

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 PŘI PARALELNÍM PROVOZU UZLOVÝCH OBLASTÍ R OTROKOVICE A R SOKOLNICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

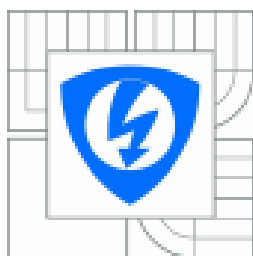
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. RENÉ MIKULINEC

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. René Mikulínek

ID: 119534

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

**Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON při paralelním provozu
uzlových oblastí R Otrokovice a R Sokolnice**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV.
2. Teorie výpočtu zkratových poměrů v sítích vvn a zvn.
3. Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV pro dvě varianty zapojení:
a) Samostatný provoz uzlových oblastí Otrokovice – Sokolnice.
b) Paralelní provoz uzlových oblastí Otrokovice – Sokolnice.
4. Výpočet zkratových poměrů při jedнопólovém a třípólovém zkratu v síti 110 kV pro obě varianty zapojení sítě 110 kV.
5. Výhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro obě varianty zapojení.
6. Návrh provozních a technických opatření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

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

Konzultanti diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

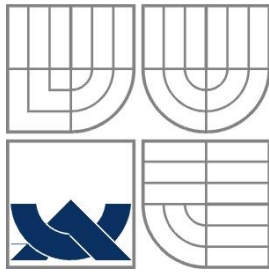
Bibliografická citace práce:

MIKULINEC, R. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON při paralelním provozu uzlových oblastí R Otrokovice a R Sokolnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 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 příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci, Ing. Petru Jandovi za pomoc při realizování praktické části práce a svým rodičům a přítelkyni za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110 KV E.ON PŘI PARALELNÍM PROVOZU UZLOVÝCH OBLASTÍ R OTROKOVICE A R SOKOLNICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Bc. RENÉ MIKULINEC

VEDOUcí PRÁCE

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, Csc.

BRNO 2013



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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



**STEADY STATE AND SHORT-CIRCUIT CONDITIONS
WITHIN E.ON 110 KV POWER NETWORK AT
PARALLEL OPERATION OF NODAL AREAS OF
OTROKOVICE SUBSTATION AND SOKOLNICE
SUBSTATION**

MASTERS'S THESIS

AUTHOR

Bc. RENÉ MIKULINEC

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, Csc.

BRNO 2013

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá ustáleným chodem a zkratovými poměry v síti 110 kV E.ON při samostatném a paralelním provozu uzlových oblastí R Otrokovice a R Sokolnice. Teoretická část práce je věnována výpočtu ustáleného chodu sítě velmi vysokého napětí pomocí Newtonovy iterační metody, přechodným jevům, které se můžou v elektrizační soustavě vyskytnout a teorií zkratových výpočtů. Praktická část se zabývá samotnými výpočty ustáleného chodu a zkratových poměrů při samostatném a při paralelním provozu uzlových oblastí Sokolnice-Otrokovice, které byly vypočítány pomocí dispečerského programu. Tyto výpočty jsou posléze vyhodnoceny z hlediska možného využití jednotlivých zapojení v reálném provozu. Na konci práce jsou uvedeny návrhy na provozní opatření v síti 110 kV.

KLÍČOVÁ SLOVA: elektrizační soustava; distribuční síť; ustálený chod; zkratové poměry; uzlová oblast; paralelní provoz

ABSTRACT

This thesis deals with the steady operation and short-circuit conditions in the 110 kV network E.ON in a separate and parallel operation of nodal areas of Otrokovice substation and Sokolnice substation. The theoretical part is devoted to the calculation of steady state high-voltage systems using Newton's iterative method, transient phenomena that may occur in the power system short-circuit calculations and theories. The practical part deals with the actual calculations of steady state and short-circuit conditions in a separate and parallel operation of nodal areas Sokolnice-Otrokovice, which were calculated using the dispatching program. These calculations are then evaluated for possible use of involvement in actual operation. At the end there are suggestions on operational measures in the network 110 kV.

KEY WORDS: electricity system; distribution network; steady state; short-circuit conditions ; nodal area; parallel operation

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD.....	17
2 USTÁLENÝ CHOD SÍTÍ ZVN A VVN	19
2.1 KLASIFIKACE UZLŮ V ES.....	19
2.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU	20
2.2.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA	21
2.2.1.1 Eliminace bilančního uzlu	22
2.2.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA	23
2.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU.....	25
3 PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	30
3.1 ZKRATY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ	30
3.2 ČASOVÝ PRŮBĚH ZKRATOVÝCH PROUDŮ	32
3.3 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU.....	37
4 ZKRATOVÉ VÝPOČTY	40
4.1 ZKRATOVÉ VÝPOČTY VE SKUTEČNÝCH HODNOTÁCH	40
4.2 ZKRATOVÉ VÝPOČTY V POMĚRNÝCH HODNOTÁCH	40
4.3 ZKRATOVÉ IMPEDANCE ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ	41
4.3.1 SÍŤOVÉ NAPÁJEČE	41
4.3.2 SYNCHRONNÍ GENERÁTORY	42
4.3.3 TRANSFORMÁTORY.....	43
4.3.3.1 Dvouvinuťové transformátory	43
4.3.3.2 Trojvinuťové transformátory	43
4.3.4 VENKOVNÍ VEDENÍ A KABELY	44
5 ZKRAT V SOUSTAVĚ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	46
5.1 TROJFÁZOVÝ ZEMNÍ ZKRAT.....	48
5.2 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT	49
6 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA SPOLEČNOSTI E.ON - OBLAST VÝCHOD	51
6.1 ROZVODNY NAPÁJENÉ Z UZLOVÉ OBLASTI SOKOLNICE	52
6.1.1 POPIS ROZVODEN A VEDENÍ V UO SOKOLNICE	53
6.2 ROZVODNY NAPÁJENÉ Z UZLOVÉ OBLASTI OTROKOVICE.....	57
6.2.1 POPIS ROZVODEN A VEDENÍ V UO OTROKOVICE.....	57
7 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PŘI SAMOSTATNÉM PROVOZU UO.....	60
7.1 SAMOSTATNÝ PROVOZ UO SOKOLNICE-OTROKOVICE	60
7.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ 110 kV V UO SOKOLNICE.....	61
7.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ 110 kV V UO OTROKOVICE	64

7.4 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV v UO SOKOLNICE.....	65
7.5 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV v UO OTROKOVICE	66
8 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PŘI PARALELNÍM PROVOZU UO.....	67
8.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE 110 kV PŘI PARALELNÍM PROVOZU UZLOVÝCH OBLASTÍ	68
8.2 VÝPOČET ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV PŘI PARALELNÍM PROVOZU UZLOVÝCH OBLASTÍ	71
9 VYHODNOCENÍ VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ	73
9.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V SÍTI 110 kV PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ	73
9.2 ZATÍŽENÍ VEDENÍ 110 kV PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ.....	74
9.3 VYHODNOCENÍ ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ.....	76
9.4 VYHODNOCENÍ ZTRÁT ČINNÉHO VÝKONU PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ	77
9.5 VYHODNOCENÍ ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ	77
10 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍŤE 110 kV PŘI VÝPADKU TRANSFORMÁTORU T403	81
10.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY V SÍTI 110 kV PŘI VÝPADKU TRANSFORMÁTORU T403.....	82
10.2 ZATÍŽENÍ VEDENÍ V SÍTI 110 kV PŘI VÝPADKU TRANSFORMÁTORU T403.....	83
10.3 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ PŘI VÝPADKU TRANSFORMÁTORU T403	85
10.4 ZTRÁTY ČINNÉHO VÝKONU PŘI VÝPADKU TRANSFORMÁTORU T403	87
11 NÁVRH PROVOZNÍCH A TECHNICKÝCH OPATŘENÍ	88
12 ZÁVĚR.....	89
POUŽITÁ LITERATURA	91
POUŽITÝ SOFTWARE.....	91
PŘÍLOHY	91

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1: Struktura elektrizační soustavy</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-1: Zapojení uzlové sítě po náhradě podélnými a příčnými admitancemi</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-2: Fázorový diagram uzlu zdroje s induktivním posunem</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-3: Náhrada sítě π-článkem</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-1: Druhy zkratů.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-2: Průběh souměrného zkratového proudu</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-3: Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-4: Časový průběh elektricky vzdáleného zkratu</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-5: Časový průběh elektrický blízkého zkratu</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-6: Složky zkratového proudu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-1: Náhradní schéma trojvinuťového transformátoru</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 5-1: Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 5-2: Trojfázový zemní zkrat</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5-3: Náhradní schéma při trojfázovém zkratu</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 5-4: Jednofázový zkrat</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 5-5: Náhradní schéma při jednofázovém zkratu</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 6-1 :Schéma distribuční sítě 110 kV - oblast východ.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6-2: Zjednodušené schéma UO Sokolnice a UO Otrokovice</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 7-1: Schéma sítě 110 kV při samostatném provozu UO Sokolnice-Otrokovice.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 8-1: Schéma sítě 110 kV při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 9-1: Napěťové poměry v síti 110 kV pro obě varianty zapojení</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 9-2: Zatížení vedení 110 kV pro obě varianty zapojení</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 9-3: Zatížení transformátorů pro obě varianty zapojení</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 9-4: Zkratové poměry při trojfázovém zkratu pro obě varianty zapojení</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 9-5: Zkratové poměry při jednofázovém zkratu pro obě varianty zapojení.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 10-1: Schéma zapojení sítě 110 kV při výpadku transformátoru T403</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 10-2: Srovnání napěťových poměrů v uzlech při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 10-3: Srovnání zatížitelnosti vedení při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 10-4: Srovnání zatížitelnosti transformátorů při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403</i>	<i>87</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1: Přehled znamének výkonů závislých na posunu proudu a typu uzlu</i>	23
<i>Tab. 6-1: Rozvodny v UO Sokolnice</i>	53
<i>Tab. 6-2: Seznam vedení 110 kV v SO-"C"</i>	54
<i>Tab. 6-3: Rozvodny v UO Otrokovice</i>	57
<i>Tab. 6-4: Seznam vedení v oblasti OKC-"C"</i>	58
<i>Tab. 7-1: Napěťové poměry v rozvodnách v oblasti SO-, "C"</i>	62
<i>Tab. 7-2: Zatížení vedení v oblasti SO-, "C"</i>	62
<i>Tab. 7-3: Zatížení transformátorů v oblasti SO-"C"</i>	63
<i>Tab. 7-4: Ztráty činného výkonu v oblasti SO-"C"</i>	63
<i>Tab. 7-5: Napěťové poměry v oblasti OKC-"C"</i>	64
<i>Tab. 7-6: Zatížení vedení v oblasti OKC-"C"</i>	64
<i>Tab. 7-7: Zatížení transformátorů v oblasti OKC-"C"</i>	65
<i>Tab. 7-8: Ztráty činného výkonu v oblasti OKC-, "C"</i>	65
<i>Tab. 7-9: Zkratové poměry v oblasti SO-"C"</i>	66
<i>Tab. 7-10: Zkratové poměry v oblasti OKC-"C"</i>	66
<i>Tab. 8-1: Napěťové poměry při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice</i>	68
<i>Tab. 8-2: Zatížení vedení při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice</i>	69
<i>Tab. 8-3: Zatížení transformátorů při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice</i>	70
<i>Tab. 8-4: Ztráty činného výkonu při paralelním provozu</i>	71
<i>Tab. 8-5: Zkratové poměry při paralelním provozu UO</i>	71
<i>Tab. 9-1: Napěťové poměry v síti 110 kV pro obě varianty zapojení</i>	73
<i>Tab. 9-2: Zatížení vedení 110 kV pro obě varianty zapojení</i>	75
<i>Tab. 9-3: Zatížení transformátorů pro obě varianty zapojení</i>	76
<i>Tab. 9-4: Ztráty činného výkonu pro obě zapojení</i>	77
<i>Tab. 9-5: Zkratových poměry při trojfázovém zkratu pro obě varianty zapojení</i>	78
<i>Tab. 9-6: Zkratových poměry při jednofázovém zkratu pro obě varianty zapojení</i>	79
<i>Tab. 10-1: Napěťové poměry v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403</i>	82
<i>Tab. 10-2: Zatížení vedení v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403</i>	83
<i>Tab. 10-3: Zatížení transformátorů při výpadku transformátoru T403</i>	85
<i>Tab. 10-4: Ztráty činného výkonu při výpadku transformátoru T403</i>	87

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
U	elektrické napětí	V
U_1	napětí na začátku vedení	V
U_2	napětí na konci vedení	V
U_0	fázor netočivé složky napětí	V
U_1	fázor sousledné složky napětí	V
U_2	fázor zpětné složky napětí	V
U_A	fázor fázového napětí ve fázi a	V
U_B	fázor fázového napětí ve fázi b	V
U_C	fázor fázového napětí ve fázi c	V
U_f	fázor napětí na svorkách alternátoru	V
U_i	fázor sdruženého napětí v i -tém uzlu sítě	V
U_i^*	komplexně sdružená hodnota fázoru sdruženého napětí v i -tém uzlu sítě	V
U_n	jmenovité sdružené napětí	V
U_{nQ}	jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q	V
U_{rG}	jmenovité napětí generátoru	V
U_{rt}	jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí	V
U_v	vztažné napětí	V
u_0	napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy	V
u_{rt}	jmenovité napětí transformátoru nakrátko	%
u_{Rr}	činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru	%
$u_{RrA,B}$	jmenovitá činná složka napětí nakrátko mezi stranami A a B	%
$u_{XrA,B}$	jmenovitá induktivní složka napětí nakrátko mezi stranami A a B	%
Δu	rozdíl jmenovitých napětí v uzlech soustavy při změně zapojení sítě	%
I	elektrický proud	A
I_i	fázor proudu v i -tém uzlu sítě	A
I_i^*	fázor komplexně sdruženého proudu v i -tém uzlu sítě	A
I_0	fázor netočivé složky proudu	A
I_1	fázor sousledné složky proudu	A
I_2	fázor zpětné složky proudu	A

I_A	fázor proudu ve fázi a	A
I_B	fázor proudu ve fázi b	A
I_C	fázor proudu ve fázi c	A
I_b	souměrný vypínací zkratový proud	A
I_{th}	ekvivalentní oteplovací proud	A
I_k	efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu	A
I_k'	počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu	A
I_k''	počáteční efektivní hodnota subtranzitního proudu	A
$^{(3)}I_k''$	počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu	A
$^{(1)}I_k''$	počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu	A
I_v	vztažný proud	A
I_{kQ}''	počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q	A
i_p	nárazový zkratový proud	A
i_{dc}	stejnoseměrná složka zkratového proudu	A
i_k	okamžitá hodnota nesouměrného střídavého zkratového proudu	A
i_{ks}	okamžitá hodnota souměrného střídavého zkratového proudu	A
i_{ka}	okamžitá hodnota stejnosměrné (aperiodické) složky zkratového proudu	A
I_{rt}	jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí	A
I_n	jmenovitá hodnota elektrického proudu	A
I_{ved}	zatížení vedení	A
I_t	zatížení transformátoru	A
I_{max}	maximální zatížitelnost vedení	A
i_{z_v}	procentuální zatížitelnost vedení	%
i_{z_t}	procentuální zatížitelnost transformátoru	%
Δi_{z_v}	procentuální změna zatížení vedení při změně zapojení sítě	%
Δi_{z_t}	procentuální změna zatížení transformátoru při změně zapojení sítě	%
i	poměrná hodnota elektrického proudu	-
Z_0	netočivá složka celkové impedance	Ω
Z_1	sousledná složka celkové impedance	Ω
Z_2	zpětná složka celkové impedance	Ω
Z_k	celková výpočtová impedance zkratového obvodu	Ω

Z_v	vztažná impedance	Ω
Z_n	podélná impedance prvků zkratového obvodu	Ω
Z_p	přepočítaná impedance	Ω
Z_Q	zkratová impedance síťového napáječe Q	Ω
Z_{Qt}	sousledná zkratová impedance vztažená ke straně transformátoru s nižším napětím	Ω
Z_{GK}	korigována impedance generátoru	Ω
Z_G	rázová impedance generátoru v sousledné soustavě	Ω
Z_L	sousledná zkratová impedance vedení	Ω
Z_v	vztažná impedance	Ω
Z_A	sousledná zkratová impedance trojvinutového transf. na straně A	Ω
Z_B	sousledná zkratová impedance trojvinutového transf. na straně B	Ω
Z_C	sousledná zkratová impedance trojvinutového transf. na straně C	Ω
z_p	fázor poměrné přepočítané impedance	-
R	elektrický odpor	Ω
X	induktivní reaktance	Ω
R_L'	činná rezistence vedení na jednotku délky	Ω/km
X_L'	reaktance vedení na jednotku délky	Ω/km
x_d''	poměrná rázová reaktance generátoru vztažená k jmenovité impedanci	-
Y_{ii}	diagonální prvek uzlové admitanční matice	S
Y_{ij}	mimodiagonální prvek uzlové admitanční matice	S
P	činný výkon	W
P_i	činný výkon v i -tém uzlu sítě	W
P_j	činný výkon v j -tém uzlu sítě	W
ΔP	ztráty činného výkonu	W
ΔP_{ij}	ztráty činného výkonu mezi i -tým a j -tým uzlem	W
P_{krt}	jmenovité ztráty nakrátko transformátoru	W
P_1	činný výkon na začátku vedení	W
P_2	činný výkon na konci vedení	W
P_{\max}	maximální výkon vedení	W
ΔP_v	ztráty činného výkonu na vedení	W

ΔP_t	ztráty činného výkonu transformátoru	W
$\Delta P_{v,c}$	celkové ztráty činného výkonu na vedení	W
$\Delta P_{t,c}$	celkové ztráty činného výkonu transformátorů	W
ΔP_c	celkové ztráty činného výkonu v síti	W
$\Delta_{\Delta P_c}$	procentuální změna ztrát činného výkonu při změně zapojení	%
Q	jalový výkon	VA
Q_i	jalový výkon v i -tém uzlu sítě	VA
Q_j	jalový výkon v j -tém uzlu sítě	VA
ΔQ_{ij}	ztráty jalového výkonu mezi i -tým a j -tým uzlem	VA
Q_1	jalový výkon na začátku vedení	VA
Q_2	jalový výkon na konci vedení	VA
S_i	komplexní výkon v i -tém uzlu sítě	VA
S_j	komplexní výkon v j -tém uzlu sítě	VA
S_i^*	komplexně sdružená hodnota komplexního výkonu v i -tém uzlu sítě	VA
S_k''	počáteční rázový zkratový výkon	VA
S_v	vztažný výkon	VA
S_{rt}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	VA
S_{od}	jmenovitá zkratová odolnost rozvodny	VA
$^{(3)}S_k''$	počáteční rázový zkratový výkon při trojfázovém zkratu	VA
$^{(1)}S_k''$	počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu	VA
s_k''	procentuální zatížení rozvodny zkratovým výkonem	%
τ_d''	časová konstanta subtranzitní složky zkratového proudu	s
τ_d'	časová konstanta tranzitní složky zkratového proudu	s
τ_s	časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu	s
t_k	doba v okamžiku vypnutí zkratu	s
T_k	doba zkratu	s
J	jacobián	-
∂	parciální derivace	-
\mathbf{a}	operátor natočení	-
k	počet odběrových nebo dodávkových uzlů sítě	-
n	počet uzlů sítě	-

c	napěťový součinitel	-
k	součinitel stanovený normou pro různé druhy zkratů	-
t_r	jmenovitý převod transformátoru	-
α	úhel proudu	°
φ	fázový posun napětí a proudu	°
m	časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu	-
n	časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu	-
d	geometrická střední vzdálenost mezi vodiči	m
r	poloměr jednoduchého vodiče	m
$\cos\varphi$	účinník	-
Δx_i	vypočítané diference v i -tém kroku	-
Δy_i	rozdíl zadané hodnoty pravé strany rovnice a odhadu hodnoty	-
δ	úhel napětí	°
α	úhel proudu	°
f	jmenovitý kmitočet	Hz
ω	úhlová rychlost	rad.s ⁻¹
φ_{rG}	úhel mezi proudem a napětím generátoru	°

Zkratka	Význam
ES	elektrizační soustava
ZVN	zvlášť vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
DS	distribuční soustava
UO	uzlová oblast

Poznámka: Fázorové veličiny jsou vyznačeny tučnými písmeny.

1 ÚVOD

Tato kapitola byla vytvořena podle [1], [7].

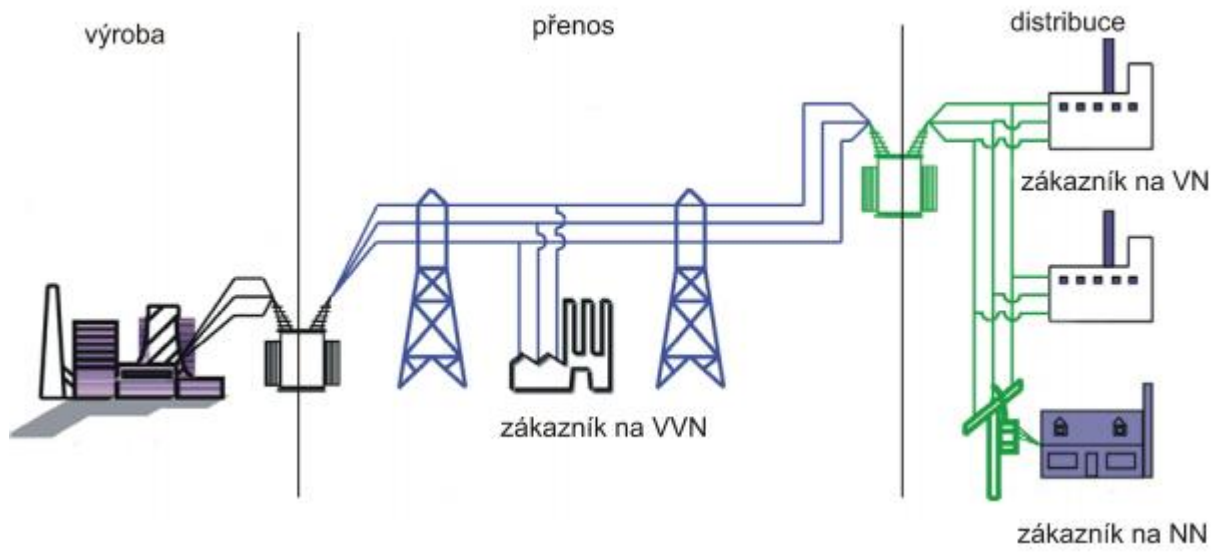
Elektrizační soustava (ES) je navzájem propojený soubor zařízení zajišťující výrobu, přenos, rozvod (distribuci) a konečné užití elektrické energie. Struktura elektrizační soustavy je znázorněna na *obr. 1-1* [7]. Kromě hlavního výrobního, přenosového a distribučního zařízení, které tvoří hlavní prvky tohoto systému, ES obsahuje řadu dalších prvků zajišťujících měření, kontrolu, ochranu, regulaci a řízení. Hlavními vazbami v ES umožňujícími plynulé předávání elektrické energie jsou elektrické sítě. Vedle těchto hlavních vazeb existuje informační systém zprostředkovávající regulaci a řízení soustavy.

Pro zajištění spolehlivého chodu elektrizační soustavy musí být vyřešeny hlavně otázky:

- synchronizace generátorů,
- stabilita paralelní spolupráce,
- regulace kmitočtu a napětí,
- omezení zkratových proudů,
- využití místních zdrojů energie,
- výstavba nových elektráren,
- ekonomické rozdělení výroby činných a jalových výkonů,
- rozdělení elektrických sítí na přenosové a distribuční.

Přenosová soustava představuje jeden ze základních subsystémů elektrizační soustavy, který propojuje všechny významné subjekty (elektrárny, velké podniky, apod.) v elektrizační soustavě a zajišťuje rozhodující podíl zahraniční spolupráce. Dále zajišťuje přenos elektřiny, provoz, údržbu a rozvoj přenosové soustavy a především dispečerské řízení elektrizační soustavy v reálném čase. Sítě 400 kV a 220 kV mají v ČR charakter přenosových vedení.

Distribuční soustava je soustava zařízení pro rozvod elektřiny z přenosové soustavy nebo ze zdrojů zapojených do ní ke koncovým uživatelům. Součástí distribuční soustavy jsou i její řídicí, ochranné, zabezpečovací a informační systémy. V podmínkách elektrizační soustavy ČR se jedná o rozvody a zařízení do maximálního napětí 110 kV.



Obr. 1-1: Struktura elektrizační soustavy

2 USTÁLENÝ CHOD SÍTÍ ZVN A VVN

Tato kapitola byla vytvořena podle [3], [5].

Elektrizační soustavy jsou provozovány v ustáleném stavu. Jedná se o provozní stav, při kterém v zařízeních ES neprobíhají krátkodobé přechodné děje a dochází k rovnováze mezi všemi veličinami charakterizujícími její chod, tj. rovnováha napětí, proudů, činných a jalových výkonů a mechanických momentů v rotačních zdrojích a spotřebičích. Díky neustálým změnám počtu a zatížení spotřebitelů a zdrojů, však ustálený stav v ES neexistuje. Následkem těchto změn dochází, měřeno v čase, k neustálým změnám efektivních hodnot napětí a proudu. Tyto změny však neuvažujeme, jelikož z časového hlediska to jsou změny značně pomalé.

Při analýze provozu ES, můžeme zjistit, že všechny její prvky (generátory, transformátory, přenosová a rozvodná vedení, spínače, odpojovače atd.) jsou spojeny v jednu komplexní síť, ve které figurují jako větve. V této síti jsou uzlové body (uzly), které tyto větve spojují. Těmito uzly jsou například přípojnice v elektrárnách a rozvodnách a u spotřebitelů.

2.1 Klasifikace uzlů v ES

Uzly v ES se dělí podle čtyř známých veličin:

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

Z hlediska těchto čtyř veličin (U , δ , P , Q) se uzly rozlišují podle toho, které z nich jsou zadány a které jsou pomocí rovnic ustáleného chodu dopočítány. Zpravidla podle požadavků praxe dělíme uzly podle zadávaných uzlových veličin do tří základních tříd:

Třída (U , δ) – bilanční uzel

V tomto uzlu je zadán fázor napětí, resp. absolutní velikost napětí a jeho úhel. Tento uzel obvykle označujeme v náhradním schématu jako první a řešením ustáleného chodu dostaneme činný a jalový výkon. Úlohou tohoto uzlu je vyrovnávat bilanci výkonů s uvažováním činných a jalových ztrát v sítích. Z tohoto důvodu obvykle volíme za bilanční uzel jeden z napáječů, v kterém je dostatečně velký zdroj výkonů.

Třída (P , Q)

Jedná se o napájecí, resp. odběrové uzly, ve kterých je zadán činný a jalový výkon. Výkony zdrojů a odběrů jsou odlišeny znamínky a to tak, že kladným znaménkem je označena dodávka výkonu a záporným odběr výkonu. Řešením ustáleného chodu vypočteme napětí a jeho úhel.

Třída (U , P)

Jsou to tzv. *regulační* nebo *kompenzační* uzly. V těchto uzlech je zadán činný výkon a absolutní hodnota napětí. Řešením ustáleného chodu získáme jalový výkon (odebíraný nebo dodávaný), potřebný pro dodržení zadané hodnoty napětí v uzlu a úhel tohoto napětí.

Volba známých a neznámých veličin (U, δ, P, Q), které charakterizují uzel, nemůže být libovolná. Je nutné dodržet zásadu, že chod sítě nemůže být přeurčen ani neurčitý. Při praktických výpočtech vesměs vystačíme s volbou základních tří kombinací (tříd) uzlů, jak bylo uvedeno výše tj.:

- jeden bilanční uzel (U, δ),
- k uzlů (P, Q),
- $(n - k - 1)$ uzlů (U, P),

jelikož pro řešení máme k dispozici $2(n - 1)$ rovnic popisujících ustálený chod.

Rychlost konvergence zvolené iterační metody závisí na konfiguraci sítě a volbě bilančního uzlu, kde by měl být k dispozici zdroj, který hradí výkonové ztráty v síti a případnou nerovnováhu v bilanci dodávek a odběrů. Dále též závisí na počtu a umístění uzlů třídy (P, Q) a (U, P). Výpočty ukazují, že bilanční uzel je vhodné volit v „elektrickém středu“ sítě, což odpovídá uzlu s největší vlastní admitancí, jinak řečeno, tento uzel má největší diagonální prvek v admitanční uzlové matici. Ne vždy je v uzlu k dispozici „volný“ generátor, který by hradil ztráty a dorovnával případnou nerovnováhu výkonů v síti, a proto je možno volit jako bilanční i jiný uzel v síti. Pak je ale nutné rozšířit klasifikaci uzlů a specifikovat podmínky určitosti chodu sítě.

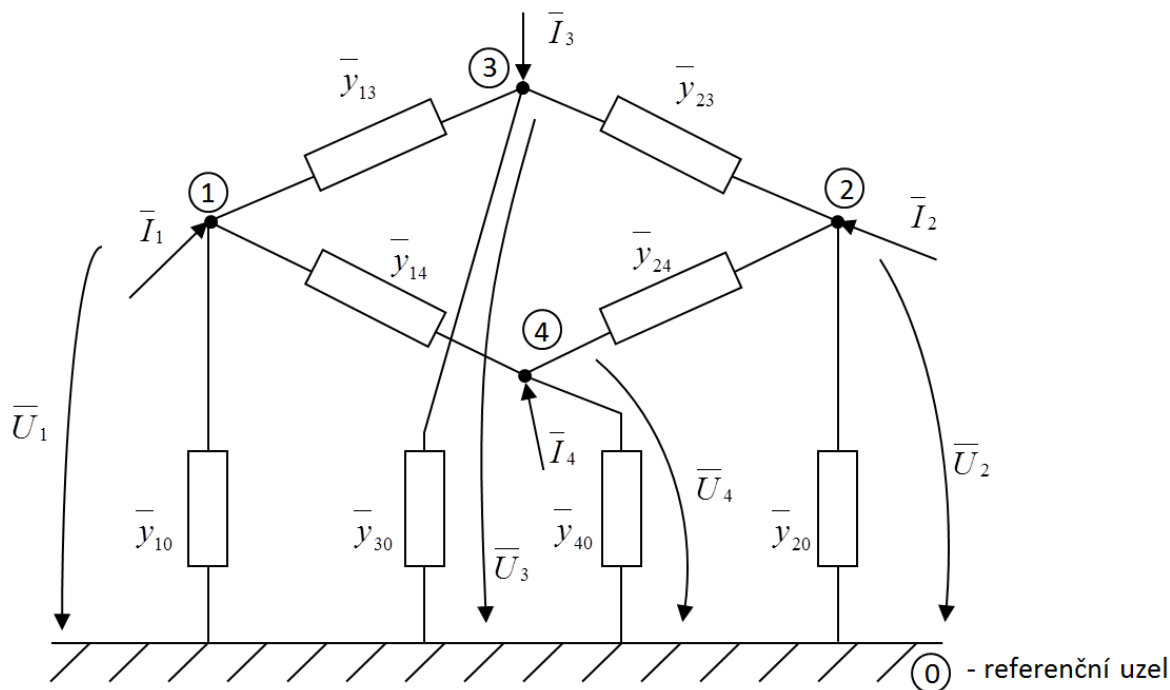
2.2 Výpočet ustáleného chodu

Výpočet ustáleného chodu ES, tedy znalost činných a jalových výkonů, ztrát a napěťových poměrů v jednotlivých prvcích (větších) a uzlech ES je důležitá jednak pro řízení provozu, tak i pro navrhování dalšího rozvoje ES. Tyto vypočítané hodnoty bývají využity také pro výpočet přechodných dějů (zkrat, statická a dynamická stabilita) a řady optimalizačních úloh jako je hospodárné rozdělování výroby činných a jalových výkonů, optimální regulace napětí, hodnocení spolehlivosti ES aj. Řešení ustáleného chodu se doplňuje kontrolou na přetížení jednotlivých prvků v ES. Výpočet ustáleného chodu sítě se zpravidla provádí pro minimální a maximální zatížení sítě. Jelikož jsou odběry a dodávky zadávány činnými a jalovými výkony, tak nemůžeme chod sítě popsat soustavou lineárních rovnic. Z tohoto důvodu jsme tedy nuceni ustálený chod matematicky formulovat jako nelineární úlohu, což vede k soustavě nelineárních rovnic, jejichž řešení musím použít některou z iteračních metod. Iterační metody jsou ovšem z časového hlediska často náročné, proto se některé úlohy, u kterých není potřebná velká přesnost, linearizují. Jsou to např. výpočty pro dlouhodobé plánování rozvoje ES příp. výpočty spolehlivosti. Výkony v uzlech se převedou na proudy a to dělením střední hodnotou očekávaného napětí v jednotlivých uzlech.

Při sestavení základních rovnic ustáleného chodu můžeme použít některou z metod řešení lineárních obvodů jako je metoda uzlových napětí nebo metoda smyčkových proudů. 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. Předpokládá se, že ES se skládá ze souměrných zdrojů, souměrných přenosových prvků a odběrů.

2.2.1 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Při výpočtu ustáleného chodu jako lineární úlohy předpokládáme, že jsou zadány odebírané a dodávané proudy do uzlů sítě. Prvky ES jsou zadány jejich podélnými a příčnými admitancemi. Přenosová a rozvodná vedení se nejčastěji nahrazují π články, transformátory Γ nebo π články. Příčné admitance jsou spojeny mezi příslušný uzel sítě a uzel referenční – „zem“ o nulovém potenciálu. Předpokládáme dále, že parametry všech prvků jsou přepočítány na jedno společné vztažné napětí a tedy ES můžeme nahradit galvanickým spojením prvků např. podle obr. 2-1.



Obr. 2-1: Zapojení uzlové sítě po náhradě podélnými a příčnými admitancemi

Náhradní schéma sítě na obr. 2-1 lze pomocí metody uzlových napětí matematicky popsat následující soustavou rovnic:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} & \mathbf{Y}_{13} & \mathbf{Y}_{14} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} & \mathbf{Y}_{23} & \mathbf{Y}_{24} \\ \mathbf{Y}_{31} & \mathbf{Y}_{32} & \mathbf{Y}_{33} & \mathbf{Y}_{34} \\ \mathbf{Y}_{41} & \mathbf{Y}_{42} & \mathbf{Y}_{43} & \mathbf{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

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

$\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_3, \mathbf{I}_4$ jsou zadané uzlové proudy, kde znaménkem „+“ jsou zadány dodávky a znaménkem „-“ odběry.

Zkrácený zápis soustavy (2.1) je pak:

$$[\mathbf{U}] = [\mathbf{Y}] \cdot [\mathbf{U}] \quad (2.2)$$

Prvky admitanční uzlové matice $[\mathbf{Y}]$ jsou sestaveny podle následujícího postupu, jenž plyne z druhého Kirchhoffova zákona:

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

Předpokládáme, že větve nemají vzájemné indukční vazby a platí:

$$\mathbf{Y}_{33} = \mathbf{y}_{13} + \mathbf{y}_{23} + \mathbf{y}_{30} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{Y}_{31} = \mathbf{Y}_{13} = -\mathbf{y}_{13} \quad (2.4)$$

Pro rozlišení jsou prvky admitanční uzlové matice a uzlové veličiny označeny velkými písmeny a admitance jednotlivých větví a větvových proudů jsou označeny malými písmeny.

Soustavu (2.2) lze také zapsat ve tvaru:

$$\mathbf{I}_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \cdot \mathbf{U}_j \quad \text{pro } i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.5)$$

kde n určuje počet uzlů v síti mimo uzel referenční, kterému je přiřazeno označení 0.

2.2.1.1 Eliminace bilančního uzlu

Admitanční matice $[\mathbf{Y}]$ je regulární maticí, což znamená, že soustava rovnic (3.1), sestavená pro síť na obr. 2-1, je nezávislá. Jedním z n uzlů soustavy je potřebné nahradit neznámé proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnávat bilanci mezi dodávkami a odběry. Zvolený uzel (s neznámým uzlovým proudem) je nazván jako *bilanční uzel*. Aby v rovnicích (2.1) až (2.5) byl stejný počet neznámých, jako je rovnic, je nutné v bilančním uzlu zadat známé napětí. Pro formální zjednodušení dalšího zápisu přiřadíme bilančnímu uzlu pevné číslo 1. Vzhledem k tomu, že v bilančním uzlu máme zadáno napětí \mathbf{U}_1 , můžeme soustavu rovnic (2.1) a analogicky rovnici (2.5) přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{Y}_{31} & \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{Y}_{41} & \mathbf{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{22} & \mathbf{Y}_{23} & \mathbf{Y}_{24} \\ \mathbf{Y}_{32} & \mathbf{Y}_{33} & \mathbf{Y}_{34} \\ \mathbf{Y}_{42} & \mathbf{Y}_{43} & \mathbf{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{Y}_{i1} \cdot \mathbf{U}_1 + \sum_{j=2}^n \mathbf{Y}_{ij} \cdot \mathbf{U}_j = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \cdot \mathbf{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (2.7)$$

Po vypočítání neznámých napětí $\mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \dots, \mathbf{U}_n$, neznámý proud \mathbf{I}_1 v bilančním uzlu zpravidla dopočítáme při určení proudů v jednotlivých větvích sítě. Soustava (2.7) se řeší např. eliminační metodou, iteračními metodami nebo přímou inverzí admitanční uzlové matice řádu $(n - 1)$. Vypuštění rovnice pro bilanční uzel ve vztazích (2.6) a (2.7) nazýváme eliminací bilančního uzlu.

2.2.2 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

Trojfázová síť je v našich úvahách nahrazena jednofázovým ekvivalentem a tudíž všechny rovnice platí pro fázové hodnoty napětí a výkon přenášený jednou fází. Ve výpočtu ustáleného chodu sítě jako nelineární úloha se předpokládá zadání činných a jalových výkonů. Proto můžeme pro i -tý uzel psát

$$\mathbf{S}_i = P_i + jQ_i = \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{I}_i^* \quad (2.8)$$

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

Vyjádřením proudu z (2.8) dostáváme rovnici (2.9):

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{S}_i^*}{\mathbf{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\mathbf{U}_i^*}. \quad (2.9)$$

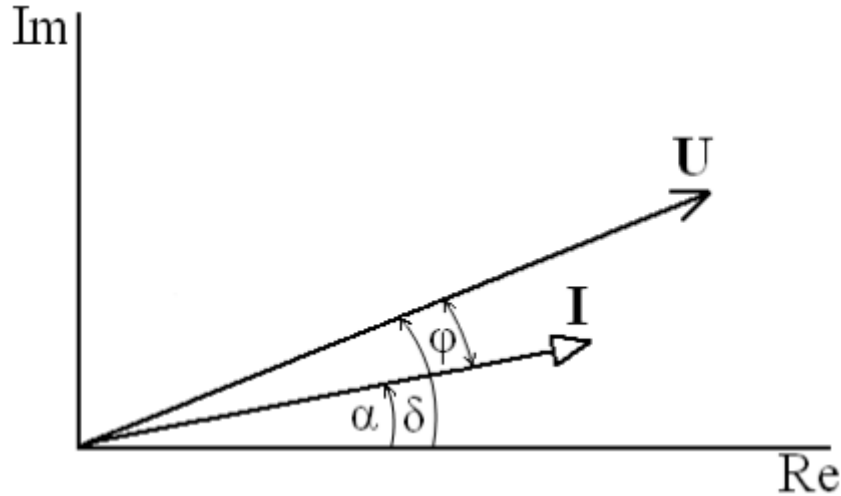
Vysvětlení znaménka u činného a jalového výkonu v rovnici (2.8) bude provedeno pomocí fázorového diagramu na obr. 2-2 [3]. Diagram znázorňuje uzel, ve kterém je umístěna výroba činného a jalového výkonu (proudu) induktivního charakteru. Komplexní výkon dodávaný do uzlu můžeme matematicky zapsat

$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^* = U \angle \delta \cdot I \angle -\alpha = U \cdot I \angle \varphi = S \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (2.10)$$

kde $\varphi = \delta - \alpha$ je fázový posun napětí vůči proudu. Platí tedy, že pokud je proud induktivního charakteru (je zpožděn za napětím), potom $\varphi > 0$ a $P > 0$ i $Q > 0$. Pro odběrový uzel uvažujeme proud záporně. To má za následek změnu znaménka u činného a jalového výkonu oproti uzlu s dodávkou. Je to nejlépe vidět z následující tabulky při uvažované orientaci toku výkonu (proudu) šipkou směrem do uzlu.

Tab. 2-1: Přehled znamének výkonů závislých na posunu proudu a typu uzlu

UZEL	ZDROJ	ODBĚR
Posun proudu	$P > 0$	$P < 0$
induktivní $\varphi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
kapacitní $\varphi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$



Obr. 2-2: Fázorový diagram uzlu zdroje s induktivním posunem

Dosažením rovnice (2.9) do (2.7) dostáváme

$$\mathbf{I}_i = \frac{\mathbf{S}_i^*}{\mathbf{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\mathbf{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \cdot \mathbf{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (2.11)$$

Při pohledu na rovnice (2.7) a (2.11) je zřejmé, že došlo k eliminaci bilančního uzlu a napětí \mathbf{U}_1 je tedy známo. Bilanční uzel v tomto případě hradí rozdíl mezi dodávkami a odběry, a navíc ztráty činného a jalového výkonu v síti. Znamé napětí bilančního uzlu a mimodiagonální admitance \mathbf{Y}_{ij} vede výpočet neznámých napětí na řešení soustavy nelineárních kvadratických rovnic vztahu (2.11). Jsou-li jednotlivé prvky sítě nahrazeny π – články (obr. 2-3) [3], pak je proud tekoucí do uzlu i je určen rovnicí

$$\mathbf{I}_i = (\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j) \cdot \mathbf{y}_{ij} + \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{y}_{i0}. \quad (2.12)$$

Podle (2.8) je zdánlivý výkon v uzlu i

$$\mathbf{S}_i = P_i + jQ_i = \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{I}_i^*. \quad (2.13)$$

Podle úmluvy, je-li $P_i > 0$ pak činný výkon vtéká do uzlu i . Znaménko u jalového výkonu pak určuje, zda jde o výkon induktivní či kapacitní. Analogicky lze vyjádřit i proud a výkon tekoucí do uzlu j

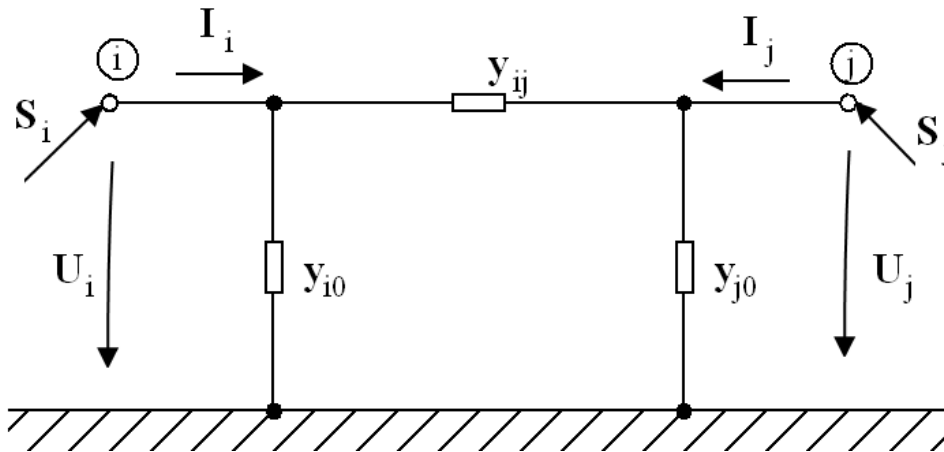
$$\mathbf{I}_j = (\mathbf{U}_j - \mathbf{U}_i) \cdot \mathbf{y}_{ij} + \mathbf{U}_j \cdot \mathbf{y}_{j0}, \quad (2.14)$$

$$\mathbf{S}_j = P_j + jQ_j = \mathbf{U}_j \cdot \mathbf{I}_j^*. \quad (2.15)$$

Algebraickým součtem výkonů P , Q tekoucích do uzlů i , j náhradního π – článku se dostanou činné a jalové ztráty

$$\Delta P_{ij} = P_i + P_j, \quad (2.16)$$

$$\Delta Q_{ij} = Q_i + Q_j. \quad (2.17)$$

Obr. 2-3: Náhrada sítě π -článkem

2.3 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Řešíme-li soustavu nelineárních rovnic, pak musíme nejprve odhadnout kořeny v nulté iteraci $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$, jejichž přesné hodnoty se liší o $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$. Přesná hodnota kořenů je tedy

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1^{(0)} + \Delta x_1 \\ x_2 &= x_2^{(0)} + \Delta x_2 \\ &\vdots \\ x_n &= x_n^{(0)} + \Delta x_n. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Rovnici lze pak přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Každou rovnici soustavy (2.19) můžeme rozepsat v Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$. Např. první rovnice bude vypadat následovně

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi_1 = y_1, \quad (2.20)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_i} \right|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ atd. a ϕ_1 zahrnuje členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ a druhé a 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 $\phi_1 \rightarrow 0$. Pokud označíme výraz $y_1^{(0)} = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$, pak můžeme rovnici (2.20) přepsat do tvaru

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)}. \quad (2.21)$$

V rovnici (2.21) výraz $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$ určené dosazením odhadu kořenů do rovnice (2.20).

Upravením i zbývajících rovnic soustavy (2.19) dostáváme soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Takto vytvořená soustava má maticový tvar

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix}. \quad (2.22)$$

Soustavu (2.22) můžeme přepsat do zkráceného tvaru

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (2.23)$$

kde matice $[J]$ je tzv. Jacobián. Ze soustavy rovnic (2.21), resp. (2.22) vypočítáme vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určíme nové, opravené odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i^{(0)} \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.24)$$

Tyto kořeny použijeme pro výpočet v další iteraci.

Použijeme-li tuto iterační metodu na rovnici (2.11), která popisuje ustálený chod sítě, můžeme rovnici přepsat dle (2.19) na tvar

$$P_i - jQ_i = \mathbf{U}_i^* \cdot \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \cdot \mathbf{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (2.25)$$

Pravou stranu rovnice (2.25) rozepíšeme na reálnou a imaginární část. Toto můžeme provést zápisem fázorů napětí a komplexních admitancí ve složkovém či polárním tvaru. Např. pro polární tvar

$$\mathbf{U}_i = U_i \angle \delta_i, \quad \mathbf{U}_i^* = U_i \angle -\delta_i, \quad \mathbf{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij}.$$

Dosazení napětí a admitance v polárním tvaru do rovnice (2.25) se po úpravě dostanou vztahy

$$P_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{U}_j \cdot \mathbf{Y}_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{U}_i \cdot \mathbf{U}_j \cdot \mathbf{Y}_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij})$$

pro $i = 2, 3, \dots, n$. (2.26)

Jedná se o soustavu $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Ve všech uzlech jsou zadány dodávané a odebírané činné a jalové výkony s výjimkou bilančního uzlu 1, kde je zadáno napětí U_1 a jeho úhel δ_1 . Iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ provedeme podle (2.22) a s použitím rovnic (2.26) dostáváme zkrácený maticový zápis

$$\begin{bmatrix} (\Delta P) \\ (\Delta Q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P}{\partial U} \right) & \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right) \\ \left(\frac{\partial Q}{\partial U} \right) & \left(\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (\Delta U) \\ (\Delta \delta) \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Všimněme si, že ΔU_i zde neznamená úbytek napětí, ale diferencí odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnic (2.26). Výpočet jednotlivých prvků Jacobiánu se provádí derivací rovnic (2.26) podle určitých proměnných.

a) Výpočet prvků matice $\left(\frac{\partial P}{\partial U} \right)$:

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \cos(\alpha_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.28)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.29)$$

b) Výpočet prvků matice $\left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)$:

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.30)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.31)$$

c) Výpočet prvků matice $\left(\frac{\partial Q}{\partial U} \right)$:

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \sin(\alpha_{ii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.32)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.33)$$

d) Výpočet prvků matice $\left(\frac{\partial Q}{\partial \delta}\right)$:

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.34)$$

Mimodiagonální prvky $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.35)$$

Shrnutí výpočtů ustáleného chodu pomocí Newtonovy iterační metody:

- Nejprve provedeme odhad fázorů napětí v jednotlivých uzlech sítě a to v nultém iteračním kroku ($k = 0$). Obvykle se volí všechny fázory napětí rovny napětí v bilančním uzlu ($\mathbf{U}_i^{(0)} = \mathbf{U}_1, i = 1, 2, \dots, n$).
- Dosazením napětí do rovnic (2.26) vypočteme difference výkonů

$$\Delta P_i^{(0)} = P_{i(\text{zadané})} - P_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)})$$

$$\Delta Q_i^{(0)} = Q_{i(\text{zadané})} - Q_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)}).$$
- Odhadnuté napětí v nultém iteračním kroku dosadíme do rovnic (2.28) až (2.35) a vyčíslíme Jacobián.
- Diference napětí a jejich úhlů $\Delta U_i^{(0)}, \Delta \delta_i^{(0)}$ v nultém iteračním kroku pak stanovíme vyřešením soustavy lineárních rovnic (2.27).
- Vypočítáme opravené hodnoty napětí a jejich úhlů na konci prvního iteračního kroku $U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}, \delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)}$ pro $i = 1, 2, \dots, n$.
- Zpřesněnými hodnotami napětí a úhlů napětí nahradíme jejich původní odhad a analogicky postupujeme v iteračním výpočtu. Iterační kroky (k) postupně nabývají hodnot (0), (1), (2), Výpočet se ukončí, až je dosaženo zadané přesnosti ε a jsou splněny nerovnice

$$\begin{aligned} |\Delta P_i^{(k)}| &\leq \varepsilon \\ |\Delta Q_i^{(k)}| &\leq \varepsilon \end{aligned} \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n.$$

Newtonova metoda velmi rychle konverguje a obvykle potřebný počet iterací závisí při zadané přesnosti ε málo na velikosti řešené sítě. Nevýhodou je poměrně značný nárok na paměť počítače při výpočtu diferencí kořenů. Současně řešení soustavy rovnic (2.27) značně prodlužuje výpočtový čas potřebný na jednu iteraci.

V úlohách, kde nejsou kladeny přílišné nároky na přesnost, lze přijmout určitá zjednodušení. Tyto zjednodušení vycházejí z faktu, že u sítí s převahou podélných reaktancí vedení a transformátorů se činné výkony v uzlech mění nepatrně s malou změnou velikosti napětí. Obdobně je tomu u výkonu jalových, kdy s malou změnou úhlů uzlových napětí se velikost jalových výkonů mění zanedbatelně. Přijmeme-li tyto předpoklady, lze do rovnic (2.27) dosadit, že

$$\left(\frac{\partial P}{\partial U}\right) \cong 0 \quad , \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial \delta}\right) \cong 0, \quad (2.36)$$

ta pak přejde na tvar, jenž vede ke zrychlení výpočtu

$$(\Delta P) \cong \left(\frac{\partial P}{\partial \delta}\right) \cdot (\Delta \delta) \quad , \quad (\Delta Q) \cong \left(\frac{\partial Q}{\partial U}\right) \cdot (\Delta U). \quad (2.37)$$

3 PŘECHODNÉ JEvy V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

Tato kapitola byla vytvořena podle [1], [2], [4], [5], [6], [8].

Ustáleným provozním stavem elektrizační soustavy rozumíme takový stav, při kterém je rovnováha všech veličin charakterizující její chod (napětí, proudy, výkony, atd.). V ustáleném stavu se nenachází přechodné jevy. Přechodný děj definujeme jako děj, který vzniká při přechodu libovolné soustavy z jednoho ustáleného stavu do nového, druhého ustáleného stavu. Přechodný děj většinou ustává v podobě tlumených oscilací. Příčinou přechodného stavu jsou abnormální provozní jevy vznikající přímo v hlavním obvodu v důsledku náhlého porušení izolace nebo při ovládnutí soustavy. Z hlediska rozdělení přechodných dějů v ES je důležité srovnání doby trvání zániku přechodných složek veličin chodu a jejich periody s periodou proudu se jmenovitým kmitočtem. Přechodné děje se rozdělují na:

1. Pomalé - elektromechanické

Perioda přechodných složek je tak veliká, že se v přechodném ději uplatní i setrvačné hmoty velkých rotačních strojů soustavy. Elektrická část soustavy se vzhledem k délce periody nahrazuje pomocí soustředěných parametrů. Doba trvání je řádově od desetin sekundy až po desítky sekund. Do skupiny patří přechodné děje související s náhlou změnou zatížení zdrojů, při kterém vzniká nerovnováha mezi elektrickým a mechanickým momentem na hřídeli generátorů, která ohrožuje synchronní chod.

2. Středně - rychlé elektromagnetické

Perioda volných složek je srovnatelná s periodou průmyslového proudu. Při tomto typu přechodných jevů zanedbáváme setrvačné hmoty rotačních strojů a elektrické části nahrazujeme soustředěnými parametry. Doba trvání je udávána řádově v desetinách sekundy. Nejčastější příčinou těchto jevů je zkratová porucha, což je náhlá změna izolačního odporu mezi krajními vodiči, středním vodičem nebo zemí v přímo uzemněné soustavě.

3. Rychlé přechodné jevy

Perioda přechodných složek je podstatně menší než u proudu jmenovitého kmitočtu. Vliv setrvačných hmot je zanedbatelný a elektrická část se řeší za pomoci náhradních obvodů s homogenně rozloženými parametry. Doba trvání se udává v mikrosekundách. Přechodné děje vznikají při úderu blesku do některého z prvků elektrizační soustavy nebo do jejich těsné blízkosti nebo jsou vyvolány spínacími pochody.

3.1 Zkrat v elektrizační soustavě

Zkratová porucha je nejrozšířenější poruchou v ES. Zkrat můžeme definovat jako chybné vodivé či nahodilé spojení mezi jednotlivými fázemi elektrizační soustavy, popř. mezi některou fází a zemí v soustavě účinně uzemněné. Dojde-li v ES k takovému spojení, dochází pak k nadměrnému růstu proudu nad běžnou provozní hodnotu v důsledku zmenšení impedance postižené části sítě. Tento proud ohrožuje zařízení ES svými dynamickými a tepelnými účinky. Mezi hlavními příčinami zkratové poruchy se stávají poruchy izolace (mechanické poškození,

přirozené znehodnocení, poškození izolace v důsledku zvýšeného elektrického namáhání), chybná manipulace. Vzniku zkratu nemůžeme vždy zabránit. Můžeme účelně uspořádat elektrické zařízení a jinými vhodnými prostředky omezit vznik zkratu na minimum, avšak nahodilým vznikům nejde zabránit. Proto se musí každé elektrické zařízení ES dimenzovat tak, aby bylo odolné vůči dynamickým a tepelným účinkům všech druhů zkratu.

Podle velikosti přechodného odporu se zkratové poruchy dělí na *zkraty dokonalé* (kovové), při nichž přechodový odpor je zanedbatelně malý, a *zkraty nedokonalé*, kdy v místě poruchy dochází k hoření oblouku nebo je styk vodičů jinak nedokonalý. Dokonalé zkraty způsobují největší tepelné a silové namáhání prvků elektrizační soustavy, a jelikož je nelze vyloučit, jsou rozhodující pro jejich dimenzování. Zato nedokonalé zkraty ohrožují okolí místa vzniku požárem.

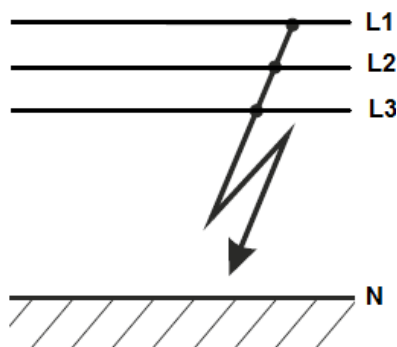
Podle způsobu zatížení třífázového zdroje zkratem se rozlišují zkraty:

- **souměrné zkraty:**

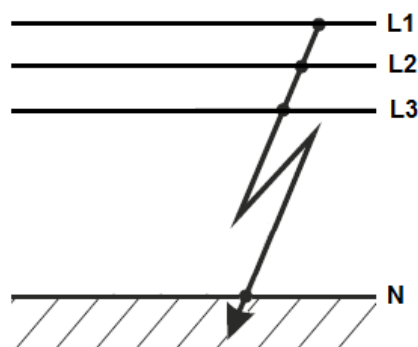
- trojfázový (*Obr. 3-1 a*) – spojení všech tří fází ES v daném místě;
- trojfázový zemní (*Obr. 3-1 b*) - spojení všech tří fází ES a zemí v daném místě;

- **nesouměrné zkraty:**

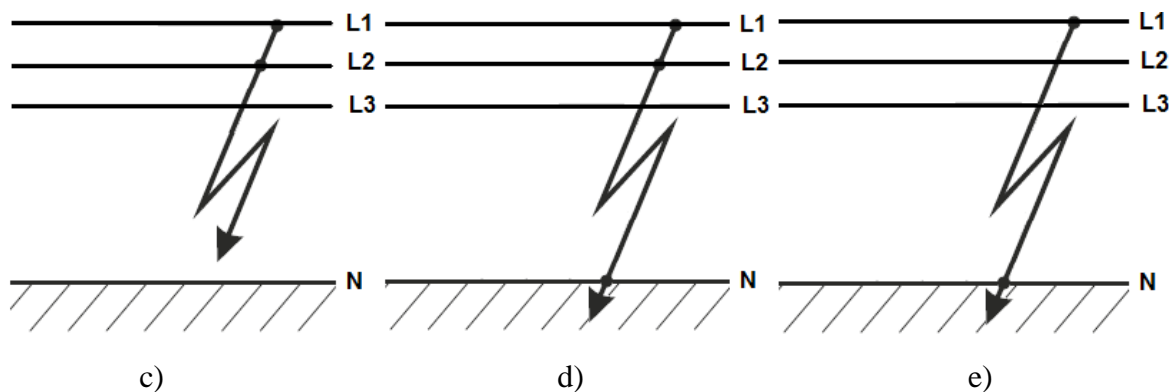
- dvoufázový (*Obr. 3-1 c*) - spojení dvou fází ve trojfázové soustavě v daném místě;
- dvoufázový zemní (*Obr. 3-1 d*) - spojení dvou fází a zemí ve trojfázové soustavě v daném místě;
- jednofázový (*Obr. 3-1 e*) - spojení jedné fáze se zemí ve trojfázové soustavě v daném místě;



a)



b)



Obr. 3-1: Druhy zkratů

Trojfázové zkraty se nejčastěji vyskytují u vedení kabelových. U vedení VVN jsou ve většině případů silové a tepelné účinky větší při nesouměrných poruchách než při poruchách souměrných. Jednofázové zkraty se nejčastěji vyskytují u venkovních vedení.

Doba trvání zkratové poruchy je závislá na použitém vypínacím zařízení či automatik odpojení. Při použití pojistek nebo jističů s magnetickým zhášením oblouku je doba trvání nejkratší, přibližně 0,1 s je závislá na velikosti zkratového proudu. Při použití ostatních druhů vypínacích zařízení a automatik je doba trvání obvykle 0,2 s až několik sekund.

3.2 Časový průběh zkratových proudů

Průběh zkratového proudu je přechodný děj, který přechází z normálního stavu na stav poruchový. Tento proud nám způsobuje nerovnováhu mezi elektrickým a magnetickým polem v ES. Každá změna proudu je spojena se změnou magnetického pole, každá změna napětí je spojena se změnou pole elektrického. Do rovnovážného stavu se soustava dostává pomocí tzv. přechodných složek proudu a napětí, jenž mají vlastní periodu příslušných obvodů. Tento přechod se nemůže odehrát v jediném okamžiku, ale trvá jistou dobu, závislou na elektromagnetické energii ve zkratovém obvodu. Pro stanovení časového průběhu proudu a napětí při zkratu máme několik zjednodušení:

- zanedbání příčné admitance prvků elektrizační soustavy,
- zanedbání odběrů,
- buzení synchronních zdrojů je konstantní.

Při přijetí těchto zjednodušujících předpokladů je okamžitá hodnota zkratového proudu neharmonickou funkcí času se třemi přechodnými složkami, které exponenciálně zanikají.

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left\{ \left[\left(I_k'' - I_k' \right) e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + \left(I_k' - I_k \right) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} = \quad (3.1)$$

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

kde: α je počáteční úhel fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratu (v čase $t = 0$ s),

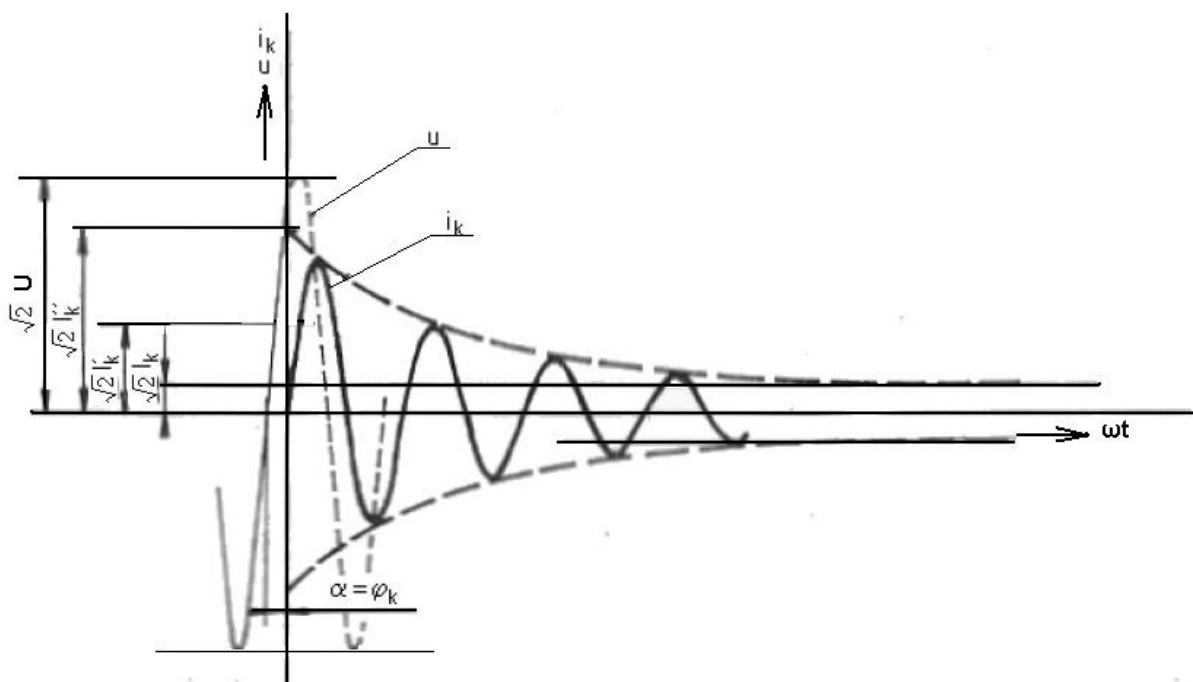
- φ_k je úhel impedance obvodu zkratového proudu (impedance mezi působišťem vnitřního napětí zdroje a místem poruchy),
- I_k'' je počáteční efektivní hodnota subtranzitního proudu- rázový zkratový proud,
- I_k' je počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu,
- I_k je efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu,
- τ_d'' je subtranzitní časová konstanta,
- τ_d' je tranzitní časová konstanta,
- τ_s je časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu,
- i_{ks} okamžitá hodnota souměrného střídavého zkratového proudu,
- i_{ka} okamžitá hodnota stejnosměrné (aperiodické) složky zkratového proudu,
- i_k okamžitá hodnota nesouměrného střídavého zkratového proudu.

Velikost zkreslení střídavého zkratového proudu stejnosměrnou složkou je závislá na okamžité hodnotě napětí při vzniku zkratové poruchy, tj. na úhlu α . V případě, že bude zkratový proud souměrný, stejnosměrná složka tedy nevznikne, když bude platit

$$\alpha - \varphi_k = 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \varphi_k \quad (3.2)$$

Potom se bude časový průběh okamžité hodnoty zkratového proudu (*obr. 3-2*) [5] řídit vztahem

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left[\left(I_k'' - I_k' \right) e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + \left(I_k' - I_k \right) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t) \quad (3.3)$$



Obr. 3-2: Průběh souměrného zkratového proudu

Největší stejnosměrná složka bude ve fázi, pro kterou v okamžiku vzniku zkratové poruchy bude počáteční fáze fázoru napětí rovna

$$\alpha = \varphi_k - \frac{\pi}{2}, \quad (3.4)$$

potom napětí v okamžiku zkratové poruchy nabude hodnoty

$$u_0 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.5)$$

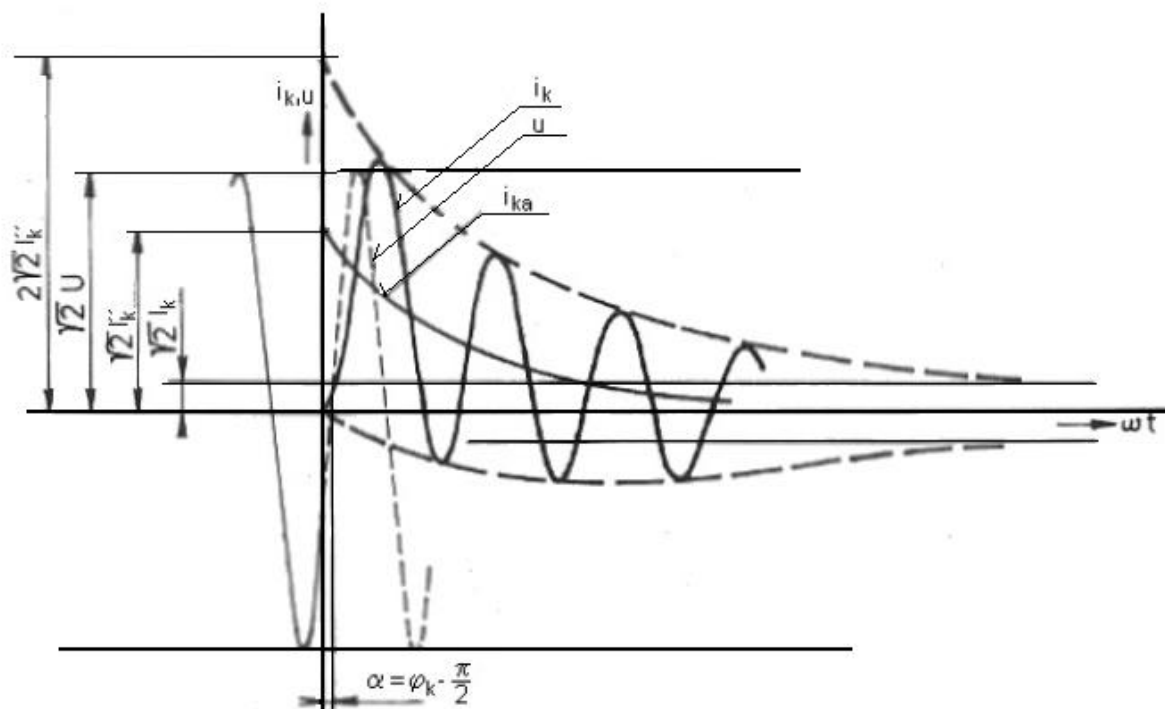
Časový průběh okamžité hodnoty zkratového proudu bude zkreslován stejnosměrnou složkou nejvíce a bude platit

$$i_k(t) = \sqrt{2} \left\{ I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \cos(\omega t) \right\} \quad (3.6)$$

Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou je na obr. 3-3.

Časové konstanty τ_d'' , τ_d' , τ_s závisí na parametrech zdrojů zkratového proudu, rezistanci a indukčnosti vnějšího obvodu zkratového proudu. Proud I_k'' , I_k' , I_k jsou závislé na impedancích synchronních strojů, na jejich vnitřních napětích a na impedanci vnějšího zkratového obvodu. Je patrné, že tyto proudy jsou závislé na buzení synchronních strojů a na jejich zatížení před zkratovou poruchou. Časové konstanty subtranzitní a stejnosměrné složky jsou několikanásobně menší a jejich závislost na vnější impedanci obvodu je zanedbatelná. U zkratové poruchy

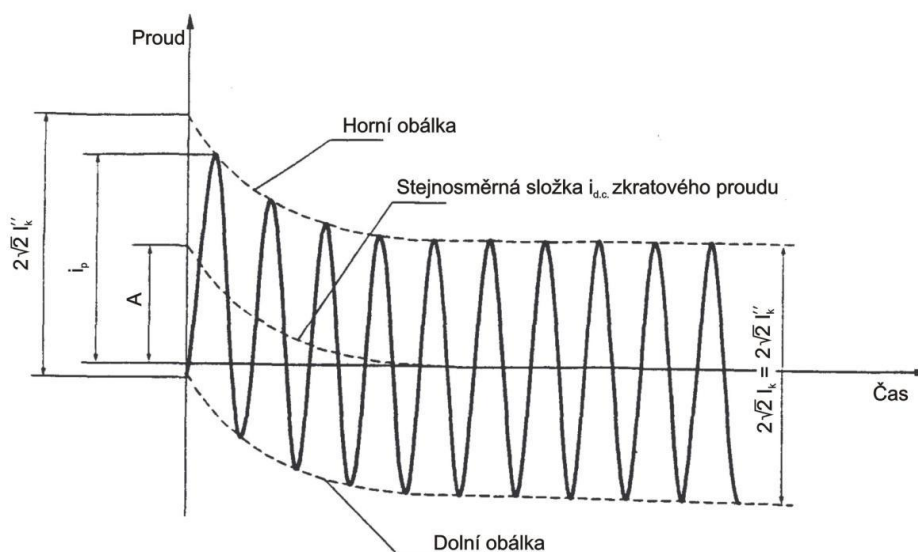
vzdálené od zdrojů je tedy ubývání zkratového proudu pomalejší a v některých případech zanedbatelné.



Obr. 3-3: Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou

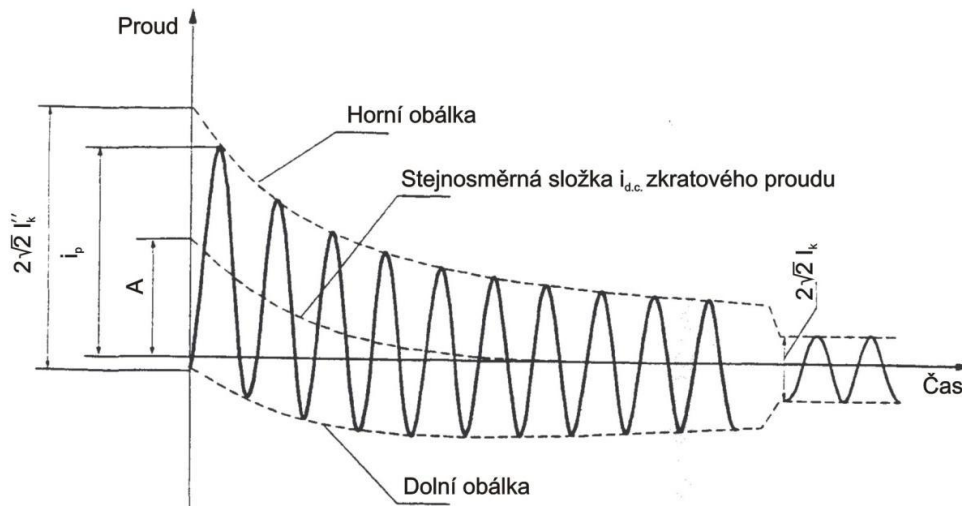
Podle normy [6] se zkraty rozdělují následovně:

- **Elektricky vzdálený zkrat** – zkrat, při kterém zůstává velikost střídavé složky zkratového proudu téměř konstantní. Tento typ zkratu se uvažuje, pokud je místo zkratu dostatečně elektricky vzdálené od zdroje zkratového proudu. Časový průběh tohoto zkratu je na obr. 3-4 [6].



Obr. 3-4: Časový průběh elektricky vzdáleného zkratu

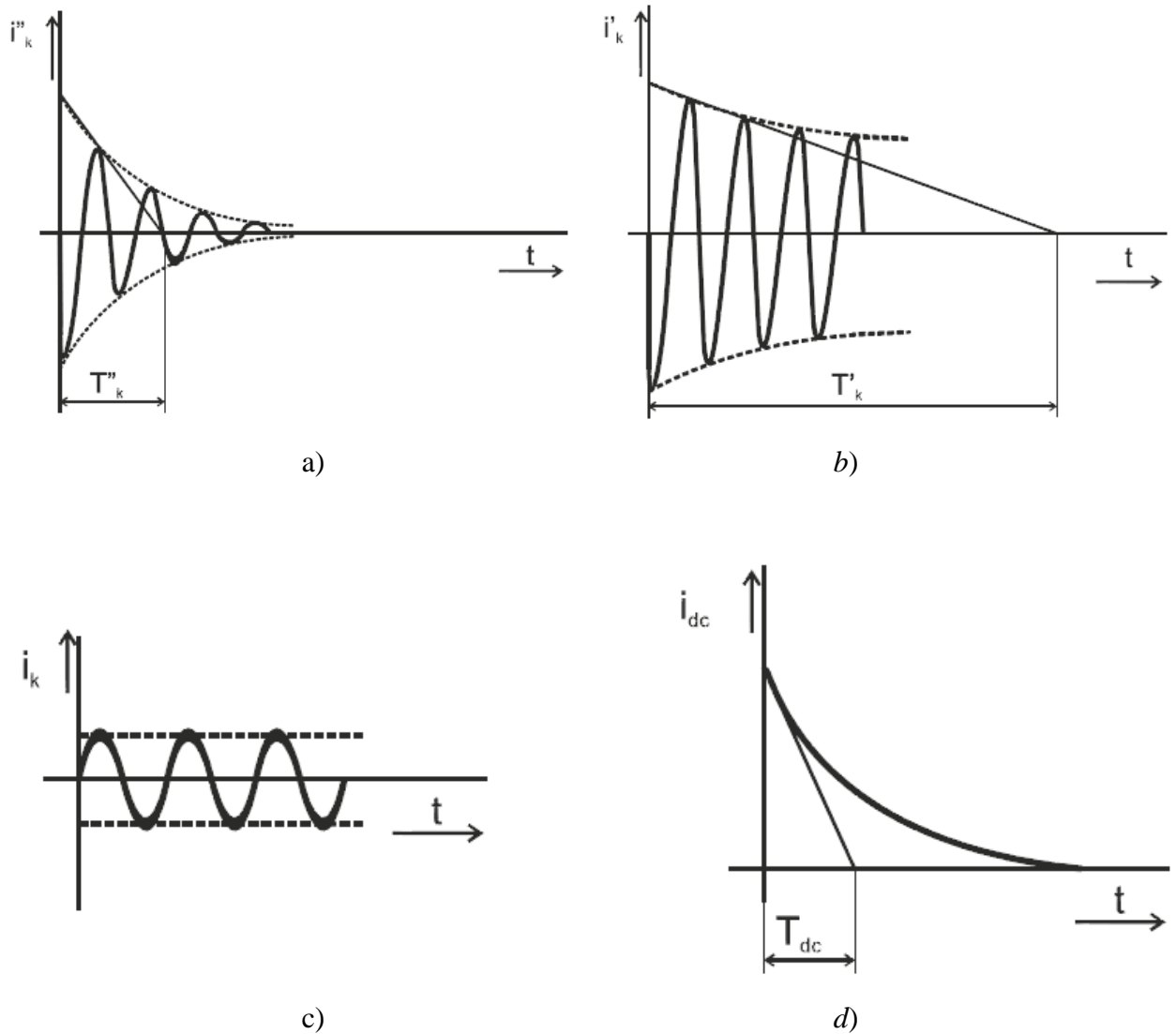
- **Elektricky blízký zkrat** – zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje. Časový průběh tohoto zkratu je na obr. 3-5.



Obr. 3-5: Časový průběh elektricky blízkého zkratu

Reálný časový průběh zkratu obsahuje podle normy [6] tyto základní složky:

- Rázovou (subtranzitní) složku $i_k''(t)$ – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_d'' . Projevuje se na začátku zkratu a trvá méně než desetinu sekundy, je to složka rychle doznívající. Obr. 3-6 a.
- Přechodnou (tranzitní) složku $i_k'(t)$ – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_d' . Jedná se o složku pomaleji doznívající. Doba zániku bývá zpravidla řádově v sekundách. Obr. 3-6 b.
- Ustálenou složku $i_k(t)$ – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a konstantní amplitudu. Obr. 3-6 c.
- Stejnoseměrnou (aperiodickou) složku $i_{dc}(t)$ – která představuje exponenciálně klesající stejnosměrný proud s časovou konstantou T_{dc} . Obr. 3-6 d.



Obr. 3-6: Složky zkratového proudu

3.3 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Pro dimenzování elektrických zařízení z hlediska účinků zkratových proudů je postačující znát určité hodnoty v průběhu zkratového proudu, které udává norma [6].

Charakteristické hodnoty zkratového proudu jsou následující:

- **Počáteční rázový zkratový proud I_k''** je efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu a určí se podle vztahu

$$I_k'' = k_1 \cdot \frac{c \cdot U_v}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|}, \quad (3.7)$$

- k je součinitel stanovený normou pro různé druhy zkratů,

- c je napěťový součinitel, jenž zahrnuje odhad vnitřního napětí zdrojů za jejich subtranzitní reaktanci v okamžiku zkratu, viz příslušná norma,
- U_v sdružené vztažené napětí, obvykle se volí napětí v místě zkratu,
- Z_k celková výpočtová impedance zkratového obvodu.

- **Nárazový zkratový proud** i_p je největší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává při prvním maximu v čase $t = 0,01s$ po vzniku zkratu. Nárazový zkratový proud je výchozí hodnotou při kontrole elektrických zařízení na účinky zkratových proudů. Právě v okamžiku první amplitudy nabývá totiž zkratový proud největší hodnoty a silové účinky jsou tak největší. V praktických zkratových výpočtech se proud i_p určuje z proudu I_k'' podle vztahu

$$i_p = \sqrt{2} \cdot K \cdot I_k'' \quad (3.8)$$

kde K představuje součinitel nárazového zkratového proudu, jež stanovuje norma [6].

- **Souměrný vypínací zkratový proud** I_b efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení. Pro zkraty elektricky vzdálené od synchronního stroje lze podle normy uvažovat, že souměrný vypínací zkratový proud je rovný počátečnímu rázovému zkratovému proudu.

$$I_b = I_k'' \quad (3.9)$$

- **Stejnoseměrná složka zkratového proudu** i_{dc} je střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze svojí původní hodnoty k nule. Stejnoseměrná složka zkratového proudu se vypočítá podle vztahu

$$i_{dc} = \sqrt{2} \cdot I_k'' \cdot e^{-2\pi f t \frac{R}{X}} \quad (3.10)$$

kde f je jmenovitý kmitočet
 t je doba trvání zkratu

- **Ekvivalentní oteplovací proud** I_{th} efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnoseměrnou složku a s časem se mění. Ekvivalentní oteplovací proud se používá při kontrole tepelných účinků zkratového proudu. Vypočítá se podle vztahu

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m+n} \quad (3.11)$$

kde m je časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu
 n je časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

Hodnoty součinitelů m a n udává norma [6].

- **Ustálený zkratový proud** I_k je efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, který protéká obvodem po odeznění přechodných dějů.
- **Doba trvání zkratu** T_k – doba od počátku vzniku zkratu do okamžiku oddělení kontaktů posledního pólu spínacího zařízení.

4 ZKRATOVÉ VÝPOČTY

Tato kapitola byla vytvořena podle [5], [6].

Před výpočtem zkratových proudů je třeba přijmout několik zjednodušujících předpokladů, které nám usnadní samotný výpočet. Tyto zjednodušující předpoklady se berou v úvahu především z důvodu rozsáhlosti ES, numerické náročnosti přesnějších metod a častému použití při provozu atd. Mezi tyto zjednodušující předpoklady patří:

1. Zdrojem zkratového proudu uvažujeme pouze větší synchronní stroje (generátory, motory a rotační kompenzátory o výkonu větším než cca. 0,5 MVA).
2. Neuvažují se impedance odběrů.
3. Uvažujeme vznik zkratu z chodu zdrojů zkratového proudu naprázdno nebo při jejich jmenovitém zatížení. Napětí zdrojů se považují za soufázová u všech zdrojů v náhradním schématu stejná. Zdroje lze potom připojit do jednoho uzlu náhradního schématu.
4. Neuvažují se proudy v příčných admitancích prvků elektrizační soustavy. Všechny prvky soustavy se nahrazují pouze podélnými impedancemi. U generátorů, transformátorů a vedeních zvn a vvn se uvažuje pouze podélná reaktance.
5. Zdroje zkratového proudu jsou uvažovány pomocí subtranzitní reaktance.
6. Uvažuje se dokonalý zkrat.
7. Soustava je před zkratem symetrická.
8. Předpokládá se, že všechny prvky ES mají lineární charakteristiku podélné impedance a parametry prvků jsou během zkratu neměnné.
9. Charakteristické hodnoty zkratového proudu jsou uvažovány při maximální stejnosměrné složce.

4.1 Zkratové výpočty ve skutečných hodnotách

Podélné impedance prvků zkratového obvodu \mathbf{Z}_n je nutno přepočítat na zvolenou vztažnou hladinu se vztažným napětím U_v s impedancí \mathbf{Z}_p . Vztažná hladina se volí obvykle s ohledem na místo poruchy. Hladina napětí, ve které se nachází zkratová porucha, je označena symbolem U_n .

$$\mathbf{Z}_p = \mathbf{Z}_n \cdot \left(\frac{U_v}{U_n} \right) \quad (4.1)$$

4.2 Zkratové výpočty v poměrných hodnotách

Při výpočtu zkratových proudů v poměrných hodnotách je vhodné volit za vztažnou hodnotu U_v jmenovitou hodnotu napětí ES s ohledem na místo poruchy. Hodnota vztažného výkonu S_v se volí libovolná.

Výpočet vztažného proudu I_v :

$$I_v = \frac{S_v}{\sqrt{3} \cdot U_v} \quad (4.2)$$

a vztažné impedance Z_v :

$$Z_v = \frac{U_v^2}{S_v}. \quad (4.3)$$

Všechny veličiny ve skutečných hodnotách, které jsou již přepočítány na vztažnou hladinu, lze přepočítat na poměrné hodnoty podělením vztažného hodnoty. Např.

$$s = \frac{S}{S_v}, \quad i = \frac{I}{I_v}, \quad u = \frac{U}{U_v}.$$

Výpočet poměrné přepočítané impedance z_p lze vypočítat následujícím způsobem.

$$z_p = \frac{Z_p}{Z_v} = \frac{Z_n \cdot \left(\frac{U_v}{U_n}\right)^2}{\frac{U_v^2}{S_v}} = Z_n \cdot \frac{S_v}{U_n^2} \quad (4.4)$$

4.3 Zkratové impedance elektrických zařízení

U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kebalů a podobných zařízení jsou si sousledná a zpětná zkratová impedance rovny $Z_1 = Z_2$.

Netočivá zkratová impedance se určuje ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (například zemí, zemnicím zařízením, nulovým vodičem, zemnicím vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). V tomto případě protéká zpětným vedením trojnásobek proudu netočivé složky.

Impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) se musí vynásobit korekčními součiniteli K_G , K_T , a K_S , K_{SO} pokud se zkratové proudy počítají pomocí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu.

4.3.1 Síťové napáječe

Je-li trojfázový zkrat napájen ze sítě, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový proud I_{kQ}'' v bodě připojení napáječe Q, pak zkratová impedance Z_Q se určí následovně

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''}. \quad (4.5)$$

Pokud známe poměr $\frac{R_Q}{X_Q}$, potom X_Q můžeme určit následovně

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (4.6)$$

kde U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe Q,
 I_{kQ}'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napáječe Q,
 c je napěťový součinitel pro napětí.

Je-li zkrat napájen transformátorem ze sítě vn, nebo vvn a zvn, u které je znám pouze počáteční souměrný rázový zkratový proud I_{kQ}'' v bodě připojení napáječe Q, pak lze souslednou zkratovou impedanci Z_{Qt} vztaženou ke straně transformátoru s nižším napětím určit následovně

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ}''} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (4.7)$$

kde t_r je jmenovitý převod transformátoru.

Netočivá zkratová impedance síťových napáječů se ve zvláštních případech může uvažovat v závislosti na konfiguraci vinutí a uzemnění uzlu transformátoru.

4.3.2 Synchronní generátory

Při výpočtu počátečních souměrných rázových zkratových proudů napájených přímo z generátoru bez blokového transformátoru, např. v průmyslových sítích, je třeba použít v sousledné složce korigovanou impedanci generátoru, která se vypočítá:

$$\mathbf{Z}_{GK} = K_G \cdot \mathbf{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX_d'') \quad (4.8)$$

s korekčním součinitelem

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (4.9)$$

kde c_{\max} je napěťový součinitel,
 U_n je jmenovité napětí soustavy,
 U_{rG} je jmenovité napětí generátoru,
 \mathbf{Z}_{GK} je korigovaná impedance generátoru,
 \mathbf{Z}_G je rázová impedance generátoru v sousledné soustavě,
 φ_{rG} je fázový úhel mezi proudem a napětím generátoru,
 x_d'' je poměrná rázová reaktance generátoru vztažená k jmenovité impedanci.

Pro zkratové impedance synchronních generátorů u zpětné soustavy se použije součinitel K_G z rovnice (4.9).

$$\mathbf{Z}_{2GK} = K_G \cdot (R_{2G} + jX_{2G}) = K_G \cdot \mathbf{Z}_{2G} \approx K_G \cdot \mathbf{Z}_G = K_G \cdot (R_G + jX_d''). \quad (4.10)$$

Pokud jsou hodnoty X_d'' a X_q'' různé, lze použít hodnotu $X_{2G} = (X_d'' + X_q'')/2$.

Pro zkratové impedance synchronních generátorů u netočivé soustavy se použije součinitel K_G z rovnice (4.9).

$$\mathbf{Z}_{0GK} = K_G \cdot (\mathbf{R}_{0G} + j\mathbf{X}_{0G}). \quad (4.11)$$

Pokud se vyskytuje impedance mezi uzlem generátoru a zemí, korekční součinitel K_G se nepoužije.

4.3.3 Transformátory

4.3.3.1 Dvouvinuťové transformátory

Sousledné zkratové impedance dvouvinuťových transformátorů $\mathbf{Z}_t = R_t + jX_t$ s odbočkami regulovatelnými při zatížení nebo bez nich je možné je vypočítat takto:

$$\mathbf{Z}_t = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rt}^2}{S_{rt}} \quad (4.12)$$

$$R_t = \frac{u_{Rr}}{100} \cdot \frac{U_{rt}^2}{S_{rt}} = \frac{P_{krt}}{3I_{rt}^2} \quad (4.13)$$

$$X_t = \sqrt{\mathbf{Z}_t^2 - R_t^2} \quad (4.14)$$

- kde U_{rt} je jmenovité napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,
 I_{rt} je jmenovitý proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí,
 S_{rt} je jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru,
 P_{krt} je jmenovité ztráty nakrátko transformátoru,
 u_{rt} je jmenovité napětí nakrátko v procentech,
 u_{Rr} je činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech.

Činná složka u_{Rr} se může vypočítat ze ztrát P_{krt} ve vinutí při jmenovitém proudu I_{rt} . Potřebné údaje pro výpočet $\mathbf{Z}_t = R_t + jX_t = \mathbf{Z}_1 = \mathbf{Z}_2$ lze najít na štítku transformátoru. Údaje o netočivé impedanci $\mathbf{Z}_{0t} = R_{0t} + jX_{0t}$ lze získat ze štítku nebo od výrobce.

4.3.3.2 Trojvinuťové transformátory

U trojvinuťových transformátorů lze sousledné zkratové impedance \mathbf{Z}_A , \mathbf{Z}_B , \mathbf{Z}_C vypočítat pomocí tří zkratových impedancí \mathbf{Z}_{AB} , \mathbf{Z}_{BC} , \mathbf{Z}_{AC} (vztaženou na stranu A) viz obr. 4-1 [6]. Výpočet impedancí je následující

$$\mathbf{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100} + j \frac{u_{XrAB}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rtA}^2}{S_{rtAB}} \quad (\text{strana C rozpojena}) \quad (4.15)$$

$$\mathbf{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100} + j \frac{u_{XrAC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rtA}^2}{S_{rtAC}} \quad (\text{strana B rozpojena}) \quad (4.16)$$

$$\mathbf{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrCB}}{100} + j \frac{u_{XrBC}}{100} \right) \cdot \frac{U_{rtA}^2}{S_{rtBC}} \quad (\text{strana A rozpojena}) \quad (4.17)$$

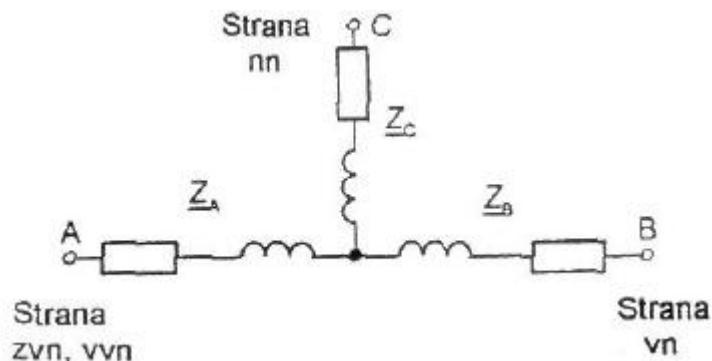
potom lze vypočítat sousledné zkratové impedance takto

$$\mathbf{Z}_A = \frac{1}{2}(\mathbf{Z}_{AB} + \mathbf{Z}_{AC} - \mathbf{Z}_{BC}) \quad (4.18)$$

$$\mathbf{Z}_B = \frac{1}{2}(\mathbf{Z}_{BC} + \mathbf{Z}_{AB} - \mathbf{Z}_{AC}) \quad (4.19)$$

$$\mathbf{Z}_C = \frac{1}{2}(\mathbf{Z}_{AC} + \mathbf{Z}_{BC} - \mathbf{Z}_{AB}). \quad (4.20)$$

- kde U_{rTA} je jmenovité napětí na straně A,
 S_{rtAB} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a B,
 S_{rtAC} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami A a C,
 S_{rtBC} je jmenovitý zdánlivý výkon mezi stranami B a C,
 u_{RrAB}, u_{XrAB} jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeny v procentech mezi stranami A a B,
 u_{RrAC}, u_{XrAC} jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeny v procentech mezi stranami A a C,
 u_{RrBC}, u_{XrBC} jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeny v procentech mezi stranami B a C.



Obr. 4-1: Náhradní schéma trojvinutového transformátoru

Netočivé impedance trojvinutových transformátorů lze získat od výrobců transformátorů.

4.3.4 Venkovní vedení a kabely

Souslednou zkratovou impedanci $\mathbf{Z}_L = R_L + jX_L$ lze vypočítat z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteče vodičů. Zpětná zkratová impedance vedení je rovna sousledné zkratové impedanci.

Činná rezistence vyjádřená na jednotku délky R'_L venkovních vedení při teplotě 20 °C lze vypočítat ze jmenovitého průřezu q_n a rezistivity ρ :

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n}. \quad (4.21)$$

Reaktanci na jednotku délky X'_L pro venkovní vedení je možné vypočítat za předpokladu, že je provedena transpozice vedení:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (4.22)$$

kde d je geometrická střední vzdálenost mezi vodiči,

r je poloměr jednoduchého vodiče,

n je počet vodičů ve svazku,

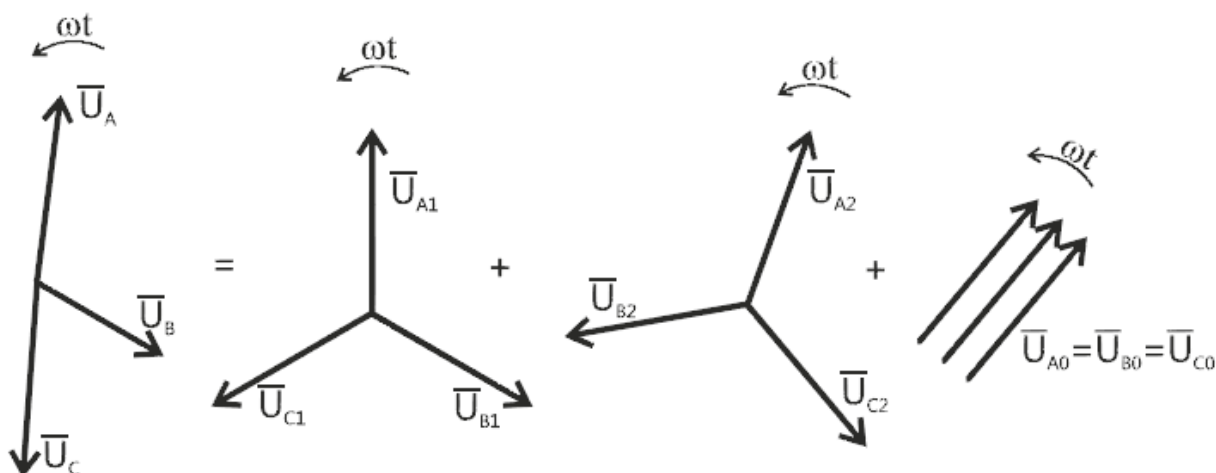
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Impedance kabelů lze odečíst z příruček či z údajů od výrobce.

5 ZKRAT V SOUSTAVĚ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK

Tato kapitola byla vytvořena podle [4], [8].

V ES se kromě souměrných zkratových poruch se velmi často vyskytují i poruchy nesouměrné. Jedná se o poruchy, při kterých je postižena pouze jedna či dvě fáze. Mezi takové zkratové poruchy patří zejména jednofázový či dvoufázový zkrat. Tyto případy se řeší metodou souměrných složek. Metoda je založena na faktu, že jakákoliv nesouměrná soustava (reprezentovaná fázory \mathbf{U}_A , \mathbf{U}_B , \mathbf{U}_C) může být rozložena do tří samostatných soustav. A to na soustavu souslednou (synchronní) – značí se indexem (1), zpětnou (inverzní) - index (2) či nulovou (netočivou) - index (0) viz obr. 5-1 [8].



Obr. 5-1: Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory

Při uvažování jednoduché symetrické trojfázové soustavy při chodu naprázdno, ve které je impedance alternátoru (zdroj sousledné složkové soustavy) a impedance vnější části obvodu, si můžeme vyjádřit fázory napětí v soustavě souměrných složek:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 + \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_B &= \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_1 + \mathbf{a} \mathbf{U}_2 + \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_C &= \mathbf{a} \mathbf{U}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_2 + \mathbf{U}_0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Analogicky si můžeme vyjádřit i proudy:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_A &= \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_B &= \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_C &= \mathbf{a} \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Pro zpětnou transformaci složkových napětí a proudů platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= \frac{1}{3}(\mathbf{U}_A + \mathbf{a}\mathbf{U}_B + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_C) \\ \mathbf{U}_2 &= \frac{1}{3}(\mathbf{U}_A + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_B + \mathbf{a}\mathbf{U}_C) \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{U}_0 = \frac{1}{3}(\mathbf{U}_A + \mathbf{U}_B + \mathbf{U}_C)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + \mathbf{a}\mathbf{I}_B + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_C) \\ \mathbf{I}_2 &= \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_B + \mathbf{a}\mathbf{I}_C) \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\mathbf{I}_0 = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C)$$

kde \mathbf{a} je operátor natočení, pro který můžeme psát

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \mathbf{a}^2 &= e^{j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\mathbf{a} + \mathbf{a}^2 + 1 = 0.$$

Označíme-li souměrné složky vnitřního napětí alternátoru \mathbf{U}_{i1} , \mathbf{U}_{i2} , \mathbf{U}_{i0} , souměrné složky napětí v místě zkratu \mathbf{U}_1 , \mathbf{U}_2 , \mathbf{U}_0 , složkové proudy \mathbf{I}_1 , \mathbf{I}_2 , \mathbf{I}_0 a složkové impedance \mathbf{Z}_1 , \mathbf{Z}_2 , \mathbf{Z}_0 , pak platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i1} &= \mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_{i2} &= \mathbf{Z}_2 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_{i0} &= \mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_0 + \mathbf{U}_0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Alternátor je vždy zdrojem pouze sousledné složky napětí, proto můžeme psát:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{i1} &= \mathbf{U}_i = c \cdot \mathbf{U}_f \\ \mathbf{U}_{i2} &= 0 \\ \mathbf{U}_{i0} &= 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

kde \mathbf{U}_f je fázor napětí na svorkách alternátoru,

c je napěťový součinitel. Při chodu naprázdno má hodnotu $c = 1$.

Dosazením rovnice (5.6) do rovnice (5.7) můžeme psát základní rovnice složkových soustav:

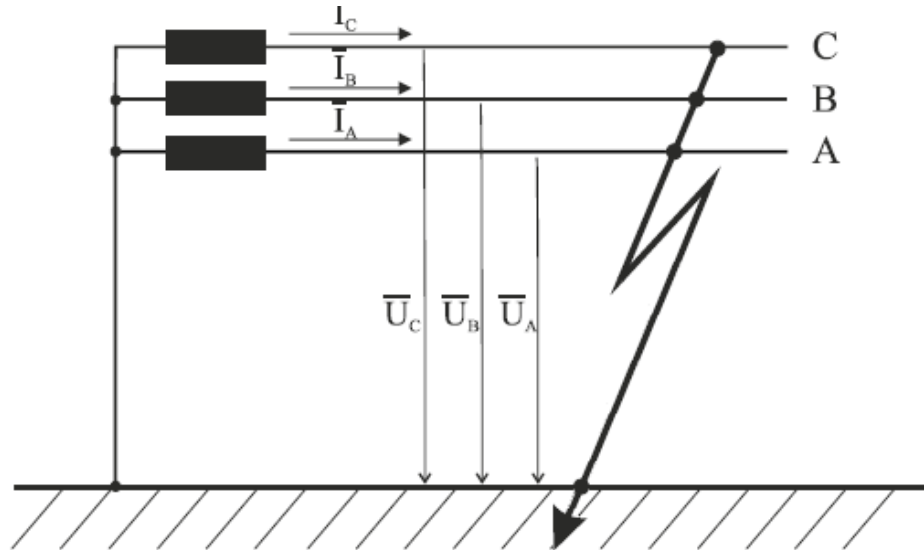
$$\begin{aligned} \mathbf{U}_i &= \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\ 0 &= \mathbf{Z}_2 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2 \\ 0 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_0 + \mathbf{U}_0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

Z rovnic (5.8) lze vyvodit závěry:

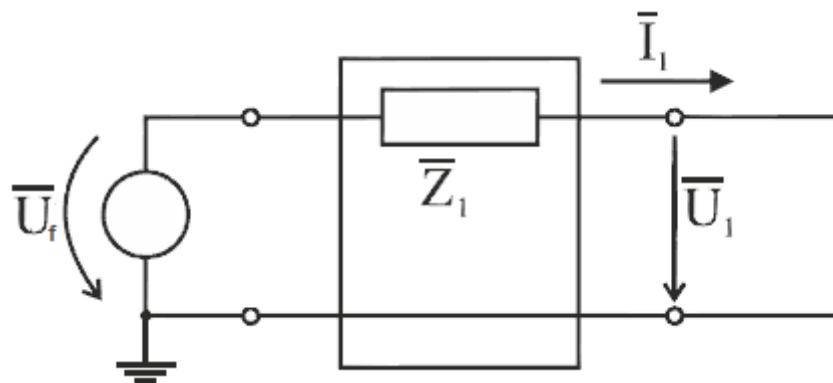
1. Zdrojem napětí sousledné složkové soustavy je alternátor.

2. Původcem proudu zpětné a netočivé soustavy je napěťová nesymetrie v místě poruchy. V místě poruchy potřebujeme určit 6 veličin ($U_1, U_2, U_0, I_1, I_2, I_0$), proto je třeba doplnit uvedené tři základní rovnice dalšími třemi rovnicemi podle uvažovaného typu zkratu.

5.1 Trojfázový zemní zkrat



Obr. 5-2: Trojfázový zemní zkrat



Obr. 5-3: Náhradní schéma při trojfázovém zkratu

Jak můžeme vidět z obr. 5-2 a obr. 5-3 [8], tento typ zkratu poskytuje v místě poruchy rovnici:

$$U_A = U_B = U_C = 0 \quad (5.9)$$

Dosazením do rovnice (5.1) dostáváme:

$$\begin{aligned} 0 &= U_1 + U_2 + U_0 \\ 0 &= a^2 U_1 + a U_2 + U_0 \\ 0 &= a U_1 + a^2 U_2 + U_0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Po sečtení rovnic zjistíme, že $U_0 = 0$. Použijeme-li tuto hodnotu při odečtení druhé rovnice od první, tak dostáváme:

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_0 = 0. \quad (5.11)$$

Dosazením rovnice (5.11) do (5.8) dostaneme:

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_1}; \quad \mathbf{I}_2 = 0; \quad \mathbf{I}_0 = 0. \quad (5.12)$$

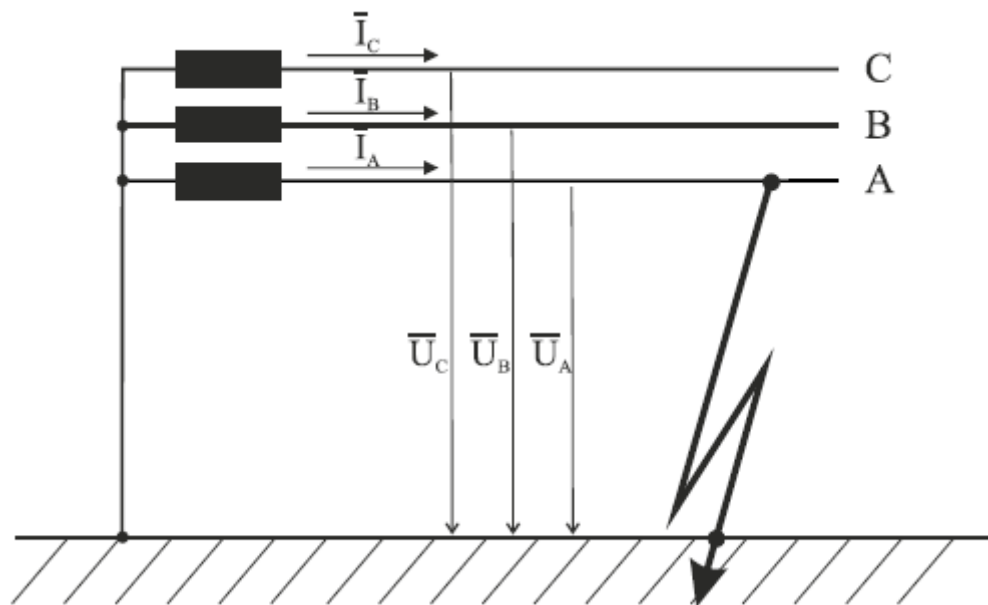
Zkratové proudy v jednotlivých fázích při respektování chodu naprázdno jsou potom:

$$\mathbf{I}_A = \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_1}; \quad \mathbf{I}_B = \mathbf{a}^2 \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_1}; \quad \mathbf{I}_C = \mathbf{a} \frac{\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_1}. \quad (5.13)$$

Z rovnice (5.13) je vidno, že při trojfázovém zkratu se uplatní pouze sousledná soustava.

5.2 Jednofázový zkrat

Jednofázový zkrat znázorňuje obr. 5-4. Náhradní schéma jednofázového zkratu je na obr. 5-5 [8].



Obr. 5-4: Jednofázový zkrat

Tento typ zkratu poskytuje v místě poruchy tyto rovnice:

$$\mathbf{U}_A = 0; \quad \mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C = 0 \quad (5.14)$$

Dosazením rovnice (5.14) do (5.1) a (5.2) dostáváme:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 + \mathbf{U}_0 = 0 \\ \mathbf{I}_B &= \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0 = 0 \\ \mathbf{I}_C &= \mathbf{a} \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Provedeme-li odečet posledních dvou rovnic z rovnice (5.15), potom bude:

$$(\mathbf{a} - \mathbf{a}^2)\mathbf{I}_1 + (\mathbf{a}^2 - \mathbf{a})\mathbf{I}_2 = 0 \quad (5.16)$$

Při vhodné úpravě zjišťujeme, že $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$. Dosadíme-li rovnici (5.16) do rovnice (5.2), získáváme $\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$. Základní rovnice (5.8) pak přejdou na tvar:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_i &= \mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\ 0 &= \mathbf{Z}_2 \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_2 \\ 0 &= \mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_0 \end{aligned} \quad (5.17)$$

Sečtením těchto rovnic a respektováním rovnice (5.15) dostaneme:

$$\mathbf{U}_i = (\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0) \cdot \mathbf{I}_1 \quad (5.18)$$

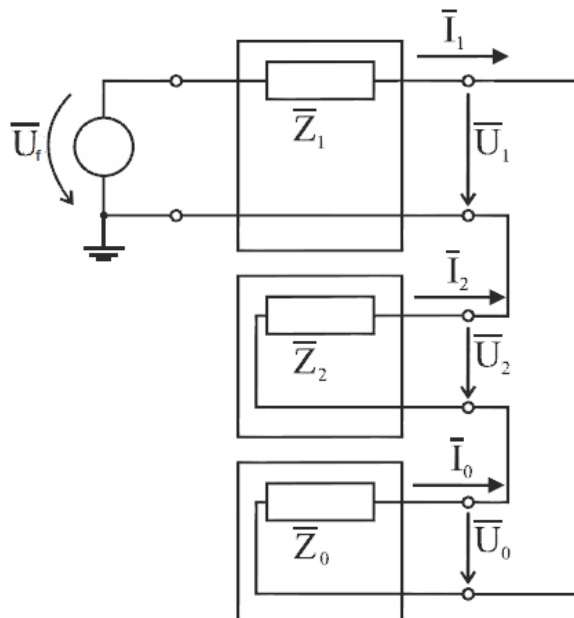
odkud

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_0 = \frac{\mathbf{U}_i}{(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0)}. \quad (5.19)$$

Zkratový proud ve fázi A bude:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_0 = \frac{3 \cdot \mathbf{U}_f}{(\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0)}. \quad (5.20)$$

Z rovnice (5.20) je vidno, že u jednofázového zkratu je potřeba určit všechny tři složkové impedance.



Obr. 5-5: Náhradní schéma při jednofázovém zkratu

6 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA SPOLEČNOSTI E.ON - OBLAST VÝCHOD

Tato kapitola byla vytvořena podle [8], [9], [11].

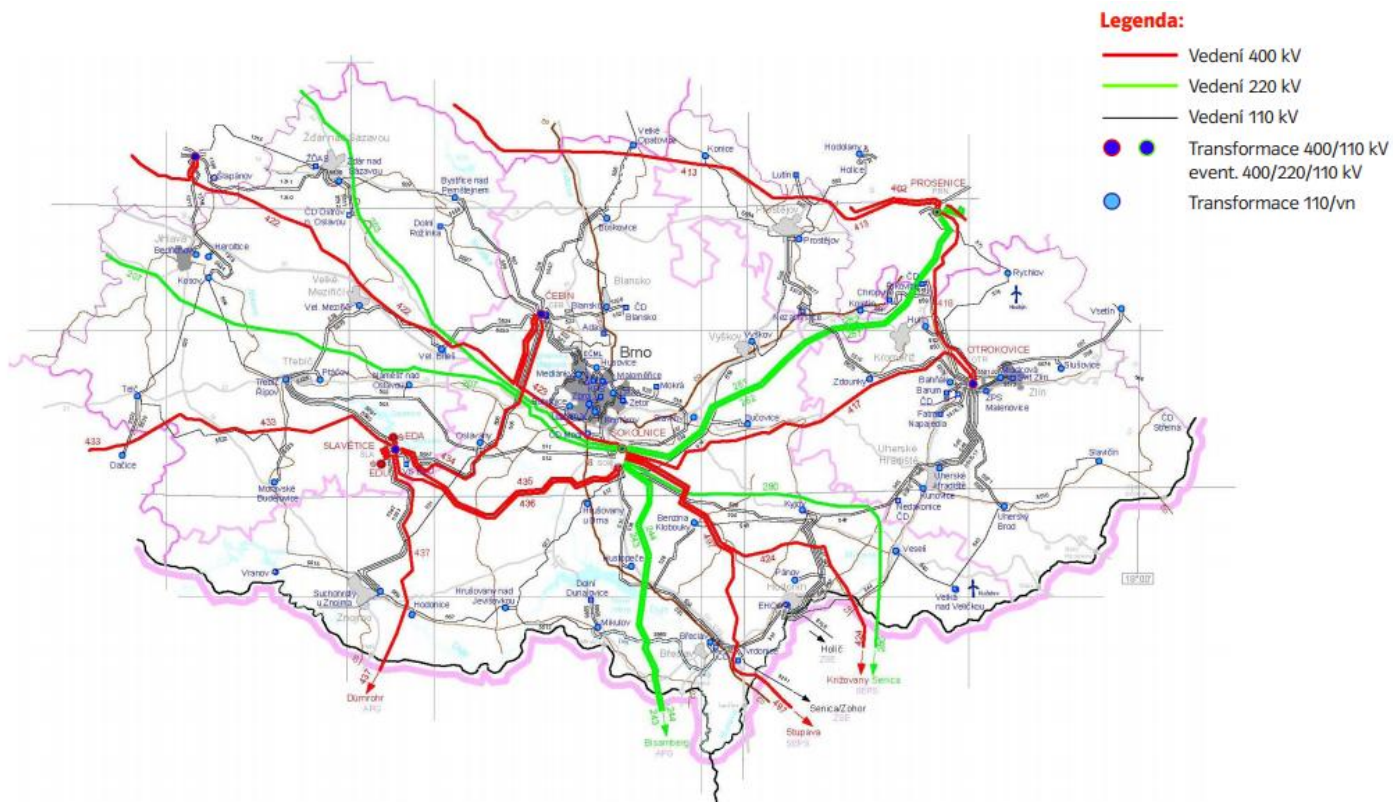
Distribuční soustava (DS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV (s výjimkou vybraných vedení a zařízení 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy patřící společnosti ČEPS, a.s.) a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV a 35 kV, sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. DS jsou zřizovány a provozovány ve veřejném zájmu. Posláním DS je bezpečně a hospodárně zásobovat odběratele elektřinou v požadovaném množství a kvalitě v daném čase a poskytovat distribuční služby uvnitř i vně soustavy provozovatele DS. Kromě toho zajišťuje systémové a podpůrné služby na úrovni DS.

Distribuční soustava 110 kV tvoří základní pilíř distribuční soustavy. Sítě zajišťují tranzit elektřiny z uzlových transformoven zvn/vvn a vvn/vvn do transformoven 110/vn kV. Do těchto sítí je vyveden výkon řady elektráren o výkonech desítek MW, jsou provozovány zpravidla jako okružní a zvolenému způsobu provozu odpovídá i použitý systém chránění distančními ochranami. Sítě se vyznačují spolu s vedeními zvn a vvn přenosové soustavy vysokou spolehlivostí, velice nízkou četností poruch a díky způsobu provozu a zálohování většina poruch při správném působení ochranných systémů nezpůsobí přerušování dodávky elektřiny odběratelům. Vedení jsou nejčastěji konstruována jako dvojítá (dvě vedení na jednom stožáru), nicméně v ČR se vyskytují i vedení jednoduchá, trojitá a čtyřnásobná.

Distribuční sítě vn jsou tvořeny venkovními a kabelovými vedeními provozovanými v převážné míře s napětím 22 kV, resp. 35 kV. Z minulosti jsou v provozu sítě s napětím 3, 6 a 10 kV. Tyto sítě ale nejsou dále rozvíjeny a jsou v rámci unifikace nahrazovány napěťovou hladinou 22 kV, resp. 35 kV. V drtivé většině jsou tyto sítě provozovány paprskově případně formou průběžného rozvodu. V městských aglomeracích toto řešení většinou umožňuje řadu propojení do dvojpaprskového nebo okružního rozvodu.

Distribuční soustavu společnosti E.ON spravuje E.ON Distribuce, a.s., která provozuje distribuční sítě na napěťové hladině velmi vysokého napětí - 110 kV, vysokého napětí - 22 kV a nízkého napětí (NN) - 0,4 kV. Distribuční síť E.ON Distribuce, a.s. je převážně napájena z přenosové soustavy společnosti ČEPS, a.s. prostřednictvím nadřazených transformací 400/220/110 kV v majetku ČEPS, a.s.. Distribuční síť je dále (částečně) napájena z výroben E.ON, závodních elektráren a ostatních lokálních zdrojů. Mezi další provozovatele distribučních soustav na území České republiky patří společnosti ČEZ Distribuce, a.s. a PRE Distribuce, a.s. E.ON Distribuce, a.s. provozuje distribuční soustavu v oblasti západ (Jihočeský kraj) a v oblasti východ (Jihomoravský kraj). Jelikož se práce zaměřuje na oblast východ, proto se dále budeme zabývat pouze touto oblastí. Schéma distribuční sítě pro oblast východ je na *obr. 6-1* [11].

Na zásobovacím území E.ON Distribuce, a.s.-oblast východ je napájení distribuční soustavy 110 kV zajištěno z nadřazené soustavy vvn (400 kV resp. 220 kV) prostřednictvím transformoven Čebín (400/ 110 kV), Otrokovice (400/ 110 kV), Slavětice (400/ 110 kV), Sokolnice (400/ 220/ 110 kV), a Mírovka (400/110 kV), kde je vyčleněný transformátor 1x250 MVA pro zásobování části oblasti východ.



Obr. 6-1 :Schéma distribuční sítě 110 kV - oblast východ

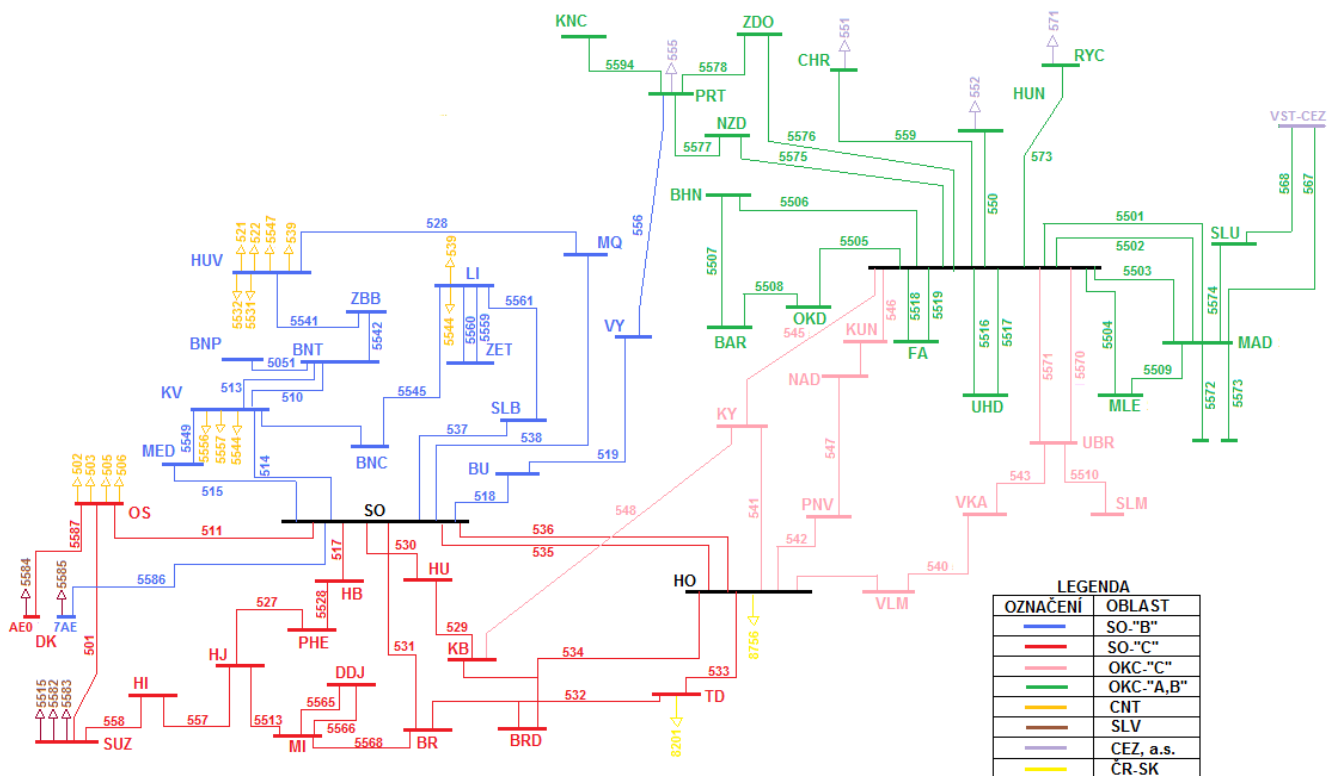
6.1 Rozvodny napájené z uzlové oblasti Sokolnice

Před samostatným výpočtem ustáleného chodu a zkratových poměrů v uzlové oblasti Sokolnice je zapotřebí se s touto oblastí seznámit. UO Sokolnice spadá pod zásobovací území E.ON Distribuce, a.s.-oblast východ a obsahuje celkem dvacet devět rozvodnů vvn/vn, jež jsou propojeny třiceti devíti vedeními 110 kV. Rozvodny jsou dále využívány k napájení místní distribuční sítě 22 kV, průmyslových objektů a rozvodnů, které vlastní společnost České dráhy, a.s.

Zjednodušené schéma uzlových oblastí Sokolnice a Otrokovice je znázorněno na obr. 6-2. Jsou zde vyznačeny jednotlivé rozvodny vvn/vn, které jsou označeny pomocí tzv. dispečerských zkratk. Dále jsou zde vyznačena vedení s příslušným číselným označením.

Jak můžeme vidět z obr. 6-2, celá UO Sokolnice je rozdělena na oblast SO-„B“ a na oblast SO-„C“. Oblast SO-„B“ je vyznačena modrou barvou a je napájena z přípojnicového systému „B“, jež se nachází v rozvodně Sokolnice. Tento přípojnicový systém je napájen z přenosové soustavy transformátorem 400/110 kV. Dále jsou v této oblasti znázorněny také hraniční vedení mezi UO Sokolnice a UO Čebín (CNT) mající oranžovou barvu. Hraniční vedení jsou nakresleny se šipkou.

Oblast SO-„C“ je ve schématu na obr. 6-2 vyznačena červenou barvou a tato oblast je napájena z přípojnicového systému „C“ z téže rozvodny. Přípojnicový systém je napájen z PS pomocí dvou transformátorů 220/110 kV. V této oblasti se nachází taktéž hraniční vedení mezi UO Sokolnice a UO Čebín, ale také vedení mezistátní. Mezistátní vedení jsou označeny žlutou barvou.



Obr. 6-2: Zjednodušené schéma UO Sokolnice a UO Otrokovice

Pzn: Jedná se pouze o zjednodušující schéma uzlových oblastí. Označení a názvy jednotlivých oblastí byly voleny s ohledem na lepší orientaci ve schématu.

6.1.1 Popis rozveden a vedení v UO Sokolnice

V tab. 6-1 jsou vypsány názvy všech rozveden příslušející do UO Sokolnice včetně jejich dispečerských zkratk. Tučně vyznačené rozvodny spadají do oblasti SO-, „C“, kterým se budeme nadále věnovat. Rozvodny z oblasti SO-, „B“ nebudou mít na výsledek našeho výpočtu vliv, proto se jim nadále věnovat nebudeme.

Tab. 6-1: Rozvodny v UO Sokolnice

Rozvodna	Dispečerská zkratka	Rozvodna	Dispečerská zkratka
Brno-Černovice	BNC	Hodonín	HO
Brno-Husovice	HUV	Hrušovany nad Jevišovkou	HJ
Brno-Komárov	KV	Hrušovany u Brna	HB
Brno-Líšeň	LI	Hustopeče	HU
Brno-Příkop	BNP	Klobouky	KB
Brno-Teplárna	BNT	Mikulov	MI
Brno-Zbrojovka	ZBB	Modřice u Brna, ČD	MED
Brno-Zetor	ZET	Mokrá, Cementárna	MQ
Břeclav	BR	Oslavany	OS
Břeclav, ČD	BRD	Pohořelice	PHE
Bučovice	BU	Slavkov u Brna	SLB
Dolní Dunajovice	DDJ	Sokolnice	SO
Dukovany, v.s. AE0	DK	Suchohrdly u Znojma	SUZ
Dukovany, v.s. AE7	DK	Tvrdonice, PZP	TD
Hodonice	HI		

V tab. 6-2 jsou vypsána vedení 110 kV, která spadají do námi označené oblasti SO-„C“. Těmito vedeními se budeme zabývat při výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV v UO Sokolnice. V tabulce je uvedeno číselné označení jednotlivých vedení, počáteční a koncový uzel vedení, maximální povolený proud vedení (I_{\max}) a přenosová schopnost vedení (P_{\max}).

Tab. 6-2: Seznam vedení 110 kV v SO-„C“

Vedení	Poč. uzel	Kon. uzel	I_{\max}	P_{\max}
			(A)	(MW)
501	OS	SUZ	455	80
511	SO-„C“	OS	455	80
517	SO-„C“	HB	680	80
517A	SO-„C“	PHE	680	80
527	PHE	HJ	455	80
529	HU	KB	455	80
530	SO-„C“	HU	455	80
531	SO-„C“	BR	455	80
532_TD	BR	TD	455	80
532_BRD	BR	BRD	360	60
533	HO-„B“	TD	455	80
534_KB	HO-„B“	KB	455	80
534_BRD	HO-„B“	BRD	360	60
535	SO-„C“	HO-„B“	455	80
536	SO-„C“	HO-„B“	455	80
557	HJ	HI	455	80
558	SUZ	HI	455	80
5513	HJ	MI	455	80
5565	MI	DDJ	180	35
5566	MI	DDJ	180	35
5568	BR	MI	530	95
5587	OS	DK	480	85

Pzn: Jelikož jsou vedení 532 a 534 do tvaru „T“, je označení těchto vedení odlišeno koncovým uzlem (viz obr. 7-1).

Detailnější popis rozveden vvn/vn v oblasti SO-„C“ je následující:

Břeclav, ČD (BRD)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Rozvodnu vlastní ČD, a.s. a využívá se pro napájení trakčního vedení. Nainstalovány jsou zde dva distribuční transformátory T1, T2 (110/27 kV) každý o jmenovitém výkonu 13,3 MVA.

Břeclav (BR)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Nainstalovány jsou zde dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Rozvodna napájí distribuční síť 22 kV.

Dolní Dunajovice (DDJ)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem, která napájí distribuční síť 22 kV. V rozvodně jsou nainstalovány dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) se jmenovitými výkony 10 MVA.

Dukovany, vlastní spotřeba AE0 (DK)

Rozvodna, která je využívána pro napájení vlastní spotřeby jaderné elektrárny Dukovany. Obsahuje dva distribuční transformátory T01, T02, se jmenovitými výkony 40 MVA. Transformátor T01 je napájen z oblasti Slavětice, T02 z oblasti Sokolnice.

Hodonice (HI)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem, která napájí distribuční síť 22 kV. Jsou zde nainstalovány dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) o jmenovitých výkonech 25 MVA.

Hodonín (HO)

Rozvodna s dvojitým systémem přípojníc, který může být spojený dvěma příčnými spínači přípojníc. U obou přípojníc je také podélné dělení, čímž mohou vzniknout celkem čtyři sekce přípojníc. Jedna přípojnice bývá využívána pro potřeby rozvodny Sokolnice, druhá pro potřeby rozvodny Otrokovice. Do rozvodny pracují dva turbogenerátory se jmenovitým výkonem 63 MVA. Výkon turbogenerátorů je vyveden přes blokové transformátory T8 a T10 o jmenovitém výkonu 63 MVA. Jsou zde nainstalovány tři distribuční transformátory T6, T7, T13 (110/22 kV) každý o jmenovitém výkonu 40 MVA a dva distribuční transformátory T12, T5 (110/6,3 kV) o výkonech 16 MVA a 12,5 MVA. Rozvodna slouží mimo jiné také pro napájení distribuční sítě 22 kV. Vedení 8756 spojuje rozvodnu Hodonín s rozvodnou Holič (SK).

Hrušovany nad Jevišovkou (HJ)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Do rozvodny pracuje z místního cukrovaru AGRANA jeden turbogenerátor o jmenovitém výkonu 12 MVA. V rozvodně jsou nainstalovány dva distribuční transformátory T101 a T102 (110/22 kV) o jmenovitých výkonech 25 MVA a 40 MVA. Rozvodna dále slouží k napájení distribuční sítě 22 kV.

Hrušovany u Brna (HB)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem, která napájí distribuční síť 22 kV. Jsou zde nainstalovány dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) o jmenovitých výkonech 40 MVA.

Hustopeče (HU)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Nainstalovány jsou zde dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Rozvodna napájí distribuční síť 22 kV.

Klobouky (KB)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. V rozvodně jsou nainstalovány tři distribuční transformátory T101, T102 (110/6 kV) a T103 (110/22 kV). Transformátory T101 a T102 o jmenovitých výkonech 10 MVA slouží k napájení průmyslového objektu, které vlastní společnost

ČEPRO, a.s. Transformátor T103 o jmenovitém výkonu 25 MVA slouží k napájení distribuční sítě 22 kV.

Mikulov (MI)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. V rozvodně jsou nainstalovány dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) o jmenovitých výkonech 25 MVA a 40 MVA. Další distribuční rozvodna napájející síť 22 kV.

Oslavany (OS)

Rozvodna se dvěma přípojnicovými systémy. Za normálního provozu je příčný spínač přípojnic rozepnutý a jedna přípojnice je využívána pro oblast Sokolnice a druhá přípojnice pro oblast Čebín. Jsou zde nainstalovány tři distribuční transformátory T101, T102, T103 (110/22 kV), jejichž jmenovité výkony jsou 40 MVA (T102, T103) a 25 MVA (T101). Rozvodna napájí distribuční síť 22 kV.

Pohořelice (PHE)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Je zde nainstalován jeden distribuční transformátor T101 (110,22 kV) se jmenovitým výkonem 25 MVA. Rozvodna slouží k napájení distribuční sítě 22 kV.

Sokolnice (SO)

Jedná se o hlavní rozvodnu v uzlové oblasti Sokolnice. Rozvodna obsahuje tři přípojnicové systémy a jednu přípojnicu pomocnou. Jsou zde použity příčné i podélné spínače hlavních přípojnic. Rozvodna je napájena z přenosové soustavy pomocí transformátoru T402 (400/110 kV) se jmenovitým výkonem 350 MVA a dále pomocí transformátorů T202, T203 (220/110 kV) o jmenovitých výkonech 200 MVA. Za normálního provozu je jeden příčný spínač sepnut kvůli můstkovému zapojení dvou transformátorů. V rozvodně se dále nacházejí tři distribuční transformátory T101, T102, T103 (110/22 kV). Transformátory T101, T103 mají jmenovité výkony 40 MVA a transformátor T102 25 MVA. Rozvodna také slouží k napájení distribuční sítě 22 kV.

Suchohrdly u Znojma (SUZ)

Rozvodna se dvěma přípojnicovými systémy. Za normálního provozu je příčný spínač přípojnic rozepnutý a jedna přípojnice je využívána pro oblast Sokolnice a druhá přípojnice pro oblast Slavětice. Jsou zde nainstalovány tři distribuční transformátory T101, T102, T103 (110/22 kV) se jmenovitými výkony 40 MVA. Rozvodna napájí distribuční síť 22 kV.

Tvrdonice, PZP (TD)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Nainstalovány jsou zde dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22kV) každý o jmenovitém výkonu 25 MVA a 16 MVA. Rozvodna slouží pro napájení distribuční sítě 22 kV. Pomocí vedení 8201 je rozvodna spojena s rozvodnou Senica (SK).

6.2 Rozvodny napájené z uzlové oblasti Otrokovice

UO Otrokovice patří tak jako UO Sokolnice pod zásobovací území E.ON Distribuce, a.s.-oblast východ. Tato uzlová oblast obsahuje dvacet pět rozveden vvn/vn, které jsou propojeny třiceti devíti vedeními 110 kV.

UO Otrokovice je znázorněna na *obr. 6-2* a je opět rozdělena na dvě menší oblasti OKC-„A, B“ a OKC-„C“. Oblast OKC-„A, B“ je vyznačena zelenou barvou a je napájena z přípojnicových systémů „A“, „B“ z rozvodny Otrokovice (OKC). Do každého přípojnicového systému pracuje jeden transformátor 400/110 kV. U takto zapojených transformátorů se může využít můstkového zapojení. Tato UO je propojena pomocí hraničního vedení s oblastí Prosenice, kterou spravuje společnost ČEZ, a.s.

Oblast OKC-„C“ je vyznačena růžovou barvou a je napájena z přípojnicového systému „C“. Do tohoto přípojnicového systému pracuje jeden transformátor 400/110 kV. Do této oblasti patří taktéž rozvodna Hodonín, která byla uváděna v UO Sokolnice, protože jeden přípojnicový systém zpravidla využívá UO Sokolnice a druhý UO Otrokovice. Vedení 548 propojuje UO Otrokovice a UO Sokolnice

6.2.1 Popis rozveden a vedení v UO Otrokovice

V *tab. 6-3* jsou vypsány názvy všech rozveden příslušející do UO Otrokovice včetně jejich dispečerských zkratk. Tučně vyznačené rozvodny spadají do oblasti OKC-„C“, kterým se budeme nadále věnovat. Rozvodny z oblasti OKC-„A, B“ nebudou mít na výsledek našeho výpočtu výrazný vliv, proto se jim nadále věnovat nebudeme.

Tab. 6-3: Rozvodny v UO Otrokovice

Rozvodna	Dispečerská zkratka	Rozvodna	Dispečerská zkratka
Hulín	HUN	Otrokovice, ČD	OKD
Hodonín	HO	Pánov	PNV
Konice	KNC	Prostějov	PRT
Kunovice	KUN	Rychlov	RYC
Kyjov	KY	Slavičín	SLM
Malenovice, ZPS	MLE	Slušovice	SLU
Mladcová	MAD	Uherské Hradiště	UHD
Napajedla, Fatra	FA	Uherský Brod	UBR
Nedakonice, ČD	NAD	Velká nad Veličkou	VKA
Nezamyslice, ČD	NZD	Veselí na Moravě	VLM
Otrokovice	OKC	Zdounky	ZDO
Otrokovice, Bahňák	BHN	Zlín, Svit	SVI
Otrokovice, Barum	BAR		

V *tab. 6-4* jsou vypsána vedení 110 kV, která spadají do námi označené oblasti OKC-„C“. Těmito vedeními se budeme zabývat při výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV v UO Sokolnice. V tabulce je uvedeno číselné označení jednotlivých vedení, počáteční a koncový uzel vedení, maximální povolený proud vedení (I_{\max}) a přenosová schopnost vedení (P_{\max}).

Tab. 6-4: Seznam vedení v oblasti OKC-"C"

Vedení	Poč. uzel	Kon. uzel	I_{\max}	P_{\max}
			(A)	(MW)
540	VLM	VKA	455	80
541	HO-"A"	KY	455	80
542	HO-"A"	PNV	455	80
543	UBR	VKA	455	80
544	HO-"A"	VLM	455	80
545	OKC-"C"	KY	455	80
546	OKC-"C"	KUN	455	80
547	NAD	PNV	455	80
548	KY	KB	530	95
5510	UBR	SLM	320	50
5540	KUN	NAD	455	80
5570	OKC-"C"	UBR	455	80
5571	OKC-"C"	UBR	455	80

Detailnější popis rozveden vvn/vn v oblasti OKC-,"C" je následující:

Kunovice (KUN)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. V rozvodně jsou nainstalovány dva distribuční transformátory T101 a T102 (110/22 kV). Transformátor T101 má jmenovitý výkon 40 MVA, transformátor T102 25 MVA. Slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Kyjov (KY)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Do rozvodny pracují z Teplárny Kyjov, a.s. tři turbogenerátory o jmenovitém výkonu 10 MVA. V rozvodně jsou nainstalovány dva distribuční transformátory T101 a T102 (110/22 kV) každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Vedení 538 spojuje oblasti Sokolnice a Otrokovice.

Nedakonice, ČD (NAD)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Rozvodnu vlastní ČD, a.s. a využívá se pro napájení trakčního vedení. Nainstalovány jsou zde dva distribuční transformátory T101 a T102 (110/22 kV), každý o jmenovitém výkonu 10 MVA a dva transformátory T1, T2 (110/27 kV) každý o jmenovitém výkonu 12,5 MVA.

Otrokovice (OKC)

Jedná se o hlavní rozvodnu v uzlové oblasti Otrokovice. Rozvodna obsahuje tři přípojnicové systémy a jednu přípojnicovou pomocnou. Jsou zde použity příčné i podélné spínače hlavních přípojníc. Za normálního provozu je jeden příčný spínač sepnut kvůli můstkovému zapojení dvou transformátorů. Rozvodna je napájena z přenosové soustavy přes tři transformátory T401, T402, T403 (400/110 kV) každý o jmenovitém výkonu 350 MVA. Každý transformátor zpravidla pracuje do jednoho přípojnicového systému.

Pánov (PNV)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem, která slouží k napájení distribuční sítě 22 kV. Jsou zde nainstalovány dva distribuční transformátory T101 a T102 (110/22 kV) o jmenovitém výkonu 40 MVA.

Slavičín (SLM)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Nainstalovány jsou zde dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Rozvodna napájí distribuční síť 22 kV.

Uherský Brod (UBR)

Rozvodna se dvěma přípojnicovými systémy. Za normálního provozu rozvodna pracuje pouze s jedním přípojnicovým systémem, druhý se využívá jako záložní. Jsou zde nainstalovány dva distribuční transformátory T101, T102 (110/22 kV) s jmenovitými výkony 40 MVA. Rozvodna napájí distribuční síť 22 kV.

Velká nad Veličkou (VKA)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Jsou zde nainstalovány tři distribuční transformátory T101, T102, T103 (110,22 kV) o jmenovitých výkonech 25 MVA. Transformátor T103 se využívá pro napájení distribuční sítě 22 kV. Ostatní transformátory napájí přilehlý průmyslový objekt.

Veselí na Moravě (VLM)

Rozvodna s jedním přípojnicovým systémem. Nainstalovány jsou zde čtyři distribuční transformátory T101 a T102 (110/6 kV), T103 a T104 (110/22 kV). Transformátory T101, T102 slouží k napájení průmyslového objektu a jejich jmenovité výkony jsou 16 MVA. Pro napájení distribuční sítě 22 kV jsou využity transformátory T103, T104 s jmenovitými výkony 25 MVA a 40 MVA.

7 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PŘI SAMOSTATNÉM PROVOZU UO

Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV i výpočet zkratových poměrů v síti 110 kV byly vypočítány na Dispečinku 110 kV společnosti E.ON, který sídlí v Brně. Naše konfigurace sítě 110 kV je ze dne 7. 3. 2013. Výpočty byly provedeny v programu SINAUT Spektrum 4.4, jenž je určen k řízení distribučních soustav 110 kV. Program je navržen takovým způsobem, že si může v jakémkoliv okamžiku stáhnout aktuální konfiguraci sítě a může s ní libovolně pracovat, aniž by ovlivnil reálný chod sítě. Při výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV program využívá modifikovanou Newtonovu iterační metodu (kapitola 2.3) s přesným názvem Newton-Raphsonova iterační metoda. Vedení jsou při výpočtech nahrazována π -články.

U výpočtu ustáleného chodu sítě při samostatném provozu UO Sokolnice-Otrokovice i při paralelním provozu těchto uzlových oblastí se zaměříme na kontrolu napěťových poměrů v uzlech sítě. V těchto uzlech může být maximální dovolená odchylka napětí $\pm 10\%$ od napětí jmenovitého. Dále budeme sledovat zatížení vedení 110 kV, zatížení transformátorů a jejich ztráty činného výkonu. Veličiny budou posuzovány pro obě varianty zapojení sítě 110 kV a budou porovnávány s veličinami při změně konfigurace sítě.

U výpočtu zkratových poměrů budeme sledovat velikosti trojfázových a jednofázových výkonů a proudů v daných uzlech sítě pro obě varianty zapojení sítě 110 kV. Uzly budou kontrolovány s ohledem na jejich jmenovitou zkratovou odolnost. Dále provedeme porovnání veličin při změně zapojení sítě 110 kV. Z výsledků porovnání sledovaných hodnot poté provedeme vyhodnocení daných zapojení.

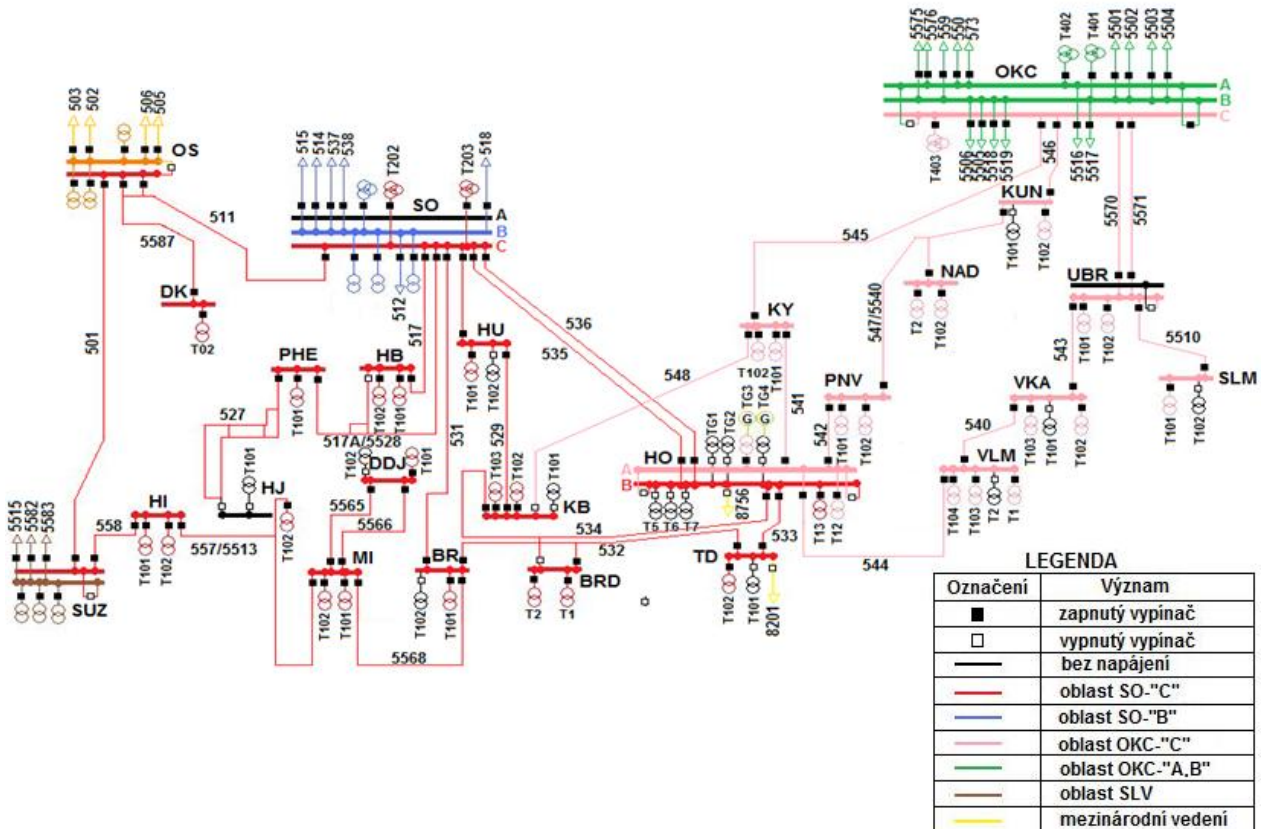
7.1 Samostatný provoz UO Sokolnice-Otrokovice

Schéma sítě 110 kV při samostatném provozu UO Sokolnice-Otrokovice je znázorněno na *obr. 7-1*. Samostatné uzlové oblasti byly vytvořeny pomocí rozvodny Hodonín, kde jsou vypnuty oba příčné spínače přípojnic a vznikají dvě samostatné oblasti. Přípojnicový systém „A“ z rozvodny Hodonín pracuje do UO Otrokovice a přípojnicový systém „B“ do UO Sokolnice.

V rozvodně Sokolnice se nacházejí tři přípojnicové systémy „A“, „B“ a „C“, z nichž pracují pouze přípojnice „B“, „C“ a přípojnice „A“ je v beznapěťovém stavu (viz *obr. 7-1*). UO Sokolnice byla rozdělena na oblasti SO-„B“ a SO-„C“. Oblast SO-„C“ je napájena z přípojnicového systému „C“, do které pracují dva transformátory 220/110 kV (T202, T203). Oblast SO-„B“ je napájena z přípojnicového systému „B“. Touto oblastí se nebudeme nadále zabývat, protože jak již bylo uvedeno výše, tato oblast spolupracuje spíše s UO Čebín, a tudíž nebude mít výrazný vliv na výpočet.

Rozvodna Otrokovice se skládá taktéž ze tří přípojnicových systémů „A“, „B“ a „C“. Přípojnice „A“, „B“ napájí oblast OKC-„A, B“ a přípojnice „C“ oblast OKC-„C“. Přípojnicový systém „C“ je napájen pomocí transformátoru 400/110 kV (T403). Oblastí OKC-„A, B“ se nebudeme nadále zabývat.

Při takto nastavené konfiguraci sítě 110 kV byl vypočítán ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV pro samostatný provoz UO Sokolnice-Otrokovice. Vypočítané hodnoty při tomto zapojení budeme brát za referenční a budou se porovnávat s vypočítanými hodnotami při paralelním provozu těchto uzlových oblastí.



Obr. 7-1: Schéma sítě 110 kV při samostatném provozu UO Sokolnice-Otrokovice

7.2 Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV v UO Sokolnice

Výpočty ustáleného chodu sítě 110 kV v samostatném provozu UO Sokolnice (oblast SO-, „C“) jsou uvedeny v následujících tabulkách. V *tab. 7-1* jsou zobrazeny napěťové poměry v jednotlivých uzlech sítě 110 kV. Z tabulky je zřejmé, že napětí ve všech uzlech je v dovoleném rozsahu $110\text{kV} \pm 10\%$ (tj. 99 kV až 121 kV) a blíží se horní dovolené hranici z důvodu minimalizace ztrát. V rozvodně Sokolnice je také splněna tolerance napětí $119\text{kV} \pm 1\text{kV}$. Dále je taktéž v *tab. 7-1* uveden úhel napětí δ .

Zatížení vedení spadající do oblasti SO-, „C“ jsou v *tab. 7-2*. Jsou zde vypsány parametry v počátečním uzlu (značeny indexem 1) a koncovém uzlu (značeny indexem 2). Mezi sledované parametry patří napětí U , úhel napětí δ , činný výkon P , jalový výkon Q , proud vedením I_v , ztráty činného výkonu ΔP_v a procentní zatížení vedení i_{z_v} vzhledem k maximálnímu dovolenému proudu vedení. Z tabulky je patrné, že žádné vedení není přetíženo a má poměrně velkou rezervu zatížení (splňuje kritérium N-1). Nejvíce zatížené jsou vedení č. 531 (30,35 %), 530 (24,97 %) a 558 (22,70 %) – v *tab. 7-2* vyznačeny červeně. Ztráty činného výkonu na vedení 110 kV v této oblasti mají hodnotu $\Delta P_{v-c} = -1,470\text{ MW}$.

Tab. 7-1: Napěťové poměry v rozvodnách v oblasti SO-, C“

Rozvodna	U	δ	Rozvodna	U	δ
	(kV)	(°)		(kV)	(°)
BR	115,7	-5,85	KB	116,8	-5,15
BRD	115,7	-5,82	MI	115,3	-6,52
DDJ	115,3	-6,51	OS	117,6	-4,77
DK	117,6	-4,78	PHE	118,3	-4,17
HB	118,4	-4,04	SO-"C"	118,5	-3,91
HI	115,6	-6,29	SUZ	116,0	-6,04
HO-"B"	116,6	-5,25	TD	115,9	-5,67
HU	117,4	-4,72			

Tab. 7-2: Zatížení vedení v oblasti SO-, C“

Vedení	U_1	δ_1	P_1	Q_1	U_2	δ_2	P_2	Q_2	I_v	ΔP_v	i_{z_v}
	(kV)	(°)	(MW)	(MVar)	(kV)	(°)	(MW)	(MVar)	(A)	(MW)	(%)
501	117,6	-4,77	-20,4	-3,2	116,0	-6,04	20,2	4,3	103,0	-0,193	22,64
511	118,5	-3,91	-20,7	-2,4	117,6	-4,77	20,6	3,1	102,1	-0,129	22,44
517	118,5	-3,91	-11,6	-2,3	118,4	-4,04	11,6	3,3	58,9	-0,009	8,66
517A	118,5	-3,91	-9,7	0,3	118,5	-4,02	9,7	0,8	47,5	-0,006	6,99
527	118,3	-4,17	0,0	1,4	118,3	-4,18	0,0	0,0	0,0	0,000	0,00
529	117,4	-4,72	-12,0	-2,0	116,8	-5,15	11,9	2,8	60,7	-0,039	13,34
530	118,5	-3,91	-22,6	-5,0	117,4	-4,72	22,4	5,6	113,6	-0,143	24,97
531	118,5	-3,91	-27,1	-6,4	115,7	-5,85	26,7	7,2	138,1	-0,418	30,35
532_BR	115,8	-5,8	-12,1	-0,3	115,7	-5,85	12,1	0,3	60,6	-0,004	13,32
532_TD	115,9	-5,67	-19,7	-2,3	115,8	-5,80	19,6	2,4	98,7	-0,019	21,69
532_BRD	115,8	-5,8	-7,5	-2,1	115,7	-5,82	7,5	2,2	39,0	-0,003	10,83
533	116,6	-5,25	-19,3	-6,4	115,9	-5,67	19,2	6,8	101,4	-0,071	22,29
534_HO	116,7	-5,23	-1,6	-1,2	116,6	-5,25	1,6	1,9	12,2	-0,001	2,68
534_KB	116,8	-5,15	-1,6	0,5	116,7	-5,23	1,6	1,2	9,7	-0,001	2,13
534_BRD	115,7	-5,82	0,0	0,0	116,7	-5,23	0,0	0,1	0,3	0,000	0,08
535	118,5	-3,91	-14,5	-1,9	116,6	-5,25	14,4	3,9	73,7	-0,169	16,20
536	118,5	-3,91	-14,8	-2,6	116,6	-5,25	14,6	4,6	75,8	-0,156	16,66
557	115,6	-6,29	-8,2	-1,4	115,3	-6,53	8,2	2,1	42,4	-0,015	9,32
558	116,0	-6,04	-20,2	-4,3	115,6	-6,29	20,2	4,5	103,3	-0,039	22,70
5513	115,3	-6,52	-0,3	0,9	115,3	-6,53	0,3	-0,2	1,8	0,000	0,40
5528	118,5	-4,02	-9,7	-0,8	118,3	-4,17	9,7	1,2	47,7	-0,009	10,48
5565	115,3	-6,52	0,0	0,0	115,3	-6,51	0,0	0,2	1,0	0,000	0,56
5566	115,3	-6,52	-0,2	0,3	115,3	-6,51	0,2	-0,1	1,3	0,000	0,72
5568	115,7	-5,85	-11,4	0,6	115,3	-6,52	11,4	0,5	57,1	-0,041	10,77
5587	117,6	-4,77	-0,1	0,1	117,6	-4,78	0,1	0,6	3,2	0,000	0,67
									ΔP_{v-c}	-1,470	

Zatížení transformátorů v oblasti SO-„C“ je v tab. 7-3. V tabulce je vždy označení příslušného transformátoru, který v rozvodně pracuje, odebíraný (dodávaný) činný P a jalový Q výkon ze strany 110 kV, odebíraný (dodávaný) proud I_t ze strany 110 kV, jmenovitý proud transformátoru I_n , činné ztráty transformátoru ΔP_t a jeho procentní zatížení $i_{z,t}$ vzhledem k jmenovitému proudu. Pro lepší přehlednost jsou zde uvedeny i přenosové transformátory (T202, T203) patřící společnosti ČEPS, a.s. Z tabulky je patrné, že do této oblasti dodávají výkon z přenosové soustavy transformátory T202, T203 z rozvodny Sokolnice a transformátor T101 z rozvodny Hrušovany nad Jevišovkou, do které pracuje turbogenerátor z místního cukrovaru AGRANA (v tab. 7-3 vyznačeny zeleně). Dodávaný výkon do této oblasti má hodnotu 129,5 MW. U všech transformátorů je dostatečně velká rezerva zatížení z důvodu možného budoucího rozšíření sítě či proměnlivého denního zatížení. Nejvíce zatížené transformátory jsou v rozvodnách BR (T101-67,95%), HU (T101-41,37%) a KB (T103-37,33%) – tab. 7-3 vyznačeny červeně. Ztráty činného výkonu na transformátorech mají hodnotu $\Delta P_{t-c} = -0,689$ MW.

Tab. 7-3: Zatížení transformátorů v oblasti SO-„C“

Rozvodna	Označení	P	Q	I_t	I_n	ΔP_t	$i_{z,t}$
		(MW)	(MVA _r)	(A)	(A)	(MW)	(%)
BR	T101	-27,4	-8,2	142,7	210	-0,145	67,95
BRD	T1	-3,7	-0,6	18,9	70	-	27,00
	T2	-3,7	-1,6	20,4	70	-	29,14
DDJ	T101	-0,2	-0,3	2	52	-	3,85
DK	T02	-0,1	-0,6	3,2	210	-	1,52
HB	T101	-0,0	0,0	0,2	210	-0,021	0,10
	T102	-11,6	-3,3	58,7	210	-0,055	27,95
HI	T101	-3,8	-0,6	19,5	131	-0,036	14,89
	T102	-8,1	-2,5	42,4	131	-0,043	32,37
HJ	T102	8,5	1,5	219,5	1050	-0,046	20,90
HO-„B“	T13	-5,4	-0,8	26,9	210	-0,043	12,81
HU	T101	-10,4	-3,5	54,2	131	-0,031	41,37
KB	T102	-0,9	-0,3	5,0	52	-	9,62
	T103	-9,4	-3,0	48,9	131	-0,049	37,33
MI	T101	-0,0	0,0	0,1	131	-0,018	0,08
	T102	-11,3	-1,5	57,0	210	-0,041	27,14
PHE	T101	-9,7	-2,6	49,0	131	-0,029	37,40
SO-„C“	T202	53,6	21,3	280,9	1050	-0,015	26,75
	T203	67,4	0,9	328,4	1050	-0,028	31,28
TD	T102	0,5	-4,5	22,4	84	-	26,67
						ΔP_{t-c}	-0,689

Celkové ztráty činného výkonu ΔP_c v oblasti SO-„C“ jsou uvedeny v tab. 7-4. Celkové ztráty činného výkonu mají hodnotu -2,159 MW.

Tab. 7-4: Ztráty činného výkonu v oblasti SO-„C“

ΔP_{v-c}	ΔP_{t-c}	ΔP_c
(MW)	(MW)	(MW)
-1,470	-0,689	-2,159

7.3 Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV v UO Otrokovice

Ustálený chod sítě 110 kV byl vypočítán i pro samostatný provoz UO Otrokovice (oblast OKC-„C“). Výsledky výpočtu napěťových poměrů jsou uvedeny v tab. 7-5. Z tabulky je zřejmé, že všechna napětí v uzlech jsou v dovolené toleranci $110\text{kV}\pm 10\%$.

Zatížení vedení spadající do oblasti OKC-„C“ jsou v tab. 7-6. Všechna vedení jsou taktéž provozována s dodatečně velkou rezervou zatížení pro splnění kritéria N-1. Nejvíce zatížené jsou vedení č. 5510 (39,47%), 5570 (37,36%) a 5571 (37,36%). Ztráty činného výkonu na vedení 110 kV v této oblasti mají hodnotu $\Delta P_{v-c} = -1,374$ MW.

V tab. 7-7 je uvedeno zatížení transformátorů v oblasti OKC-„C“. Do této oblasti je dodáván výkon prostřednictvím přenosového transformátoru T403 z rozvodny Otrokovice a transformátoru T8 z přípojnicového systému „A“ rozvodny Hodonín, který spolupracuje s Elektrárnou Hodonín (v tab. 7-7 vyznačeny zeleně). Dodávaný výkon do této oblasti má hodnotu 145,7 MW. Opět je u všech transformátorů dostatečně velká rezerva zatížení. Nejvíce zatížené transformátory jsou v rozvodnách HO (T8-66,19%), SLM (T101-60,14%) a HO (T12-55,36%). Ztráty činného výkonu na transformátorech v této oblasti mají hodnotu $\Delta P_{t-c} = -0,771$ MW.

Tab. 7-5: Napěťové poměry v oblasti OKC-„C“

Rozvodna	U	δ	Rozvodna	U	δ
	(kV)	(°)		(kV)	(°)
HO-„A“	116,6	-5,25	PNV	116,4	-5,48
KUN	117,3	-5,15	SLM	114,5	-6,52
KY	116,1	-5,80	UBR	116,4	-5,71
NAD	117,2	-5,21	VKA	116,1	-5,91
OKC-„C“	118,2	-4,42	VLM	116,1	-5,85

Tab. 7-6: Zatížení vedení v oblasti OKC-„C“

Vedení	U_1	δ_1	P_1	Q_1	U_2	δ_2	P_2	Q_2	I_v	ΔP_v	i_{z_v}	
	(kV)	(°)	(MW)	(MVar)	(kV)	(°)	(MW)	(MVar)	(A)	(MW)	(%)	
540	116,1	-5,85	-2,7	1,6	116,1	-5,91	2,7	-1,1	14,5	-0,001	3,19	
541	116,6	-5,25	-14,5	-0,9	116,1	-5,80	14,5	1,7	72,5	-0,057	15,93	
542	116,6	-5,25	-14,4	-0,3	116,4	-5,48	14,4	0,6	71,5	-0,021	15,71	
543	116,4	-5,71	-7,4	-1,5	116,1	-5,91	7,4	2,2	38,2	-0,012	8,40	
544	116,6	-5,25	-15,1	-0,4	116,1	-5,85	15,0	1,1	75,1	-0,062	16,51	
545	118,2	-4,42	-19,7	-5,6	116,1	-5,80	19,5	6,9	102,8	-0,209	22,59	
546	118,2	-4,42	-15,7	-3,5	117,3	-5,15	15,6	4,4	79,9	-0,075	17,56	
547	117,2	-5,21	-6,1	-3,3	116,4	-5,48	6,0	4,6	37,7	-0,020	8,29	
548	116,1	-5,80	0,0	0,0	116,8	-5,15	0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	
5510	116,4	-5,71	-24,1	-7,2	114,5	-6,52	23,8	7,7	126,3	-0,292	39,47	
5540	117,3	-5,15	-6,2	-2,0	117,2	-5,21	6,2	2,2	32,7	-0,003	7,19	
5570	118,2	-4,42	-33,3	-9,2	116,4	-5,71	33,0	9,4	170,0	-0,311	37,36	
5571	118,2	-4,42	-33,3	-9,2	116,4	-5,71	33,0	9,4	170,0	-0,311	37,36	
										ΔP_{v-c}	-1,374	

Tab. 7-7: Zatížení transformátorů v oblasti OKC-„C“

Rozvodna	Označení	P	Q	I_t	I_n	ΔP_t	$i_{z,t}$
		(MW)	(MVar)	(A)	(A)	(MW)	(%)
HO-„A“	T8	43,8	6,4	219,1	331	-0,123	66,19
	T12	-5,6	-7,5	46,5	84	-	55,36
KUN	T102	-9,4	-2,4	47,7	131	-0,035	36,41
KY	T101	-21,9	-6,7	114,1	210	-0,107	54,33
	T102	-12,0	-2,7	61,3	210	-0,031	29,19
NAD	T2	-0,1	0,5	2,5	52	-	4,81
	T102	-0,1	0,5	2,5	52	-	4,81
OKC-„C“	T403	101,9	27,6	515,8	1837	-0,019	28,08
PNV	T101	0,0	-0,2	1,1	226	-0,039	0,49
	T102	-20,4	-5,0	104,2	210	-0,097	49,62
SLM	T101	-23,8	-7,7	126,3	210	-0,060	60,14
UBR	T101	-20,7	-6,9	108,4	210	-0,101	51,62
	T102	-13,7	-3,0	69,7	210	-0,039	33,19
VKA	T102	-5,8	-0,2	29,0	131	-	22,14
	T103	-4,2	-0,8	21,5	131	-0,020	16,41
VLM	T101	-1,9	0,0	9,6	84	-	11,43
	T103	-10,4	-2,5	53,1	131	-0,064	40,53
	T104	0,0	-0,2	1,0	210	-0,036	0,48
						ΔP_{t-c}	-0,771

Celkové ztráty činného výkonu ΔP_c v oblasti OKC-„C“ jsou uvedeny v tab. 7-8. Celkové ztráty činného výkonu mají hodnotu -2,145 MW.

Tab. 7-8: Ztráty činného výkonu v oblasti OKC-„C“

ΔP_{v-c}	ΔP_{t-c}	ΔP_c
(MW)	(MW)	(MW)
-1,374	-0,771	-2,145

7.4 Výpočet zkratových poměrů v síti 110 kV v UO Sokolnice

Výpočty zkratových poměrů při trojfázovém (označovaném symbolem ⁽³⁾) a jednofázovém (označovaném symbolem ⁽¹⁾) zkratu v síti 110 kV v oblasti SO-„C“ jsou v tab. 7-9. Zkraty byly vypočítány na přípojnících jednotlivých rozvodů, které mají danou jmenovitou zkratovou odolnost S_{od} . V tabulce jsou pro jednotlivé druhy zkratů uvedeny hodnoty počátečního rázového zkratového výkonu S_k'' a počátečního rázového zkratového proudu I_k'' . Dále je zde vypočítáno procentuální zatížení zkratovým výkonem s_k'' vzhledem ke zkratové odolnosti jednotlivých rozvodů.

Z výsledků zkratových poměrů je patrné, že u žádné rozvodny nebyla překročena jmenovitá zkratová odolnost. Nejvíce zatěžované rozvodny zkratovým výkonem při trojfázovém zkratu jsou SO (72,70%), HB (58,12%) a OS (40,34%) – v tab. 7-9 vyznačeny červeně. Při jednofázovém

zkratu jsou nejvíce zatěžovány rozvodny HB (79,89%), SO (58,22%) a HO (32,59%) - tab. 7-9 vyznačeny modře.

Tab. 7-9: Zkratové poměry v oblasti SO-"C"

Rozvodna	S_{od} (MVA)	3-fázový zkrat			1-fázový zkrat		
		$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(1)}s_k''$
		(MVA)	(kA)	(%)	(MVA)	(kA)	(%)
BR	3500	1101,9	5,78	31,48	1054,3	5,53	30,12
BRD	3500	1034,2	5,43	29,55	946,6	4,97	27,05
DDJ	2500	608,8	3,20	24,35	615,1	3,23	24,60
DK	3500	616,0	3,23	17,60	440,0	2,31	12,57
HB	3500	2034,1	10,68	58,12	2796,2	14,68	79,89
HI	2500	623,2	3,27	24,93	647,2	3,4	25,89
HO-,B"	3500	1249,1	6,56	35,69	1140,7	5,99	32,59
HU	3500	1134,6	5,96	32,42	953,7	5,01	27,25
KB	3500	857,7	4,50	24,51	731,9	3,84	20,91
MI	3500	678,3	3,56	19,38	731,3	3,84	20,89
OS	2500	1008,6	5,29	40,34	765,4	4,02	30,62
PHE	3500	1246,9	6,55	35,63	876,8	4,60	25,05
SO-,C"	5000	3634,8	19,08	72,70	2911,1	15,28	58,22
SUZ	3500	639,8	3,36	18,28	598,9	3,14	17,11
TD	3500	1095,1	5,75	31,29	1000,5	5,25	28,59

7.5 Výpočet zkratových poměrů v síti 110 kV v UO Otrokovice

Zkratové poměry byly vypočítány i pro oblast OKC-,C". Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 7-10. Taktéž v této oblasti není u žádné z rozveden překročena jmenovitá zkratová odolnost. Nejvíce zatěžované rozvodny zkratovým výkonem při trojfázovém zkratu jsou OKC (54,86%), UBR (41,38%) a NAD (36,99) – v tab. 7-10 vyznačeny červeně. Při jednofázovém zkratu jsou nejvíce zatěžovány rozvodny UBR (39,76%), OKC (38,00%) a HO (34,34%) - tab. 7-10 vyznačeny modře.

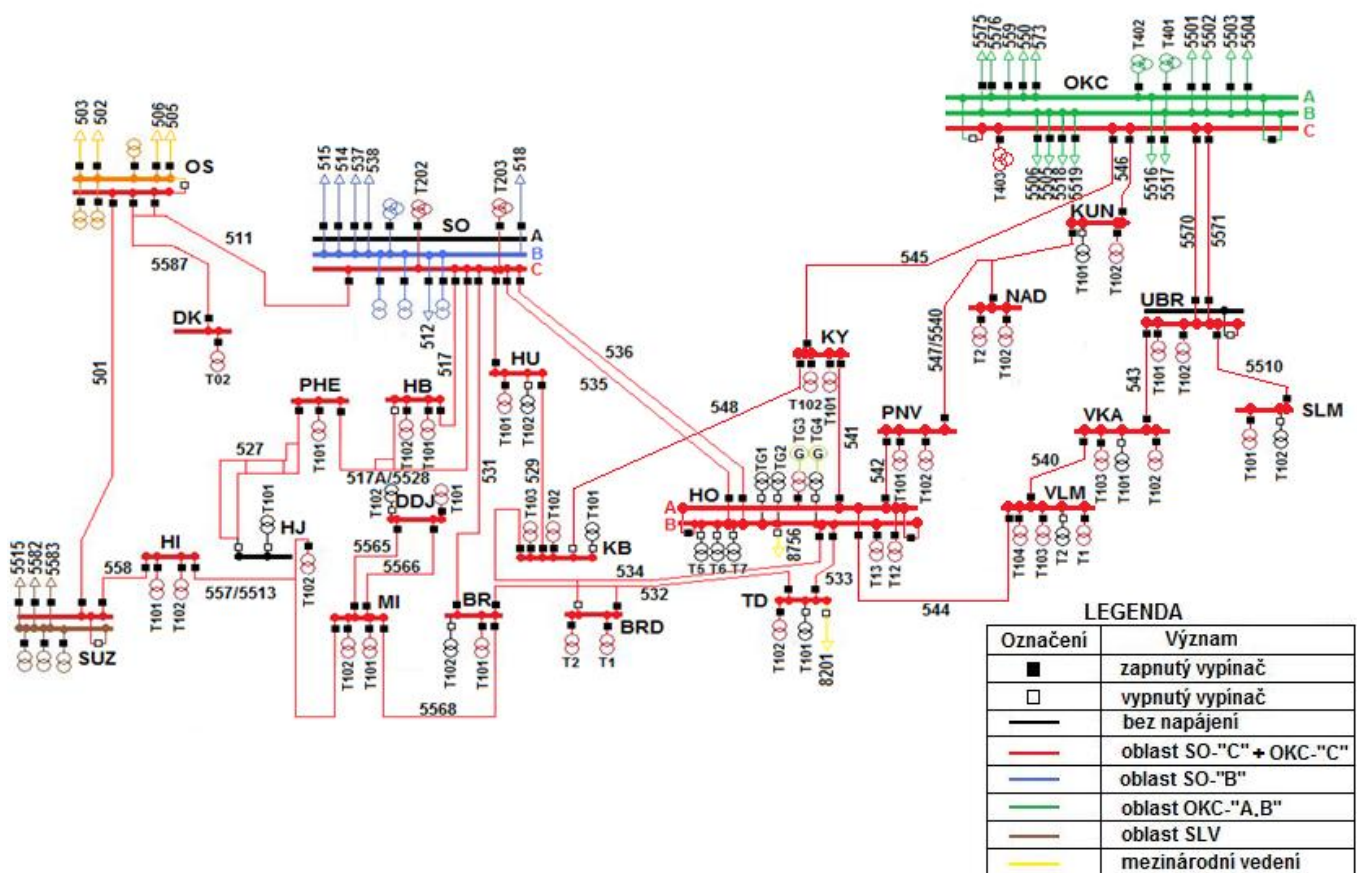
Tab. 7-10: Zkratové poměry v oblasti OKC-"C"

Rozvodna	S_{od} (MVA)	3-fázový zkrat			1-fázový zkrat		
		$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(1)}s_k''$
		(MVA)	(kA)	(%)	(MVA)	(kA)	(%)
HO-,A"	3500	1133,7	5,95	32,39	1201,8	6,31	34,34
KUN	3500	992,6	5,21	28,36	842,4	4,42	24,07
KY	3500	939,9	4,93	26,85	966,6	5,07	27,62
NAD	2500	924,8	4,85	36,99	781,7	4,1	31,27
OKC-,C"	5000	2743,2	14,40	54,86	1899,9	9,97	38,00
PNV	3500	982,8	5,16	28,08	1047,3	5,5	29,92
SLM	3500	653,2	3,43	18,66	605,6	3,18	17,30
UBR	3500	1448,4	7,60	41,38	1391,7	7,3	39,76
VKA	3500	1031,8	5,42	29,48	966,9	5,08	27,63
VLM	3500	966,6	5,07	27,62	972,6	5,1	27,79

8 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PŘI PARALELNÍM PROVOZU UO

Schéma sítě 110 kV při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice je znázorněno na *obr. 8-1*. Paralelní provoz těchto uzlových oblastí byl vytvořen pomocí tzv. můstkového zapojení. Při tomto zapojení byly v rozvodně Hodonín sepnuty oba příčné spínače přípojníc „A“ i „B“ (podélné dělení obou systému přípojníc zůstalo sepnuto). Konfigurace sítě 110 kV byla pro ostatní rozvodny a prvky sítě zachována jako při výpočtu samostatného provozu uzlových oblastí. Tudiž nám oba přenosové transformátory T202, T203 z rozvodny Sokolnice pracují do přípojniového systému „B“ v rozvodně Hodonín a přenosový transformátor T403 z rozvodny Otrokovice pracuje do přípojniového systému „A“ v téže rozvodně. Rozvodna Hodonín slouží také jako rozpadové místo můstkového zapojení. Mezi výhody můstkového zapojení patří zejména zvýšení napěťových poměrů v jednotlivých uzlech sítě 110 kV, snížení zatížení transformátorů a ztrát činného výkonu. Naopak největší nevýhodou můstkového zapojení je zvýšení zkratových poměrů v síti 110 kV.

Při takto nastavené konfiguraci sítě 110 kV byl vypočítán ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV pro paralelní provoz UO Sokolnice-Otrokovice. Vypočítané hodnoty budou porovnávány s hodnotami při samostatném provozu uzlových oblastí.



Obr. 8-1: Schéma sítě 110 kV při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice

8.1 Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV při paralelním provozu uzlových oblastí

U výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice jsou sledovány tytéž parametry jako u samostatného provozu. Nyní jsou již všechny rozvodny, vedení či transformátory z oblastí SO-„C“ a OKC-„C“ uvedeny ve společných tabulkách kvůli lepší orientaci. Rozvodny, vedení i transformátory, které při samostatném provozu uzlových oblastí spadaly do oblasti OKC-„C“, jsou v tabulkách vyznačeny tučným písmem.

V *tab. 8-1* jsou znázorněny napěťové poměry při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice. U všech rozvodn je opět dodržena dovolená tolerance napětí $110\text{kV} \pm 10\%$. Rozvodny Sokolnice i Otrokovice splňují toleranci $119\text{kV} \pm 1\text{kV}$.

Tab. 8-1: Napěťové poměry při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice

Rozvodna	U	δ	Rozvodna	U	δ
	(kV)	(°)		(kV)	(°)
BR	115,9	-5,77	SUZ	116,1	-5,92
BRD	115,9	-5,75	TD	116,1	-5,62
DDJ	115,5	-6,42	HO-„A“	116,7	-5,20
DK	117,7	-4,64	KUN	117,3	-5,16
HB	118,5	-3,89	KY	116,1	-5,79
HI	115,8	-6,17	NAD	117,2	-5,21
HO-„B“	116,7	-5,20	OKC-„C“	118,3	-4,46
HU	117,5	-4,60	PNV	116,5	-5,44
KB	117,0	-5,04	SLM	114,5	-6,53
MI	115,5	-6,42	UBR	116,4	-5,73
OS	117,7	-4,63	VKA	116,2	-5,91
PHE	118,4	-4,02	VLM	116,2	-5,83
SO-„C“	118,6	-3,76			

Zatížení všech vedení z obou oblastí jsou *tab. 8-2*. Žádné vedení není opět přetíženo. Nejvíce zatížené jsou vedení č. 5510(39,34%), 5570(36,86%), 5571(36,86%) a 531(30,84%). Ztráty činného výkonu na vedení 110 kV v této oblasti mají hodnotu $\Delta P_{v-c} = -2,857$ MW.

V *tab. 8-3* je uvedeno zatížení všech transformátorů při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice. Jsou zde uvedeny jak přenosové transformátory (T202, T203 a T403), tak i distribuční transformátory. Transformátory dodávající výkon do sítě 110 kV jsou v tabulce vyznačeny zeleně. Dodávaný výkon do sítě při paralelním provozu UO má hodnotu 274,9 MW. U všech transformátorů je dostatečně velká rezerva zatížení. Nejvíce zatížené transformátory jsou v rozvodnách BR (T101-67,81%), HO (T8-64,41%) a SLM (T101-59,95%). Ztráty činného výkonu na transformátorech v této oblasti mají hodnotu $\Delta P_{t-c} = -1,369$ MW.

Tab. 8-2: Zatížení vedení při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice

Vedení	U_1	δ_1	P_1	Q_1	U_2	δ_2	P_2	Q_2	I_v	ΔP_v	i_{z_v}
	(kV)	(°)	(MW)	(MVA _r)	(kV)	(°)	(MW)	(MVA _r)	(A)	(MW)	(%)
501	117,7	-4,63	-20,6	-3	116,1	-5,92	20,4	4	103,5	-0,195	22,75
511	118,6	-3,76	-20,9	-2,1	117,7	-4,63	20,8	2,9	102,8	-0,131	22,59
517	118,6	-3,76	-11,6	-2,3	118,5	-3,89	11,6	3,3	58,8	-0,009	8,65
517A	118,6	-3,76	-9,7	0,3	118,6	-3,87	9,7	0,8	47,5	-0,005	6,99
527	118,4	-4,02	0	0	118,5	-4,03	0	1,4	7	0	1,54
529	117,5	-4,60	-12,5	-1,8	117,0	-5,04	12,5	2,6	62,9	-0,042	13,82
530	118,6	-3,76	-23,1	-4,7	117,5	-4,60	22,9	5,3	115,7	-0,149	25,43
531	118,6	-3,76	-27,9	-5,6	115,9	-5,77	27,4	6,4	140,3	-0,432	30,84
532_BR	116	-5,73	-11,1	1,4	115,9	-5,77	11,1	1,4	55,9	-0,003	12,29
532_TD	116,1	-5,62	-18,7	-3,4	116	-5,73	18,7	3,5	94,8	-0,017	20,84
532_BRD	116	-5,73	-7,6	-2,2	115,9	-5,75	7,6	2,2	39,4	-0,001	10,94
533	116,7	-5,20	-18,4	-4,9	116,1	-5,62	18,3	5,3	94,7	-0,062	20,81
534_HO	116,9	-5,16	-2,2	-1	116,7	-5,20	2,2	1,6	13,4	-0,001	2,95
534_KB	117,0	-5,04	-2,2	0,8	116,9	-5,16	2,2	0,9	11,6	-0,002	2,55
534_BRD	115,9	-5,75	0	0,1	116,9	-5,16	0	0	0	0	0,00
535	118,6	-3,76	-15,4	-1,5	116,7	-5,20	15,2	3,5	77,2	-0,186	16,97
536	118,6	-3,76	-15,6	-2,2	116,7	-5,20	15,5	4,2	79,3	-0,172	17,43
557	115,8	-6,17	-8,5	-1,1	115,5	-6,42	8,4	1,8	43,2	-0,016	9,49
558	116,1	-5,92	-20,4	-4	115,8	-6,17	20,4	4,2	103,8	-0,04	22,81
5513	115,5	-6,42	0	0,6	115,5	-6,42	0	0,1	0,5	0	0,11
5528	118,6	-3,87	-9,7	-0,8	118,4	-4,02	9,7	1,2	47,7	-0,009	10,48
5565	115,5	-6,42	0	0,2	115,5	-6,42	0	0	0	0	0,00
5566	115,5	-6,42	-0,2	0,3	115,5	-6,42	0,2	-0,1	1,3	0	0,72
5568	115,9	-5,77	-11,2	0,3	115,5	-6,42	11,1	0,8	55,7	-0,039	10,51
5587	117,7	-4,63	-0,1	0,1	117,7	-4,64	0,1	0,6	3,2	0	0,67
540	116,2	-5,83	-3,5	1,5	116,2	-5,91	3,5	-1,1	18	-0,002	3,96
541	116,7	-5,20	-15,5	-1	116,1	-5,79	15,4	1,8	77	-0,064	16,92
542	116,7	-5,20	-15,1	-0,3	116,5	-5,44	15,1	0,6	75	-0,023	16,48
543	116,4	-5,73	-6,6	-1,5	116,2	-5,91	6,6	2,2	34,4	-0,01	7,56
544	116,7	-5,20	-15,9	-0,5	116,2	-5,83	15,8	1,2	78,7	-0,068	17,30
545	118,3	-4,46	-19	-5,6	116,1	-5,79	18,8	6,9	99,6	-0,196	21,89
546	118,3	-4,46	-15	-3,4	117,3	-5,16	15	4,4	76,7	-0,069	16,86
547	117,2	-5,21	-5,4	-3,3	116,5	-5,44	5,4	4,6	35	-0,017	7,69
548	116,1	-5,79	0	0,9	117,0	-5,04	0	0	0	0	0,00
5510	116,4	-5,73	-24,1	-7,3	114,5	-6,53	23,8	7,7	125,9	-0,29	39,34
5540	117,3	-5,16	-5,6	-1,9	117,2	-5,21	5,6	2,2	29,5	-0,003	6,48
5570	118,3	-4,46	-32,8	-9,2	116,4	-5,73	32,5	9,4	167,7	-0,302	36,86
5571	118,3	-4,46	-32,8	-9,2	116,4	-5,73	32,5	9,4	167,7	-0,302	36,86
									ΔP_{v-c}	-2,857	

Tab. 8-3: Zatížení transformátorů při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice

Rozvodna	Označení	P	Q	I_t	I_n	ΔP_t	$i_{z,t}$
		(MW)	(MVar)	(A)	(A)	(MW)	(%)
BR	T101	-27,4	-8,20	142,4	210	-0,145	67,81
BRD	T1	-3,8	-0,60	19,1	70	-	27,29
	T2	-3,8	-1,60	20,6	70	-	29,43
DDJ	T101	0,2	-0,30	1,9	52	-	3,65
DK	T02	-0,1	-0,6	3,2	210	-	1,52
HB	T101	0	0,00	0,2	210	-0,021	0,10
	T102	-11,6	-3,30	58,7	210	-0,055	27,95
HI	T101	-3,9	-0,60	19,4	131	-0,036	14,81
	T102	-8,1	-2,50	42,1	131	-0,043	32,14
HJ	T102	8,4	1,50	218,4	1050	-0,046	20,80
HO-„B“	T13	-5,3	-0,80	26,8	210	-0,043	12,76
HU	T101	-10,4	-3,50	54,1	131	-0,031	41,30
KB	T102	-0,9	-0,40	4,9	52	-	9,42
	T103	-9,4	-3,00	48,6	131	-0,049	37,10
MI	T101	0	0,00	0,1	131	-0,018	0,08
	T102	-11,3	-1,50	56,9	210	-0,041	27,10
PHE	T101	-9,7	-2,60	49	131	-0,029	37,40
SO-„C“	T202	55,6	19,40	286,7	1050	-0,016	27,30
	T203	68,6	-1,20	333,8	1050	-0,029	31,79
TD	T102	0,4	-1,90	9,7	84	-	11,55
HO-„A“	T8	42,7	5,80	213,2	331	-0,119	64,41
	T12	-5,4	-7,50	45,7	84	-	54,40
KUN	T102	-9,4	-2,4	47,7	131	-0,035	36,41
KY	T101	-22,1	-6,8	114,8	210	-0,108	54,67
	T102	-12,1	-2,8	61,8	210	-0,031	29,43
NAD	T2	-0,1	0,5	2,7	52	-	5,19
	T102	-0,1	0,5	2,7	52	-	5,19
OKC-„C“	T403	99,6	27,5	504,4	1837	-0,018	27,46
PNV	T101	0	-0,2	1,1	226	-0,039	0,49
	T102	-20,5	-5	104,4	210	-0,098	49,71
SLM	T101	-23,8	-7,7	125,9	210	-0,059	59,95
UBR	T101	-20,7	-7	108,1	210	-0,101	51,48
	T102	-13,7	-3	69,4	210	-0,039	33,05
VKA	T102	-5,8	-0,3	28,8	131	-	21,98
	T103	-4,2	-0,8	21,5	131	-0,020	16,41
VLM	T101	-1,9	0,00	9,4	84	-	11,19
	T103	-10,4	-2,60	53,2	131	-0,064	40,61
	T104	0	-0,20	1	210	-0,036	0,48
					ΔP_{t-c}	-1,369	

Celkové ztráty činného výkonu ΔP_c při paralelním provozu jsou uvedeny v tab. 8-4. Celkové ztráty činného výkonu při paralelním provozu mají hodnotu -4,226 MW.

Tab. 8-4: Ztráty činného výkonu při paralelním provozu

ΔP_{v-c}	ΔP_{t-c}	ΔP_c
(MW)	(MW)	(MW)
-2,857	-1,369	-4,226

8.2 Výpočet zkratových poměrů v síti 110 kV při paralelním provozu uzlových oblastí

Výsledky výpočtů zkratových poměrů při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice jsou v tab. 8-5. I zde jsou všechny rozvodny z obou oblastí uvedeny v jediné tabulce. Tučným písmem jsou rozvodny z původní oblasti OKC-,C“. Z výsledků je patrné, že ani při tomto paralelním provozu UO nedochází u žádné z rozveden k překročení dovolené zkratové odolnosti. Nejvíce zatěžované rozvodny zkratovým výkonem při trojfázovém zkratu jsou SO (85,88%), HO (67,39%) a HB (63,47%). Při jednofázovém zkratu jsou nejvíce zatěžovány rozvodny HB (86,63%), HO (66,97, resp. 66,76%) a SO (65,83%).

Tab. 8-5: Zkratové poměry při paralelním provozu UO

Rozvodna	S_{od} (MVA)	3-fázový zkrat			1-fázový zkrat		
		$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(3)}S_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(1)}S_k''$
		(MVA)	(kA)	(%)	(MVA)	(kA)	(%)
BR	3500	1440,9	7,56	41,17	1317,9	6,92	37,65
BRD	3500	1354,4	7,11	38,70	1182,7	6,21	33,79
DDJ	2500	675,4	3,55	27,02	661,8	3,47	26,47
DK	3500	640,5	3,36	18,30	449,8	2,36	12,85
HB	3500	2221,4	11,66	63,47	3032,0	15,91	86,63
HI	2500	670,1	3,52	26,80	681,1	3,57	27,24
HO-,B“	3500	2358,6	12,38	67,39	2336,7	12,26	66,76
HU	3500	1269,6	6,66	36,27	1031,0	5,41	29,46
KB	3500	999,1	5,24	28,55	820,2	4,30	23,43
MI	3500	762,0	4,00	21,77	798,4	4,19	22,81
OS	2500	1076,0	5,65	43,04	795,3	4,17	31,81
PHE	3500	1313,8	6,90	37,54	904,1	4,75	25,83
SO-,C“	5000	4294,2	22,54	85,88	3291,5	17,28	65,83
SUZ	3500	684,9	3,60	19,57	625,6	3,28	17,87
TD	3500	1523,8	8,00	43,54	1338,2	7,02	38,23
HO-,A“	3500	2358,7	12,38	67,39	2343,8	12,3	66,97
KUN	3500	1166,0	6,12	33,31	928,9	4,88	26,54
KY	3500	1267,0	6,65	36,20	1203,9	6,32	34,40
NAD	2500	1112,5	5,84	44,50	874,9	4,59	35,00
OKC-,C“	5000	3166,3	16,62	63,33	2037,6	10,69	40,75

PNV	3500	1591,6	8,35	45,47	1537,0	8,07	43,91
SLM	3500	691,8	3,63	19,77	628,7	3,30	17,96
UBR	3500	1674,0	8,79	47,83	1529,7	8,03	43,71
VKA	3500	1273,2	6,68	36,38	1106,1	5,81	31,60
VLM	3500	1293,2	6,79	36,95	1192,6	6,26	34,07

9 VYHODNOCENÍ VÝPOČTU USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ

V této kapitole budou vyhodnocovány a srovnávány výsledky výpočtů ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro samostatný provoz UO Sokolnice-Otrokovice (*obr. 7-1*) a pro paralelní provoz UO Sokolnice-Otrokovice (*obr. 8-1*). Shrnutí bude vyjádřeno menšími podkapitolami.

9.1 Napěťové poměry v síti 110 kV pro obě varianty zapojení

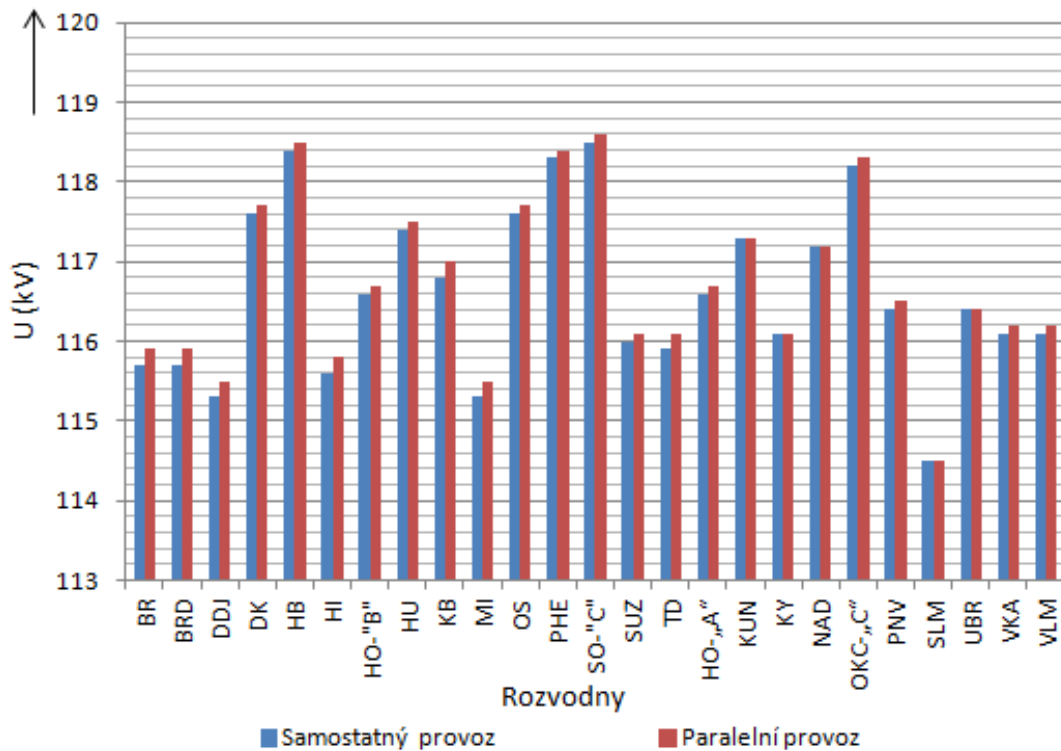
Napěťové poměry v síti 110 kV pro obě varianty zapojení jsou v *tab. 9-1*. Tabulka je doplněna o procentuální změnu napětí Δ_U a procentuální změnu úhlu napětí Δ_δ . Z tabulky a z *obr. 9-1* je zřejmé, že ve všech uzlech je napětí v dovolené toleranci $110\text{kV}\pm 10\%$. Rozvodny Sokolnice a Otrokovice jsou hlavními uzly svých uzlových oblastí, a proto se zde musí udržovat napětí v toleranci $119\text{kV}\pm 1\text{kV}$.

Srovnáním napětí v jednotlivých uzlech sítě 110 kV zjistíme, že při paralelním (můstkovém) zapojení uzlových oblastí se tato napětí v uzlech zvětšuje. Tuto vlastnost bychom mohli považovat za výhodu tohoto zapojení, pokud napětí nepřesáhne dovolenou toleranci napětí. Největší procentuální změna napětí v uzlu při změně konfigurace sítě 110 kV má hodnotu 0,17% - v *tab. 9-1* vyznačena červeně.

Tab. 9-1: Napěťové poměry v síti 110 kV pro obě varianty zapojení

Rozvodna	Samostatný provoz		Paralelní provoz		Δ_U (%)	Δ_δ (%)
	U (kV)	δ (°)	U (kV)	δ (°)		
BR	115,7	-5,85	115,9	-5,77	0,17	-1,39
BRD	115,7	-5,82	115,9	-5,75	0,17	-1,22
DDJ	115,3	-6,51	115,5	-6,42	0,17	-1,40
DK	117,6	-4,78	117,7	-4,64	0,08	-3,02
HB	118,4	-4,04	118,5	-3,89	0,08	-3,86
HI	115,6	-6,29	115,8	-6,17	0,17	-1,94
HO-"B"	116,6	-5,25	116,7	-5,20	0,09	-0,96
HU	117,4	-4,72	117,5	-4,60	0,09	-2,61
KB	116,8	-5,15	117,0	-5,04	0,17	-2,18
MI	115,3	-6,52	115,5	-6,42	0,17	-1,56
OS	117,6	-4,77	117,7	-4,63	0,08	-3,02
PHE	118,3	-4,17	118,4	-4,02	0,08	-3,73
SO-"C"	118,5	-3,91	118,6	-3,76	0,08	-3,99
SUZ	116,0	-6,04	116,1	-5,92	0,09	-2,03
TD	115,9	-5,67	116,1	-5,62	0,17	-0,89
HO-„A“	116,6	-5,25	116,7	-5,20	0,09	-0,96

KUN	117,3	-5,15	117,3	-5,16	0,00	0,19
KY	116,1	-5,80	116,1	-5,79	0,00	-0,17
NAD	117,2	-5,21	117,2	-5,21	0,00	0,00
OKC-„C“	118,2	-4,42	118,3	-4,46	0,08	0,90
PNV	116,4	-5,48	116,5	-5,44	0,09	-0,74
SLM	114,5	-6,52	114,5	-6,53	0,00	0,15
UBR	116,4	-5,71	116,4	-5,73	0,00	0,35
VKA	116,1	-5,91	116,2	-5,91	0,09	0,00
VLM	116,1	-5,85	116,2	-5,83	0,09	-0,34



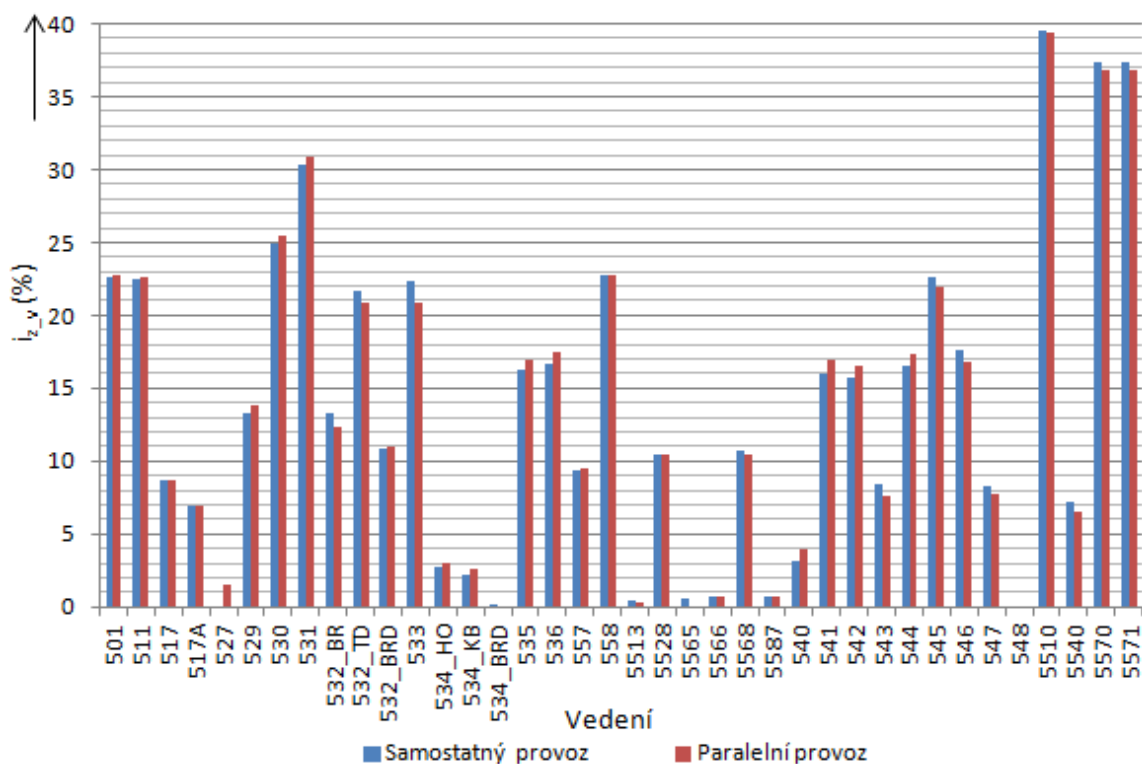
Obr. 9-1: Napěťové poměry v síti 110 kV pro obě varianty zapojení

9.2 Zatížení vedení 110 kV pro obě varianty zapojení

Srovnání zatížení vedení 110 kV při změně zapojení sítě 110 kV je v tab. 9-2. V tabulce je uvedeno procentuální zatížení $i_{z,v}$ při jednotlivých provozech a procentuální změna zatížení $\Delta i_{z,v}$ při změně zapojení sítě 110 kV. Grafické znázornění zatížení jednotlivých vedení je na obr. 9-2. Z výsledků zatížení vedení je patrné, že žádné vedení není přetěžováno. Nejvíce jsou zatížena vedení 5510, 5570 a 5571 (v tab. 9-2 vyznačena modře). Naopak největší procentuální změna zatížení při změně konfigurace sítě 110 kV nastala u vedení 540, 534_KB a 543 (v tab. 9-2 vyznačena červeně).

Tab. 9-2: Zatížení vedení 110 kV pro obě varianty zapojení

Vedení	Samostatný provoz	Paralelní provoz	Δi_{z_v} (%)	Vedení	Samostatný provoz	Paralelní provoz	Δi_{z_v} (%)
	i_{z_v} (%)	i_{z_v} (%)			i_{z_v} (%)	i_{z_v} (%)	
501	22,64	22,75	0,48	5513	0,40	0,31	-4,63
511	22,44	22,59	0,68	5528	10,48	10,48	0,00
517	8,66	8,65	-0,17	5565	0,56	0,00	0,00
517A	6,99	6,99	0,00	5566	0,72	0,72	0,00
527	0,00	1,54	0,00	5568	10,77	10,51	-2,51
529	13,34	13,82	3,50	5587	0,67	0,67	0,00
530	24,97	25,43	1,82	540	3,19	3,96	19,44
531	30,35	30,84	1,57	541	15,93	16,92	5,84
532_BR	13,32	12,29	-8,41	542	15,71	16,48	4,67
532_TD	21,69	20,84	-4,11	543	8,40	7,56	-11,05
532_BRD	10,83	10,94	1,02	544	16,51	17,30	4,57
533	22,29	20,81	-7,07	545	22,59	21,89	-3,21
534_HO	2,68	2,95	8,96	546	17,56	16,86	-4,17
534_KB	2,13	2,55	16,38	547	8,29	7,69	-7,71
534_BRD	0,08	0,00	0,00	548	0,00	0,00	0,00
535	16,20	16,97	4,53	5510	39,47	39,34	-0,32
536	16,66	17,43	4,41	5540	7,19	6,48	-10,85
557	9,32	9,49	1,85	5570	37,36	36,86	-1,37
558	22,70	22,81	0,48	5571	37,36	36,86	-1,37



Obr. 9-2: Zatížení vedení 110 kV pro obě varianty zapojení

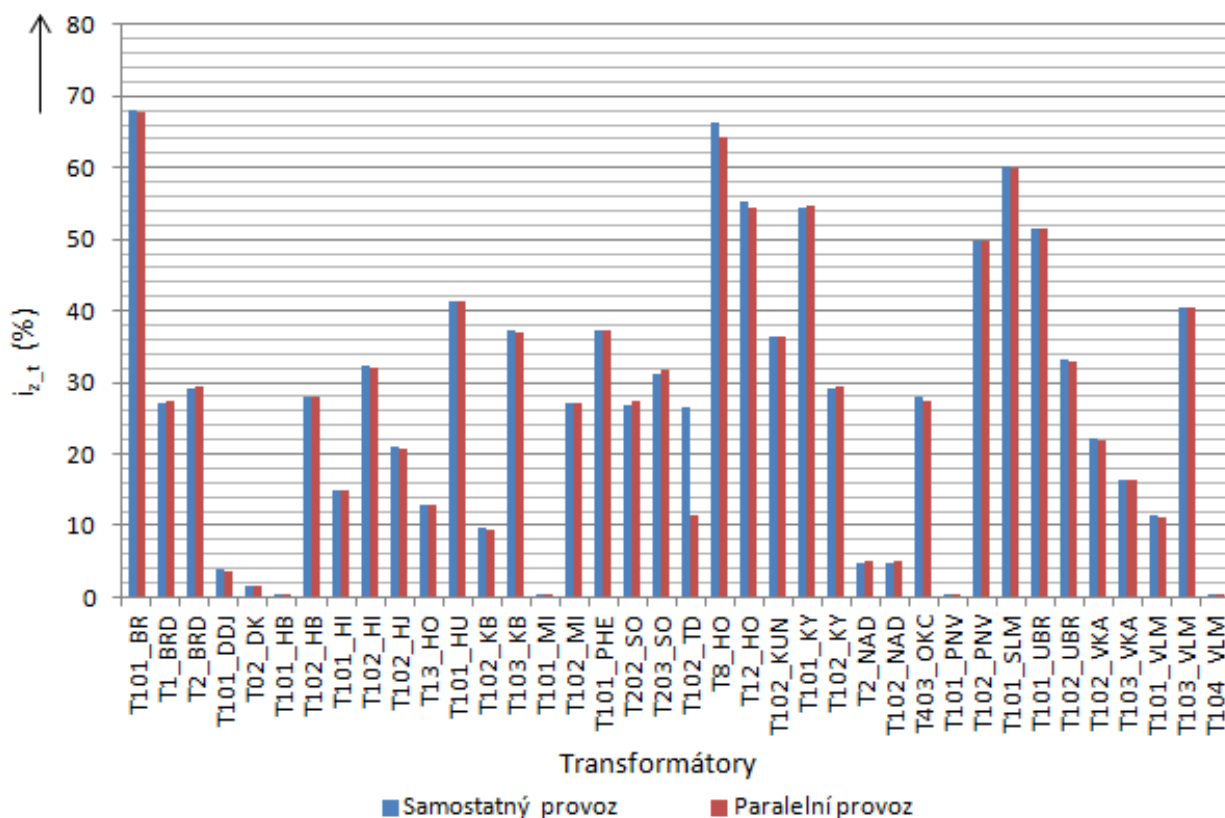
9.3 Vyhodnocení zatížení transformátorů pro obě varianty zapojení

Srovnání zatížení transformátorů při změně zapojení sítě 110 kV je v *tab. 9-3*. V tabulce je uvedeno procentuální zatížení $i_{z,t}$ při jednotlivých provozech a procentuální změna zatížení $\Delta i_{z,t}$ při změně zapojení sítě 110 kV. Je zde rovněž uvedeno zatížení přenosových transformátorů T202, T203 (SO-,C“) a T403 (OKC-,C“). Graf

Z výsledků zatížení transformátorů je patrné, že žádný transformátor není přetěžován. Naopak pracují všechny transformátory s dostatečnou rezervou zatížení z důvodu možného budoucího rozšíření sítě či proměnlivého denního zatížení. Při paralelním provozu byla u většiny transformátorů snížena procentuální zatížitelnost. Nejvíce jsou zatíženy transformátory T101 (BR), T8 (HO) a T101 (SLM) - v *tab. 9-3* vyznačeny modře. Největší procentuální změna zatížení při změně provozu sítě 110 kV nastala u transformátorů T102 (TD), T2 a T102 (oba NAD) - v *tab. 9-3* vyznačeny červeně. Grafické znázornění zatížení jednotlivých transformátorů je na *obr. 9-3*.

Tab. 9-3: Zatížení transformátorů pro obě varianty zapojení

Rozvodna	Označení	Samostatný provoz	Paralelní provoz	$\Delta i_{z,t}$ (%)	Rozvodna	Označení	Samostatný provoz	Paralelní provoz	$\Delta i_{z,t}$ (%)
		$i_{z,t}$ (%)	$i_{z,t}$ (%)				$i_{z,t}$ (%)	$i_{z,t}$ (%)	
BR	T101	67,95	67,81	-0,21	HO-,A“	T8	66,19	64,41	-2,77
BRD	T1	27,00	27,29	1,05		T12	55,36	54,40	-1,75
	T2	29,14	29,43	0,97	KUN	T102	36,41	36,41	0,00
DDJ	T101	3,85	3,65	-5,26	KY	T101	54,33	54,67	0,61
DK	T02	1,52	1,52	0,00		T102	29,19	29,43	0,81
HB	T101	0,10	0,10	0,00	NAD	T2	4,81	5,19	7,41
	T102	27,95	27,95	0,00		T102	4,81	5,19	7,41
HI	T101	14,89	14,81	-0,52	OKC-,C“	T403	28,08	27,46	-2,26
	T102	32,37	32,14	-0,71		PNV	T101	0,49	0,49
HJ	T102	20,90	20,80	-0,50	T102		49,62	49,71	0,19
HO-,B“	T13	12,81	12,76	-0,37	SLM	T101	60,14	59,95	-0,32
HU	T101	41,37	41,30	-0,18	UBR	T101	51,62	51,48	-0,28
KB	T102	9,62	9,42	-2,04		T102	33,19	33,05	-0,43
	T103	37,33	37,10	-0,62	VKA	T102	22,14	21,98	-0,69
MI	T101	0,08	0,08	0,00		T103	16,41	16,41	0,00
	T102	27,14	27,10	-0,18	VLM	T101	11,43	11,19	-2,13
PHE	T101	37,40	37,40	0,00		T103	40,53	40,61	0,19
SO-,C“	T202	26,75	27,30	2,02		T104	0,48	0,48	0,00
	T203	31,28	31,79	1,62					
TD	T102	26,67	11,55	-130,93					



Obr. 9-3: Zatížení transformátorů pro obě varianty zapojení

9.4 Vyhodnocení ztrát činného výkonu pro obě varianty zapojení

Srovnání ztrát činného výkonu při změně zapojení sítě 110 kV jsou v tab. 9-4. V tabulce jsou uvedeny celkové ztráty činného výkonu ΔP_c pro jednotlivé zapojení sítě a procentuální změna ztrát činného výkonu $\Delta_{\Delta P_c}$ při změně provozu. Při změně samostatného provozu na provoz paralelní (můstkové zapojení) je dosažené snížení ztrát činného výkonu o -1,846 %. Tuto vlastnost můžeme považovat za výhodu tohoto zapojení.

Tab. 9-4: Ztráty činného výkonu pro obě zapojení

Samostatný provoz	Paralelní provoz	
ΔP_c	ΔP_c	$\Delta_{\Delta P_c}$
(MW)	(MW)	(%)
-4,304	-4,226	-1,846

9.5 Vyhodnocení zkratových poměrů pro obě varianty zapojení

Srovnání zkratových poměrů při jednotlivých prozvozech uzlových oblastí jsou v tab. 9-5 (pro trojfázový zkrat) a v tab. 9-6 (pro jednofázový zkrat). V obou tabulkách jsou uvedeny kromě hodnot počátečního rázového zkratového výkonu S_k'' a počátečního rázového zkratového proudu I_k'' , také procentuální změny počátečního rázového zkratového výkonu $\Delta s_k''$ a počátečního

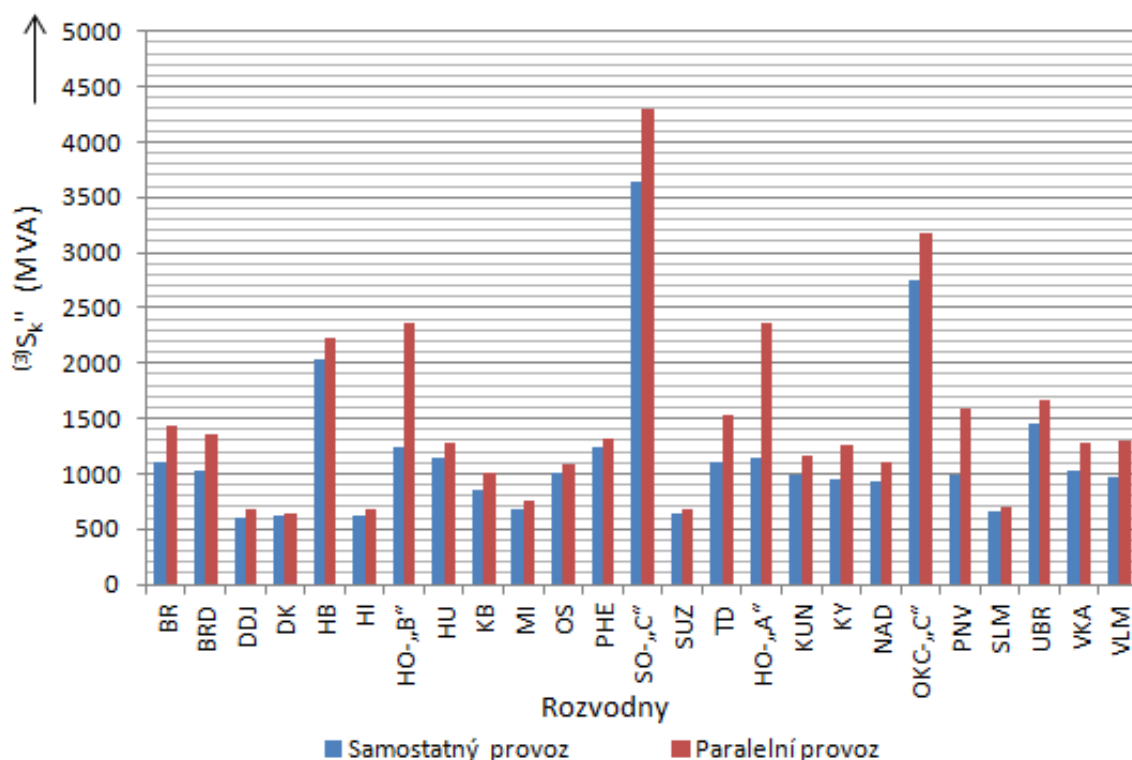
**9 Vyhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro obě 78
varianty zapojení**

rázového zkratového proudu $\Delta i_k''$. Procentuální změny jsou vztaženy k samostatnému provozu uzlových oblastí.

Z výsledků, které jsou v tabulkách *tab. 9-5* a *tab. 9-6* (grafické znázornění je na *obr. 9-5* a *9-6*), je patrné, že při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice dochází ke zvětšování zkratových příspěvků v jednotlivých rozvodnách. Tuto vlastnost můžeme považovat za hlavní nevýhodu paralelního provozu (můstkového zapojení). Všechny rozvodny z obou oblastí vyhovují svým zkratovým odolnostem při obou variantách zapojení. Největší změny zkratových příspěvků při trojfázovém i jednofázovém zkratu a změně zapojení jsou v rozvodnách HO („A“, „B“), PNV a TD – *tab. 9-5* a *tab. 9-6* vyznačeny červeně.

Tab. 9-5: Zkratových poměry při trojfázovém zkratu pro obě varianty zapojení

Rozvodna	Samostatný provoz		Paralelní provoz		$^{(3)}\Delta s_k''$ (%)	$^{(3)}\Delta i_k''$ (%)
	$^{(3)}S_k''$ (MVA)	$^{(3)}I_k''$ (kA)	$^{(3)}S_k''$ (MVA)	$^{(3)}I_k''$ (kA)		
	BR	1101,9	5,78	1440,9		
BRD	1034,2	5,43	1354,4	7,11	23,64	23,63
DDJ	608,8	3,20	675,4	3,55	9,86	9,86
DK	616,0	3,23	640,5	3,36	3,83	3,87
HB	2034,1	10,68	2221,4	11,66	8,43	8,40
HI	623,2	3,27	670,1	3,52	7,00	7,10
HO-„B“	1249,1	6,56	2358,6	12,38	47,04	47,01
HU	1134,6	5,96	1269,6	6,66	10,63	10,51
KB	857,7	4,50	999,1	5,24	14,15	14,12
MI	678,3	3,56	762,0	4,00	10,98	11,00
OS	1008,6	5,29	1076,0	5,65	6,26	6,37
PHE	1246,9	6,55	1313,8	6,90	5,09	5,07
SO-„C“	3634,8	19,08	4294,2	22,54	15,36	15,35
SUZ	639,8	3,36	684,9	3,60	6,58	6,67
TD	1095,1	5,75	1523,8	8,00	28,13	28,13
HO-„A“	1133,7	5,95	2358,7	12,38	51,94	51,94
KUN	992,6	5,21	1166,0	6,12	14,87	14,87
KY	939,9	4,93	1267,0	6,65	25,82	25,86
NAD	924,8	4,85	1112,5	5,84	16,87	16,95
OKC-„C“	2743,2	14,40	3166,3	16,62	13,36	13,36
PNV	982,8	5,16	1591,6	8,35	38,25	38,20
SLM	653,2	3,43	691,8	3,63	5,58	5,51
UBR	1448,4	7,60	1674,0	8,79	13,48	13,54
VKA	1031,8	5,42	1273,2	6,68	18,96	18,86
VLM	966,6	5,07	1293,2	6,79	25,26	25,33



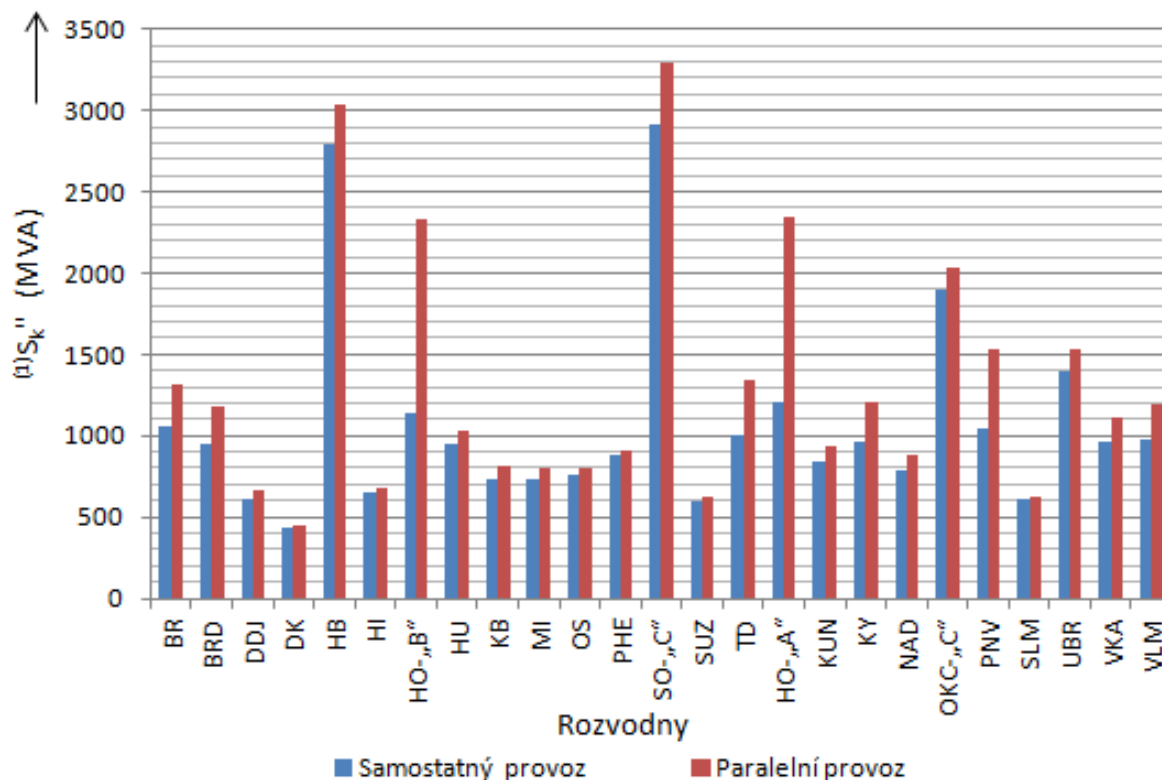
Obr. 9-4: Zkratové poměry při trojfázovém zkratu pro obě varianty zapojení

Tab. 9-6: Zkratových poměrů při jednofázovém zkratu pro obě varianty zapojení

Rozvodna	Samostatný provoz		Paralelní provoz		⁽¹⁾ $\Delta S_k''$ (%)	⁽¹⁾ $\Delta I_k''$ (%)
	⁽¹⁾ S_k'' (MVA)	⁽¹⁾ I_k'' (kA)	⁽¹⁾ S_k'' (MVA)	⁽¹⁾ I_k'' (kA)		
	BR	1054,3	5,53	1317,9		
BRD	946,6	4,97	1182,7	6,21	19,96	19,97
DDJ	615,1	3,23	661,8	3,47	7,06	6,92
DK	440,0	2,31	449,8	2,36	2,18	2,12
HB	2796,2	14,68	3032,0	15,91	7,78	7,73
HI	647,2	3,4	681,1	3,57	4,98	4,76
HO-„B“	1140,7	5,99	2336,7	12,26	51,18	51,14
HU	953,7	5,01	1031,0	5,41	7,50	7,39
KB	731,9	3,84	820,2	4,30	10,77	10,70
MI	731,3	3,84	798,4	4,19	8,40	8,35
OS	765,4	4,02	795,3	4,17	3,76	3,60
PHE	876,8	4,60	904,1	4,75	3,02	3,16
SO-„C“	2911,1	15,28	3291,5	17,28	11,56	11,57
SUZ	598,9	3,14	625,6	3,28	4,27	4,27
TD	1000,5	5,25	1338,2	7,02	25,24	25,21
HO-„A“	1201,8	6,31	2343,8	12,3	48,72	48,70
KUN	842,4	4,42	928,9	4,88	9,31	9,43
KY	966,6	5,07	1203,9	6,32	19,71	19,78

9 Vyhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro obě 80
varianty zapojení

NAD	781,7	4,1	874,9	4,59	10,65	10,68
OKC-„C“	1899,9	9,97	2037,6	10,69	6,76	6,74
PNV	1047,3	5,5	1537,0	8,07	31,86	31,85
SLM	605,6	3,18	628,7	3,30	3,67	3,64
UBR	1391,7	7,3	1529,7	8,03	9,02	9,09
VKA	966,9	5,08	1106,1	5,81	12,58	12,56
VLM	972,6	5,1	1192,6	6,26	18,45	18,53

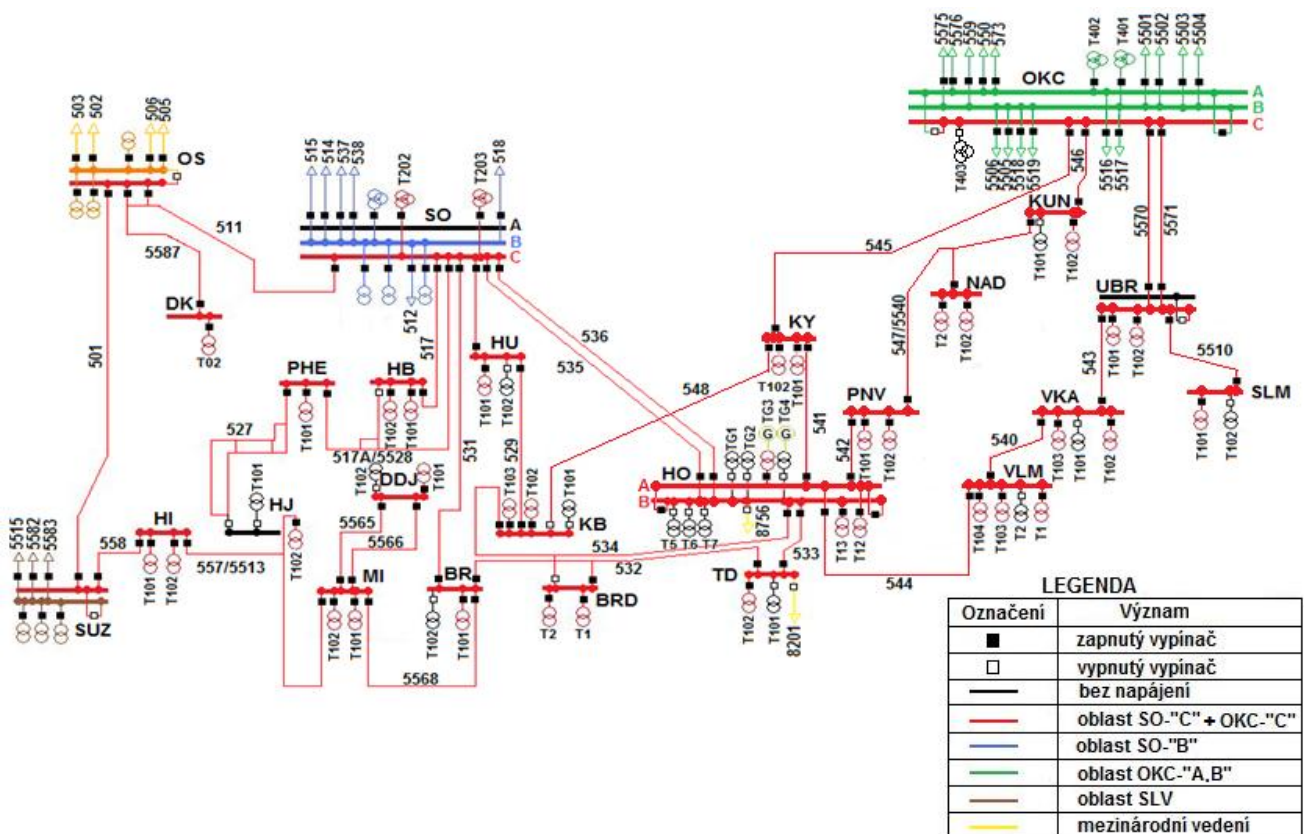


Obr. 9-5: Zkratové poměry při jednofázovém zkratu pro obě varianty zapojení

10 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ 110 kV PŘI VÝPADKU TRANSFORMÁTORU T403

V této kapitole se budeme zabývat výpočtem ustáleného chodu sítě 110 kV při vybraném mimořádném stavu, který by se v síti mohl vyskytnout. Tímto mimořádným stavem budeme uvažovat výpadek přenosového transformátoru T403 (400/110 kV) z otrokovické rozvodny (OKC). Transformátor napájí přípojnicový systém „C“ v této rozvodně a také celou oblast OKC-„C“. Schéma zapojení sítě 110 kV při tomto mimořádném stavu je na *obr. 10-1*. Jak je ze zapojení sítě patrné, tento mimořádný stav budeme zkoumat při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice.

Při mimořádném stavu v síti 110 kV budeme zkoumat, jaký vliv má tento nasimulovaný mimořádný stav na chod sítě. Tedy zejména na napěťové poměry v síti, zatížitelnosti vedení a transformátorů, případně na ztráty činného výkonu v síti 110 kV. U těchto veličin budeme tedy kontrolovat dodržení dovolené tolerance napětí v uzlech $110\text{kV} \pm 10\%$ a maximální dovolené zatížitelnosti vedení a transformátorů. Výsledky budou posléze porovnávány s bezporuchovým stavem při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice.



Obr. 10-1: Schéma zapojení sítě 110 kV při výpadku transformátoru T403

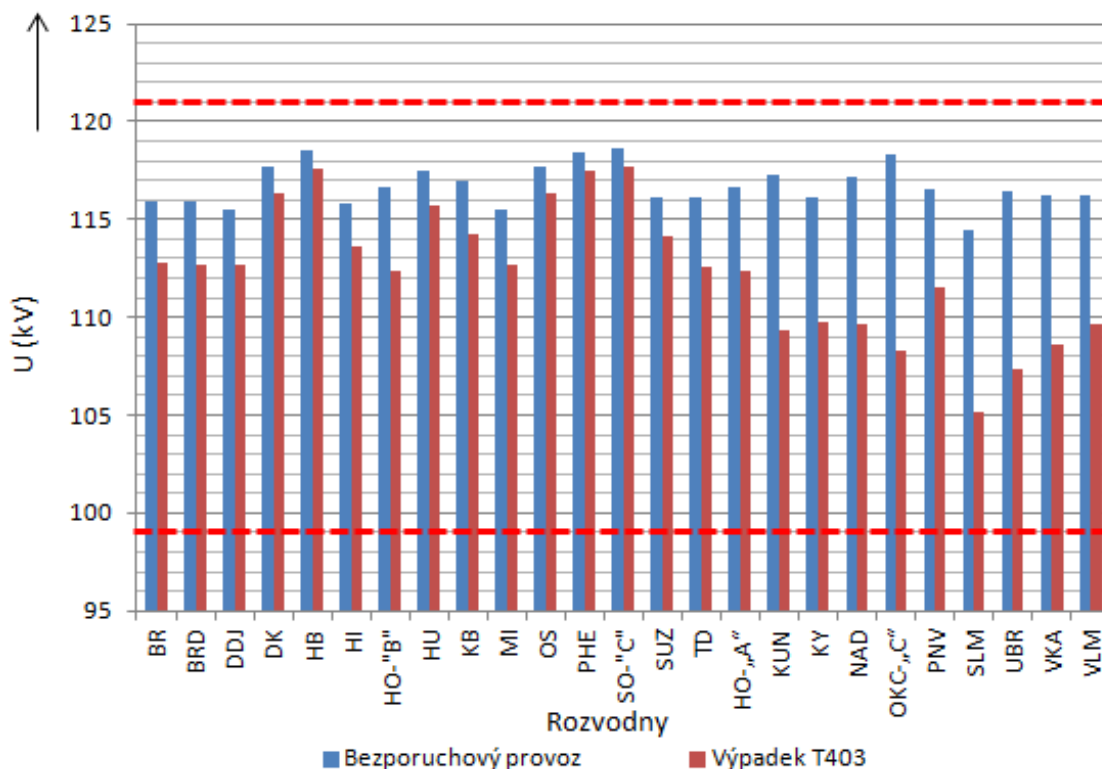
10.1 Napětíové poměry v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403

Napětíové poměry v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403 z otrokovické rozvodny jsou v tab. 10-1. V tabulce jsou také uvedeny procentuální změny napětí ΔU a úhlu napětí $\Delta \delta$ oproti zapojení bezporuchovém. Na obr. 10-2 je srovnání napětíových poměrů v jednotlivých uzlech při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403. Je zde také vyznačena dovolená tolerance napětí v uzlech.

Z výsledků napětíových poměrů je patrné, že ve všech uzlech dochází k napětíovému poklesu, ale u všech uzlů je dodržena dovolená tolerance napětí $110\text{kV} \pm 10\%$. Zato v rozvodnách Sokolnice a Otrokovice, jež jsou hlavními uzly svých uzlových oblastí, není dodrženo napětí v toleranci $119\text{ kV} \pm 1\text{ kV}$. Největšího poklesu napětí oproti normálnímu stavu je dosaženo v rozvodně Otrokovice (OKC-,C“), kde napětí pokleslo o -9,23%. Mezi další rozvodny, u kterých bylo dosaženo výrazného poklesu napětí, patří SLM (-8,84%) a UHB (-8,48%).

Tab. 10-1: Napětíové poměry v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403

Rozvodna	U	δ	ΔU	$\Delta \delta$	Rozvodna	U	δ	ΔU	$\Delta \delta$
	(kV)	(°)	(%)	(%)		(kV)	(°)	(%)	(%)
BR	112,8	-10,48	-2,75	44,94	SUZ	114,1	-9,65	-1,75	38,65
BRD	112,7	-10,57	-2,84	45,60	TD	112,6	-10,62	-3,11	47,08
DDJ	112,7	-10,73	-2,48	40,17	HO-,A“	112,4	-10,94	-3,83	52,47
DK	116,3	-7,86	-1,20	40,97	KUN	109,3	-13,37	-7,32	61,41
HB	117,6	-6,79	-0,77	42,71	KY	109,8	-12,87	-5,74	55,01
HI	113,6	-10,10	-1,94	38,91	NAD	109,7	-13,08	-6,84	60,17
HO-,B“	112,4	-10,94	-3,83	52,47	OKC-,C“	108,3	-14,15	-9,23	68,48
HU	115,7	-8,19	-1,56	43,83	PNV	111,5	-11,64	-4,48	53,26
KB	114,3	-9,33	-2,36	45,98	SLM	105,2	-15,75	-8,84	58,54
MI	112,7	-10,73	-2,48	40,17	UBR	107,3	-14,81	-8,48	61,31
OS	116,3	-7,86	-1,20	41,09	VKA	108,6	-13,88	-7,00	57,42
PHE	117,5	-6,93	-0,77	41,99	VLM	109,6	-13,05	-6,02	55,33
SO-,C“	117,7	-6,67	-0,76	43,63					



Obr. 10-2: Srovnání napěťových poměrů v uzlech při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403

10.2 Zatížení vedení v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403

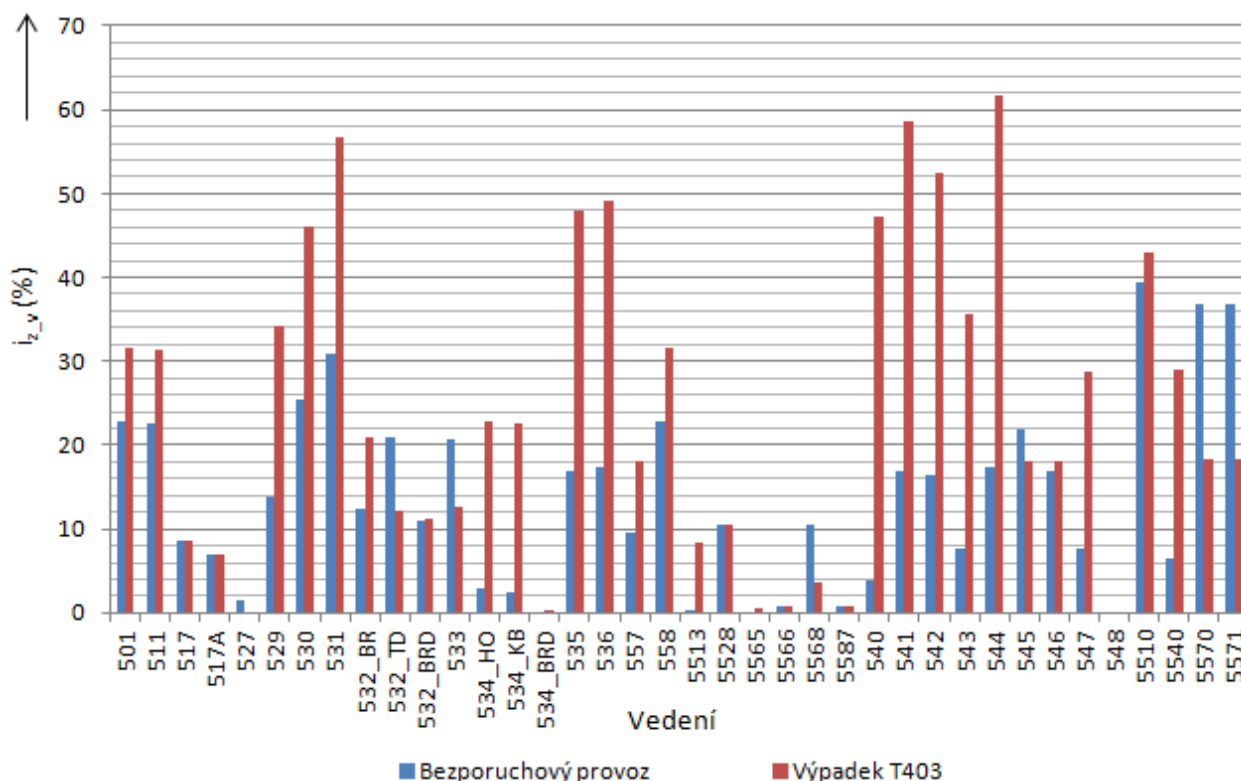
Zatížení vedení v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403 z otrokovické rozvodny jsou v tab. 10-2. Tabulka je doplněna procentuální změnou zatížení vedení Δi_{z_v} oproti zapojení bezporuchovém. Dále je na obr. 10-3 uvedeno srovnání zatížitelnosti jednotlivých vedení při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403.

Z výsledků zatížení vedení je patrné, že žádné vedení není přetěžováno a ani se žádné vedení neblíží ke své maximální zatížitelnosti. Nejvíce jsou zatížena vedení 544, 541 a 538 (v tab. 10-2 vyznačena modře). Naopak největší procentuální změna zatížení nastala u vedení 5513, 540 a 534 (v tab. 10-2 vyznačena červeně). Ztráty činného výkonu na vedení 110 kV při tomto mimořádném stavu mají hodnotu $\Delta P_{v-c} = -9,614$ MW.

Tab. 10-2: Zatížení vedení v síti 110 kV při výpadku transformátoru T403

Vedení	U_1	δ_1	P_1	Q_1	U_2	δ_2	P_2	Q_2	I_v	ΔP_v	i_{z_v}	Δi_{z_v}
	(kV)	(°)	(MW)	(MVar)	(kV)	(°)	(MW)	(MVar)	(A)	(MW)	(%)	(%)
501	116,3	-7,86	-28,2	-5,0	114,1	-9,65	27,8	5,5	143,7	-0,377	31,58	27,97
511	117,7	-6,67	-28,6	-4,5	116,3	-7,86	28,4	4,9	142,9	-0,253	31,41	28,06
517	117,7	-6,67	-11,6	-2,3	117,6	-6,79	11,6	3,3	59,2	-0,009	8,71	0,68
517A	117,7	-6,67	-9,7	0,2	117,7	-6,78	9,7	0,8	47,8	-0,006	7,03	0,63
527	117,5	-6,93	0,0	1,4	117,5	-6,93	0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00
529	115,7	-8,19	-30,6	-5,3	114,3	-9,33	30,3	5,5	155,8	-0,26	34,24	59,63
530	117,7	-6,67	-41,5	-9,2	115,7	-8,19	41	8,9	209,5	-0,49	46,04	44,77

531	117,7	-6,67	-51,1	-11,4	112,8	-10,48	49,6	9,4	258,5	-1,479	56,81	45,73
532_BR	112,7	-10,55	-18,4	-2,7	112,8	-10,48	18,4	2,7	95,3	-0,011	20,95	41,34
532_TD	112,6	-10,62	-10,8	-0,5	112,7	-10,55	10,8	0,7	55,6	-0,006	12,22	-70,50
532_BRD	112,7	-10,55	-7,6	-2,2	112,7	-10,57	7,6	2,2	40,5	-0,001	11,25	2,72
533	112,4	-10,94	-11,3	1,2	112,6	-10,62	11,2	-0,7	57,8	-0,023	12,70	-63,84
534_HO	113,1	-10,39	-19,9	-3,4	112,4	-10,94	19,8	3,8	103,5	-0,082	22,75	87,05
534_KB	114,3	-9,33	-20,0	2,2	113,1	-10,39	19,9	3,4	102,9	-0,155	22,62	88,73
534_BRD	112,7	-10,57	0,0	0,0	113,1	-10,39	0,0	0,1	0,3	0,000	0,08	0,00
535	117,7	-6,67	-43,7	-6,6	112,4	-10,94	42,2	5,4	218,3	-1,525	47,98	64,64
536	117,7	-6,67	-44,4	-8,7	112,4	-10,94	43	7,4	223,9	-1,411	49,21	64,58
557	113,6	-10,10	-15,9	-2,5	113,0	-10,50	15,8	3,1	82,2	-0,057	18,07	47,45
558	114,1	-9,65	-27,8	-5,5	113,6	-10,10	27,8	5,6	144	-0,076	31,65	27,92
5513	112,7	-10,73	-7,3	-1,2	113,0	-10,50	7,3	1,8	38,5	-0,013	8,46	98,70
5528	117,7	-6,78	-9,7	-0,8	117,5	-6,93	9,7	1,2	48,1	-0,009	10,57	0,83
5565	112,7	-10,73	0,0	0,0	112,7	-10,73	0,0	0,2	1,0	0,000	0,56	0,00
5566	112,7	-10,73	-0,2	0,3	112,7	-10,73	0,2	-0,1	1,3	0,000	0,72	0,00
5568	112,8	-10,48	-3,8	1,5	112,7	-10,73	3,8	-0,4	19,4	-0,005	3,66	-187,11
5587	116,3	-7,86	-0,1	0,1	116,3	-7,86	0,1	0,6	3,3	0,000	0,69	3,03
540	109,6	-13,05	-39,6	-9,1	108,6	-13,88	39,4	8,8	214,6	-0,254	47,16	91,61
541	112,4	-10,94	-50,1	-13	109,8	-12,87	49,3	11,8	266,6	-0,767	58,59	71,12
542	112,4	-10,94	-45,2	-10,8	111,5	-11,64	45,0	10,5	238,9	-0,231	52,51	68,61
543	107,3	-14,81	-29,4	-7,7	108,6	-13,88	29,1	7,8	162,3	-0,219	35,67	78,80
544	112,4	-10,94	-52,8	-13,3	109,6	-13,05	52,0	11,9	280,7	-0,864	61,69	71,96
545	108,3	-14,15	-15,1	-2,8	109,8	-12,87	15,0	4,0	82,7	-0,136	18,18	-20,44
546	108,3	-14,15	-14,6	-4,3	109,3	-13,37	14,5	5,1	82	-0,079	18,02	6,46
547	109,7	-13,08	-24,5	-5,1	111,5	-11,64	24,2	5,7	130,8	-0,268	28,75	73,24
548	109,8	-12,87	0,0	0,8	114,3	-9,33	0,0	0,0	0,0	0,000	0,00	0,00
5510	107,3	-14,81	-24,1	-7,8	105,2	-15,75	23,8	8,0	137,8	-0,348	43,06	8,64
5540	109,3	-13,37	-24,0	-6,7	109,7	-13,08	24,0	6,8	131,6	-0,05	28,92	77,58
5570	108,3	-14,15	-14,7	-4,6	107,3	-14,81	14,7	5,2	83,7	-0,075	18,40	-100,36
5571	108,3	-14,15	-14,7	-4,6	107,3	-14,81	14,7	5,2	83,7	-0,075	18,40	-100,36
										ΔP_{v-c}	-9,614	



Obr. 10-3: Srovnání zatížitelnosti vedení při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403

10.3 Zatížení transformátorů při výpadku transformátoru T403

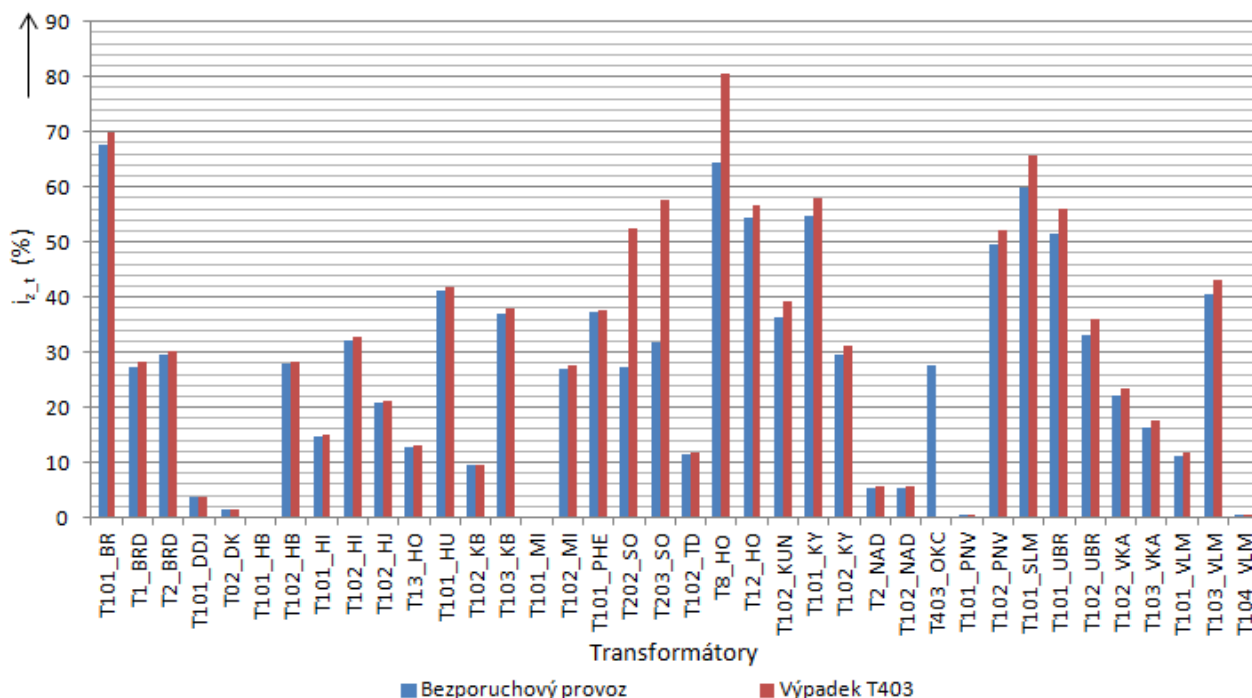
Zatížení transformátorů při výpadku transformátoru T403 z otrokovické rozvodny jsou v tab. 10-3. Tabulka je doplněna procentuální změnou zatížení transformátorů $\Delta i_{z,t}$ oproti zapojení bezporuchovém. Dále je na obr. 10-4 uvedeno srovnání zatížitelnosti jednotlivých transformátorů při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403.

Z výsledků zatížení transformátorů je patrné, že žádný transformátor není přetěžován a ani se žádný transformátor neblíží ke své maximální zatížitelnosti. Dodávaný výkon do sítě z transformátoru T403 přebírají transformátory T202, T203 z rozvodny Sokolnice, a také transformátor T8 z rozvodny Hodonín, který spolupracuje s Elektrárnou Hodonín. U těchto transformátorů je také největší procentuální změna zatížení oproti normálnímu stavu (v tab. 10-3 vyznačeny červeně). Nejvíce zatíženy transformátory jsou T101 (BR), T8 (HO) a T101 (SLM) - v tab. 10-3 vyznačeny modře. Ztráty činného výkonu na transformátorech při tomto mimořádném stavu mají hodnotu $\Delta P_{t-c} = -1,495$ MW. Dodávaný výkon při výpadku transformátoru T403 má hodnotu 281,7 MW.

Tab. 10-3: Zatížení transformátorů při výpadku transformátoru T403

Rozvodna	Označení	P	Q	I_t	I_n	ΔP_t	$i_{z,t}$	$\Delta i_{z,t}$
		(MW)	(MVA _r)	(A)	(A)	(MW)	(%)	(%)
BR	T101	-27,4	-8,3	146,6	210	-0,149	69,81	2,66
BRD	T1	-3,8	-0,6	19,7	70	-	28,14	4,06
	T2	-3,8	-1,6	21,2	70	-	30,29	3,77
DDJ	T101	0,2	-0,3	2,0	52	-	3,85	0,00

DK	T02	-0,1	-0,6	3,3	210	-	1,57	3,03
HB	T101	0,0	0,0	0,2	210	-0,021	0,10	0,00
	T102	-11,6	-3,3	59,1	210	-0,054	28,14	0,68
HI	T101	-3,8	-0,6	19,8	131	-0,035	15,11	1,52
	T102	-8,1	-2,5	42,9	131	-0,043	32,75	1,17
HJ	T102	8,4	1,5	223,2	1050	-0,045	21,26	1,66
HO-„B“	T13	-5,3	-0,8	27,8	210	-0,041	13,24	3,24
HU	T101	-10,4	-3,6	55,0	131	-0,031	41,98	1,45
KB	T102	-0,9	-0,4	5,0	52	-	9,62	0,00
	T103	-9,4	-3,0	49,8	131	-0,049	38,02	1,81
MI	T101	0,0	0,0	0,1	131	-0,017	0,08	0,00
	T102	-11,3	-1,5	58,2	210	-0,040	27,71	2,06
PHE	T101	-9,7	-2,6	49,4	131	-0,029	37,71	0,81
SO-„C“	T202	107,6	32,3	551,1	1050	-0,059	52,49	49,03
	T203	123,0	10,2	605,0	1050	-0,095	57,62	45,72
TD	T102	0,4	-1,9	10,0	84	-	11,90	-124,00
HO-„A“	T8	42,7	29,4	266,2	331	-0,153	80,42	17,69
	T12	-5,4	-7,5	47,5	84	-	56,55	2,11
KUN	T102	-9,4	-2,5	51,3	131	-0,035	39,16	7,02
KY	T101	-22,1	-7,0	121,7	210	-0,112	57,95	6,24
	T102	-12,1	-2,8	65,4	210	-0,031	31,14	6,27
NAD	T2	-0,1	0,5	2,9	52	-	5,58	13,79
	T102	-0,1	0,5	2,9	52	-	5,58	13,79
OKC-„C“	T403	0,0	0,0	0,0	1837	0,000	0,00	-
PNV	T101	0,0	-0,2	1,0	226	-0,035	0,44	-10,00
	T102	-20,5	-5,1	109,2	210	-0,100	52,00	4,58
SLM	T101	-23,8	-8,0	137,8	210	-0,064	65,62	8,35
UBR	T101	-20,7	-7,2	117,7	210	-0,106	56,05	7,90
	T102	-13,7	-3,1	75,5	210	-0,037	35,95	7,68
VKA	T102	-5,8	-0,3	30,8	131	-	23,51	5,84
	T103	-4,2	-0,8	23,0	131	-0,018	17,56	6,52
VLM	T101	-1,9	0,00	10,0	84	-	11,90	4,00
	T103	-10,4	-2,60	56,5	131	-0,064	43,13	6,02
	T104	0,0	-0,20	0,9	210	-0,032	0,43	-11,11
					ΔP_{t-c}	-1,495		



Obr. 10-4: Srovnání zatížitelnosti transformátorů při bezporuchovém provozu a při výpadku transformátoru T403

10.4 Ztráty činného výkonu při výpadku transformátoru T403

Ztráty činného výkonu v síti 110 V při výpadku transformátoru T403 jsou uvedeny v tab. 10-4. V tabulce je kromě celkových ztrát činného výkonu ΔP_c také procentuální změna ztrát činného výkonu $\Delta \Delta P_c$. Celkové ztráty činného výkonu při výpadku transformátoru T403 vzrostly o 61,969% oproti normálnímu stavu. Tento vzrůst především způsobily ztráty na vedení, které vzrostly o 70,283% oproti bezporuchovému stavu při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice.

Tab. 10-4: Ztráty činného výkonu při výpadku transformátoru T403

ΔP_{t-v}	ΔP_{t-v}	ΔP_c	$\Delta \Delta P_c$
(MW)	(MW)	(MW)	(%)
-9,614	-1,495	-11,109	61,969

11 NÁVRH PROVOZNÍCH A TECHNICKÝCH OPATŘENÍ

Z výsledků ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV je sice patrné, že všechny vedení a transformátory nejsou přetěžovány, nebo nejsou překročeny dovolené zkratové odolnosti rozvodů, nicméně je třeba upozornit na hodnoty, jež se blíží ke svým hraničním hodnotám. Proto jsou pro tyto případy uvedeny následující opatření:

- Zvýšení zkratové odolnosti rozvodny Sokolnice (SO). Při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice a při trojfázovém zkratu dosahuje zkratový výkon hodnoty 4294,2 MW, což je 85,88% své dosavadní zkratové odolnosti. Při případném budoucím připojení nového zdroje do takto provozované sítě 110 kV by mohlo dojít k překročení dovolené zkratové odolnosti rozvodny.
- Zvýšení zkratové odolnosti v rozvodně Hrušovany u Brna (HB). Zkratový výkon při paralelním provozu UO a při jednofázovém zkratu má hodnotu 3032 MW, což je 86,63% své dosavadní zkratové odolnosti. Opět by mohlo dojít k překročení zkratové odolnosti rozvodny při připojení nového zdroje do sítě 110 kV.
- Posílení přenosové schopnosti vedení 531, 541 a 544. Při paralelním provozu UO a při výpadku transformátoru T403 (400/110 kV) z rozvodny Otrokovice jsou tato vedení procentuálně zatížena následovně: 531 (56,81%), 541(58,59%) a 544 (61,69%).
- Posílení vedení 5510 o další vedení. V případě výpadku vedení dojde k přerušení napájení rozvodny Slavičín (SLM) ze sítě 110 kV. Rozvodna bude napájena pouze místní sítí 22 kV, což bude nedostatečné.

12 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá ustáleným chodem a zkratovými poměry v síti 110 kV E.ON při samostatném a paralelním provozu uzlových oblastí R Otrokovice a R Sokolnice. Tudiž cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit a porovnat obě zapojení sítě 110 kV z hlediska ustáleného chodu a zkratových poměrů.

Teoretické části práce je věnováno pět kapitol. V úvodu práce je popsána elektrizační soustava a její struktura. První kapitola je zaměřena na teorii výpočtu ustáleného chodu sítí vvn a zvn. Tato kapitola se nejprve zabývá klasifikací uzlů a dále se věnuje teorii výpočtu ustáleného chodu jako lineární a nelineární úloha. Je zde uveden základní popis a odvození rovnic jednotlivých úloh. Dále je popsán výpočet ustáleného chodu pomocí Newtonovy iterační metody.

Třetí kapitola je zaměřena na teorii výpočtů přechodných jevů v elektrizační soustavě. Ve svém úvodu popisuje rozdělení přechodných jevů, které se v elektrizační soustavě mohou vyskytnout. Dále je kapitola zaměřena na zkratové poruchy. Jsou zde uvedeny základní typy zkratových poruch, časový průběh a popis charakteristických veličin zkratového proudu.

Čtvrtá kapitola je věnována zkratovým výpočtům ve skutečných a poměrných hodnotách, či popisem zkratových impedancí jednotlivých elektrických zařízení. V poslední teoretické kapitole jsou detailně popsány výpočty zkratových proudů pro trojfázový zemní a jednofázový zkrat.

Praktická část diplomové práce se zabývá nejprve ustáleným chodem a zkratovými poměry v síti 110 kV při samostatném provozu UO Sokolnice-Otrokovice a posléze při paralelním provozu UO. U obou zapojení jsou rozebrány jednotlivé oblasti sítě včetně jejich schémat zapojení. Ustálený chod sítě byl kontrolován na napěťové poměry v jednotlivých uzlech sítě, zatížitelnosti vedení či transformátorů a ztrát činného výkonu v síti. Zkratové poměry v síti byly kontrolovány z hlediska zkratových odolností jednotlivých rozvodů při trojfázovém a jednofázovém zkratu. V kapitole devět bylo provedeno vyhodnocení a srovnání vypočítaných hodnot pro obě varianty zapojení.

V kapitole deset je uveden výpočet ustáleného chodu v síti 110 kV při mimořádném stavu. Tímto mimořádným stavem byl výpadek přenosového transformátoru T403 (400/110kV) z rozvodny Otrokovice při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice. Opět byl ustálený chod kontrolován na napěťové poměry v jednotlivých uzlech sítě, zatížitelnosti vedení, či transformátorů a ztrát činného výkonu v síti. Posléze byly tyto výsledky porovnávány s výsledky při normálním (bezporuchovém) provozu. Poslední kapitola je věnována návrhům na provozní a technická opatření.

Shrnutí dosažených výsledků

Cílem této práce bylo porovnat a vyhodnotit ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV při samostatném provozu UO Sokolnice-Otrokovice a při provozu paralelním (můstkovém). Proto se pokusíme v následujících několika řádcích výsledky této práce shrnout.

Z výsledků ustáleného chodu sítě 110 kV při samostatném a paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice je patrné, že všechny uzly mají při obou variantách zapojení napětí v dovolené toleranci $110\text{kV} \pm 10\%$. Rozvodny Sokolnice a Otrokovice, jež jsou hlavními rozvodnami ve svých oblastech, také splňují podmínku $119\text{kV} \pm 1\text{kV}$. Při paralelním provozu UO nám napětí v některých uzlech vzrostla, což můžeme považovat za výhodu tohoto zapojení, pokud nám napětí nevzroste nad dovolenou toleranci napětí. Z výsledků zatížení vedení je patrné, že žádné vedení není přetěžováno ani v jednom případě provozu. Naopak všechna vedení mají

dostatečnou rezervu zatížení pro splnění kritéria N-1. Největší změna zatížení při změně konfigurace sítě 110 kV nastala u vedení 540, 534_KB a 543 (viz *tab. 9-2*). Taktéž u transformátorů byla provedena kontrola zatížitelnosti při změně zapojení a žádný transformátor není přetěžován. Naopak všechny transformátory pracují s dostatečnou rezervou zatížení z důvodu možného budoucího rozšíření sítě či proměnlivého denního zatížení. Při paralelním provozu byla u většiny transformátorů snížena procentuální zatížitelnost, což můžeme považovat za další výhodu paralelního provozu. Největší změna zatížení při změně provozu sítě 110 kV nastala u transformátorů T102 (TD), T2 a T102 (oba NAD) – (viz *tab. 9-3*). Poslední kontrola byla provedena na ztráty činného výkonu v síti. Při změně provozu sítě bylo dosaženo snížení ztrát činného výkonu o -1,846%. Tuto vlastnost můžeme opět považovat za výhodu tohoto zapojení.

Z výsledků zkratových poměrů v síti 110 kV při samostatném a paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice je zřejmé, že všechny rozvodny vyhovují svým zkratovým odolnostem. Maximální hranici zkratového výkonu při trojfázovém zkratu se blíží rozvodna Sokolnice (85,88%) a při jednofázovém zkratu rozvodna Hrušovany u Brna (86,63%). Těmto rozvodnám bylo také navrženo zvýšení zkratových odolnosti z důvodu možného budoucího připojení nového zdroje, a tudíž překročení dovolené zkratové odolnosti. Při změně zapojení došlo ke zvýšení zkratových příspěvků jednotlivých rozvodn. Tuto vlastnost můžeme považovat za největší nevýhodu při paralelním provozu UO Sokolnice-Otrokovice. I přes tuto nepříznivou vlastnost lze říci, že paralelní provoz UO Sokolnice-Otrokovice je výhodný.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] REISS, L.; MALÝ, K.; PAVLÍČEK, Z*d. Teoretická elektroenergetika II*. Bratislava : ALFA, 1971. 440 s.
- [2] PAUZA, J. *Zkratý v elektrických obvodech*. Praha 1 : SNTL, 1970. 248 s.
- [3] HALUZÍK, E. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Brno : VUT v Brně, 1983. 126 s.
- [4] BLAŽEK, V.; PAAR, M. *Přenosové sítě*. Brno : VUT v Brně, 2007. 122 s.
- [5] BLAŽEK, V.; SKALA, P. *Distribuce elektrické energie*. Brno : VUT v Brně, 138 s.
- [6] ČSN EN 60909-0 (333022). *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách*. [s.l.]: [s.n.], 2002. 64 s.
- [7] Elektrizační soustava. [online]. [cit. 2012-10-22]. Dostupné z: <<http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/pred_web/1_MRes.pdf>>
- [8] TOMAN, Petr et al. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [9] KUČERA, Drahoš. *Elektroenergetika I*. 1. vyd. Brno: VUT, 1986, 214 s.
- [10] HODINKA, Miloslav. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. 2.vyd. Brno: VUT, 1985, 239 s.
- [11] [Http://www.eon-distribuce.cz/](http://www.eon-distribuce.cz/). [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <<<http://www.eon-distribuce.cz/cs/distribuce-elektriny/distribucni-soustava/technicke-informace.shtml>>>

POUŽITÝ SOFTWARE

- [1] Dispečerský program SINAUT Spektrum 4.4

PŘÍLOHY

- [1] Výpočty z dispečerného programu SINAUT Spectrum 4.4 pro jednotlivé varianty zapojení.