,6	15,24
V526	CNT - C	VOP	114,4	-4,9	112,7	-6,3	-23,0	-5,0	22,8	5,7	0,209	455	120,6	26,51
V5525	RIP	PTA	111,3	-7,6	111,0	-8,0	-23,1	-3,6	23,0	3,7	0,045	450	121,4	26,98
V5526	BK	BK-D	113,2	-6,0	113,2	-6,0	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,004	450	8,0	1,78
V5527	BK	BK-D	113,2	-6,0	113,2	-6,0	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,004	450	8,0	1,78
V5533	CNT - A	VB	-	-	110,1	-8,8	0,0	0,0	0,0	0,7	0,000	450	3,5	0,78
V5534	CNT - C	VMZ	114,4	-4,9	111,7	-7,2	-34,1	-7,8	33,6	7,8	0,481	450	178,2	39,60
V5537	CNT - A	RON	-	-	113,9	-6,3	0,0	0,0	0,0	1,1	0,000	550	5,4	0,98
V5538	BYP	RON	113,9	-6,2	113,9	-6,3	-8,0	3,7	8,0	-3,4	0,007	550	43,8	7,96
V5539	PTA	VB	111,0	-8,0	110,1	-8,8	-11,2	-1,7	11,1	3,0	0,054	450	60,4	13,42
V5593	VOP	BO	112,7	-6,3	112,3	-6,6	-13,1	-3,4	13,1	3,8	0,025	455	70,1	15,41
V5597	CNT - A	BO	-	-	112,3	-6,6	0,0	0,0	0,0	1,0	0,000	450	5,2	1,16

Z Tab. 6-9 je patrné, že při můstkovém zapojení a výpadku přípojnice A v R 110 kV CNT není žádné vedení 110 kV v DS 110 kV UO Čebín přetíženo.

6.4.2 Můstkové zapojení - zvýšené zatížení

V případě výskytu problémů v DS 110 kV UO Slavětice dochází v R 110 kV RIP k přepojení transformátoru T102 (110/22 kV, $S_n = 40$ MVA) na přípojnici, která spadá do DS 110 kV UO Čebín. Dále bývá v případě výskytu problémů část DS 110 kV UO Mírovka, konkrétně rozvodny MZR, OVD, SL a ZDA, napájena přes vedení V509 z DS 110 kV UO Čebín. Pro můstkové zapojení to bude znamenat zvýšení proudového zatížení a je potřeba prověřit, zda-li nedojde k přetížení vedení (především V509) a poklesu napětí v rozvodnách 110 kV pod dovolenou mez (především v rozvodnách – SL a ZDA). Schéma zapojení DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení – zvýšené zatížení je znázorněno na Obr. 6-3. Vzhledem k tomu, že celkový odebíraný výkon z transformátorů 400/110 kV je nyní $S_{\text{celk}} = 277,2$ MVA, tak toto zapojení nemůže být provozováno v případě výpadku transformátoru T401, protože by došlo k přetížení transformátoru T403.



Obr. 6-3 DS 110 kV UO Čebín při můstkovém zapojení – zvýšené zatížení

- Napětíové poměry v DS 110 kV**

Tab. 6-10 prezentuje vypočítané velikosti napětí a úhlu napětí v jednotlivých rozvodnách náležících do DS 110 kV UO Čebín při zapojení dle Obr. 6-3.

Tab. 6-10 Napětíové poměry v uzlech – můstkové zapojení (zvýšené zatížení)

Rozvodna		U_R	δ
Označení	Název	kV	°
BK	Blansko	115,7	-3,5
BK-D	Blansko-ČD	115,7	-3,5
BO	Boskovice	115,3	-3,8
BYP	Bystřice n. Perštejnem	115,3	-4,2
CNT - A	Čebín - A	116,2	-3,1
CNT - C	Čebín - C	116,2	-3,1
MZR	Žďár n. Sázavou	113,8	-5,8
NAO	Náměšť n. Oslavou	114,4	-4,6
OS	Oslavany	114,8	-4,2
OVD	Ostrov n. Oslavou-ČD	113,7	-5,8
PTA	Ptáčov	114,2	-4,8
RIP	Řípov	114,2	-4,9
RON	Dolní Rožínka	115,6	-4,0
SL	Šlapánov	113,8	-6,0
VB	Velká Bíteš	115,3	-3,9
VMZ	Velké Meziříčí	114,3	-4,7
VOP	Velké Opatovice	115,4	-3,8
ZDA	Žďár, ŽĎAS	113,7	-5,8

Z přehledu vypočítaných hodnot napětíových poměrů v R 110 kV UO Čebín v Tab. 6-10 je zřejmé, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru jsou napětí ve všech rozvodnách 110 kV v dovozených mezích (dovolená mez 99 kV - 121 kV).

- Transformátory PS - 400/110 kV:**

Výsledky výpočtů pro transformátory 400/110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-11.

Tab. 6-11 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení)

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{dodt}	Q_{dodt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVAr	MW	A	%
CNT - A	Čebín - A	T401	350	1837	155,8	36,5	0,063	795,0	43,28
CNT - C	Čebín - C	T403	250	1312	121,4	-3,3	0,028	603,3	45,98

Z Tab. 6-11 je patrné, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru není žádný transformátor 400/110 kV přetížen.

- Distribuční transformátory 110/VN kV:**

Vypočítané hodnoty pro distribuční transformátory 110/VN kV jsou uvedeny v Tab. 6-12. Z Tab. 6-12 je patrné, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru není žádný distribuční transformátor 110/VN kV přetížen.

Tab. 6-12 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení)

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{odbt}	Q_{odbt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVar	MW	A	%
BK	Blansko	T101	25	131	-3,2	0	0,020	16,1	12,29
BK	Blansko	T102	40	210	-24,1	-7,1	0,120	125,5	59,76
BK-D	Blansko-ČD	T1	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BK-D	Blansko-ČD	T2	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BO	Boskovice	T101	25	131	-13,8	-2,9	0,072	70,4	53,74
BO	Boskovice	T102	40	210	-12,6	-2,2	0,031	64,2	30,57
BYP	Bystřice n. Perštejnem	T102	40	210	-16,6	-1	0,045	83,5	39,76
CNT - A	Čebín	T102	40	210	-21,1	-6,4	0,092	109,5	52,14
CNT - A	Čebín	T1	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,7	21,00
CNT - A	Čebín	T2	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,7	21,00
CNT - C	Čebín	T101	40	210	-14	-5,1	0,046	74,3	35,38
MZR	Žďár n. Sázavou	T101	40	210	-13,5	-2,2	0,045	69,5	33,10
MZR	Žďár n. Sázavou	T102	40	210	-13,1	-0,7	0,043	66,5	31,67
NAO	Náměšť n. Oslavou	T101	25	131	-4,2	-0,5	0,021	21,5	16,41
OS	Oslavany	T101	25	131	-9,8	-3	0,050	51,3	39,16
OS	Oslavany	T102	40	210	-14,6	-3,6	0,042	75,8	36,10
OS	Oslavany	T103	40	210	-9,7	-1,8	0,037	49,8	23,71
OVD	Ostrov n. Oslavou-ČD	T2	13,3	70	-3,4	-0,5	-	17,6	25,14
PTA	Ptáčov	T102	40	210	-11,9	-2	0,055	60,7	28,90
RIP	Řípov	T102	40	210	-22,7	-5,4	0,108	118	56,19
RON	Dolní Rožínka	T101	40	210	-7,8	0,3	-	39	18,57
RON	Dolní Rožínka	T102	40	210	-0,2	2	-	9,8	4,67
SL	Šlapánov	T102	10	52	-1,3	0,8	-	7,6	14,62
VB	Velká Bíteš	T101	40	210	-11,1	-3,6	0,025	58,6	27,90
VMZ	Velké Meziříčí	T101	40	210	-8,4	-2,2	0,026	44	20,95
VMZ	Velké Meziříčí	T102	25	131	-12,9	-4,4	0,070	68,7	52,44
VOP	Velké Opatovice	T101	25	131	-9,7	-2,3	0,032	50	38,17
ZDA	Žďár, ŽĎAS	T101	25	131	-8,3	-2,9	-	44,6	34,05
ZDA	Žďár, ŽĎAS	T102	25	131	-3	-0,4	-	15,3	11,68

- Vedení 110 kV:

Vypočítané hodnoty pro vedení 110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-13.

Tab. 6-13 Vedení 110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení)

Název	Rozvodny		U_1	δ_1	U_2	δ_2	P_{odbv}	Q_{odbv}	P_{dodv}	Q_{dodv}	ΔP_v	I_{nv}	I_{dodv}	
-	-		kV	°	kV	°	MW	MVar	MW	MVar	MW	A	A	%
V1309	SL	MIR	113,3	-6,6	-	-	0,0	0,2	0,0	0,0	0,000	450	1	0,2
V1310	MZR	MIR	113,2	-6,5	-	-	0,0	1,2	0,0	0,0	0,000	450	5,9	1,31
V1311	ZDA	SL	113,7	-5,8	113,8	-6,0	-1,3	2,0	1,3	-1,0	0,001	530	8,2	1,55
V502	OS	502A	114,8	-4,2	114,5	-4,6	-11,1	-0,3	11	1	0,029	450	55,9	12,42
	502A	RIP	114,5	-4,6	114,2	-4,9	-6,8	-0,5	6,8	1,3	0,013	450	35	7,78
	502A	NAO	114,5	-4,6	114,4	-4,6	-4,2	-0,5	4,2	0,5	0,002	450	21,5	4,78
V503	OS	RIP	114,8	-4,2	114,2	-4,9	-8,8	0,0	8,7	1,6	0,040	450	44,9	9,98
V505	CNT - A	OS	116,2	-3,1	114,8	-4,2	-27,2	-3,9	27,0	4,4	0,251	450	137,7	30,60

V506	CNT - C	OS	116,2	-3,1	114,8	-4,2	-27,2	-3,9	27,0	4,4	0,251	450	137,7	30,60
V507	CNT - A	BYP	116,2	-3,1	115,3	-4,2	-23,8	0,3	23,6	0,4	0,188	450	118,1	26,24
V508	CNT - C	BYP	116,2	-3,1	115,3	-4,2	-23,8	0,3	23,6	0,4	0,188	450	118,1	26,24
V509	BYP	MZR	115,3	-4,2	113,8	-5,8	-43,0	-3,5	42,5	3,1	0,477	450	216,5	48,11
V516	VMZ	RIP	114,3	-4,7	114,2	-4,9	-4,1	0,3	4,1	0,5	0,004	450	21,1	4,69
V523	CNT - A	BK	116,2	-3,1	115,7	-3,5	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	93,0	20,67
V524	CNT - C	BK	116,2	-3,1	115,7	-3,5	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	93,0	20,67
V525	BK	BO	115,7	-3,5	115,3	-3,8	-6,9	1,0	6,8	-0,2	0,027	450	34,2	7,60
V526	CNT - C	VOP	116,2	-3,1	115,4	-3,8	-12,0	-1,7	11,9	3,0	0,054	455	61,5	13,52
V5512	MZR	OVD	113,8	-5,8	113,7	-5,8	-3,4	-0,3	3,4	0,5	0,000	450	17,6	3,91
V5525	PTA	RIP	114,2	-4,8	114,2	-4,9	-3,0	-1,6	3,0	1,9	0,005	450	18,2	4,04
V5526	BK	BK-D	115,7	-3,5	115,7	-3,5	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,002	450	7,8	1,73
V5527	BK	BK-D	115,7	-3,5	115,7	-3,5	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,002	450	7,8	1,73
V5533	CNT - A	VB	116,2	-3,1	115,3	-3,9	-26,2	-5,6	26,1	5,9	0,127	450	134,1	29,80
V5534	CNT - C	VMZ	116,2	-3,1	114,3	-4,7	-25,7	-5,5	25,4	6,3	0,264	450	132,3	29,40
V5536	MZR	ZDA	113,8	-5,8	113,7	-5,8	-12,5	-1,2	12,5	1,3	0,005	450	64,0	14,22
V5537	CNT - A	RON	116,2	-3,1	115,6	-4,0	-20,6	-0,4	20,5	1,2	0,107	550	102,4	18,62
V5538	RON	BYP	115,6	-4,0	115,3	-4,2	-12,5	-3,5	12,5	3,8	0,015	550	65,3	11,87
V5539	VB	PTA	115,3	-3,9	114,2	-4,8	-15,0	-2,3	14,9	3,6	0,089	450	77,4	17,20
V5593	VOP	BO	115,4	-3,8	115,3	-3,8	-2,2	-0,7	2,2	1,2	0,001	455	12,5	2,75
V5597	CNT - A	BO	116,2	-3,1	115,3	-3,8	-17,5	-3,3	17,4	4,1	0,084	450	89,4	19,87

Z Tab. 6-13 je patrné, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru není žádné vedení 110 kV v DS 110 kV UO Čebín přetíženo.

6.4.3 Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507)

Dále můstkové zapojení při zvýšeném zatížení prověříme při výpadku vedení V506 a V507. Tím ověříme, jestli při provozu můstkového zapojení při zvýšeném odběru vyhovují vedení 110 kV bezpečnostnímu kritériu $n - 1$.

• Napěťové poměry v DS 110 kV

Tab. 6-14 prezentuje vypočítané velikosti napětí a úhlu napětí v jednotlivých rozvodnách náležících do DS 110 kV UO Čebín při zapojení dle Obr. 6-3 (vedení V506 a V507 jsou vypnuty).

Tab. 6-14 Napěťové poměry v uzlech – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadkem V506 a V507)

Rozvodna		U_R	δ
Označení	Název	kV	°
BK	Blansko	115,7	-3,5
BK-D	Blansko-ČD	115,7	-3,5
BO	Boskovice	115,3	-3,9
BYP	Bystřice n. Perštejnem	114,8	-4,9
CNT - A	Čebín - A	116,2	-3,1
CNT - C	Čebín - C	116,2	-3,1

MZR	Žďár n. Sázavou	113,2	-6,5
NAO	Náměšť n. Oslavou	113,6	-5,3
OS	Oslavany	113,8	-5,1
OVD	Ostrov n. Oslavou-ČD	113,2	-6,5
PTA	Ptáčov	113,7	-5,3
RIP	Řípov	113,6	-5,4
RON	Dolní Rožínka	115,1	-4,5
SL	Šlapánov	113,3	-6,6
VB	Velká Bíteš	115,1	-4,0
VMZ	Velké Meziříčí	113,9	-5,1
VOP	Velké Opatovice	115,4	-3,8
ZDA	Žďár, ŽďAS	113,2	-6,5

Z přehledu vypočítaných hodnot napěťových poměrů v R 110 kV UO Čebín v Tab. 6-14 je zřejmé, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru (při výpadku vedení V506 a V507) jsou napětí ve všech rozvodnách 110 kV v dovořených mezích (dovolená mez 99 kV - 121 kV).

- **Transformátory PS - 400/110 kV:**

Výsledky výpočtů pro transformátory 400/110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-15.

Tab. 6-15 Transformátory 400/110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadky vedení V506 a V507)

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{dodt}	Q_{dodt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVar	MW	A	%
CNT - A	Čebín - A	T401	350	1837	156,2	37,6	0,063	798,4	43,46
CNT - C	Čebín - C	T403	250	1312	121,7	-2,3	0,028	604,9	46,11

Z Tab. 6-15 je patrné, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru (při výpadku vedení V506 a V507) není žádný transformátor 400/110 kV přetížen.

- **Distribuční transformátory 110/VN kV:**

Vypočítané hodnoty pro distribuční transformátory 110/VN kV jsou uvedeny v Tab. 6-16.

Tab. 6-16 Transformátory 110/VN kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadkem vedení V506 a V507)

Rozvodna		Typ	S_{nt}	I_{nt}	P_{odbt}	Q_{odbt}	ΔP_t	I_{zt}	
Označení	Název	-	MVA	A	MW	MVar	MW	A	%
BK	Blansko	T101	25	131	-3,2	0	0,020	16,1	12,29
BK	Blansko	T102	40	210	-24,1	-7,1	0,120	125,5	59,76
BK-D	Blansko-ČD	T1	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BK-D	Blansko-ČD	T2	13,3	70	-1,4	0,7	-	7,8	11,14
BO	Boskovice	T101	25	131	-13,8	-2,9	0,072	70,5	53,82
BO	Boskovice	T102	40	210	-12,6	-2,2	0,031	64,2	30,57
BYP	Bystřice n. Perštejnem	T102	40	210	-16,6	-1	0,045	83,9	39,95
CNT - A	Čebín	T102	40	210	-21,1	-6,4	0,092	109,5	52,14
CNT - A	Čebín	T1	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,7	21,00
CNT - A	Čebín	T2	13,3	70	-0,5	2,9	-	14,7	21,00
CNT - C	Čebín	T101	40	210	-14	-5,1	0,046	74,3	35,38
MZR	Žďár n. Sázavou	T101	40	210	-13,5	-2,2	0,044	69,8	33,24
MZR	Žďár n. Sázavou	T102	40	210	-13,1	-0,7	0,043	66,8	31,81
NAO	Náměšť n. Oslavou	T101	25	131	-4,2	-0,5	0,021	21,6	16,49

OS	Oslavany	T101	25	131	-9,8	-3	0,050	51,7	39,47
OS	Oslavany	T102	40	210	-14,6	-3,6	0,042	76,5	36,43
OS	Oslavany	T103	40	210	-9,7	-1,8	0,037	50,2	23,90
OVD	Ostrov n. Oslavou-ČD	T2	13,3	70	-3,4	-0,5	-	17,6	25,14
PTA	Ptáčov	T102	40	210	-11,9	-2	0,054	61	29,05
RIP	Říčov	T102	40	210	-22,7	-5,4	0,109	118,6	56,48
RON	Dolní Rožínka	T101	40	210	-7,8	0,3	-	39,2	18,67
RON	Dolní Rožínka	T102	40	210	-0,2	2	-	9,9	4,71
SL	Šlapánov	T102	10	52	-1,3	0,8	-	7,6	14,62
VB	Velká Bíteš	T101	40	210	-11,1	-3,6	0,025	58,7	27,95
VMZ	Velké Meziříčí	T101	40	210	-8,4	-2,2	0,026	44,1	21,00
VMZ	Velké Meziříčí	T102	25	131	-12,9	-4,4	0,070	68,9	52,60
VOP	Velké Opatovice	T101	25	131	-9,7	-2,3	0,032	50	38,17
ZDA	Žďár, ŽďAS	T101	25	131	-8,3	-2,9	-	44,8	34,20
ZDA	Žďár, ŽďAS	T102	25	131	-3	-0,4	-	15,4	11,76

Z Tab. 6-16 je patrné, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru (při výpadku vedení V506 a V507) není žádný distribuční transformátor 110/VN kV přetížen.

• Vedení 110 kV:

Vypočítané hodnoty pro vedení 110 kV jsou uvedeny v Tab. 6-17. Vypnutá vedení V506 a 507 jsou označena červenou barvou.

Tab. 6-17 Vedení 110 kV – můstkové zapojení (zvýšené zatížení s výpadkem vedení V506 a V507)

Název	Rozvodny		U ₁	δ ₁	U ₂	δ ₂	P _{odbv}	Q _{odbv}	P _{dodv}	Q _{dodv}	ΔP _v	I _{nv}	I _{dodv}	
-	-		kV	°	kV	°	MW	MVar	MW	MVar	MW	A	A	%
V1309	SL	MIR	113,3	-6,6	-	-	0,0	0,2	0,0	0,0	0,000	450	1	0,2
V1310	MZR	MIR	113,2	-6,5	-	-	0,0	1,2	0,0	0,0	0,000	450	5,9	1,31
V1311	ZDA	SL	113,2	-6,5	113,3	-6,6	-1,3	2,0	1,3	-1,0	0,005	530	8,2	1,55
V502 (1)	OS	502A	113,8	-5,1	113,6	-5,3	-6,5	0,5	6,5	0,2	0,01	450	33	7,33
V502 (2)	502A	RIP	113,6	-5,3	113,6	-5,4	-2,3	0,3	2,3	0,6	0,001	450	11,9	2,64
V502 (3)	502A	NAO	113,6	-5,3	113,6	-5,3	-4,2	-0,5	4,2	0,5	0,001	450	21,6	4,80
V503	OS	RIP	113,8	-5,1	113,6	-5,4	-4,2	0,8	4,2	0,8	0,009	450	21,8	4,84
V505	CNT - A	OS	116,2	-3,1	113,8	-5,1	-45,6	-6,7	44,9	6,1	0,703	450	229,6	51,02
V506	CNT - C	OS	-	-	113,8	-5,1	0,0	0,0	0,0	1,1	0,000	450	5,4	1,20
V507	CNT - A	BYP	-	-	114,8	-4,9	0,0	0,0	0,0	1,1	0,000	450	5,5	1,22
V508	CNT - C	BYP	116,2	-3,1	114,8	-4,9	-37,3	0,4	36,8	-0,5	0,462	450	185,2	41,16
V509	BYP	MZR	114,8	-4,9	113,2	-6,5	-43,0	-3,6	42,5	3,2	0,482	450	217,5	48,33
V516	VMZ	RIP	113,9	-5,1	113,6	-5,4	-8,9	-0,6	8,8	1,3	0,016	450	45,4	10,09
V523	CNT - A	BK	116,2	-3,1	115,7	-3,5	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	93,0	20,67
V524	CNT - C	BK	116,2	-3,1	115,7	-3,5	-18,6	-1,9	18,5	2,3	0,061	450	93,0	20,67
V525	BK	BO	115,7	-3,5	115,3	-3,9	-7,4	-2,4	7,4	2,7	0,005	450	39,9	8,87
V526	CNT - C	VOP	116,2	-3,1	115,4	-3,8	-12,0	-1,7	11,9	3,0	0,054	455	61,5	13,52
V5512	MZR	OVD	113,2	-6,5	113,2	-6,5	-3,4	-0,3	3,4	0,5	0,001	450	17,6	3,91
V5525	PTA	RIP	113,7	-5,3	113,6	-5,4	-7,4	-2,4	7,4	2,7	0,005	450	39,9	8,87
V5526	BK	BK-D	115,7	-3,5	115,7	-3,5	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,000	450	7,8	1,73
V5527	BK	BK-D	115,7	-3,5	115,7	-3,5	-1,4	0,7	1,4	-0,7	0,000	450	7,8	1,73
V5533	CNT - A	VB	116,2	-3,1	115,1	-4,0	-30,7	-6,7	30,5	6,9	0,174	450	156,9	34,87
V5534	CNT - C	VMZ	116,2	-3,1	113,9	-5,1	-30,5	-6,7	30,2	7,1	0,373	450	157,1	34,91
V5536	MZR	ZDA	113,2	-6,5	113,2	-6,5	-12,5	-1,3	12,5	1,3	0,006	450	64,3	14,29
V5537	CNT - A	RON	116,2	-3,1	115,1	-4,5	-31,1	-1,2	30,9	1,5	0,245	550	155,0	28,18
V5538	RON	BYP	115,1	-4,5	114,8	-4,9	-22,9	-3,8	22,9	4,0	0,047	550	116,7	21,22
V5539	VB	PTA	115,1	-4,0	113,7	-5,3	-19,4	-3,3	19,2	4,3	0,149	450	100,1	22,24
V5593	VOP	BO	115,4	-3,8	115,3	-3,9	-2,2	-0,7	2,2	1,2	0,001	455	12,5	2,75
V5597	CNT - A	BO	116,2	-3,1	115,3	-3,9	-17,5	-3,3	17,4	4,1	0,084	450	89,4	19,87

Z Tab. 6-17 je patrné, že při můstkovém zapojení a zvýšeném odběru (při výpadku vedení V506 a V507) není žádné vedení 110 kV v DS 110 kV UO Čebín přetíženo. Zároveň jsme ověřili, že při provozu můstkového zapojení při zvýšeném odběru vedení 110 kV vyhovují bezpečnostnímu kritériu n-1.

6.5 Spínač přípojnic - SP

Spínač přípojnic – SP jsme použili pro spojení přípojnic A a C při můstkovém zapojení. Tab. 6-18 obsahuje vypočítané velikosti proudového zatížení spínače přípojnic (SP) pro všechna analyzovaná zapojení v DS 110 kV.

Symbody obsažené v Tab. 6-18 značí:

I_{nSP} jmenovitý proud spínače přípojnic,
 I_{zSP} proudové zatížení spínače přípojnic.

Tab. 6-18 Přehled zatížení spínače přípojnic

		Můstkové zapojení	Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507)
I_{nSP}	A	1600			
I_{zSP}	A	147,7	-	104,8	97,8
	%	9,23	-	6,55	6,11

Z přehledu proudových zatížení v Tab. 6-18 je patrné, že při žádném provozním stavu můstkového zapojení nedojde k přetížení spínače přípojnic (SP).

Spínač přípojnic je potřeba prověřit také na případ, kdy dojde k výpadku transformátoru T401 (výkon odebíraný z přípojnice A je vyšší než z přípojnice C) a veškerý výkon dodávaný z T401 je nahrazen výkonem z T403, který musí projít přes spínač přípojnic (SP). Celkový výkon odebíraný vedeními 110 kV z přípojnice A v R 110 kV CNT je

$$S_{celk,A} = 117,18 \text{ MVA} \quad (6.5)$$

Jmenovitý výkon SP je

$$S_{n,SP} = 305 \text{ MVA} \quad (6.6)$$

Vzhledem k tomu, že

$$S_{celk,A} \leq S_{n,SP}, \quad 117,18 \text{ MVA} \leq 305 \text{ MVA} \quad (6.7)$$

tak spínač přípojnic nebude přetížen. Z hlediska proudového zatížení spínače přípojnic (SP) je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující.

7 VYHODNOCENÍ ŘEŠENÍ SOUČASNÉHO PROVOZU A MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ

V této části práce budou zhodnoceny výsledky výpočtů z předchozích kapitol (5 a 6). Nejprve se budeme věnovat zhodnocení současného provozu a navrhovaného – můstkového zapojení. V další části provedeme zhodnocení provozu můstkového zapojení při zvláštních provozních stavech. Nakonec zhodnotíme ztráty v DS 110 kV po zavedení můstkového zapojení.

7.1 Vyhodnocení současného provozu a můstkového zapojení

Jako první budou vyhodnoceny změny v DS 110 kV po zavedení můstkového zapojení (oproti současnému provozu). Pozornost bude věnována změnám napěťových poměrů v rozvodnách 110 kV, změnám proudového zatížení transformátorů (400/110 kV a 110/VN kV) a vedení 110 kV. V další části se budeme věnovat změnám zkratových poměrů v DS 110 kV po zavedení můstkového zapojení.

7.1.1 Ustálený chod sítě DS 110 kV UO Čebín

Zhodnocení výsledků bude provedeno pro oblasti, které jsou napájeny z R 110 kV CNT pomocí přípojníc A a C. Přípojnice B zůstává v současném provozu, můstkového zapojení se neúčastní, a věnovat se jí nebudeme.

- **Napěťové poměry v DS 110 kV**

Tabulka Tab. 7-1 obsahuje zhodnocení vypočítaných hodnot napětí v rozvodnách 110 kV při současném provozu a můstkovém zapojení. Velikost napětí na přípojnicích A a C v R 110 kV CNT je při můstkovém zapojení rovna $U_R = 116,7$ kV. Příčné spojení přípojníc, při můstkovém zapojení, má za následek změnu napěťových poměrů na obou přípojnicích v R 110 kV CNT, oproti současnému provozu. Na přípojnici A dojde, při můstkovém zapojení, k poklesu napětí o $\Delta U_R = -0,43$ % a dále se tato změna napětí projeví i ve všech uzlech, které náleží (při současném provozu) přípojnici A.

Tab. 7-1 Přehled napěťových poměrů v rozvodnách 110 kV

	Současný provoz	Můstkové zapojení	Současný provoz x můstkové zapojení	
Rozvodna	U_R		ΔU_R	
Označení	kV		kV	%
BK	115,6	116,2	0,6	0,52
BK-D	115,6	116,2	0,6	0,52
BO	115,2	115,8	0,6	0,52
BYP	115,9	116,5	0,6	0,52
CNT - A	117,2	116,7	-0,5	-0,43
CNT - C	116,1	116,7	0,6	0,52
NAO	116,0	115,5	-0,5	-0,43
OS	116,2	115,6	-0,6	-0,52
PTA	116,0	115,5	-0,5	-0,43
RIP	116,0	115,5	-0,5	-0,43
RON	116,0	116,6	0,6	0,52
VBT	116,6	116,1	-0,5	-0,43
VMZ	115,8	115,3	-0,5	-0,43
VOP	115,3	115,9	0,6	0,52

Naopak na přípojnici C dojde při můstkovém zapojení k nárůstu napětí o $\Delta U_R = 0,52 \%$. Tato změna se opět projeví i ve všech uzlech, které náleží (při současném provozu) přípojnici C.

Z přehledu napěťových poměrů v uzlech v Tab. 7-1 je zřejmé, že při můstkovém zapojení jsou napětí ve všech uzlech v dovolených mezích (dovolená mez 99 kV - 121 kV). **Z hlediska napěťových poměrů je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující.**

- **Transformátory 400/110 kV**

Tabulka Tab. 7-2 obsahuje zhodnocení vypočítaného proudového zatížení transformátorů 400/110 kV při současném provozu a můstkovém zapojení. Příčné spojení přípojníc v R 110 kV CNT, při můstkovém zapojení, má za následek zvýšení proudového zatížení transformátoru T401 ($S_n = 350$ MVA) o $\Delta I_{zt} = 0,52 \%$. Můstkové zapojení také způsobí zvýšení proudového zatížení transformátoru T403 ($S_n = 250$ MVA), a to o $\Delta I_{zt} = 0,24 \%$.

Tab. 7-2 Přehled zatížení transformátorů 400/110 kV

		Současný provoz	Můstkové zapojení	Současný provoz x můstkové zapojení
Typ		I_{zt}		ΔI_{zt}
-		%		%
CNT - A	T401	32,35	32,87	0,52
CNT - C	T403	34,60	34,83	0,24

Transformátory T401 a T403 nejsou shodné (výkonově, napětím nakrátko), a proto se na nich výkon nerozloží rovnoměrně. Větší část výkonu do DS 110 kV UO Čebín bude, při můstkovém zapojení, dodávat jmenovitým výkonem větší transformátor T401 ($P_{dodt} = 118,5$ MW a $Q_{dodt} = 29,4$ MVar). Transformátor T403 dodává při můstkovém zapojení $P_{dodt} = 92,1$ MW a $Q_{dodt} = -8,8$ MVar. Ztráty v transformátoru T401 při můstkovém zapojení vzrostou o $\Delta P_t = 0,001$ MW, v T403 zůstávají ztráty stejné.

Z přehledu proudového zatížení transformátorů 400/110 kV v Tab. 7-2 je zřejmé, že při můstkovém zapojení není žádný transformátor přetížen. **Z hlediska proudového zatížení transformátorů 400/110 kV je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující.**

- **Transformátory 110/VN kV**

Tabulka Tab. 7-3 obsahuje zhodnocení vypočítaného proudového zatížení distribučních transformátorů 110/VN kV při současném provozu a při můstkovém zapojení.

Při můstkovém zapojení dojde ke změnám napěťových poměrů v DS 110 kV. Změny napětí v uzlech mají za následek změny proudového zatížení transformátorů 110/VN kV. V uzlech, ve kterých se velikost napětí zvýší ($\Delta U_R = 0,52 \%$), dojde k poklesu proudového zatížení transformátorů 110/VN kV. Největší pokles zatížení je na transformátoru T102 v R 110 kV BK ($\Delta I_{zt} = -0,33 \%$). V uzlech, ve kterých se velikost napětí sníží ($\Delta U_R = -0,43 \%$), dojde ke zvýšení proudového zatížení transformátorů 110/VN kV. Tato změna je největší na transformátoru T102 v R 110 kV CNT - A ($\Delta I_{zt} = 0,24 \%$). Změny proudového zatížení transformátorů jsou však pouze v desetinách procenta, a proto při můstkovém zapojení, stejně jako při současném provozu, nedojde k přetížení žádného transformátoru 110/VN kV v DS 110 kV UO Čebín. **Z hlediska proudového zatížení transformátorů 110/VN kV je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující.**

Tab. 7-3 Přehled zatížení transformátorů 110/VN kV

		Současný provoz	Můstkové zapojení	Současný provoz x můstkové zapojení
Typ		I_{zt}		ΔI_{zt}
-		%		%
BK	T101	12,29	12,21	-0,08
	T102	59,81	59,48	-0,33
BK-D	T1	11,14	11,14	0,00
	T2	11,14	11,14	0,00
BO	T101	53,82	53,51	-0,31
	T102	30,62	30,43	-0,19
BYP	T102	39,57	39,33	-0,24
CNT - C	T101	35,05	35,24	0,19
CNT - A	T102	51,67	51,90	0,24
	T1	20,86	21,00	0,14
	T2	20,86	21,00	0,14
NAO	T101	16,18	16,26	0,08
OS	T101	38,70	38,85	0,15
	T102	35,67	35,86	0,19
	T103	23,43	23,57	0,14
PTA	T102	28,48	28,62	0,14
RON	T101	18,52	18,43	-0,10
	T102	4,67	4,62	-0,05
VBT	T101	27,57	27,71	0,14
VMZ	T101	20,67	20,76	0,10
	T102	51,68	51,91	0,23
VOP	T101	38,24	38,02	-0,23

• Vedení 110 kV

Tabulka Tab. 7-4 obsahuje zhodnocení vypočítaného proudového zatížení vedení 110 kV při současném provozu a můstkovém zapojení.

Změny napěťových poměrů v uzlech mají za následek změnu proudového zatížení vedení 110 kV. Změna proudového zatížení není, stejně jako v případě transformátorů 110/VN kV, velká (přibližně v desetinách procenta). K největší změně proudového zatížení vedení 110 kV dojde na vedení V5538 ($\Delta I_{odbv} = 0,33 \%$).

Stejně jako při současném provozu, nedojde při můstkovém zapojení k proudovému přetížení žádného vedení 110 kV v DS 110 kV UO Čebín.

Dále je patrné, že vedení 110 kV jsou poměrně málo zatížená. Nejvíce zatížená vedení 110 kV jsou V505 a V506 (shodně $I_{odbv} = 24,13 \%$).

Z přehledu procentuálních hodnot proudového zatížení vedení 110 kV v Tab. 7-4 vyplývá, že vedení 110 kV jsou dimenzovaná na daleko větší proudová zatížení, než která jsou při současném provozu či při navrhovaném můstkovém zapojení. Proto je provoz při můstkovém zapojení z hlediska **proudového zatížení vedení 110 kV vyhovující** a současně je pro vedení 110 kV splněno i bezpečnostní kritérium $n - 1$.

Tab. 7-4 Přehled zatížení vedení 110 kV

	Současný provoz	Můstkové zapojení	Současný provoz x můstkové zapojení
Vedení	I_{odbv}		ΔI_{dodv}
-	%		%
V502 (1)	6,18	6,29	0,11
V502 (2)	1,53	1,56	0,02
V502 (3)	4,71	4,73	0,02
V503	3,71	3,73	0,02
V505	24,02	24,13	0,11
V506	24,02	24,13	0,11
V507	9,00	8,96	-0,04
V508	9,00	8,96	-0,04
V516	3,18	3,18	0,00
V523	20,69	20,58	-0,11
V524	20,69	20,58	-0,11
V525	7,62	7,56	-0,07
V526	13,52	13,45	-0,07
V5525	2,91	2,93	0,02
V5526	1,76	1,73	-0,02
V5527	1,76	1,73	-0,02
V5533	22,89	23,00	0,11
V5534	21,91	22,00	0,09
V5537	7,65	7,62	-0,04
V5538	1,40	1,73	0,33
V5539	10,42	10,49	0,07
V5593	2,75	2,75	0,00
V5597	19,89	19,78	-0,11

7.1.2 Zkratové poměry DS 110 kV UO Čebín

Tabulka Tab. 7-5 obsahuje zhodnocení výpočtů zkratových poměrů v uzlech při třífázovém zkratu pro současný provoz a můstkové zapojení. Dále je provedeno procentuální zhodnocení změn počátečního rázového zkratového výkonu a proudu při třífázovém zkratu.

Tab. 7-5 Přehled zkratových poměrů při třífázovém zkratu

		Současný provoz		Můstkové zapojení		Současný provoz x můstkové zapojení	
Označení	Odolnost	$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$\Delta ^{(3)}S_k''$	$\Delta ^{(3)}I_k''$
-	MVA	MVA	kA	MVA	kA	%	%
BK	3500	1562,9	8,203	2165,2	11,364	38,5	38,5
BK-D	3500	1547,7	8,123	2135,8	11,210	38,0	38,0
BO	3500	1223	6,419	1558,9	8,182	27,5	27,5
BYP	3500	1325,1	6,955	1732,3	9,092	30,7	30,7
CNT-A	5000	2233	11,720	3885,6	20,394	74,0	74,0
CNT-C	5000	2285,9	11,998	3885,6	20,394	70,0	70,0
NAO	3500	854,5	4,485	1013,8	5,321	18,6	18,6
OS	3500	1274,8	6,691	1672,5	8,779	31,2	31,2
PTA	3500	926,5	4,863	1119,5	5,876	20,8	20,8
RIP	3500	1026,4	5,387	1268,8	6,660	23,6	23,6
RON	3500	1204,4	6,322	1531,8	8,040	27,2	27,2
VBT	3500	1097,5	5,760	1381,3	7,250	25,9	25,9
VMZ	3500	900,7	4,728	1082,2	5,680	20,2	20,1
VOP	3500	1045,1	5,485	1281,4	6,726	22,6	22,6

Z přehledu vypočítaných hodnot zkratových poměrů v Tab.7-5 je patrné, že při můstkovém zapojení, vlivem paralelního provozu transformátorů 400/110 kV v R 110 kV CNT, dojde k značnému zvýšení počátečního rázového zkratového výkonu a proudu ve všech uzlech. Největší zvýšení, při třífázovém zkratu, nastane v R 110 kV CNT na přípojnici A ($\Delta^{(3)}S_k'' = 74\%$, $\Delta^{(3)}I_k'' = 74\%$). Z Tab. 7-5 je patrné, že výkonové vypínače ve všech rozvodnách 110 kV v DS 110 kV UO Čebín v můstkovém zapojení, při třífázovém zkratu, z hlediska zkratové odolnosti vyhovují.

Tabulka Tab. 7-6 obsahuje zhodnocení výpočtů zkratových poměrů v uzlech při jednofázovém zkratu pro současný provoz a můstkové zapojení. Dále je provedeno procentuální zhodnocení změn počátečního rázového zkratového výkonu a proudu při jednofázovém zkratu.

Tab. 7-6 Přehled zkratových poměrů při jednofázovém zkratu

Označení	Odolnost	Současný provoz		Můstkové zapojení		Současný provoz x můstkové zapojení	
		$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$\Delta^{(1)}S_k''$	$\Delta^{(1)}I_k''$
-	MVA	MVA	kA	MVA	kA	%	%
BK	3500	2262,5	11,88	3095,4	16,25	36,8	36,8
BK-D	3500	2215,7	11,63	3008	15,79	35,8	35,8
BO	3500	1261,6	6,62	1496,9	7,86	18,7	18,7
BYP	3500	1875,2	9,84	2412,5	12,66	28,7	28,7
CNT-A	5000	2039,4	10,70	4104,7	21,54	101,3	101,3
CNT-C	5000	2506,9	13,16	4104,7	21,54	63,7	63,7
NAO	3500	778,8	4,09	874,2	4,59	12,2	12,2
OS	3500	1315,7	6,91	1654,7	8,68	25,8	25,6
PTA	3500	889,5	4,67	1018,9	5,35	14,5	14,6
RIP	3500	988,1	5,19	1151,2	6,04	16,5	16,4
RON	3500	1288,3	6,76	1527,8	8,02	18,6	18,6
VBT	3500	896,8	4,71	1079,1	5,66	20,3	20,2
VMZ	3500	890,3	4,67	1019,6	5,35	14,5	14,6
VOP	3500	984,3	5,17	1125,4	5,91	14,3	14,3

Z přehledu vypočítaných hodnot zkratových poměrů v Tab. 7-6 je patrné, že i při jednofázovém zkratu dojde k značnému zvýšení počátečního rázového zkratového výkonu a proudu v uzlech DS 110 kV. K největšímu nárůstu dojde, při jednofázovém zkratu, v rozvodně 110 kV CNT na přípojnici A ($\Delta^{(1)}S_k'' = 101,3\%$, $\Delta^{(1)}I_k'' = 101,3\%$). Z Tab. 7-6 je patrné, že výkonové vypínače ve všech rozvodnách 110 kV v DS 110 kV UO Čebín v můstkovém zapojení, při jednofázovém zkratu, z hlediska zkratové odolnosti vyhovují.

7.2 Vyhodnocení můstkového zapojení při zvláštních provozních stavech

Můstkové zapojení musí být také prověřeno, zda-li vyhovuje i při poruchových stavech. Za nejméně příznivý stav považujeme výpadek přípojnice A v R 110 kV CNT (tím i transformátoru T401) - viz Obr. 6-2. Dalším analyzovaným provozním stavem je zvýšené zatížení můstkového zapojení (viz Obr. 6-3). Toto zvýšené zatížení spočívá v připojení rozveden MZR, OVD, SL a ZDA, a transformátoru T102 v rozvodně RIP k DS 110 kV UO Čebín. Tento provozní stav je také překontrolován pro případ, kdy jsou odpojeny vedení V506 a V507.

Pro snazší orientaci, při vyhodnocení jednotlivých stavů, jsou v tabulkách zavedeny tato označení jednotlivých stavů:

- Můstkové zapojení = Stav A
- Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A = Stav B
- Můstkové zapojení - zvýšené zatížení = Stav C
- Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507) = Stav D

Tučně označené hodnoty v následujících tabulkách znamenají, že je o nich v textu pojednáváno.

• Napětové poměry v DS 110 kV

Tab. 7-7 obsahuje zhodnocení vypočítaných hodnot napětí v uzlech DS, při zvláštních provozních stavech můstkového zapojení. Zhodnocení je provedeno i graficky na Obr. 7-1.

Tab. 7-7 Přehled napětových poměrů při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech

	Můstkové zapojení	Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507)	Stav A x Stav B		Stav A x Stav C		Stav C x Stav D	
	Stav A	Stav B	Stav C	Stav D						
Rozvodna	U _R				ΔU _R					
Označení	kV				kV	%	kV	%	kV	%
BK	116,2	113,2	115,7	115,7	-3,0	-2,58	-0,5	-0,43	0,0	0,00
BK-D	116,2	113,2	115,7	115,7	-3,0	-2,58	-0,5	-0,43	0,0	0,00
BO	115,8	112,3	115,3	115,3	-3,5	-3,02	-0,5	-0,43	0,0	0,00
BYP	116,5	113,9	115,3	114,8	-2,6	-2,23	-1,2	-1,03	-0,5	-0,43
CNT - A	116,7	-	116,2	116,2	-	-	-0,5	-0,43	0,0	0,00
CNT - C	116,7	114,4	116,2	116,2	-2,3	-1,97	-0,5	-0,43	0,0	0,00
MZR	-	-	113,8	113,2	-	-	-	-	-0,6	-0,53
NAO	115,5	111,5	114,4	113,6	-4,0	-3,46	-1,1	-0,95	-0,8	-0,70
OS	115,6	111,7	114,8	113,8	-3,9	-3,37	-0,8	-0,69	-1,0	-0,87
OVD	-	-	113,7	113,2	-	-	-	-	-0,5	-0,44
PTA	115,5	111,0	114,2	113,7	-4,5	-3,90	-1,3	-1,13	-0,5	-0,44
RIP	115,5	111,3	114,2	113,6	-4,2	-3,64	-1,3	-1,13	-0,6	-0,53
RON	116,6	113,9	115,6	115,1	-2,7	-2,32	-1,0	-0,86	-0,5	-0,43
SL	-	-	113,8	113,3	-	-	-	-	-0,5	-0,44
VBT	116,1	110,1	115,3	115,1	-6,0	-5,17	-0,8	-0,69	-0,2	-0,17
VMZ	115,3	111,7	114,3	113,9	-3,6	-3,12	-1,0	-0,87	-0,4	-0,35
VOP	115,9	112,7	115,4	115,4	-3,2	-2,76	-0,5	-0,43	0,0	0,00
ZDA	-	-	113,7	113,2	-	-	-	-	-0,5	-0,44

- Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A:

Porovnání je provedeno vůči základnímu stavu můstkového zapojení (první sloupec v Tab. 7-7, Stav A). Při výpadku přípojnice A v R 110 kV CNT dojde k poklesu napětí ve všech uzlech DS 110 kV. Největší pokles napětí nastane v uzlu (rozvodně) VBT, a to o $\Delta U_R = -5,17$ %.

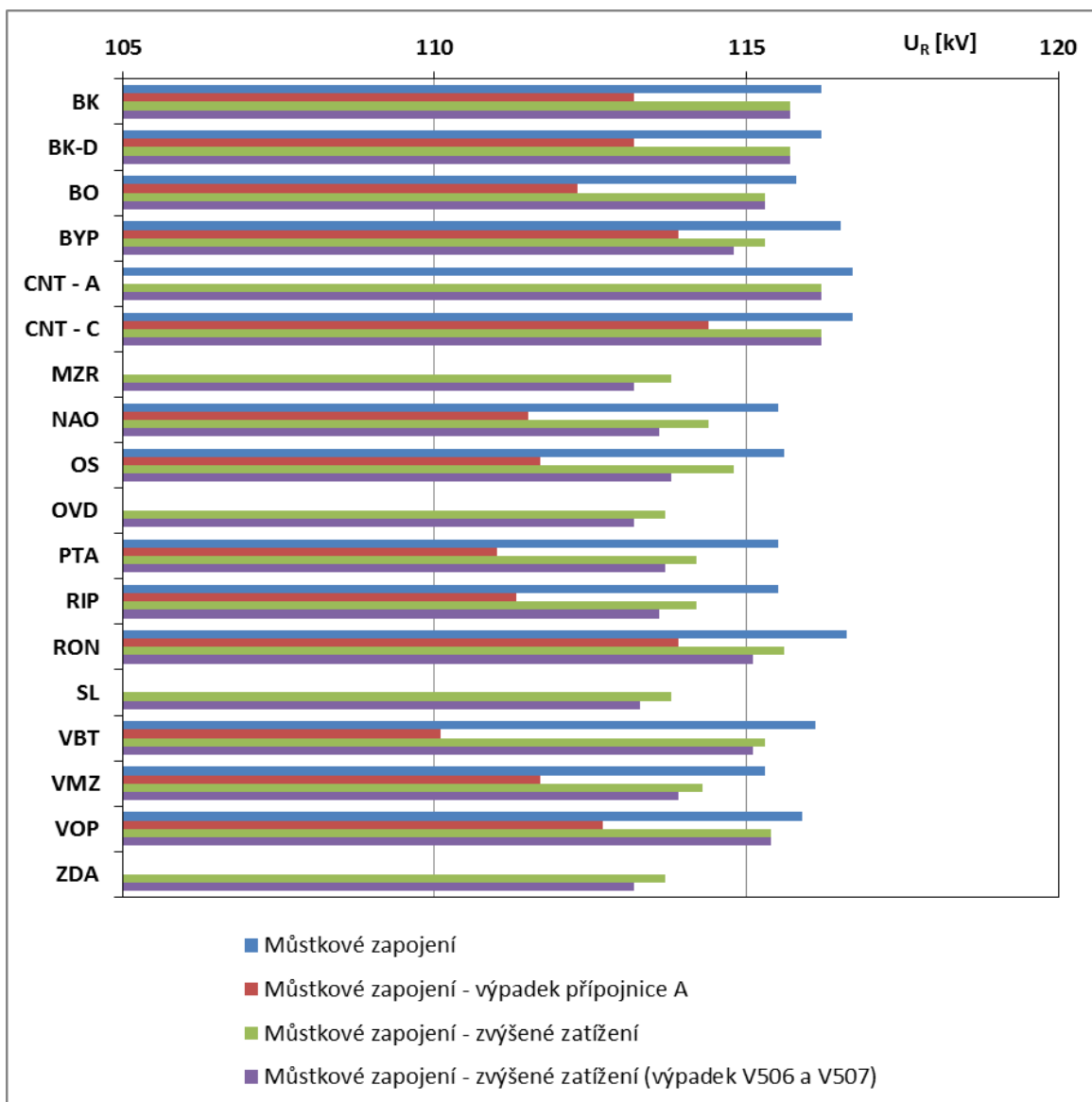
- **Můstkové zapojení - zvýšené zatížení:**

Porovnání je provedeno vůči základnímu stavu můstkového zapojení (první sloupec v Tab. 7-7, Stav A). Při zvýšeném odběru dojde k poklesu napětí ve všech uzlech DS 110 kV (oproti základním můstkovém zapojení). Největší pokles nastane v uzlech (rozvodnách) RIP a PTA, a to o $\Delta U_R = -1,13 \%$.

- **Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507):**

Porovnání je provedeno vůči můstkovému zapojení – zvýšené zatížení (třetí sloupec v Tab. 7-7, Stav C). Při zvýšeném odběru a výpadku vedení V506 a V507 dojde k poklesu napětí ve většině uzlů v DS 110 kV. Největší pokles nastane v uzlech (rozvodnách) RIP a PTA, $\Delta U_R = -0,87 \%$.

Velikost napětí neklesne v žádném uzlu, při jednom ze zvláštních provozních stavů, pod limitní úroveň a tím je velikosti napětí v dovolené toleranci $\pm 10\%$ (99 kV - 121 kV) od jmenovité hodnoty 110 kV. **Z hlediska napěťových poměrů je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující.**



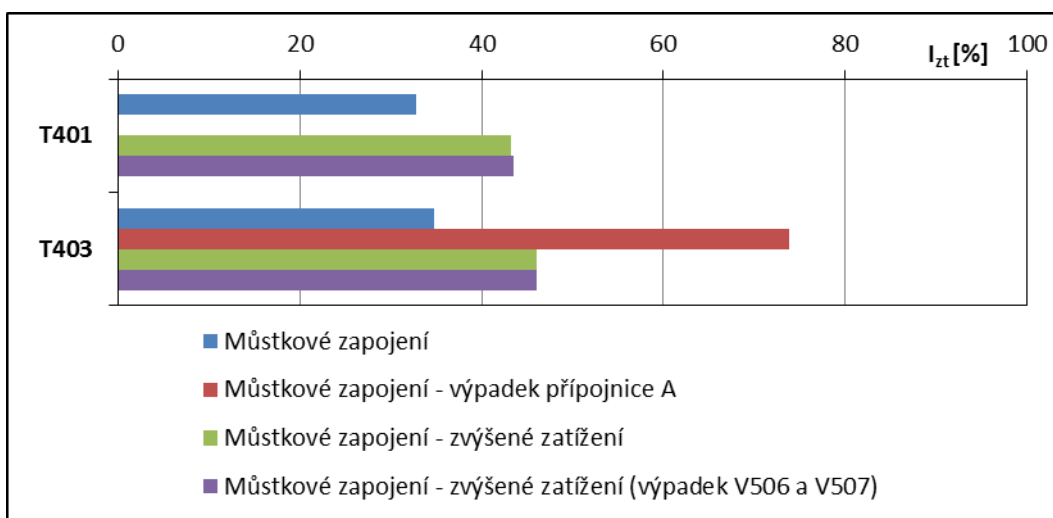
Obr. 7-1 Grafický přehled napěťových poměrů při můstkovém zapojení

• Transformátory 400/110 kV

Tabulka Tab. 7-8 obsahuje zhodnocení vypočítaného proudového zatížení transformátorů 400/110 kV při zvláštních provozních stavech můstkového zapojení. Zhodnocení proudového zatížení transformátorů je provedeno i graficky v Obr. 7-2.

Tab. 7-8 Přehled zatížení transformátorů 400/110 kV při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech

	Můstkové zapojení		Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507)	Stav A x Stav B	Stav A x Stav C	Stav C x Stav D
	Stav A	Stav B	Stav C	Stav D				
Typ	I _{zt}					ΔI _{zt}		
-	%					%		
T401	32,87	-	43,28	43,46		-	10,41	0,19
T403	34,83	73,77	45,98	46,11		38,94	11,15	0,12



Obr. 7-2 Grafický přehled zatížení transformátorů 400/110 kV při můstkovém zapojení

- Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A:

Porovnání je provedeno vůči základnímu stavu můstkového zapojení (první sloupec v Tab. 7-8, Stav A). Při výpadku přípojnice A v R 110 kV CNT dojde k odpojení T401 a veškeré zatížení převezme T403. Při tomto provozním stavu je T403 zatížen na $I_{zt} = 73,77 \%$.

- Můstkové zapojení - zvýšené zatížení:

Porovnání je provedeno vůči základnímu stavu můstkového zapojení (první sloupec v Tab. 7-8, Stav A). Při zvýšeném odběru dojde ke zvýšení proudového zatížení transformátorů 400/110 kV, na T401 se zatížení zvýší o $\Delta I_{zt} = 10,41 \%$ a na T403 se zatížení zvýší o $\Delta I_{zt} = 11,15 \%$. Vzhledem k tomu, že celkový odebíraný výkon je nyní $S_{celk} = 277,2 \text{ MVA}$, tak toto zapojení **nemůže** být provozováno v případě výpadku transformátoru T401, protože by došlo k přetížení transformátoru T403.

- **Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507):**

Porovnání je provedeno vůči stavu můstkové zapojení – zvýšené zatížení (třetí sloupec v Tab. 7-8, Stav C). Při zvýšeném odběru a výpadku vedení V506 a V507 dojde ke zvýšení proudového zatížení transformátorů 400/110 kV z důvodu pokrytí vyšších ztrát v DS 110 kV UO Čebín. Toto zvýšení je však pouze v desetinách procenta, pro T401 je $\Delta I_{zt} = 0,19 \%$ a pro T403 je $\Delta I_{zt} = 0,12 \%$.

Proudové zatížení transformátorů 400/110 kV, při ani jednom ze zvláštních provozních stavů, nepřekročuje jmenovitou hodnotu proudového zatížení. **Z hlediska proudového zatížení transformátorů 400/110 kV je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující.**

• **Transformátory 110/VN kV**

Tabulka Tab. 7-9 obsahuje zhodnocení vypočítaného proudového zatížení transformátorů 110/ kV při zvláštních provozních stavech můstkového zapojení.

Při zvláštních provozních stavech můstkového zapojení dojde ke změnám napěťových poměrů v DS 110 kV (napětí poklesnou). Změny napětí v uzlech mají za následek změny proudového zatížení transformátorů 110/VN kV. Změny proudového zatížení jsou však při všech zvláštních provozních stavech minimální, a proto jim není potřeba věnovat zvláštní pozornost.

Tab. 7-9 Přehled zatížení transformátorů 110/VN kV při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech

		Můstkové zapojení	Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507)	Stav A x Stav B	Stav A x Stav C	Stav C x Stav D
		Stav A	Stav B	Stav C	Stav D			
Typ		I_{zt}				ΔI_{zt}		
-		%				%		
BK	T101	12,21	12,52	12,29	12,29	0,31	0,08	0,00
	T102	59,48	61,14	59,76	59,76	1,67	0,29	0,00
BK-D	T1	11,14	11,43	11,14	11,14	0,29	0,00	0,00
	T2	11,14	11,43	11,14	11,14	0,29	0,00	0,00
BO	T101	53,51	55,27	53,74	53,82	1,76	0,23	0,08
	T102	30,43	31,38	30,57	30,57	0,95	0,14	0,00
BYP	T102	39,33	40,24	39,76	39,95	0,90	0,43	0,19
CNT - A	T102	51,90	-	52,14	52,14	-	0,24	0,00
	T1	21,00	-	21,00	21,00	-	0,00	0,00
	T2	21,00	-	21,00	21,00	-	0,00	0,00
CNT - C	T101	35,24	35,95	35,38	35,38	0,71	0,14	0,00
MZR	T101	-	-	33,10	33,24	-	-	0,14
	T102	-	-	31,67	31,81	-	-	0,14
NAO	T101	16,26	16,79	16,41	16,49	0,53	0,15	0,08
OS	T101	38,85	40,23	39,16	39,47	1,37	0,31	0,31
	T102	35,86	37,14	36,10	36,43	1,29	0,24	0,33
	T103	23,57	24,38	23,71	23,90	0,81	0,14	0,19
OVD	T2	-	-	25,14	25,14	-	-	0,00
PTA	T102	28,62	29,76	28,90	29,05	1,14	0,29	0,14
RIP	T102	-	-	56,19	56,48	-	-	0,29
RON	T101	18,43	18,86	18,57	18,67	0,43	0,14	0,10
	T102	4,62	4,76	4,67	4,71	0,14	0,05	0,05

SL	T102	-	-	14,62	14,62	-	-	0,00
VB	T101	27,71	29,24	27,90	27,95	1,52	0,19	0,05
VMZ	T101	20,76	21,43	20,95	21,00	0,67	0,19	0,05
	T102	51,91	53,66	52,44	52,60	1,76	0,53	0,15
VOP	T101	38,02	39,08	38,17	38,17	1,07	0,15	0,00
ZDA	T101	-	-	34,05	34,20	-	-	0,15
	T102	-	-	11,68	11,76	-	-	0,08

Proudové zatížení transformátorů 110/VN kV, při ani jednom ze zvláštních provozních stavů, nepřekročí jmenovitou hodnotu proudového zatížení. **Z hlediska proudového zatížení transformátorů 110/VN kV je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující.**

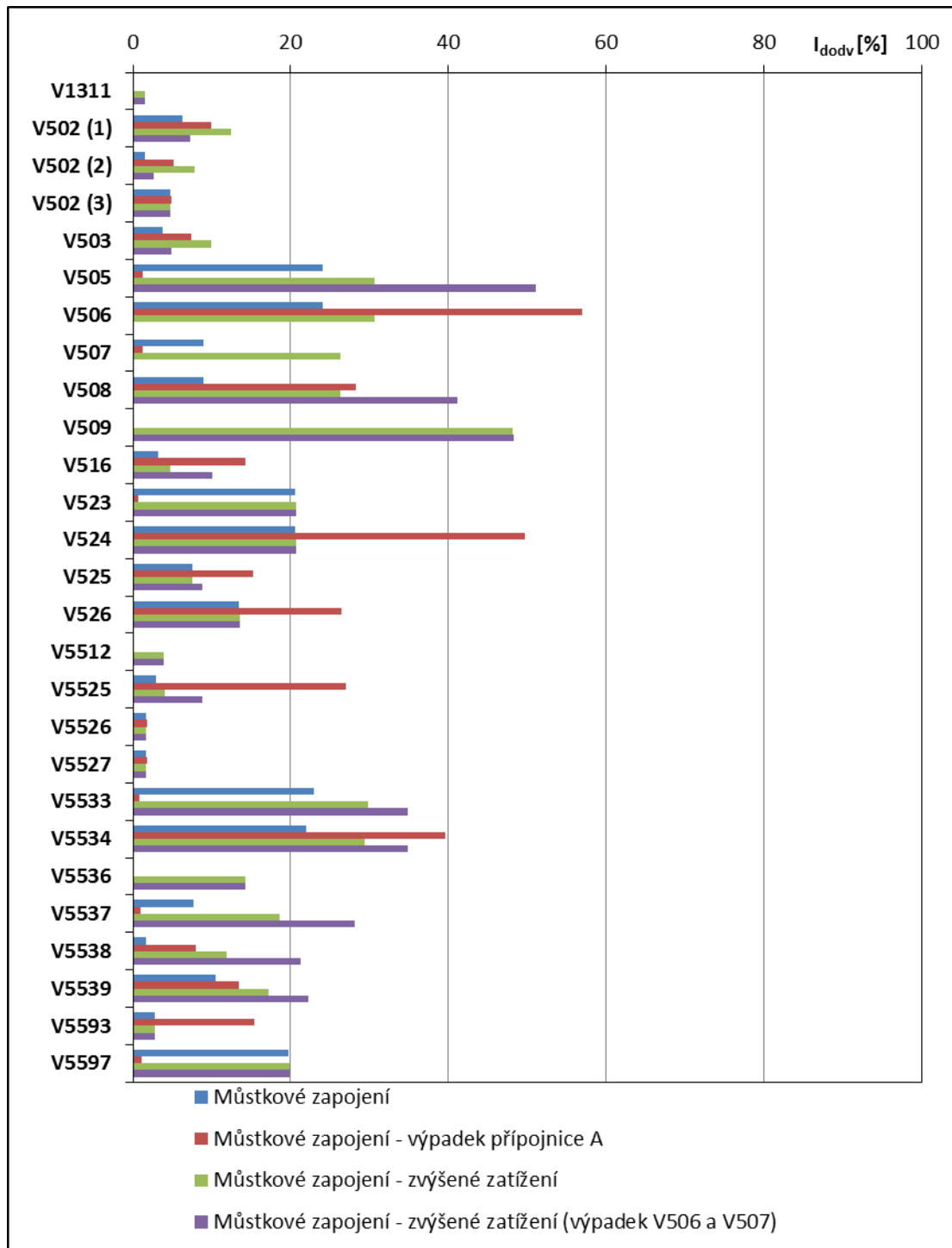
• Vedení 110 kV

Tabulka Tab. 7-10 obsahuje zhodnocení vypočítaného proudového zatížení vedení 110 kV při zvláštních provozních stavech můstkového zapojení. Zhodnocení proudového zatížení vedení 110 kV je provedeno i graficky v Obr. 7-3. Vedení V1309 a V1310 při zhodnocení nebudeme uvažovat. Červenou barvou jsou označena vypnutá vedení.

Tab. 7-10 Přehled zatížení vedení 110 kV při můstkovém zapojení a při zvláštních provozních stavech

	Můstkové zapojení	Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení	Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507)	Stav A x Stav B	Stav A x Stav C	Stav C x Stav D
	Stav A	Stav B	Stav C	Stav D			
Rozvodna	I _{odbv}				ΔI _{dodv}		
-	%				%		
V1311	-	-	1,55	1,55	-	-	0,00
V502 (1)	6,29	9,98	12,42	7,33	3,69	6,13	-5,09
V502 (2)	1,56	5,18	7,78	2,64	3,62	6,22	-5,13
V502 (3)	4,73	4,89	4,78	4,80	0,16	0,04	0,02
V503	3,73	7,44	9,98	4,84	3,71	6,24	-5,13
V505	24,13	1,18	30,60	51,02	-22,95	6,47	20,42
V506	24,13	57,02	30,60	-	32,89	6,47	-
V507	8,96	1,22	26,24	-	-7,74	17,29	-
V508	8,96	28,20	26,24	41,16	19,24	17,29	14,91
V509	-	-	48,11	48,33	-	-	0,22
V516	3,18	14,29	4,69	10,09	11,11	1,51	5,40
V523	20,58	0,62	20,67	20,67	-19,96	0,09	0,00
V524	20,58	49,69	20,67	20,67	29,11	0,09	0,00
V525	7,56	15,24	7,60	8,87	7,69	0,04	1,27
V526	13,45	26,51	13,52	13,52	13,05	0,07	0,00
V5512	-	-	3,91	3,91	-	-	0,00
V5525	2,93	26,98	4,04	8,87	24,04	1,11	4,82
V5526	1,73	1,78	1,73	1,73	0,04	0,00	0,00
V5527	1,73	1,78	1,73	1,73	0,04	0,00	0,00
V5533	23,00	0,78	29,80	34,87	-22,22	6,80	5,07
V5534	22,00	39,60	29,40	34,91	17,60	7,40	5,51

V5536	-	-	14,22	14,29	-	-	0,07
V5537	7,62	0,98	18,62	28,18	-6,64	11,00	9,56
V5538	1,73	7,96	11,87	21,22	6,24	10,15	9,35
V5539	10,49	13,42	17,20	22,24	2,93	6,71	5,04
V5593	2,75	15,41	2,75	2,75	12,66	0,00	0,00
V5597	19,78	1,16	19,87	19,87	-18,62	0,09	0,00



Obr. 7-3 Grafický přehled zatížení vedení 110 kV při můstkovém zapojení

- Můstkové zapojení - výpadek přípojnice A:

Porovnání je provedeno vůči základnímu stavu můstkového zapojení (první sloupec v Tab. 7-10, Stav A). Při výpadku přípojnice A v R 110 kV CNT je DS 110 kV UO Čebín zásobována pouze z přípojnice C. Pro vedení V506 to znamená nárůst proudového zatížení o $\Delta I_{\text{odbv}} = 32,89 \%$, nyní je tedy zatíženo na $I_{\text{odbv}} = 57,02 \%$, a tím je nevíce zatíženým vedením 110 kV v DS 110 kV UO Čebín. Na vedení 110 kV V524 dojde k nárůstu $\Delta I_{\text{odbv}} = 29,11 \%$ a nyní je vedení zatíženo $I_{\text{odbv}} = 49,69 \%$. Dále dojde k nárůstu proudového zatížení vedení V5525 o $\Delta I_{\text{odbv}} = 24,04 \%$ a nyní je zatíženo $I_{\text{odbv}} = 26,98 \%$. Další více zatížené vedení je V5534 ($I_{\text{odbv}} = 39,60 \%$).

- Můstkové zapojení - zvýšené zatížení:

Porovnání je provedeno vůči základnímu stavu můstkového zapojení (první sloupec v Tab. 7-10, Stav A). Při zvýšeném zatížení dojde k nárůstu proudového zatížení na většině vedení 110 kV. Největší změna proudového zatížení nastane na vedeních V507 a V508 a to shodně o $\Delta I_{\text{odbv}} = 17,29 \%$. Nejvíce zatížené vedení 110 kV je V509 ($I_{\text{odbv}} = 48,11 \%$), které zásobuje nově připojené rozvodny - MZR, OVD, SL a ZDA.

- Můstkové zapojení - zvýšené zatížení (výpadek V506 a V507):

Porovnání je provedeno vůči stavu můstkové zapojení – zvýšené zatížení (třetí sloupec v Tab. 7-10, Stav C). Při zvýšeném odběru a výpadku vedení V506 a V507 dojde k nárůstu zatížení vedení 110 kV V505 a V508, které jsou vedeny souběžně s odpojenými vedeními V506 a V507. Proudové zatížení vedení V505 vzroste o $\Delta I_{\text{odbv}} = 20,42 \%$ a nyní je zatíženo na $I_{\text{odbv}} = 51,02 \%$. Proudové zatížení vedení V508 vzroste o $\Delta I_{\text{odbv}} = 14,91 \%$ a nyní je zatíženo na $I_{\text{odbv}} = 41,16 \%$. Vedení 110 kV V509 je zatíženo na $I_{\text{odbv}} = 48,33 \%$.

Ani při jednom ze zvláštních provozních stavů vypočítaná proudová zatížení vedení 110 kV nepřekročí jmenovitou hodnotu proudového zatížení. **Z hlediska proudového zatížení vedení 110 kV je tedy provoz můstkového zapojení vyhovující** a současně je pro vedení 110 kV splněno i bezpečnostní kritérium n-1.

7.3 Vyhodnocení ztrát činného výkonu v DS 110 kV UO Čebín

Tab. 7-11 obsahuje vypočítané hodnoty ztrát činného výkonu pro současný provoz a můstkové zapojení v DS 110 kV UO Čebín. Při výpočtu ztrát v DS 110 kV UO Čebín nejsou uvažovány transformátory : BK – D (T101, T102), CNT (T1, T2), RON (T101, T102), ZET (T101), OVD (T2), SL (T102) a ZDA (T101, T102). Tyto transformátory nespádají pod správu společnosti E.ON a jsou označovány jako “cizí transformátory”.

Symbyly obsažené v Tab. 7-11 značí:

$\sum P_{\text{dod}}$	celkový činný výkon dodávaný do DS 110 kV (strana 110 kV),
$\sum P_{\text{odb}}$	celkový činný výkon odebíraný z DS 110 kV (strana 110 kV),
$\sum \Delta P_v$	celkové ztráty činného výkonu na vedeních 110 kV,
$\sum \Delta P_{t,110}$	celkové ztráty činného výkonu v transformátorech 110/VN kV,
$\sum \Delta P_c$	celkové ztráty činného výkonu v DS 110 kV.

Celkové ztráty v DS 110 kV UO Čebín jsou uvažovány pro všechny transformátory (110/VN kV - mimo “cizích transformátorů”) a vedení 110 kV.

Tab. 7-11 Přehled ztrát v DS 110 kV UO Čebín

		Současný provoz (T401 a T403)	Můstkové zapojení
ΣP_{dod}	MW	210,6	
ΣP_{odb}	MW	209,5	
$\Sigma \Delta P_v$	MW	0,927	0,936
	%	0,440	0,444
$\Sigma \Delta P_{t,110 \text{ kV}}$	MW	0,786	0,782
	%	0,375	0,373
$\Sigma \Delta P_c$	MW	1,713	1,718
	%	0,813	0,816

Z přehledu vypočítaných ztrát v DS 110 kV uvedených v Tab. 7-11 je zřejmé, že při můstkovém zapojení dojde, oproti současnému provozu, k nárůstu ztrát na vedeních 110 kV o $\Sigma \Delta P_{\text{odv}} = 0,009$ MW. Na transformátorech 110/VN kV dojde k poklesu ztrát o $\Sigma \Delta P_{t,110} = -0,004$ MW. Nárůst celkových ztrát v DS 110 kV je $\Sigma \Delta P_c = 0,005$ MW.

8 NÁVRH PROVOZNÍCH OPATŘENÍ

Z hlediska řešení ustáleného chodu DS 110 kV vyplývá, že hodnoty napětí v uzlech (rozvodnách) DS 110 kV UO Čebín jsou ve všech analyzovaných provozních stavech v dovolených mezích, transformátory (400/110 kV a 110/VN kV), vedení 110 kV a spínač přípojníc nejsou přetíženy. Tím tedy všechna zkoumaná zařízení (transformátory 400/110 kV, 110/VN kV, vedení 110 kV a spínač přípojníc) DS 110 kV UO Čebín **vyhovují** provozu v můstkovém zapojení. Současně je pro vedení 110 kV splněno i bezpečnostní kritérium $n - 1$.

Můstkové zapojení s transformátorem T403 vyhovuje bezpečnému a spolehlivému provozu, ovšem vzhledem k tomu, že při provozu transformátoru T403 v můstkovém zapojení dojde oproti současnému provozu k navýšení celkových ztrát v DS 110 kV, bylo by výhodnější v můstkovém zapojení provozovat, místo transformátoru T403, stejný transformátor jako T401, tedy transformátor o jmenovitém výkonu $S_n = 350$ MVA. Použitím stejného transformátoru jako T401 (v provozu by byly dva transformátory $S_n = 350$ MVA) bychom dosáhli po zavedení můstkového zapojení stejných ztrát jako při současném provozu.

Z hlediska řešení zkratových poměrů v DS 110 kV vyplývá, že výkonové vypínače ve všech rozvodnách 110 kV v DS 110 kV **vyhovují** provozu v můstkovém zapojení. Proto není potřeba pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu DS 110 kV při můstkovém zapojení přijmout žádná nová provozní opatření.

9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zpracování návrhu tzv. můstkového zapojení v distribuční soustavě E.ON 110 kV v uzlové oblasti Čebín pro zajištění vyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie se zaměřením na výpočet ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů.

V teoretické části práce je popsána problematika výpočtu ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů v elektrizační soustavě. První kapitola teoretické části zaměřená na výpočet ustáleného chodu sítě obsahuje základní popis a odvození rovnic výpočtu ustáleného chodu sítě pro řešení lineárních a nelineárních úloh. Výpočet ustáleného chodu sítě je proveden využitím iteračních metod, z nichž je popsáno řešení rovnic ustáleného chodu sítě pomocí Newtonovi iterační metody, kterou zároveň využívá řídicí systém Sinaut Spectrum, pomocí něhož jsou všechny výpočty provedeny. Druhá kapitola teoretické části je zaměřená na výpočet zkratových poměrů v elektrizační soustavě. Obsahuje popis zkratové poruchy jako přechodného jevu a uvádí rozlišení typů zkratových poruch, příčiny vzniku zkratu, následky zkratu, popis průběhu zkratového proudu a popis charakteristických hodnot zkratového proudu. Jako metoda výpočtu hodnot proudů při nesouměrných zkratech je uvedena metoda souměrných složek.

Praktická část diplomové práce, zaměřená na výpočet ustáleného chodu sítě a zkratových poměrů, poskytuje vyhodnocení možnosti provedení tzv. můstkového zapojení v DS 110 kV UO Čebín. Za můstkové zapojení považujeme paralelní chod transformátorů (T401 a T403) přes příčně spojené přípojnice (A a C), pomocí spínače přípojníc (SP) v rozvodně 110 kV Čebín (CNT). Provoz DS 110 kV při můstkovém zapojení je znázorněn na Obr. 6-1.

Ustálený chod sítě.

Výpočet ustáleného chodu sítě je zpracován pro pět variant zapojení v DS 110 kV. První analyzované zapojení je stávající zapojení UO Čebín – současný provoz (viz Obr. 4-1). Druhé řešené zapojení je můstkové zapojení (viz Obr. 6-1). Další varianty zapojení jsou variace můstkového zapojení – označené jako zvláštní provozní stavy. Zvláštními provozními stavy můstkového zapojení v práci jsou: výpadek přípojnice A v rozvodně 110 kV Čebín (CNT) - viz Obr. 6-2, zvýšené zatížení a zvýšené zatížení s výpadky vedení 110 kV (V506 a V507) – viz. Obr. 6-3. Pro každou variantu zapojení je proveden výpočet velikosti napětí v uzlech DS 110 kV, výpočet velikostí činných a jalových výkonů, proudových zatížení transformátorů (400/110 kV a 110/VN kV), vedení 110 kV a spínače přípojníc.

Na základě dosažených výsledků z výpočtu ustáleného chodu sítě lze konstatovat, že při můstkovém zapojení dojde:

- K zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie.
- Velikost napětí na přípojnících A (T401) a C (T403) v R 110 kV CNT je rovno $U_R = 116,7$ kV. Oproti současnému provozu v oblasti napájené z T401 poklesnou hodnoty napětí v uzlech o $\Delta U_R = -0,43$ %, v oblasti napájené z T403 dojde ke zvýšení hodnot napětí v uzlech o $\Delta U_R = 0,52$ %.
- Proudové zatížení transformátoru T401 se zvýší o $\Delta I_{zt} = 0,52$ %, tedy na $I_{zt} = 32,87$ % . Zatížení transformátoru T403 se také zvýší, a to o $\Delta I_{zt} = 0,24$ %, tedy na $I_{zt} = 34,83$ %.
- Změny napětí v uzlech mají za následek změny proudového zatížení transformátorů 110/VN kV. V uzlech, ve kterých se velikost napětí zvýší, dojde k poklesu proudového zatížení transformátorů 110/VN kV. V uzlech, ve kterých se velikost napětí sníží, dojde

ke zvýšení proudového zatížení transformátorů 110/VN kV. Změny proudového zatížení transformátorů jsou však pouze v desetinách procent.

- Změny napěťových poměrů v uzlech mají za následek změnu proudového zatížení vedení 110 kV. Změna proudového zatížení není, stejně jako v případě transformátorů 110/VN kV, velká (přibližně v desetinách procenta). Vedení 110 kV jsou poměrně málo zatížená, nejvíce zatížená vedení 110 kV jsou V505 a V506 (shodně $I_{\text{obdv}} = 24,13 \%$).
- Ztráty na vedeních 110 kV se zvýší o $\sum \Delta P_{\text{odv}} = 0,009 \text{ MW}$. Na transformátorech 110/VN kV dojde k poklesu ztrát o $\sum \Delta P_{\text{t},110} = -0,004 \text{ MW}$. Nárůst celkových ztrát v DS 110 kV je $\sum \Delta P_{\text{c}} = 0,005 \text{ MW}$.

Můstkové zapojení je také prověřeno při, výše zmíněných, zvláštních provozních stavech. Výsledné výpočty jsou porovnány vůči základnímu můstkovému zapojení. Ve všech zvláštních provozních stavech jsou hodnoty napětí v uzlech (rozvodnách 110 kV) v dovolených mezích a zároveň nedochází k přetížení transformátorů, vedení 110 kV nebo spínače přípojnic v rozvodně 110 kV CNT.

Z hlediska řešení ustáleného chodu DS 110 kV jsme došli k závěru, že ve všech analyzovaných variantách zapojení DS 110 kV jsou hodnoty napětí v uzlech (rozvodnách) v dovolených mezích, transformátory (400/110 kV a 110/VN kV), vedení 110 kV a spínač přípojnic nejsou proudově přetíženy. Tím tedy všechna zkoumaná zařízení DS 110 kV UO Čebín **vyhovují provozu v můstkovém zapojení**. Dále je také pro všechny vedení 110 kV splněno i bezpečnostní kritérium $n - 1$.

Můstkové zapojení s transformátorem T403 vyhovuje bezpečnému a spolehlivému provozu, ovšem vzhledem k tomu, že při provozu transformátoru T403 v můstkovém zapojení dojde oproti současnému provozu k navýšení celkových ztrát v DS 110 kV, bylo by vhodnější v můstkovém zapojení provozovat, místo transformátoru T403, stejný transformátor jako T401, tedy transformátor o jmenovitém výkonu $S_n = 350 \text{ MVA}$. Při použití výkonově stejného transformátoru s T401 (v provozu by byly dva transformátory $S_n = 350 \text{ MVA}$) bychom dosáhli po zavedení můstkového zapojení stejných ztrát jako při současném provozu.

Výpočet zkratových poměrů:

Výpočet zkratových poměrů je proveden pro současný provoz DS 110 kV a pro nové můstkové zapojení. Uvažované druhy zkratů jsou třífázový a jednofázový. Pro oba druhy zkratu jsou vypočítány velikosti počátečního rázového zkratového výkonu a proudu. Vypočítané hodnoty jsou dále vyhodnoceny a docházíme k závěru, že při můstkovém zapojení dojde k značnému zvýšení hodnot počátečního rázového zkratového výkonu a proudu ve všech uzlech. Největší nárůst počátečního zkratového výkonu nastane v R 110 kV CNT na přípojnici A:

- při třífázovém zkratu je nárůst $\Delta^{(3)} S_k'' = 74\%$,
- při jednofázovém zkratu je nárůst $\Delta^{(1)} S_k'' = 101,3\%$.

Vypočítaná velikost počátečního rázového zkratového výkonu v R 110 kV CNT na přípojnici A je rovna:

- při třífázovém zkratu je rozdíl $^{(3)} S_k'' = 3885,6 \text{ MVA}$,
- při jednofázovém zkratu je rozdíl $^{(1)} S_k'' = 4104,7 \text{ MVA}$.

Z hlediska řešení zkratových poměrů v DS 110 kV vyplývá, že výkonové vypínače ve všech rozvodnách 110 kV v DS 110 kV **vyhovují provozu** v můstkovém zapojení.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V., SKALA, P.: *Distribuce elektrické energie*, Brno: VUT 2005.
- [2] BLAŽEK, V., PAAR, M.: *Přenosové sítě*, Brno: VUT 2007.
- [3] ČSN EN 60909-0:2002 *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách-Část 0: Výpočet proudů*, Český normalizační institut, 2002.
- [4] HALUZÍK, E.: *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Učební texty. 1. vyd. Praha : SNTL, 1983, 126 s.
- [5] HRADÍLEK, Z.: *Elektroenergetika II*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1993.
- [6] MEŠTER, M.: *Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách*. Bratislava, 2005, 94s., ISBN 80-89057-10-1.
- [7] PAUZA, J.: *Zkratý v elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1970, 248 s.
- [8] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P.: *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. SNTL Praha, 1987.
- [9] E.ON DISTRIBUCE, A.S : Popis distribuční soustavy E.ON, 5/2006, [on line], [cit. 2011-04-04]. Dostupný z WWW: http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/technical_information/EON-popis_ds.pdf

Přílohy

Příloha A: Výpočty vygenerované z řídicího systému Sinaut pro jednotlivé varianty zapojení.

Příloha B: Dispečerská mapa DS 110 kV E.ON – východ.