

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**

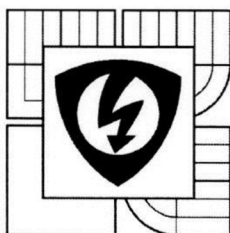
**USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V
SÍTI 110kV E.ON NAPÁJENÉ Z
TRANSFORMOVNY SOKOLNICE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

VÁCLAV VYČÍTAL

BRNO 2015



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

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Václav Vyčítal
Ročník: 2

ID: 134662
Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

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

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

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

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynu vedoucího práce

Termín zadání: 9. 2. 2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

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

Konzultanti diplomové práce:



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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

VYČÍTAL, V. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z transformovny Sokolnice*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2015, 114 stran.

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

.....

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Ramplovi za vstřícnost a pomoc při realizaci výpočtu v druhé části této práce.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

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

Václav Vyčítal

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

Master's Thesis

**Steady state and short-circuit
conditions within E.ON 110 kV power
network powered by transformer
substation Sokolnice**

by

Václav Vyčítal

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2015

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se skládá z pěti hlavních částí.

V první části práce je proveden teoretický rozbor výpočtu ustáleného chodu elektrizační soustavy v ustáleném stavu. Je zde uveden postup výpočtu ustáleného chodu sítě jako lineární i jako nelineární úloha. Pro výpočet nelineární úlohy je v této práci prezentována Newtonova iterační metoda.

V druhé části práce je pak proveden rozbor výpočtu zkratových proudů v souladu s platnou normou ČSN EN 60909. Tato část práce se dále zabývá výpočtem zkratových proudů metodou ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Pro výpočet nesymetrických zkratových poruch je zde také proveden rozbor metody souměrných složek.

Zbylé tři části práce se dále zabývají výpočtem ustáleného chodu a zkratových poměrů v části sítě Sokolnice. Třetí část práce se tedy věnuje popisu uzlové oblasti Sokolnice a výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v této síti pro dvě různé napájecí varianty. Pro obě varianty je také uvažován jeden mimořádný stav. (celkem jsou tedy počítány čtyři varianty)

Čtvrtá část práce se pak věnuje rozboru výsledků výpočtu a porovnání výsledků uvažovaných napájecích variant mezi sebou.

Poslední část práce pak navrhuje potřebná technická opatření pro bezporuchový chod v části sítě Sokolnice, která je zapotřebí provést na základě výsledků výpočtu a vyhodnocení výsledků získaných v předchozích dvou částech práce.

KLÍČOVÁ SLOVA: Ustálený chod; Elektrizační soustava; Distribuční soustava 110 kV Sokolnice; Newtonova iterační metoda; Zkrat; Zkratové poměry; Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu; Souměrné složky

ABSTRACT

This thesis can be divided into five main parts.

The first part deals with theoretical analysis of power flow calculation in power network during steady state condition. Load flow calculation is presented here as a linear and nonlinear problem. Newton iteration method is proposed for solving power flow as nonlinear problem.

The second part of this thesis deals with the analysis of short-circuit calculation in accordance with valid International Standard IEC 60909. The equivalent voltage source method is adopted in case of the short-circuit calculation. For the calculation of unbalanced short-circuit currents, the symmetrical components method is also presented.

The last three parts of this paper are focused on calculations of power flow and short-circuit conditions in power grid Sokolnice. So in the third part is the description of nodal area Sokolnice with its substations and the calculation of load flow and short-circuit conditions for two different power supply options. For each supply option is also considered an abnormal (fault) grid condition. (overall there are solved four different options)

The fourth part of this thesis deals with the result analysis and also the results of different power supply options are compared.

In the last part there are presented necessary technical improvements for fault-free operation of power grid Sokolnice based on the result of power flow and short-circuit conditions in that grid.

KEY WORDS:

Steady state; Power system; Distribution network 110 kV Sokolnice; Newton iteration method; Short-circuit; Short-circuit condition; Equivalent voltage source at the short-circuit location; Symmetrical components

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	14
1 ÚVOD.....	22
2 CÍLE PRÁCE	24
3 USTÁLENÝ CHOD V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ VVN.....	25
3.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA	25
3.1.1 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU.....	28
3.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA.....	29
3.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU ITERAČNÍ METODOU.....	31
3.3.1 GAUSS-SEIDLOVA METODA	31
3.3.2 NEWTONOVA ITERAČNÍ METODA	31
3.4 KLASIFIKACE UZLŮ A PODMÍNKY URČITOSTI CHODU SÍTĚ.....	38
4 ZKRATOVÉ PORUCHY	40
4.1 KLASIFIKACE ZKRATU.....	40
4.2 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATU	42
4.3 NEBEZPEČNÉ DĚJE PŘI ZKRATECH.....	42
4.4 ČASOVÝ PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU	43
4.5 ZKRAT ELEKTRICKY BLÍZKÝ A VZDÁLENÝ.....	47
4.6 METODY VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	48
4.7 METODA EKVIVALENTNÍHO NAPĚŤOVÉHO ZDROJE V MÍSTĚ ZKRATU.....	49
4.8 METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	50
4.8.1 TROJFÁZOVÝ ZEMNÍ ZKRAT	53
4.8.2 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT	54
4.9 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU	56
4.9.1 POČÁTEČNÍ SOUMĚRNÝ RÁZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_K^{**}	56
4.9.2 NÁRAZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD I_p	57
4.9.3 STEJNOSMĚRNÁ SLOŽKA ZKRATOVÉHO PROUDU $I_{D.C.}$	57
4.9.4 SOUMĚRNÝ VYPÍNAČÍ ZKRATOVÝ PROUD I_B	57
4.9.5 USTÁLENÝ ZKRATOVÝ PROUD I_K	58
4.9.6 EKVIVALENTNÍ OTEPLOVACÍ ZKRATOVÝ PROUD I_{TH}	58
4.10 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY VÝPOČTU	58
4.11 ZKRATOVÉ IMPEDANCE	59
4.11.1 SÍŤOVÉ NAPAJEČE	59
4.11.2 DVOUVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	60
4.11.3 TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY.....	61
4.11.4 VENKOVNÍ VEDENÍ A KABELY.....	62
4.11.5 SYNCHRONNÍ GENERÁTORY	63
4.11.6 OSTATNÍ ZKRATOVÉ IMPEDANCE	64

4.12 POSTUP VÝPOČTU ZKRATOVÝCH PROUDŮ	64
4.12.1 MAXIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	66
4.12.2 MINIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	66
5 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA SPOLEČNOSTI E.ON – OBLAST SOKOLNIC	67
5.1 OBLAST NAPÁJENÁ Z TRANSFORMOVNY SOKOLNICE.....	68
5.1.1 ROZVODNA SOKOLNICE (SO).....	68
5.1.2 ROZVODNY V OBLASTI SOKOLNICE SO/BC	70
5.2 CHARAKTERISTIKA ŘEŠENÉHO PROBLÉMU V OBLASTI SOKOLNIC.....	72
6 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY PŘI CHODU T202 A T203, SOUČASNÝ STAV 75	
6.1 MŮSTKOVÝ PROVOZ T202 A T203	76
6.1.1 ZHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO PROVOZU T202 A T203.....	79
6.2 MŮSTKOVÝ PROVOZ T202 A T203, VÝPADEK PŘÍPOJNICE C V SO.....	80
6.2.1 ZHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO PROVOZU T202 A T203 PŘI PORUŠE.....	83
7 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY PŘI CHODU T402 A T403	84
7.1 MŮSTKOVÝ PROVOZ T402 A T403	84
7.1.1 ZHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO PROVOZU T402 A T403.....	87
7.2 MŮSTKOVÝ PROVOZ T402 A T403, VÝPADEK PŘÍPOJNICE C V SO	88
7.2.1 ZHODNOCENÍ MŮSTKOVÉHO PROVOZU T402 A T403 PŘI PORUŠE.....	91
8 SROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAPÁJECÍCH VARIANT PRO UO SOKOLNICE	92
8.1 POROVNÁNÍ T202, T203 S T402, T403	92
8.2 POROVNÁNÍ T202, T203 S MIMOŘÁDNÝM STAVEM.....	97
8.3 POROVNÁNÍ T402, T403 S MIMOŘÁDNÝM STAVEM.....	103
9 NÁVRH TECHNICKÝCH OPATŘENÍ.....	109
10 ZÁVĚR.....	110
POUŽITÁ LITERATURA	113

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Schéma sítě</i>	26
<i>Obr. 3-2 Fázrový diagram napětí a proudu v uzlu se zdrojem</i>	29
<i>Obr. 3-3 Model π-článku</i>	30
<i>Obr. 3-4 Model sítě jen s podélnou reaktancí</i>	37
<i>Obr. 3-5 Napěťové poměry při konstantním U_j, Q, proměnném P</i>	37
<i>Obr. 3-6 Napěťové poměry při konstantním P, U_j a proměnným Q</i>	38
<i>Obr. 4-1 Druhy zkratů</i>	41
<i>Obr. 4-2 Průběh souměrného zkratového proudu</i>	44
<i>Obr. 4-3 Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou</i>	45
<i>Obr. 4-4 Složky zkratového proudu</i>	46
<i>Obr. 4-5 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu se stejnosměrnou složkou</i>	47
<i>Obr. 4-6 Průběh proudu elektricky vzdáleného zkratu</i>	47
<i>Obr. 4-7 Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory</i>	50
<i>Obr. 4-8 Trojfázový zemní zkrat</i>	53
<i>Obr. 4-9 Náhradní schéma při trojfázovém zkratu</i>	54
<i>Obr. 4-10 Jednofázový zkrat</i>	55
<i>Obr. 4-11 Náhradní schéma při jednofázové poruše</i>	56
<i>Obr. 4-12 Trojvintuťový transformátor - označení zapojení</i>	62
<i>Obr. 5-1 Územní působnost distribuční společnosti E.ON</i>	67
<i>Obr. 5-2 Transformační schéma rozvodny Sokolnice</i>	68
<i>Obr. 5-3 Schéma uzlové oblasti Sokolnice, T202, T203</i>	69
<i>Obr. 5-4 Transformační schéma rozvodny Sokolnice po roce 2017</i>	73
<i>Obr. 5-5 Schéma uzlové oblasti Sokolnice po rekonstrukci</i>	74
<i>Obr. 6-1 Schéma uzlové oblasti Sokolnice, T202, T203, při poruše</i>	80
<i>Obr. 7-1 Schéma UO Sokolnice s dvěma transformátory T402 a T403, výpadek C v SO</i>	88
<i>Obr. 8-1 Napěťové poměry, porovnání T202, T203 s T402, T403</i>	93
<i>Obr. 8-2 Zatížení vedení, porovnání T202, T203 s T402, T403</i>	94
<i>Obr. 8-3 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T402, T403</i>	95
<i>Obr. 8-4 Zatížení zkratovým výkonem, $3f$ i $1f$, porovnání T202, T203 s T402, T403</i>	97
<i>Obr. 8-5 Napěťové poměry, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	98
<i>Obr. 8-6 Zatížení vedení, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	99

<i>Obr. 8-7 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 8-8 Zatížení zkratovým výkonem, $3f$ i $1f$, porovnání T202, T203 se stavem po poruše T203</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 8-9 Napěťové poměry, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 8-10 Zatížení vedení, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 8-11 Zatížení transformátorů, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 8-12 Zatížení zkratovým výkonem, $3f$ i $1f$, porovnání T402, T403 se stavem po poruše T402</i>	<i>108</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3-1 Znaménka výkonů pro typ uzlu a posun proudu</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 4-1 Pravděpodobnost výskytu různých druhů zkratů</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 4-2 Napěťový součinitel c.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 5-1 Seznam dispečerských zkratk rozveden.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 6-1 Napěťové poměry, paralelně T202 a T203</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 6-2 Zatížení vedení, paralelně T202 a T203</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 6-3 Zatížení transformátorů, paralelně T202 a T203</i>	<i>77</i>
<i>Tabulka 6-4 Výkonová bilance, paralelně T202 a T203</i>	<i>78</i>
<i>Tabulka 6-5 Zkratové poměry, paralelně T202 a T203.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 6-6 Napěťové poměry, T202, T203, porucha</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 6-7 Zatížení vedení, T202, T203 porucha</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 6-8 Zatížení transformátorů, T202, T203 porucha</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 6-9 Výkonová bilance, T202 a T203 při poruše</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka 6-10 Zkratové poměry, T202, T203 při poruše</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka 7-1 Napěťové poměry, paralelně T402 a T403</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 7-2 Zatížení vedení, paralelně T402 a T403</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 7-3 Zatížení transformátorů, paralelně T402 a T403</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 7-4 Výkonová bilance, paralelně T402 a T403</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 7-5 Zkratové poměry, paralelně T402 a T403.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabulka 7-6 Napěťové poměry, T402 a T403, porucha</i>	<i>88</i>
<i>Tabulka 7-7 Zatížení vedení, T402 a T403, porucha</i>	<i>89</i>
<i>Tabulka 7-8 Zatížení transformátorů, T402 a T403, porucha</i>	<i>89</i>
<i>Tabulka 7-9 Výkonová bilance, T402 a T403, porucha</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka 7-10 Zkratové poměry, T402 a T403, porucha.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka 8-1 Napěťové poměry při chodu T202, T203, srovnání s T402, T403</i>	<i>92</i>
<i>Tabulka 8-2 Zatížení vedení, porovnání při T202, T203 a T402, T403</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka 8-3 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T402, T403</i>	<i>94</i>
<i>Tabulka 8-4 Činné ztráty, porovnání T202, T203 s T402, T403</i>	<i>95</i>
<i>Tabulka 8-5 Zkratové poměry, porovnání T202, T203 s T402, T403</i>	<i>96</i>
<i>Tabulka 8-6 Napěťové poměry, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO....</i>	<i>97</i>
<i>Tabulka 8-7 Zatížení vedení, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabulka 8-8 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>100</i>

<i>Tabulka 8-9 Činné ztráty, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>101</i>
<i>Tabulka 8-10 Zkratové poměry, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO.</i>	<i>101</i>
<i>Tabulka 8-11 Napěťové poměry, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>103</i>
<i>Tabulka 8-12 Zatížení vedení, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO....</i>	<i>104</i>
<i>Tabulka 8-14 Zatížení transformátorů, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>106</i>
<i>Tabulka 8-15 Činné ztráty, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO</i>	<i>107</i>
<i>Tabulka 8-13 Zkratové poměry, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO.</i>	<i>107</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značky komplexních veličin v této práci jsou zvýrazněny vodorovnou čarou nad/pod příslušným symbolem, např. impedance $\bar{Z} = R + jX$, $\underline{Z} = R + jX$.

Složkové soustavy v této práci byly značeny příslušným číslem v dolním indexu (1 – sousledná, 2 – zpětná, 0 – netočivá), (např. sousledná složka fázoru \bar{U}_A nesouměrné soustavy fázorů $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ je označena jako \bar{U}_{A1} , kde A, B, C značí jednotlivé fáze soustavy).

Některé symboly se v práci vyskytují s různými dolními indexy, výpis možných dolních indexů a jejich popis je proveden formou odrážek u dané veličiny. Pro všechny dolní indexy platí stejná jednotka jako je uvedena u základního označení, pokud není ke konkrétní odrážce uvedeno jinak. Některé symboly obsahují indexy sestavené z příslušného symbolu a k tomu odpovídajícího písmena podle seznamu dolních a horních indexů, např. fázor jmenovitého proudu generátoru vznikne jako \bar{I}_r a dolní index G tedy \bar{I}_{rG} .

A	Počáteční hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu $i_{d.c.}$	[A]
\bar{a}	Komplexní konstanta (operátor natočení)	[-]
C	Elektrická kapacita	[F]
c	Napěťový součinitel - max/min podle Tabulka 4-2	[-]
d	Střední geometrická vzdálenost mezi vodiči	[m]
d_{L1L2}	Vzdálenost mezi vodiči dvou fází L1 a L2	[m]
d_{L2L3}	Vzdálenost mezi vodiči dvou fází L2 a L3	[m]
d_{L3L1}	Vzdálenost mezi vodiči dvou fází L3 a L1	[m]
E	Napětí ekvivalentního zdroje (fázová efektivní hodnota)	[V]
\bar{E}	$= \bar{E}_1$	[V]
\bar{E}_1	Fázor vnitřního napětí alternátoru, sousledná složka	[V]
\bar{E}_2	Fázor vnitřního napětí alternátoru, zpětná složka	[V]
\bar{E}_0	Fázor vnitřního napětí alternátoru, netočivá složka	[V]
e	Eulerovo číslo ($\sim 2,7183$)	[-]
$[\bar{F}]$	Transformační desymetrizační matice	[-]
f	Označení funkce	[-]
f	Kmitočet	[Hz]
I	Efektivní hodnota proudu, absolutní hodnota	[A]
I_b	Souměrný vypínací zkratový proud (efektivní hodnota), všeobecně - b označení též pro vypínací zkratový proud při trojfázovém zkratu - $b1$ vypínací zkratový proud při jednofázovém zkratu	[A]

$I_{b,a}$	Nesymetrický vypínací zkratový proud	[A]
I_k	Ustálený zkratový proud (efektivní hodnota)	[A]
\bar{I}_k''	Fázor počátečního rázového zkratového proudu	[A]
I_k''	Počáteční souměrný rázový zkratový proud (efektivní hodnota)	[A]
	- k3 pro trojfázový zkrat	
	- k3e proud fázovým vodičem při trojfázovém zemním zkratu (k3E proud tekoucí zemí)	
	- k1 pro jednofázový zkrat	
	- k2 pro dvoufázový zkrat	
	- k2e proud fázovým vodičem pro dvoufázový zemní zkrat (k2E proud tekoucí zemí)	
	Viz. Obr. 4-1.	
I_k'	Počáteční efektivní hodnota tranzitního (přechodného) zkratového proudu	[A]
I_r	Jmenovitý proud elektrického zařízení	[A]
I_{th}	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud	[A]
I_v	Vztažný proud	[A]
\bar{I}_A	Fázor proudu fáze A (efektivní hodnota)	[A]
\bar{I}_B	Fázor proudu fáze B (efektivní hodnota)	[A]
\bar{I}_C	Fázor proudu fáze C (efektivní hodnota)	[A]
\bar{I}_i	Fázor proudu v i -tém uzlu	[A]
\bar{I}_j	Fázor proudu v j -tém uzlu	[A]
\bar{I}_1	Fázor proudu všeobecně, sousledná složka (efektivní hodnota)	[A]
\bar{I}_2	Fázor proudu všeobecně, zpětná složka (efektivní hodnota)	[A]
\bar{I}_0	Fázor proudu všeobecně, netočivá složka (efektivní hodnota)	[A]
$[\bar{I}]$	Sloupcový vektor uzlových proudů	[A]
\bar{i}_{ij}	Fázor proudu tekoucí větví spojující uzly i a j	[A]
i	Okamžitá hodnota proudu	[A]
i	Poměrná nebo Procentuelní hodnota proudu	[-]/[%]
$i_{a.c.}$	Okamžitá hodnota střídavé složky zkratového proudu	[A]
$i_{b,d.c.}$	Stejnoseměrná složka vypínacího zkratového proudu (v čase t_k)	[A]
$i_{d.c.}$	Okamžitá hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu	[A]
i_k	Okamžitá hodnota (nesouměrného) zkratového proudu	[A]
i_k	Okamžitá hodnota ustálené složky zkratového proudu	[A]
i_k''	Okamžitá hodnota subtranzitní složky zkratového proudu	[A]

i_k'	Okamžitá hodnota tranzitní složky zkratového proudu	[A]
i_{ka}	Stejně jako $i_{d.c.}$	[A]
i_p	Nárazový zkratový proud	[A]
[J]	Jacobián (matice)	[-]
K	Korekční součinitel pro impedance	[-]
	- G pro synchronní generátory	
	- S pro elektrárenský blok	
	- T pro transformátor	
k_1	Součinitel zkratového proudu pro různé druhy zkratu	[-]
k	Počet uzlů typu (P, Q)	[-]
L	Indukčnost	[H]
m	Součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu	[-]
n	Součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu	[-]
n	Počet vodičů ve svazku	[-]
n	Počet uzlů soustavy	[-]
n	Počet neznámých	[-]
P	Činný výkon	[W]
P_{dod}	Dodávaný činný výkon	[W]
P_{odb}	Odebíraný činný výkon	[W]
P_i	Činný výkon v uzlu i	[W]
P_j	Činný výkon v uzlu j	[W]
$P_{i,zadané}$	Zadaný činný výkon v uzlu i	[W]
P_{krT}	Jmenovité ztráty nakrátko transformátoru	[W]
Q	Jalový výkon	[VAr]
$Q_{i,zadané}$	Zadaný jalový výkon v uzlu i	[VAr]
Q_i	Jalový výkon v uzlu i	[VAr]
Q_j	Jalový výkon v uzlu j	[VAr]
q_n	Jmenovitý průřez	[m ²]
R	Rezistance	[Ω]
	- G synchronního generátoru	
	- Gf fiktivní rezistence synchronního generátoru	
	- L vedení	
	- Le vedení na jednotku délky [Ω.m ⁻¹]	
	- L20 vedení při 20°C	

	- M asynchronního motoru	
	- Q síťového napaječe	
	- T transformátoru	
R_S	Poloměr svazku svazkového vodiče	[m]
r	Poloměr vodiče	[m]
S_k''	Počáteční souměrný rázový zkratový výkon	[VA]
	- S_{kQ}'' síťového napaječe	
S	Zdánlivý výkon (třífázový)	[VA]
	- rG jmenovitý zdánlivý výkon synchronního generátoru	
	- rT jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	
	- V vztažný zdánlivý výkon	
	- kvyp zdánlivý výkon zkratové odolnosti	
\bar{S}	Komplexní výkon	[VA]
\bar{S}_i	Komplexní výkon v i -tém uzlu	[VA]
\bar{S}_j	Komplexní výkon v j -tém uzlu	[VA]
s	Poměrná hodnota zdánlivého výkonu	[-]
T_k''	Stejně jak τ_d''	[s]'
T_k'	Stejně jak τ_d'	[s]
$T_{d.c.}$	Stejně jak τ_s	[s]
t	Čas	[s]
t_k	Doba trvání zkratu	[s]
t_r	Jmenovitý převod transformátoru	[-]
U	Efektivní hodnota napětí (absolutní fázová hodnota)	[V]
U_m	Nejvyšší provozovací napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)	[V]
U_n	Jmenovité napětí soustavy, sdružené (efektivní hodnota)	[V]
U_r	Jmenovité napětí zařízení, sdružené (efektivní hodnota)	[V]
U_s	Efektivní hodnota napětí, sdružené (efektivní hodnota)	[V]
U_V	Vztažné napětí	[V]
\bar{U}_A	Fázor napětí fáze A (efektivní fázová hodnota)	[V]
\bar{U}_B	Fázor napětí fáze B (efektivní fázová hodnota)	[V]
\bar{U}_C	Fázor napětí fáze C (efektivní fázová hodnota)	[V]
\bar{U}_i	Fázor napětí v uzlu i	[V]
\bar{U}_j	Fázor napětí v uzlu j	[V]

$[\bar{U}]$	Sloupcový vektor uzlových napětí	[V]
$[\bar{U}_F]$	Sloupcový vektor nesymetrické soustavy fázorů napětí	[V]
$[\bar{U}_S]$	Sloupcový vektor symetrické soustavy fázorů napětí	[V]
\bar{U}_1	Fázor napětí všeobecně, sousledná složka (efektivní fázová hodnota)	[V]
\bar{U}_2	Fázor napětí všeobecně, zpětná složka (efektivní fázová hodnota)	[V]
\bar{U}_0	Fázor napětí všeobecně, netočivá složka (efektivní fázová hodnota)	[V]
u	Okamžitá hodnota napětí	[V]
u	Poměrná hodnota napětí	[-]
u_{kr}	Jmenovité napětí nakrátko transformátoru v procentech	[%]
u_{Rr}	Činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech	[%]
u_{Xr}	Induktivní složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru v procentech	[%]
u_0	Okamžitá hodnota napětí na začátku zkratové poruchy	[V]
W_L	Energie v indukčnostech	[J]
W_C	Energie v kapacitách	[J]
X	Reaktance	[Ω]
	- G2 reaktance synchronního generátoru (zpětná složka)	
	- L vedení	
	- L_e vedení na jednotku délky [$\Omega \cdot m^{-1}$]	
	- M asynchronního motoru	
	- Q síťového napaječe	
	- T transformátoru	
X_d	Synchronní reaktance	[Ω]
X_d'	Přechodná reaktance synchronního stroje v podélné ose	[Ω]
X_d''	Rázová reaktance synchronního stroje v podélné ose	[Ω]
X_q''	Rázová reaktance synchronního stroje v příčné ose	[Ω]
x	Proměnná	[-]
x_d''	Poměrná rázová reaktance generátoru, vztažená k jmenovité impedanci	[-]
x_T	Poměrná reaktance transformátoru vztažená k jmenovité impedanci	[-]
\bar{Y}	Prvek uzlové admitanční matice	[S]
\bar{Y}_{ii}	Diagonální prvek uzlové admitanční matice	[S]
\bar{Y}_{ij}	Mimodiagonální prvek uzlové admitanční matice	[S]

$[\bar{Y}]$	Uzlová admitanční matice	[S]
y	Proměnná	[-]
\bar{y}_{ij}	Větвовá admitance mezi uzly i a j	[S]
Z	Impedance, absolutní hodnota	[Ω]
\bar{Z}_k	Celková výpočtová zkratová impedance	[Ω]
\bar{Z}_N	Impedance uzemnění	[Ω]
\bar{Z}_1	Sousledná složka impedance všeobecně	[Ω]
\bar{Z}_2	Zpětná složka impedance všeobecně	[Ω]
\bar{Z}_0	Netočivá složka impedance všeobecně	[Ω]
z	Poměrná hodnota impedance	[-]
α	Počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy	[$^\circ$]
α	Úhel fázoru proudu (kapitola 3)	[$^\circ$]
α	Úhel admitance (kapitola 3)	[$^\circ$]
α_θ	Teplotní součinitel elektrického odporu	[K^{-1}]
ΔU_i	Diference velikosti napětí uzlu i , absolutní hodnoty	[V]
Δi	Rozdíl hodnot proudu	[%]
Δx_i	Diference kořenů od skutečných hodnot	[-]
Δy_i	Diference zadané hodnoty funkce f od odhadu kořenů	[-]
ΔP	Ztráty činného výkonu	[W]
ΔP_{ij}	Ztráty činného výkonu mezi uzly i a j	[W]
ΔQ_{ij}	Ztráty jalového výkonu mezi uzly i a j	[VAr]
ΔP	Diference činného výkonu v uzlu i	[W]
ΔQ	Diference jalového výkonu v uzlu i	[VAr]
ΔU	Rozdíl napětí (absolutní sdružená hodnota)	[V]
$\Delta \delta$	Rozdíl úhlů napětí v uzlu i	[$^\circ$]
ε	Odchylka vypočtených a zadaných výkonů zadaná	[%]
δ	Úhel fázoru napětí	[$^\circ$]
κ	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu	[-]
μ	Součinitel pro výpočet souměrného vypínacího zkratového proudu	[-]
μ_0	Permitivita vakua $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	[H.m ⁻¹]
π	Ludolfovo číslo ($\sim 3,1416$)	[-]
ρ	Rezistivita (měrný odpor)	[$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
τ_d	Časová konstanta rázové (subtranzitní) složky zkratového proudu	[s]

τ_d	Časová konstanta přechodné (tranzitní) složky zkratového proudu	[s]
τ_s	Časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu	[s]
φ	Fázový posun napětí a proudu	[°]
φ_k	Fázový úhel impedance zkratového obvodu	[°]
φ_{rG}	Fázový úhel mezi \bar{I}_{rG} a $\bar{U}_{rG}/\sqrt{3}$	[°]
θ	Teplota vodiče na konci zkratu	[K]
Φ	Označení funkce	[-]
ω	Úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]

Dolní indexy

1	Sousledná složka, pokud není uvedeno jinak
2	Zpětná složka, pokud není uvedeno jinak
0	Zpětná složka, pokud není uvedeno jinak
$k1$	Jednofázová zkratová jednofázová hodnota
$k3$	Trojfázová zkratová hodnota
n	Jmenovitá hodnota
$,p$	Přepočtená hodnota (na vztažnou napěťovou hladinu)
r	Jmenovitá hodnota zařízení
A, B, C	Značení fází v trojfázové střídavé soustavě
A, B, C nebo AB, AC, BC	značení impedancí trojvinutového transformátoru
G	Generátor
K	Impedance přepočtené impedančním korekčním součinitelem („korigované hodnoty“) (K_T, K_G, K_S)
L	Vedení, vodič
Q	Síť
T	Transformátor

Horní indexy

“	Počáteční rázová (zkratová) hodnota
‘	Tranzitní (přechodná) hodnota

SEZNAM ZKRATEK

BR	Břeclav
BRD	Břeclav ČD
CNT	Čebín
DDJ	Dolní Dunajovice

DK	Dukovany
ES	Elektrizační soustava
HB	Hrušovany u Brna
HJ	Hrušovany nad Jevišovkou
HO	Hodonín
HU	Hustopeče
KB	Klobouky
MI	Mikulov
Norma	ČSN EN 60909-0:2002. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách, část 0. [7]
OKC	Otrokovice
OS	Oslavany
PHE	Pohořelice
SLV	Slavětice
SO	Sokolnice
SUZ	Suchohrdly u Znojma
TD	Tvrdonice
UO	Uzlová oblast
ZSE	Západoslovenská energetika
3f / 1f	Třífázový zkrat / Jednofázový zkrat
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
zvn	zvlášť vysoké napětí

1 ÚVOD

Elektrizační soustava je vzájemně propojený soubor zařízení zahrnující výrobu, přenos, transformaci a spotřebu elektrické energie. Přenos elektrické energie se uskutečňuje prostřednictvím elektrických sítí. Celý proces od výroby elektrické energie až po spotřebu, zahrnující i jejich řízení je velice dynamický. V každém okamžiku se musí vyrobené množství elektrické energie rovnat množství spotřebovávanému. Přenos není bezztrátový a množství vyráběné elektrické energie musí být v každém okamžiku větší o velikost ztrát, způsobených průchodem proudu skrz elektrickou síť. Velikost spotřeby elektrické energie není v čase konstantní a její velikost lze odhadnout z historických dat zpracovaných do diagramů zatížení.

Jelikož při průchodu proudu vodičem se vodič ohřívá a z ekonomického i technického hlediska není možné pro konstrukci elektrických zařízení použít neomezeně velké vodiče, musí se při konstrukci elektrických zařízení uvažovat s maximální možnou velikostí proudu, který těmito vodiči poteče a nezpůsobí přehřátí vodiče nad dovolenou mez. Ovšem velikost proudu není jediný parametr, který by určoval podmínky pro dimenzování zařízení. Při dimenzování elektrických zařízení je také nezbytné zohlednit budoucí nárůst spotřeby. S rozšiřováním počítačové elektroniky se také klade čím dál tím větší důraz ze strany spotřebitelů na kvalitu odebírané (resp. dodávané) elektrické energie, sledovanými parametry jsou např.: absolutní velikost napětí, stálá síťová frekvence 50 Hz, symetrická napětí, vliv vyšších harmonických, šíření flikru atp. Zároveň je zapotřebí zohlednit, že mnoho průmyslových, ale i civilních zařízení není v dnešní době možné jednoduše odpojit od napájení elektrickou energií, jelikož by mohlo dojít k vysokým národohospodářským a ekonomickým ztrátám. Dále veškerá nemocniční zařízení je zapotřebí udržovat v prvním stupni zabezpečení dodávky elektrické energie, protože v případě výpadku napájení by došlo k ohrožení lidských životů. V neposlední řadě je zapotřebí elektrická zařízení navrhovat tak, aby odolaly vyskytujícím se poruchám v elektrizační soustavě. Jednou z takových poruch je také zkrat. Při zkratové poruše jsou elektrická zařízení zatěžována proudy mnohonásobně převyšujícími proudy jmenovité. S nástupem liberalizace trhu s elektřinou je při provozu elektrických sítí také nezbytné zohledňovat ekonomickou výhodnost jednotlivých postupů a řešení. V dnešní době do jisté míry také značnou měrou na celé odvětví elektroenergetiky působí tlak ekologické lobby, či především v posledních letech výstavba obnovitelných zdrojů energie, které výrobu dislokují v rámci celé sítě. Přejít z elektrizační soustavy z menšího množství větších výroben elektrické energie k většímu počtu menších dislokovaných výroben otevírá do budoucna nová úskalí v oblasti řízení a provozu ES jako celku.

Z předešlého výčtu je zřejmé, že požadavky na návrh, řízení a provoz zařízení elektrizační soustavy, dále se zaměříme jen na její přenos prostřednictvím elektrických sítí, jsou mnohdy protichůdné a vyžadují často komplexní řešení, která je zapotřebí mnohdy stanovovat na mnoho let dopředu i bez znalosti všech potřebných parametrů.

Jednou z hlavních analýz je výpočet ustáleného chodu sítě. Je prováděn z mnoha důvodů, které ovšem mají původ ve předešlých zmíněných požadavcích (rozvoj ES, obnova stávajících zařízení, problémy se stabilitou chodu elektrických sítí, dále slouží jako vstupní údaje k mnoha navazujícím úlohám analýzy elektrických sítí, atp.) Výpočet ustáleného chodu je na první pohled úloha triviální, ale skrývá jistá úskalí. Za prvé, velikosti odběrů a dodávek elektrické energie v praxi nebývá zadána pomocí proudů a napětí, ale pomocí výkonů. Tím se ovšem problém stává nelineárním a k řešení je zapotřebí použít některou z iteračních metod. Celý problém se dále komplikuje tím, že výpočet je zapotřebí v praxi provést pro desítky až stovky uzlů soustavy, což činí problém

numericky velice náročným. S nástupem výpočetní techniky již toto přestává být problém a umožňuje tím analytikům elektrických sítí více se věnovat samotné optimalizaci než výpočtům iteračních kroků.

Tato práce se tedy bude dále zabývat výpočtem ustáleného chodu, jakožto jednou ze základních úloh analýzy elektrických sítí. Další část práce se dále zaměří na výpočet zkratových proudů, jelikož ty jsou z hlediska dimenzování jedním ze základních a nezbytných parametrů pro správný návrh parametrů elektrických zařízení.

V druhé části práce pak bude zpracovaná teorie využita a ukázána její reálná aplikace při výpočtu sledovaných elektrických veličin při stávajícím provozu části sítě Sokolnice a porovnána s výpočtem po provedení rekonstrukce.

2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je zhodnocení současného provozu části sítě 110 kV Sokolnice a také zhodnocení po plánované rekonstrukci transformační stanice Sokolnice v roce 2017. V současné době je část distribuční sítě v oblasti Sokolnic napájena dvěma transformátory 220/110 kV. Po plánované rekonstrukci bude možno tuto síť napájet pomocí dvou transformátorů 400/110 kV. Cílem práce je tedy provést výpočet ustáleného chodu a zkratových poměrů pro současné zapojení dané sítě s dvěma transformacemi napětí 220/110 kV a dále provést obdobný výpočet pro budoucí napájecí variantu se dvěma přímými transformacemi napětí 400/110 kV. V práci by pak mělo být provedeno porovnání obou uvedených variant a dále provedeno i jejich vyhodnocení na základě vypočtených elektrických veličin.

Práce je rozdělena do dvou částí, kde cílem první je pojednat o použitých metodách výpočtu ustáleného chodu a zkratových proudů. V druhé části práce je pak přiblížena problematika části distribuční sítě E.ON 110 kV Sokolnice s následnou prezentací výsledků výpočtu a jejich diskusí.

Názornější popis řešené problematiky a rekonstrukce transformační stanice Sokolnice je uveden z části v kapitole 5.1.1 a především pak v kapitole 5.2.

3 USTÁLENÝ CHOD V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ VVN

Ustáleným chodem rozumíme stav provozu sítě, kdy je možné považovat její parametry za konstantní. Přísně vzato takovýto stav v elektrizačních sítích z dlouhodobějšího hlediska nenastává, neboť vzhledem k rozsahu elektrizační soustavy (dále jen ES) nelze zaručit, že v některé její části nedochází k přechodným dějům, změnám zatížení či změnám výroby. Jednalo by se např. o přechodné děje související s poruchami v ES (zkraty), údery blesků do vedení, přepínání regulačních odboček transformátorů pod zatížením, připínání a odpínání jednotlivých prvků ES (vedení) nebo spotřebičů či zdrojů elektrické energie. Výše uvedené faktory ovlivňující efektivní hodnoty napětí a proudů v síti je ovšem možné zanedbat a dále řešit ustálený chod ES pro přesně stanovený výchozí stav (nastavení odboček regulačních transformátorů, připojené zátěže a výrobní, připojená vedení atd.). [1]

Řešením ustáleného chodu ES lze tedy rozumět výpočet elektrických veličin v jednotlivých prvcích - větvích a uzlech ES. Především nás zajímá rozložení napětí, velikost činných a jalových výkonů, velikost proudů a ztrát. Hodnoty získané řešením ustáleného chodu ES jsou důležité z mnoha důvodů. Jsou zapotřebí pro návrh rozvoje ES, jsou nezbytné pro její zdárné řízení a jsou dále využívány jako vstupní údaje k dalším výpočtům jako např. výpočet přechodných dějů (zkraty, statická a dynamická stabilita), výpočet hospodárného rozdělení výroby činných a jalových výkonů, výpočet optimální regulace napětí či hodnocení spolehlivosti ES aj. Řešením ustáleného chodu lze také například zjistit, zda není některý přenosový prvek přetížen. Výpočet se zpravidla provádí pro maximální a minimální zatížení sítě.

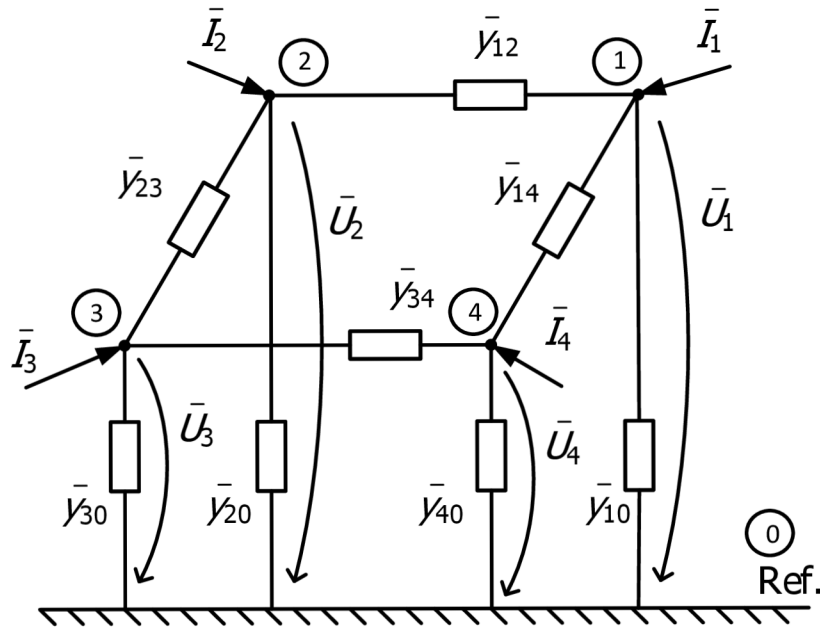
Pro výpočet ustáleného chodu je zapotřebí sestavit základní rovnice popisující dané zapojení a stav sítě. Při tom se vychází ze znalosti elektrických parametrů prvků sítě, uzlových napětí, proudů, mezi nimiž platí závislosti podle Prvního a Druhého Kirchhoffova zákona. Lze tedy využít metod z teoretické elektrotechniky pro řešení lineárních obvodů, jako jsou metoda uzlových napětí nebo metoda smyčkových proudů.

V dalším textu se budeme zabývat metodou uzlových napětí, neboť se vyznačuje jednodušším algoritmem výpočtu vlastních a vzájemných uzlových admitancí a snadným zakódováním konfigurace (propojením jednotlivých prvků) sítě. Dále přijmeme předpoklad, že ES se skládá ze souměrných prvků, zdrojů a odběrů což nám umožní řešení třífázového problému pomocí jednofázového sousledného schématu. [2]

3.1 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

Nejprve si objasníme vznik uzlové admitanční matice. Uvažujme zapojení podle Obr. 3-1, schéma je tvořeno čtyřmi uzly označenými čísly a pátým uzlem referenčním o nulovém potenciálu (zemí). Prvky zadaného schématu jsou popsány svými admitancemi a v uzlech daného zapojení jsou známy uzlové proudy \bar{I}_1 až \bar{I}_4 (externí proudové zdroje). Dané zapojení je možné popsat následující soustavou rovnic vycházejících z II. Kirchhoffova zákona. Předpokládáme přitom, že jednotlivé větve schématu nemají vzájemné induktivní vazby.

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_1 &= \bar{y}_{12}(\bar{U}_1 - \bar{U}_2) + \bar{y}_{14}(\bar{U}_1 - \bar{U}_4) + \bar{y}_{10}\bar{U}_1 \\
 \bar{I}_2 &= \bar{y}_{12}(\bar{U}_2 - \bar{U}_1) + \bar{y}_{23}(\bar{U}_2 - \bar{U}_3) + \bar{y}_{20}\bar{U}_2 \\
 \bar{I}_3 &= \bar{y}_{23}(\bar{U}_3 - \bar{U}_2) + \bar{y}_{34}(\bar{U}_3 - \bar{U}_4) + \bar{y}_{30}\bar{U}_3 \\
 \bar{I}_4 &= \bar{y}_{14}(\bar{U}_4 - \bar{U}_1) + \bar{y}_{34}(\bar{U}_4 - \bar{U}_3) + \bar{y}_{40}\bar{U}_4
 \end{aligned}
 \tag{3-1}$$



Obr. 3-1 Schéma sítě

Po provedení úprav v (3-1) lze psát

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_1 &= (\bar{y}_{12} + \bar{y}_{14} + \bar{y}_{10})\bar{U}_1 - \bar{y}_{12}\bar{U}_2 - \bar{y}_{14}\bar{U}_4 \\
 \bar{I}_2 &= (\bar{y}_{12} + \bar{y}_{23} + \bar{y}_{20})\bar{U}_2 - \bar{y}_{12}\bar{U}_1 - \bar{y}_{23}\bar{U}_3 \\
 \bar{I}_3 &= (\bar{y}_{23} + \bar{y}_{34} + \bar{y}_{30})\bar{U}_3 - \bar{y}_{23}\bar{U}_2 - \bar{y}_{34}\bar{U}_4 \\
 \bar{I}_4 &= (\bar{y}_{14} + \bar{y}_{34} + \bar{y}_{40})\bar{U}_4 - \bar{y}_{14}\bar{U}_1 - \bar{y}_{34}\bar{U}_3
 \end{aligned}
 \tag{3-2}$$

Pokud zavedeme následující admittance

$$\begin{aligned}
 \bar{Y}_{11} &= \bar{y}_{12} + \bar{y}_{14} + \bar{y}_{10} \\
 \bar{Y}_{22} &= \bar{y}_{12} + \bar{y}_{23} + \bar{y}_{20} \\
 \bar{Y}_{33} &= \bar{y}_{23} + \bar{y}_{34} + \bar{y}_{30} \\
 \bar{Y}_{44} &= \bar{y}_{14} + \bar{y}_{34} + \bar{y}_{40} \\
 \bar{Y}_{12} &= \bar{Y}_{21} = -\bar{y}_{12} \\
 \bar{Y}_{14} &= \bar{Y}_{41} = -\bar{y}_{14} \\
 \bar{Y}_{23} &= \bar{Y}_{32} = -\bar{y}_{23} \\
 \bar{Y}_{34} &= \bar{Y}_{43} = -\bar{y}_{34}
 \end{aligned}
 \tag{3-3}$$

A jelikož mezi uzly 1 a 3 není žádné spojení (podobně 2 a 4)

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{13} &= \bar{Y}_{31} = 0 \\ \bar{Y}_{24} &= \bar{Y}_{42} = 0\end{aligned}\tag{3-4}$$

Soustavu rovnic (3-2) můžeme převést za pomoci (3-3) a (3-4) na

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \bar{Y}_{11}\bar{U}_1 + \bar{Y}_{12}\bar{U}_2 + \bar{Y}_{13}\bar{U}_3 + \bar{Y}_{14}\bar{U}_4 \\ \bar{I}_2 &= \bar{Y}_{21}\bar{U}_1 + \bar{Y}_{22}\bar{U}_2 + \bar{Y}_{23}\bar{U}_3 + \bar{Y}_{24}\bar{U}_4 \\ \bar{I}_3 &= \bar{Y}_{31}\bar{U}_1 + \bar{Y}_{32}\bar{U}_2 + \bar{Y}_{33}\bar{U}_3 + \bar{Y}_{34}\bar{U}_4 \\ \bar{I}_4 &= \bar{Y}_{41}\bar{U}_1 + \bar{Y}_{42}\bar{U}_2 + \bar{Y}_{43}\bar{U}_3 + \bar{Y}_{44}\bar{U}_4\end{aligned}\tag{3-5}$$

V maticovém zápisu

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix}\tag{3-6}$$

Nebo

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{U}]\tag{3-7}$$

- Kde $[\bar{I}]$ je sloupcový vektor uzlových proudů (proudů externích proudových zdrojů se znaménky „+“ nebo odběrů se znaménky „-“), $[\bar{U}]$ je sloupcový vektor neznámých uzlových napětí měřených vůči uzlu referenčnímu, $[\bar{Y}]$ je uzlová admitanční matice, k jejímuž sestavení lze konstatovat následující:

- diagonální prvky \bar{Y}_{ii} vzniknou součtem admitancí připojených k danému uzlu i
- mimodiagonální prvky \bar{Y}_{ij} jsou rovny záporně vzaté hodnotě admitance mezi uzly i a j , $j \neq i$

Soustavu rovnic (3-7) pro n uzlů, mimo uzlu referenčního, je možné zapsat jako

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}\bar{U}_j\tag{3-8}$$

- Kde $i = 1, 2, 3 \dots n$; a referenční uzel budeme dále značit číslem 0.

Chod sítě z Obr. 3-1 při znalosti uzlových proudů by bylo možné vypočíst z (3-7) jako

$$[\bar{U}] = [\bar{Y}]^{-1} \cdot [\bar{I}]\tag{3-9}$$

Pozn. 3-1: Z hlediska výpočetní techniky a algoritmy je důležité zmínit následující: Uzlová admitanční matice je diagonálně symetrická, čehož lze využít k úspoře počítačové paměti a pracovat s ní jen jako horní trojúhelníkovou maticí. V typické elektrizační síti je pak každý uzel spojen jen s pár dalšími uzly a admitanční matice bude tedy obsahovat množství nulových prvků. Výše uvedených vlastností je vhodné využít při hledání řešení soustavy rovnic (3-9). Jelikož prostá Gaussova eliminace je z hlediska výpočetní rychlosti při hledání inverzní matice pomalá, je vhodnější využít matematické metody LU rozkladu, známe pod anglickým názvem „triangular factorization“ či „LU decomposition“. [3]

Jednoduchým výpočtem by se dalo dokázat, že pokud bychom při sestavování uzlové admitanční matice neuvažovali příčné admittance (podle Obr. 3-1 tedy $\bar{y}_{10}, \bar{y}_{20}, \bar{y}_{30}, \bar{y}_{40}$), tak takto vzniklá matice $[\bar{Y}]$ by byla singulární, a tedy k takovéto matici by nebylo možné nalézt matici inverzní. Takováto soustava rovnic by byla závislá. Tuto závislost je možné odstranit eliminací bilančního uzlu.

Pozn. 3-2: Při sestavování náhradního schématu pro výpočet ustáleného chodu jednotlivé prvky schématu nahradíme jejich příčnými a podélnými admittance, vedení nahradíme π -články, transformátory Γ nebo π články. Příčné admittance jsou připojeny mezi daný uzel a uzel referenční. V dalším kroku je nezbytné, pokud neprovádíme výpočet na jedné napěťové hladině, přepočíst všechny prvky schématu na stejnou napěťovou hladinu. V dalším textu budeme velkými písmeny značit prvky admitanční matice a uzlové veličiny a malými písmeny admittance jednotlivých větví a větvové proudy.

Text kapitoly byl vytvořen podle [2].

3.1.1 Eliminace bilančního uzlu

V předchozí kapitole jsme provedli odvození rovnice (3-6) i s uvažováním příčných admítancí, a tedy soustava rovnic by byla regulární. Úskalí výpočtu podle (3-9) by spočívalo v tom, že při výpočtu zpravidla známe jen proudy odběrů a nikoliv zdrojů. Proud zdrojů musí hradit jak proudy odběrů, tak proudy ztrát, které vzniknou průtokem proudů příčnými prvky schématu Obr. 3-1 (tedy $\bar{y}_{10}, \bar{y}_{20}, \bar{y}_{30}, \bar{y}_{40}$).

Problém lze obejít, zavedeme-li jeden z uzlů jako uzel bilanční. Proud bilančního uzlu bude tedy hradit neznámé proudy tekoucí příčnými prvky a bude tedy vyrovnávat bilanci mezi celkovou výrobou a spotřebou. Abychom zachovali v (3-6), resp. (3-8) stejný počet neznámých jako je rovnic, zavedeme si v uzlu bilančním známé napětí \bar{U}_1 . Z formálního hlediska bude v dalším textu uzel bilanční vždy označován číslem 1. Soustavu rovnic (3-6) je pak možné přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{21} \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{31} \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{41} \bar{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

A obdobně pro (3-8)

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1} \bar{U}_1 + \sum_{j=2}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3-11)$$

Po vypočtení neznámých napětí $\bar{U}_2, \bar{U}_3, \dots, \bar{U}_n$ lze pak neznámý proud v bilančním uzlu dopočíst ze znalosti proudů jednotlivých větví včetně proudů příčnými admittance. Vypuštění rovnice pro bilanční uzel v (3-10) a (3-11) nazýváme eliminací bilančního uzlu. Zároveň eliminací bilančního uzlu se sníží řád uzlové admitanční matice na $(n-1)$. Z hlediska výpočtu pro soustavu (3-10) platí stejná pravidla, jako byly uvedeny v předešlé kapitole v Pozn. 1. Po vyřešení soustavy (3-10) je možné ze znalosti uzlových napětí dopočíst proudy jednotlivými větvemi schématu jako

$$\bar{i}_{ij} = \bar{y}_{ij} (\bar{U}_i - \bar{U}_j) \quad (3-12)$$

-kde \bar{i}_{ij} je proud tekoucí větví o admitanci \bar{y}_{ij} z uzlu i do uzlu j . Obdobně \bar{U}_i je uzlové napětí uzlu i a \bar{U}_j je uzlové napětí uzlu j .

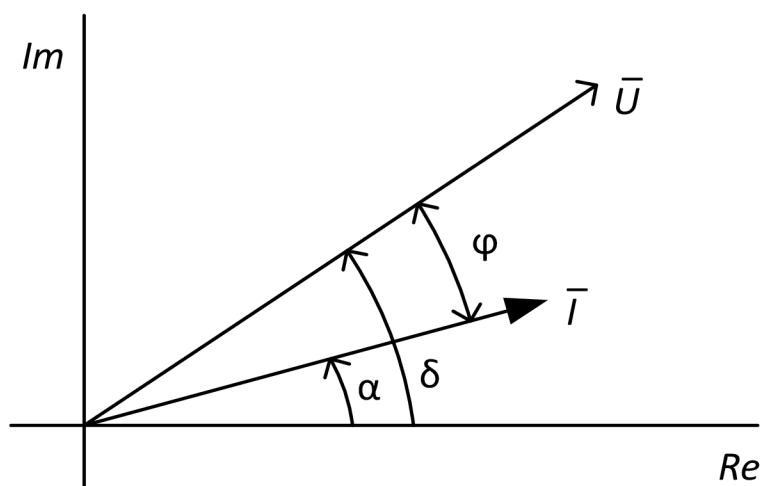
Kapitola zpracována podle [2].

3.2 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

Rovnice odvozené v předešlé kapitole předpokládaly, že dodávky a odběry jsou v dané síti zadané velikostí jejich proudů. V praxi tomu ovšem tak nebývá a namísto proudů, jsou známy příslušné činné a jalové výkony. Tedy např. pro i -tý uzel platí

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (3-13)$$

-kde \bar{I}_i^* je komplexně sdružený proud k proudu \bar{I}_i . Než přejdeme k odvození nelineárních vztahů pro výpočet uzlových napětí ustáleného chodu sítě, objasníme si znaménka u činného a jalového výkonu ve vztahu (3-13). Přitom vyjdeme z fázorového diagramu Obr. 3-2, který znázorňuje výrobu činného a induktivního jalového výkon. Ve fázorovém diagramu je vyneseno uzlové napětí a proud v uzlu se zdrojem.



Obr. 3-2 Fázorový diagram napětí a proudu v uzlu se zdrojem

Pro uvedený fázorový diagram lze pro komplexní výkon psát

$$\begin{aligned} \bar{S} &= P + jQ = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = (U \angle \delta) \cdot (I \angle -\alpha) = U \cdot I \angle (\delta - \alpha) = U \cdot I \angle \varphi = S \angle \varphi = \\ &= S(\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) \end{aligned} \quad (3-14)$$

Kde $\varphi = \delta - \alpha$ značí fázový posun napětí a proudu. Pro náš induktivní posun bude tedy $\varphi > 0$, $P > 0$ a $Q > 0$. Pakliže bychom uvažovali všechny čtyři kombinace: tedy dodávku induktivního nebo kapacitního a odběr induktivního nebo kapacitního jalového výkonu lze sestavit následující tabulku. (Přičemž pro odběrový uzel uvažujeme proud záporně, což změní znaménka u činného a jalového výkonu)

Tabulka 3-1 Znaménka výkonů pro typ uzlu a posun proudu [2]

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

Vyjádříme-li z rovnice (3-13) proud

$$\bar{I}_i = \left(\frac{\bar{S}_i}{\bar{U}_i} \right)^* = \left(\frac{P_i + jQ_i}{\bar{U}_i} \right)^* = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} \quad (3-15)$$

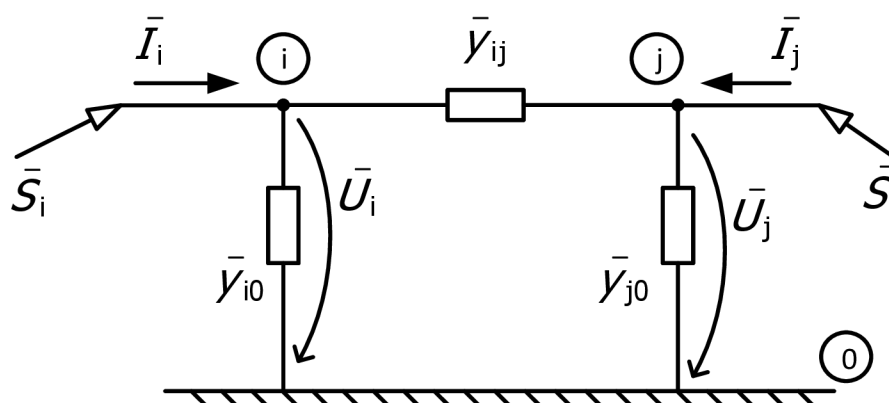
Který dosadíme do (3-11)

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3-16)$$

Vztah (3-16) jsme odvodili pro síť se zavedeným bilančním uzlem a tedy známým napětím \bar{U}_1 . Dále je z tohoto vztahu patrná nelinearita vzniklého problému. Pakliže jsou známé výkony odběrů a dodávek, uzlová admítanční matice a napětí v bilančním uzlu výpočet ustáleného chodu povede na řešení soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic. K řešení této soustavy rovnic pro ustálený chod se nejčastěji používá Gauss-Seidlova a nebo Newtonova iterační metoda. Algoritmus Newtonovy iterační metody bude objasněn v následujících kapitolách.

Za předpokladu, že jsme podle soustavy (3-16) vypočetli neznámá uzlová napětí, je zapotřebí určit toky výkonů a výkonové ztráty v síti, přičemž uzel bilanční bude hradit nerovnováhu mezi dodávkou, odběrem a ztrátami.

Rozložení toků výkonu a ztrát, lze popsat na modelu π -článku Obr. 3-3

Obr. 3-3 Model π -článku

Pro proud tekoucí do uzlu i

$$\bar{I}_i = (\bar{U}_i - \bar{U}_j) \bar{y}_{ij} + \bar{U}_i \bar{y}_{i0} \quad (3-17)$$

A výkon

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \bar{I}_i^* \quad (3-18)$$

Je-li $P_i > 0$ činný výkon vtéká do uzlu i , znaménko u jalového výkonu pak určuje charakter jalového výkonu.

Pro proud a výkon do uzlu j

$$\bar{I}_j = (\bar{U}_j - \bar{U}_i)y_{ij} + \bar{U}_j \bar{y}_{j0} \quad (3-19)$$

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

Ztráty činného a jalového výkonu pro uvedený π -článek lze pak vypočítat jako algebraický součet výkonů tekoucích do uzlu i a j

$$\Delta P_{ij} = P_i + P_j \quad (3-20)$$

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

Pozn. 3-3: Při sestavování uzlové admitanční matice jsme předpokládali náhradu trojfázové sítě jejím náhradním jednofázovým schématem. Výše uvedené vztahy tedy platí pro fázové hodnoty napětí a jednofázový výkon.

Kapitola zpracována podle [2].

3.3 Výpočet ustáleného chodu iterační metodou

K výpočtu ustáleného chodu se nejčastěji používají Gauss-Seidlova, nebo Newtonova iterační metoda. V této kapitole bude především pojednáno o druhé zmiňované. Více informací na téma numerických metod vhodných pro výpočet ustáleného chodu lze nalézt např. v [4].

3.3.1 Gauss-Seidlova metoda

Gauss-Seidlova iterační metoda se vyznačuje jednoduchým algoritmem výpočtu a potřebuje oproti jiným iteračním metodám poměrně krátkou dobu výpočtu na jeden iterační krok. Nevýhodou této metody je poměrně pomalá konvergence (zvláště u málo zauzlených sítí, např. [5] uvádí, že pro síť o 100 až 200 uzlech je zapotřebí řešit 300 až 500 iterací). Dále při této výpočetní metodě je zapotřebí volit vysokou přesnost výpočtu (velmi malé ϵ), jelikož nepřesně vypočítaná napětí způsobují značnou chybu v tocích výkonů a uzlových bilancích výkonů. Jelikož výše uvedené nevýhody do jisté míry odstraňuje právě Newtonova iterační metoda, budeme se jí v dalším textu věnovat [2]. Algoritmus výpočtu Gauss-Seidlovy metody lze nalézt např. [1], [2] nebo [3].

3.3.2 Newtonova iterační metoda

Nejprve si objasníme princip vzniku iterační metody na obecném příkladu. Hledáme řešení následující soustavy nelineárních rovnic

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3-21)$$

Pakliže provedeme počáteční odhad kořenů v nulté iteraci, které označíme $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Pak pro přesné hodnoty kořenů lze psát $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n$,

kde $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ značí hodnotu, o kterou se liší odhadnuté kořeny od skutečných hodnot. Soustavu rovnic (3-21) můžeme tedy přepsat

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3-22)$$

Soustavu nelineárních rovnic (3-22) lze přepsat za pomoci Taylorova rozvoje funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$ jako

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n + \Phi_1 &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n + \Phi_2 &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n + \Phi_n &= y_n \end{aligned} \quad (3-23)$$

Kde např. $\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ a obdobně pro zbylé parciální derivace, Φ_1 zahrnuje členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \dots, \Delta x_n$ a druhé a vyšší derivace funkce f_1 .

Pakliže provedeme počáteční odhady kořenů velice blízké přesným hodnotám, můžeme pak předposlední člen Φ_1 v rovnicích (3-23) zanedbat, jelikož difference Δx_i jsou dostatečně malé a $\Phi_1 \rightarrow 0$. Pokud dále označíme $y_1^{(0)} = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ atd. můžeme soustavu (3-23) přepsat jako

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n &= y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n &= y_2 - y_2^{(0)} = \Delta y_2^{(0)} \\ &\vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1 + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n &= y_n - y_n^{(0)} = \Delta y_n^{(0)} \end{aligned} \quad (3-24)$$

Kde $\Delta y^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a $y_1^{(0)}$ určené dosazením počátečních odhadů kořenů do rovnice (3-23). Odvozenou soustavu rovnic lze přepsat maticově

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

Zkráceně

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (3-26)$$

Kde $[J]$ je matice parciálních derivací tzv. Jacobián. Jestliže v soustavě (3-25) nebo (3-26) dopočteme Jacobián a známe vektor pravých stran, můžeme dopočíst vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určit nové, opravné odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-27)$$

Které použijeme pro výpočet v další iteraci. Jelikož jsme v (3-24), resp. (3-25) počítali jen s prvními derivacemi Taylorova rozvoje, vektor vypočtených diferencí $[\Delta x]$ nebude úplně přesný a tedy hodnoty nových opravných odhadů se budou od přesných hodnot lišit.

Iterační proces postupného zpřesňování kořenů soustavy rovnic (3-21) lze zapsat úpravou rovnic (3-26) a (3-27) do iteračního tvaru

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}] \quad (3-28)$$

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

- kde k určuje k -tou iteraci.

Uvedené odvození jsme provedli za předpokladu existence spojitých derivací $\partial f_i / \partial x_j$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$; jednoznačnost řešení soustavy rovnic (3-25) a konvergenci iteračního postupu, která bývá obvykle při praktických výpočtech ustáleného chodu sítě splněna.

Nyní jsme si odvodili dostatečný matematický aparát k tomu, abychom jej mohli aplikovat na rovnice (3-16) popisující ustálený chod sítě. Rovnici přepíšeme do tvaru

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3-29)$$

Pokud fázory napětí a komplexní admitanci v pravé části rovnice (3-29) rozepíšeme v polárním tvaru

$$\bar{U}_i = U_i \angle \delta_i, \quad \bar{U}_i^* = U_i \angle -\delta_i, \quad \bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij} \quad (3-30)$$

Pak můžeme rovnici (3-29) upravit na reálnou a imaginární část

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n (U_i \angle -\delta_i) \cdot (U_j \angle \delta_j) \cdot (Y_{ij} \angle \alpha_{ij}) \quad (3-31)$$

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

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^n (U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij}) [\cos(-\delta_i + \delta_j + \alpha_{ij}) + j \sin(-\delta_i + \delta_j + \alpha_{ij})]$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij}) \cos[(-1) \cdot (\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij})]$$

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

S uvážením sudosti funkce $\cos(-x) = \cos(x)$ a lichosti funkce $\sin(-x) = -\sin(x)$ můžeme z posledních dvou vztahů (3-31) psát

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n (U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij}) \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n (U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij}) \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \end{aligned} \right\} i = 2, 3, \dots, n \quad (3-32)$$

Což je soustava $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Předpokládáme přitom znalost všech dodávaných činných a jalových výkonů do všech uzlů, kromě uzlu bilančního, kde je zadáno napětí U_1 a jeho úhel δ_1 (obvykle se zvolí $\delta_1 = 0$). Podle schématu (3-25) lze pro difference napětí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ psát za použití (3-32)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

Je dobré zmínit, že ΔU_i zde neznamená úbytek napětí, jak bychom mohli podle jiné literatury předpokládat, ale diferenci odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnic (3-32).

Soustavu rovnic (3-33) lze zkráceně zapsat

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

Nyní si vypočteme jednotlivé prvky Jacobiánu (parciální derivace) derivováním rovnic (3-32) podle jednotlivých proměnných.

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

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i Y_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-35)$$

Mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-36)$$

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

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-37)$$

Mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-38)$$

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

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i Y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-39)$$

Mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-40)$$

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

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-41)$$

Mimodiagonální prvky pro $i \neq j$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (3-42)$$

Pro názornost zde uvedeme algoritmus výpočtu

1. V nultém iteračním kroku $k = 0$ odhadneme napětí v uzlech sítě a jejich úhly, obvykle lze zvolit $\bar{U}_i^{(0)} = \bar{U}_1$, $i = 2, 3, \dots, n$ a obvykle se volí $\delta_1 = 0^\circ$.
2. Dosazením napětí do rovnic (3-32) vypočteme difference výkonů

$$\Delta P_i^{(0)} = P_{i,zadané} - P_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)}) \quad (3-43)$$

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

3. Výpočet prvků Jacobiánu dosazením odhadnutých napětí v nultém iteračním kroku do rovnic (3-35) až (3-42).
4. Vyřešením soustavy lineárních rovnic (3-33) dostáváme difference $\Delta U_i^{(0)}, \Delta \delta_i^{(0)}$ v nulté iteraci.
5. Vypočítáme opravné hodnoty napětí a jejich úhlů na konci prvního iteračního kroku

$$\left. \begin{aligned} U_i^{(1)} &= U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)} \\ \delta_i^{(1)} &= \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)} \end{aligned} \right\} \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3-44)$$

6. Zpřesněnými napětími a jejich úhly nahradíme původní odhady jejich velikosti a opět v iteračním výpočtu postupujeme analogicky podle bodů ad 2) až ad 6). Horní index tedy bude nabývat postupně hodnot (0), (1), (2), ... podle jednotlivých iteračních kroků (k). Výpočet ukončíme, až jsou splněny nerovnice

$$\left. \begin{aligned} |\Delta P_i^{(k)}| &\leq \varepsilon \\ |\Delta Q_i^{(k)}| &\leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \text{pro všechna } i = 2, 3, \dots, n \quad (3-45)$$

Kde ε je zvolená přesnost rozdílu zadaných výkonů a výkonů vypočítaných dosazením vypočítaných napětí a jejich úhlů do rovnic (3-32).

Odvození vztahů pro výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou zpracováno v souladu s [2].

Newtonova metoda většinou velmi rychle konverguje a obvyklý počet iterací je cca 2 až 6. [5] Počet iterací závisí při zadané přesnosti ε málo na velikosti řešené sítě. Na druhou stranu Newtonova metoda je mnohem náročnější na paměť počítače. Výpočetní čas jedné iterace v rozsáhlých sítích v praktických úlohách je ekvivalentní sedmi iteracím Gauss-Seidlovoy metody. Pak například pro výpočet systému s 500 uzly je zapotřebí provést okolo 500 iterací Gauss-Seidlovou metodou. Naproti tomu při použití Newtonovy metody na stejný systém je možné výsledků dosáhnout již po 4 iteracích. S uvážením delších časů pro výpočet jedné iterace Newtonovou metodou lze i tak konstatovat, že poměr rychlostí obou metod bude nahrávat Newtonově v poměru přibližně 15:1. [4]

Pro méně přesné výpočty lze využít následujícího zjednodušení:

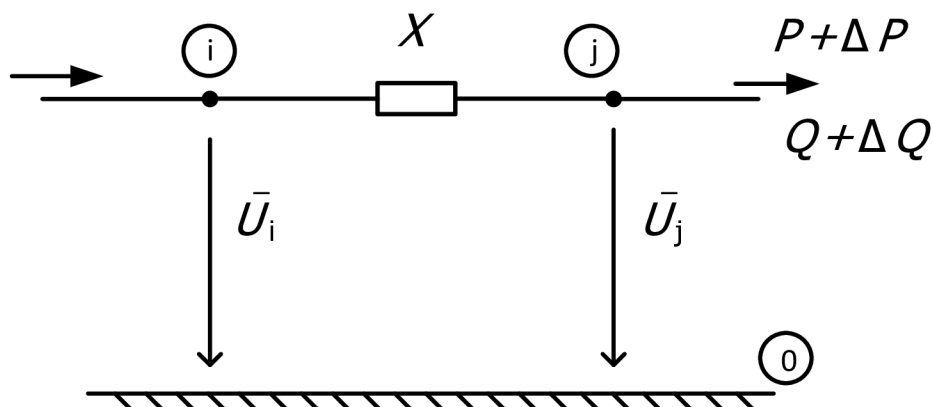
V sítích s převažující podélnou reaktancí vedení a transformátorů $X \gg R$ při malých změnách modulu napětí se činné výkony v uzlech příliš nemění. Podobně při malých změnách úhlů uzlových napětí se velice málo mění jalové výkony. Lze tedy psát

$$\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \cong [0], \quad \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \cong [0], \quad (3-46)$$

S využitím uvedených rovností (3-46), lze značně urychlit výpočet jelikož (3-34) lze pak psát jako

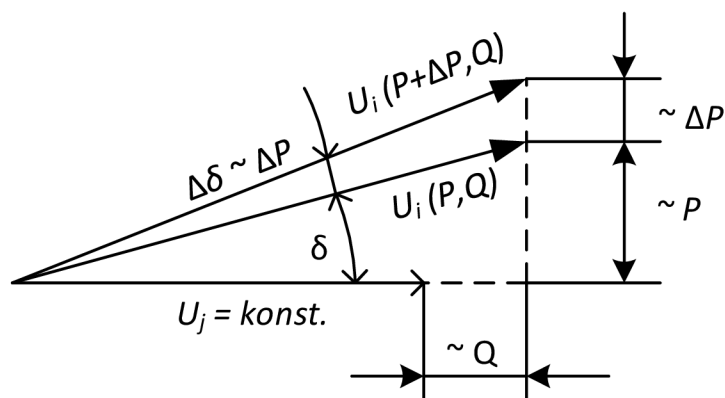
$$[\Delta P] = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta], \quad [\Delta Q] = \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \cdot [\Delta U], \quad (3-47)$$

Vliv změn odebíraného výkonu na změnu velikosti napětí a jeho úhlu lze znázornit na následujícím schématu Obr. 3-4.



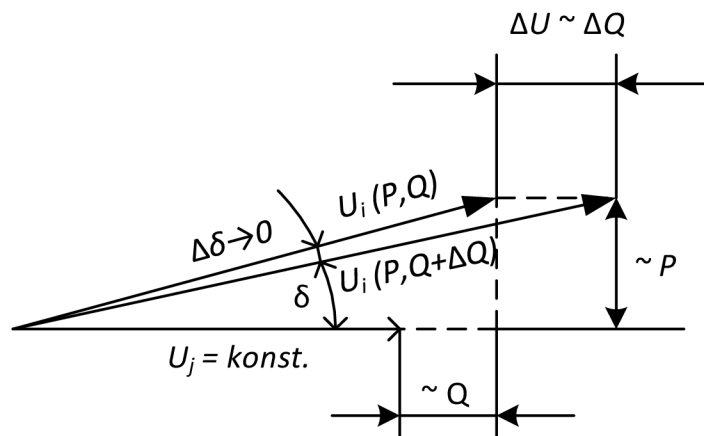
Obr. 3-4 Model sítě jen s podélnou reaktancí

Obrázek Obr. 3-5 vykresluje napěťové poměry při odběru výkonů v uzlu j o velikosti P, Q a dále při změně činného odběru v uzlu j o ΔP s neměnným odebíraným Q . Je-li U_j udržováno na konstantní hodnotě, je patrné, že při změně činného výkonu na hodnotu $(P + \Delta P)$ zůstane absolutní hodnota U_i prakticky stejná jako při hodnotě P . Dále je zřejmé, že se výrazně změní úhel oproti původnímu napětí o $\Delta\delta$ a tedy $\Delta P \sim \Delta\delta$. [2]



Obr. 3-5 Napěťové poměry při konstantním U_j , Q , proměnném P

Obr. 3-6 vykresluje napěťové poměry při změně jalového výkonu v uzlu j o ΔQ a konstantním činném odběru P . Z obrázku je zřejmý podstatný vliv změny jalového výkonu (na hodnotu $Q + \Delta Q$) na velikost absolutní hodnoty napětí v uzlu i a zároveň nepatrný vliv na změnu úhlu $\Delta\delta$. Opět bylo uvažováno s udržováním $U_j = \text{konst.}$ Platí tedy $\Delta Q \sim \Delta U$. [2]



Obr. 3-6 Napěťové poměry při konstantním P , U_j a proměnným Q

3.4 Klasifikace uzlů a podmínky určitosti chodu sítě

Ustálený chod je jednoznačně určen znalostí čtyř uzlových veličin

- Absolutní hodnoty napětí U
- Úhlem natočení napětí δ
- Činným výkonem P
- Jalovým výkonem Q

Jednotlivé uzly soustavy je možné z hlediska znalosti uzlových veličin rozdělit do tří kategorií. Rozdělení uzlů dále značí, které veličiny jsou v něm zadány a které je zapotřebí dopočítat.

1. Třída (U, δ) - Bilanční uzel – V bilančním uzlu je známa absolutní velikost napětí U a jeho úhel δ . Neznámými veličinami v tomto uzlu jsou činný a jalový výkon, které je zapotřebí určit výpočtem. Tento uzel hradí případnou nerovnováhu mezi dodávkou a odběrem a navíc hradí ztráty v soustavě, jejichž velikost není před započtením výpočtu známa. Bilanční uzel by tedy měl obsahovat zdroj, pro případné dorovnání výkonové bilance v síti.
2. Třída (P, Q) – Jde o uzly se zadanými činnými a jalovými výkony. V těchto uzlech je zapotřebí dopočítat velikosti napětí a jejich úhly. Může se jednat o uzly se zdroji, nebo o odběrové uzly, které rozlišujeme znaménky „+“ nebo „-“.
3. Třída (U, P) – Jde o tzv. uzly regulační nebo kompenzační. V uzlech jsou známy činné výkony a absolutní velikost napětí je zde udržována na konstantní hodnotě. Při výpočtu ustáleného chodu je zapotřebí určit velikost jalového výkonu, aby byla udržena zadaná absolutní velikost napětí. Další počítanou veličinou je zde velikost úhlu napětí δ .

Známe a neznáme veličiny v uzlech U, δ, P, Q nemůžou být zvoleny libovolně, ale je zapotřebí dodržet zásadu, že chod sítě nemůže být přeuročen ani neurčitý. V praktických příkladech výpočtu si vystačíme s volbou základních tří kombinací uzlů, podle bodu 1), 2), 3)

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

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

Bilanční uzel je obvykle vhodné volit v „elektrickém středu“ sítě, tj. v uzlu s největší vlastní admitancí - největším diagonálním prvkem v uzlové admitanční matici. Tento uzel nemusí vždy obsahovat „volný generátor“ na krytí ztrát. Je možné volit generátor na krytí ztrát i v jiném uzlu

než ve kterém volíme pevné – zadané napětí a úhel. V tomto případě je zapotřebí rozšířit uvedenou základní klasifikaci uzlů a blíže specifikovat podmínky určitosti chodu sítě. Ztráty v soustavě mohou být i rozděleny určitým dílem na všechny generátory pracující v soustavě. To však komplikuje matematické řešení úlohy.

Kapitola zpracována podle [2].

4 ZKRATOVÉ PORUCHY

První část této práce se zabývala problematikou ustáleného chodu ES. V další části práce se budeme zabývat výpočtem zkratových proudů. Na začátku kapitoly 3 jsme si uvedli, že zkrat je jedna z příčin změn parametrů soustavy. Tato příčina (zkrat) tedy vyvolá přechodný děj přechodu soustavy od jednoho ustáleného stavu k druhému novému ustálenému stavu soustavy. Obvodové prvky mají jistou míru setrvačnosti (akumulace energie) a tyto přechody mezi ustálenými stavy tedy nejsou skokové, ale plynulé. Při zkratové poruše vznikají s časem zanikající přechodné složky, které určují charakter a průběh přechodu sítě do nového ustáleného stavu. [1]

4.1 Klasifikace zkratu

Zkratem (zkratovou poruchou) rozumíme elektromagnetický přechodný děj, který je časově omezen okamžikem náhlého zmenšení impedance mezi krajními vodiči, případně středním vodičem nebo zemí v některé části elektrizační soustavy (v soustavách s přímo uzemněným uzlem) a okamžikem odpojení aktivních zdrojů od místa poruchy. [6]

Nyní si naznačíme zařazení zkratových poruch jakožto elektromagnetického přechodného děje. Přechodné děje lze podle délky period přechodných složek rozdělit následovně [6].

1. **Pomalé – elektromechanické přechodné děje.** Pro tyto děje je typické, že perioda přechodných složek je tak velká, že je zapotřebí při výpočtu uvažovat i setrvačné hmoty velkých rotačních strojů v soustavě a v elektrické části soustavy je možné použít soustředěných parametrů vzhledem k délce periody přechodného děje.
2. **Středně rychlé – elektromagnetické přechodné děje.** Pro tyto děje je perioda přechodných složek srovnatelná s periodou proudu o jmenovitém kmitočtu. Doba trvání je tedy od několika milisekund až po několik desetin sekundy. Vliv setrvačných hmot rotačních strojů lze při výpočtu zanedbat. Elektrická část se řeší za pomoci soustředěných parametrů.
3. **Rychlé – vlnové – přechodné děje.** Perioda přechodných složek je podstatně menší než u proudu s jmenovitým kmitočtem. Změny otáček, tj. mechanického stavu nemají na průběh těchto dějů vliv. Elektrickou část je tedy zapotřebí řešit za pomoci rovnoměrně rozložených parametrů. Jedná se např. o atmosférická přepětí.

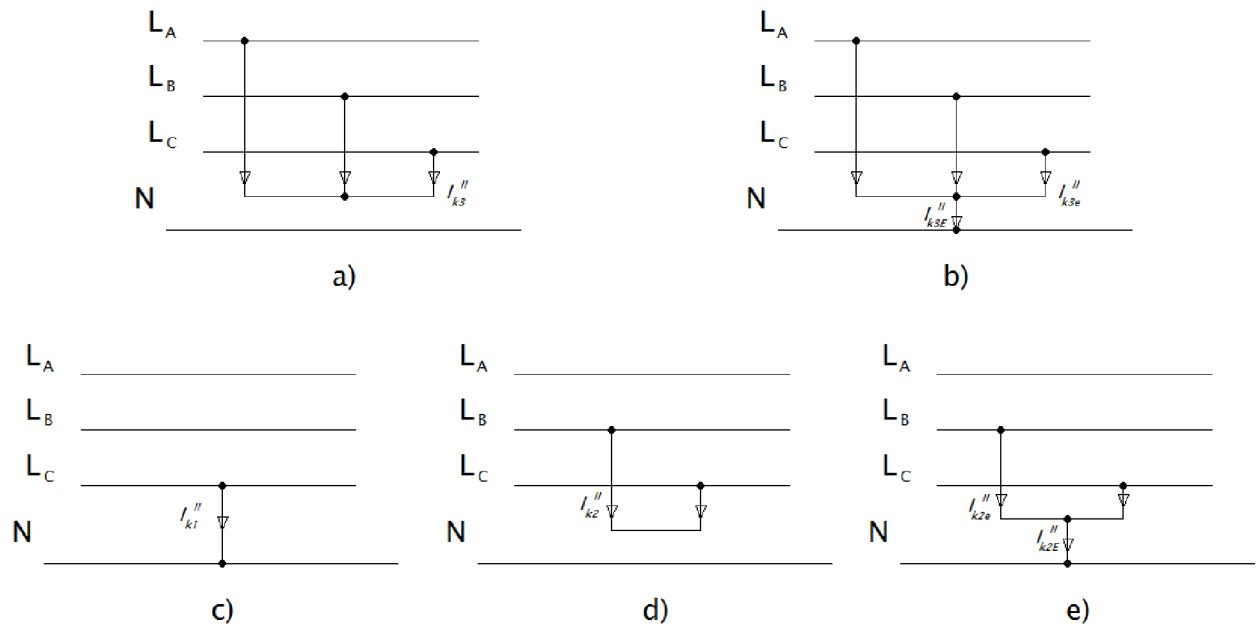
Zkratovou poruchu můžeme dále zařadit jako jednu z poruch vyskytující se v ES. Mezi poruchy vyskytující se v ES lze řadit

- Zkraty
- Přerušení fázového vedení
- Zemní spojení
- Proudové přetížení
- Kývání synchronních strojů
- Přepětí atp.

Norma „ČSN EN 60909-0:2002. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách“ [7] (dále jen norma) uvádí následující definici zkratu „náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“.

Zkratové poruchy je dále možné dělit podle způsobu zatěžování třífázových zdrojů [1]

- Zkraty **souměrné**
 - Třífázové, Obr. 4-1 a)
 - Třífázové zemní Obr. 4-1 b)
- Zkraty **nesouměrné**
 - Jednofázové Obr. 4-1 c)
 - Dvufázové Obr. 4-1 d)
 - Dvufázové zemní Obr. 4-1 e)



Obr. 4-1 Druhy zkratů

Další možností jak dělit zkratové poruchy je podle velikosti přechodového odporu v místě poruchy mezi krajními vodiči, středním vodičem nebo zemí: [8]

- Zkrat **dokonalý**, též nazývaný jako kovový, je zkrat se zanedbatelným nebo též nulovým přechodovým odporem (dokonalý styk kovových vodičů).
- Zkrat **nedokonalý** má již jistý zanedbatelný přechodový odpor, který může ovlivnit velikost zkratového proudu. Zpravidla jsou doprovázeny obloukem. Nedokonalé zkraty ohrožují okolí místa zkratu nebezpečím vzniku požáru. V praxi se většinou při výpočtu vliv přechodového odporu zanedbává.

Ke zdrojům zkratových proudů lze řadit [9]

- Synchronní stroje (turboalternátory, hydroalternátory, synchronní motory, synchronní kompenzátory)
- Asynchronní stroje
- Síťové napaječe, zahrnující synchronní stroje elektricky vzdálené od místa zkratu
- Polovodičové systémy, které jsou uzpůsobeny k dodávce energie zpět do sítě

Pravděpodobnost výskytu jednotlivých zkratových poruch uvádí následující tabulka. Hodnoty jsou získány statistickým záznamem.

Tabulka 4-1 Pravděpodobnost výskytu různých druhů zkratů [8]

	Jednofázový	Dvoufázový	Dvoufázový zemní	Trojfázový
Sítě vn	65 %	10 %	20 %	5 %
Sítě 110 kV	91 %	4,8 %	3,8 %	0,4 %
Sítě 220 kV	93,1 %	0,6 %	5,4 %	0,9 %
Sítě kabelové	-	-	-	Téměř 100 %

Doba trvání zkratové poruchy je závislá na druhu vypínacího zařízení. Nejkratší je při použití pojistek nebo jističů s magnetickým zhášením oblouku. V těchto případech bývá menší jak 0,1 s a závisí na velikosti zkratového proudu. U ostatních vypínacích zařízení tato doba bývá obvykle větší jak 0,2 s. [1]

4.2 Příčiny vzniku zkratu

Mezi hlavní příčiny vzniku zkratu patří především [1]

- Chybná manipulace
- Mechanické poškození izolace, např. přetržení vodiče venkovního vedení, poškození kabelu při zemních spojeních
- Přirozené znehodnocování izolace, např. vlhkostí
- Poškození izolace v důsledku zvýšeného elektrického namáhání, např. při úderu blesku nebo při spínacích pochodech

Uvedené příčiny vzniku zkratu často nemusí působit jednotlivě, ale společně, dvě i několik příčin současně nebo následovně.

4.3 Nebezpečné děje při zkratech

Náhlé zmenšení impedance při zkratu má za následek mnohonásobné zvětšení proudu, který protéká místem poruchy. Zkratový proud teče do místa poruchy ze všech zdrojů elektrické energie (zkratových zdrojů viz. 4.1). Zkratový proud způsobuje zvýšené namáhání všech prvků zkratového obvodu. Hlavními účinky zkratových proudů jsou především **tepelné** a **silové** (dynamické)

Účinky zkratových proudů lze rozdělit následovně [8]

- 1) Tepelné působení – nadměrným oteplováním zkratovými proudy dochází ke snížení mechanické pevnosti vodičů, k narušení mechanické pevnosti spojů atp. U kabelových vedení pak dochází k rychlejšímu stárnutí izolace. V neposlední řadě k tepelným účinkům patří také vznik oblouku a s ním spojeného požáru v blízkosti elektrického zařízení.
- 2) Mechanické působení – zkratový proud při průchodu vodiči svým elektromagnetickým působením bude vytvářet mechanické síly, které budou ve formě dynamického rázu způsobovat těžké mechanické namáhání celého elektrického systému (např. ohýbání pevných vodičů, roztržení podpěrných izolátorů, kývání lanových vodičů, přerušování vinutí elektrických strojů atp.)
- 3) Pokles napětí – při zkratu dochází k výraznému poklesu napětí. Jelikož na zkratovém proudu se svojí mírou podílí veškeré zkratové zdroje (elektrické zdroje), protéká určitá část zkratového proudu všemi částmi soustavy, což způsobí snížení napětí podle velikosti proudů ve všech uzlech soustavy. Snížené napětí ovlivňuje funkci mnoha elektrických

zařízení (např. u indukčních motorů poklesem momentu, u světelných zdrojů zmenšení světelného toku), dále může být ohrožena stabilita chodu systému.

- 4) Indukované napětí – V této souvislosti uvažujeme indukovaná napětí vznikající při souběhu silnoproudých a slaboproudých vedení. Průtokem zkratového proudu silnoproudým vedením vlivem indukce mohou být ohroženy i zařízení v slaboproudém obvodu.
- 5) Přepětí – zde máme na mysli především velikost a strmost zotaveného napětí, které vzniká při vypínání zkratových proudů. Velikost zotaveného napětí může dosahovat až dvojnásobku jmenovitého napětí. Zotavené napětí může narušit izolační pevnost jak samotného vypínacího prvku (havárie vypínače), tak způsobuje zvýšené namáhání ostatních prvků zkratového obvodu.

4.4 Časový průběh zkratového proudu

Náhlá změna impedance na svorkách zdrojů při zkratové poruše má za následek přechodný děj ve všech prvcích elektrizační soustavy. Průtokem zkratového proudu se naruší rovnováha mezi magnetickým a elektrickým polem v prostoru elektrizační soustavy a soustava bude přecházet do nového rovnovážného stavu pomocí přechodných (zanikajících) složek proudu a napětí. Přechodné složky proudu a napětí zanikají podle vlastních period příslušných obvodů. Při stanovování časového průběhu proudu a napětí při zkratu se obvykle přijímá následující zjednodušení - zanedbávají se příčné admitance prvků ES včetně odběrů, což má za následek vyloučení vlivu elektrického pole a přechodné složky proudů a napětí mají pak frekvenci zdrojů nebo jsou aperiodické. Rozložení energie magnetického pole v náhradním obvodu bez příčných admitancí a odběrů se oproti stavu před zkratem změní. Tato změna je po dobu trvání zkratové poruchy spojitá. Energie magnetického pole v synchronních zdrojích zkratových proudů se při stálém buzení vlivem reakce kotvy zmenšuje.

Energie v ostatních pasivních prvcích elektrizační soustavy se zvětšuje v důsledku zvětšujícího se proudu ($W_L = \frac{1}{2} Li^2$), ($W_C = \frac{1}{2} Cu^2$). Přebytek energie magnetických polí ve zdrojích se pomocí přechodných složek proudu transformuje do ostatních prvků náhradního obvodu. Pokud by zkratovou poruchu neodpojily příslušné vypínače od zdrojů energie, přechodný děj by proběhl až do zániku přechodných složek až by nastal nový rovnovážný (ustálený) stav. Celková hodnota energie magnetického pole v náhradním schématu by odpovídala hodnotě energie před vznikem přechodného děje, ovšem rozložení energie magnetického pole v prvcích náhradního schématu by odpovídalo novému ustálenému zkratovému proudu.

S těmito zjednodušujícími předpoklady (stálé buzení, nahrazení prvků ES pouze jejich podélnou impedancí induktivního charakteru) lze pro okamžitou hodnotu zkratového proudu psát vztah

$$i_k = \sqrt{2} \left\{ \left[(I_k'' - I_k') e^{\frac{-t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{\frac{-t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' e^{\frac{-t}{\tau_s}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} = i_{a.c.} + i_{d.c.} \quad (4-1)$$

Ze vztahu je patrné, že zkratový proud je neharmonickou funkcí času a průběh proudu obsahuje tři exponenciálně zanikající přechodné složky, ve vztahu (4-1) pak

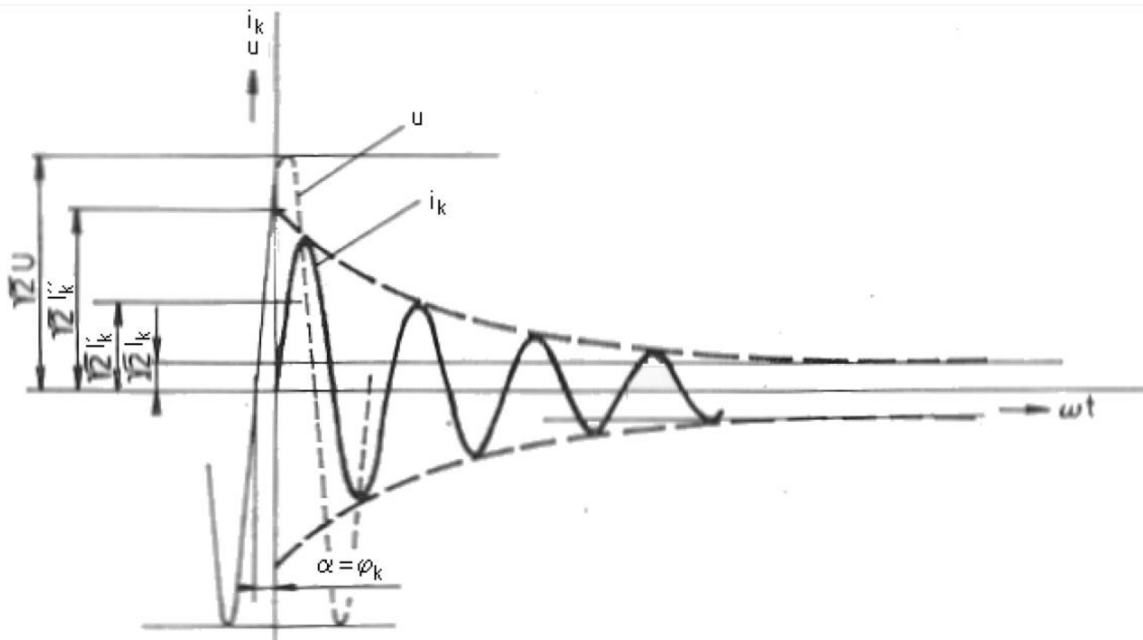
- α je počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratové poruchy ($t = 0$), který je mírou okamžité hodnoty napětí u_0 na začátku poruchy

$$u_0 = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha) \Big|_{t=0} = \sqrt{2}U \sin \alpha \quad (4-2)$$

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

Z rovnice (4-1) je zřejmé, že velikost stejnosměrné složky zkratového proudu je závislá na velikosti úhlu α , tedy na velikosti počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku poruchy ($t = 0$). Stejnosemnná složka se pro danou fázi nevyvine právě tehdy, pokud bude argument harmonické funkce sinus pro stejnosměrnou složku roven nule, tedy

$$\alpha - \varphi_k = 0, \text{ tedy } \alpha = \varphi_k \quad (4-3)$$



Obr. 4-2 Průběh souměrného zkratového proudu [1]

Pokud tedy bude pro danou fázi počáteční fáze fázoru napětí rovna úhlu zkratové impedance, bude v této fázi třífázové soustavy průběh zkratového proudu souměrný. Za předpokladu, že zkrat vznikl při chodu naprázdno a platnosti (4-3) je pak možné pro průběh zkratového proudu pro danou fázi psát

$$i_k = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{\frac{-t}{\tau_d'}} + (I_k' - I_k) e^{\frac{-t}{\tau_d}} + I_k \right] \sin(\omega t) \quad (4-4)$$

Průběh souměrného zkratového proudu je znázorněn na Obr. 4-2.

V třífázovém systému vznikne naopak největší stejnosměrná složka v té fázi, pro kterou bude v okamžiku vzniku poruchy ($t = 0$) pro počáteční fázi fázoru napětí platit

$$\alpha - \varphi_k = -\pi/2, \text{ tedy } \alpha = \varphi_k - \pi/2 \quad (4-5)$$

Průběh zkresleného proudu dané fáze stejnosměrnou složkou lze úpravou (4-1) za podmínky (4-5) získat

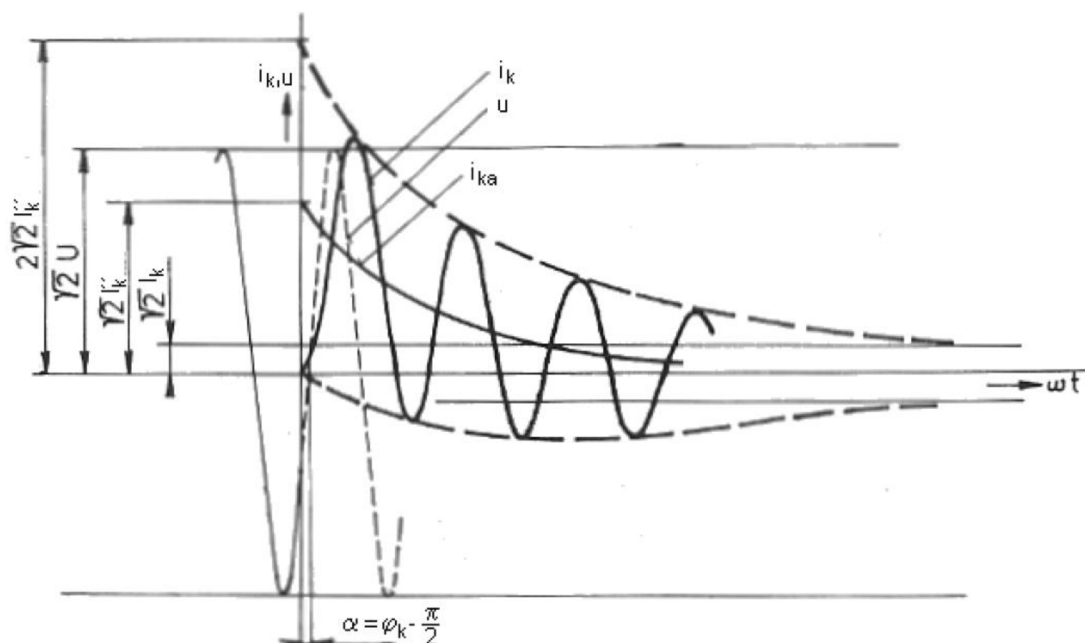
$$i_k = \sqrt{2} \left\{ I_k'' e^{\frac{-t}{\tau_s}} - \left[(I_k'' - I_k') e^{\frac{-t}{\tau_d'}} + (I_k' - I_k) e^{\frac{-t}{\tau_d}} + I_k \right] \cos(\omega t) \right\} \quad (4-6)$$

A průběh napětí v dané fázi lze získat dosazením podmínky (4-5) do (4-2), konkrétně pro čas $t = 0$

$$u_0 = \sqrt{2} U \sin\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4-7)$$

První amplituda zkratového proudu zkresleného stejnosměrnou složkou může dosáhnout téměř dvojnásobku amplitudy střídavého zkratového proudu. Tento proud je nejméně příznivý z hlediska dimenzování a proto je zapotřebí z něj odvozovat případné silové namáhání a tepelné účinky zkratového proudu. Průběh proudu s vyvinutou stejnosměrnou složkou vykresluje Obr. 4-3.

Velikosti časových konstant τ_d'' , τ_d' , τ_s jsou závislé na parametrech zdrojů zkratového proudu (synchronních strojích) a na rezistanci a indukčnosti vnějšího obvodu zkratového proudu. Tranzitní časová konstanta samotných synchronních strojů bývá v rozmezí (0,04 až 1,8) s a její velikost je závislá i na parametrech vnějšího zkratového obvodu. Subtranzitní a stejnosměrná časová konstanta bývají obě několikanásobně menší jak tranzitní časová konstanta a závislost na parametrech vnějšího obvodu je velice malá. Ubývání zkratového proudu u zkratové poruchy vzdálené od zdrojů je tedy pomalejší a v některých případech zanedbatelné.



Obr. 4-3 Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou [1]

Velikosti proudů I_k'' , I_k' , I_k jsou závislé na příslušných impedancích synchronních strojů, jejich vnitřních napětích a na velikosti impedance vnějšího zkratového obvodu. Závisí tedy na buzení a zatížení strojů před vznikem poruchy.

V literatuře je možné se také setkat s následujícími označeními rázová = subtranzitní složka, přechodná = tranzitní.

Pokud bychom vztah (4-1) přepsali následovně

$$i_k = i_k'' + i_k' + i_k + i_{d.c.} \quad (4-8)$$

Kde jednotlivé složky proudu

$$i_k'' = \sqrt{2}(I_k'' - I_k')e^{\frac{-t}{\tau_d''}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$$

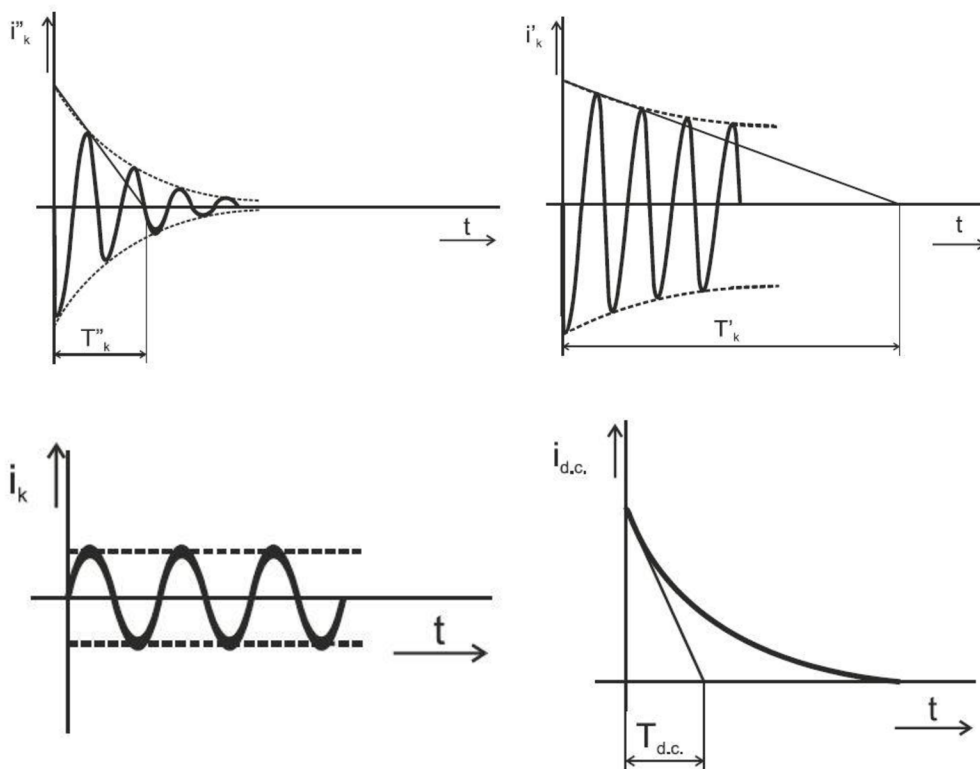
$$i_k' = \sqrt{2}(I_k' - I_k)e^{\frac{-t}{\tau_d'}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) \quad (4-9)$$

$$i_{ku} = \sqrt{2}I_k \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$$

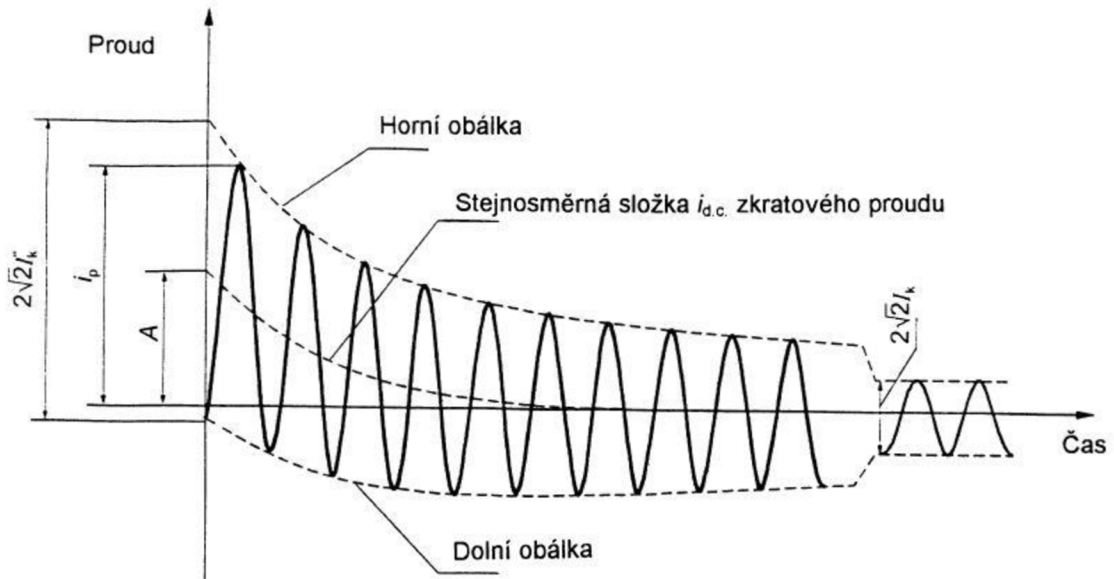
$$i_{d.c.} = -\sqrt{2}I_k''e^{\frac{-t}{\tau_s}} \sin(\alpha - \varphi_k)$$

Pak lze pro subtranzitní, tranzitní, ustálenou a stejnosměrnou složku proudu naznačit jejich průběh Obr. 4-4. Součtem těchto průběhů lze pak sestavit výsledný průběh zkratového proudu Obr. 4-5, (obrázek slouží jen pro ilustraci a nevznikl součtem složek uvedených v Obr. 4-4)

Tato kapitola byla zpracována podle [1].



Obr. 4-4 Složky zkratového proudu (v pořadí zleva doprava a první řádek druhý řádek odpovídají – subtranzitní i_k'' – tranzitní i_k' – ustálená i_k – stejnosměrná $i_{d.c.}$) (pro časové konstanty $T_k'' = \tau_d''$, $T_k' = \tau_d'$, $T_{d.c.} = \tau_s$) [8]

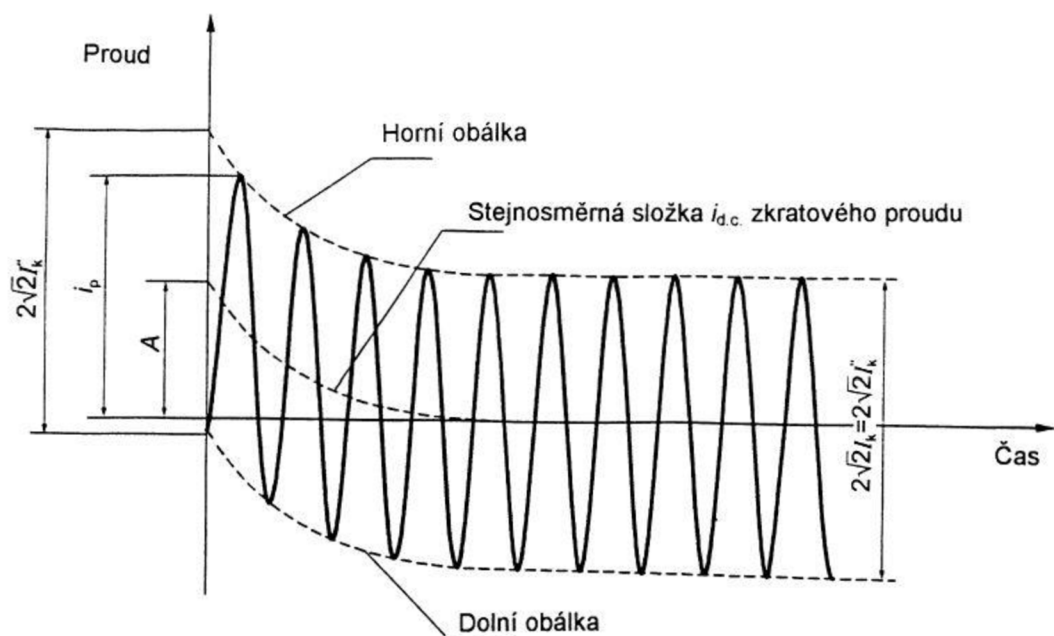


Obr. 4-5 Zkratový proud elektricky blízkého zkratu se stejnosměrnou složkou [7]

4.5 Zkrat elektricky blízký a vzdálený

Podle změny souměrné složky zkratového proudu lze rozlišit dva druhy zkratu: [9], [7]

- Elektricky blízký zkrat – je takový zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje nebo v případě, že příspěvek asynchronních motorů překračuje 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů. Souměrná složka zkratového proudu nemá v průběhu zkratové poruchy konstantní velikost, ale s postupujícím časem po vzniku poruchy postupně klesá až na hodnotu ustáleného zkratového proudu. Průběh takového zkratového proudu je na Obr. 4-5.



Obr. 4-6 Průběh proudu elektricky vzdáleného zkratu [7]

- Elektricky vzdálený zkrat – je zkrat v místě dostatečně elektricky vzdáleném od zdrojů zkratového proudu (především synchronních strojů), nebo pokud je podíl asynchronních motorů na počátečním rázovém zkratovém proudu zanedbatelný. Při elektricky vzdáleném zkratu je velikost souměrné střídavé složky zkratového proudu v podstatě po celou dobu zkratové poruchy konstantní. Průběh takového proudu vykresluje Obr. 4-6.

4.6 Metody výpočtu zkratových proudů

Výpočet zkratových proudů se obvykle provádí v souvislosti s následujícími činnostmi [11]

- Dimenzování elektrického zařízení s ohledem na tepelné a silové účinky zkratového proudu
- Kontrola vypínačů s ohledem na průběh zkratového proudu a parametry zotaveného napětí v místě instalace
- Návrh uzemňovacích soustav, stanovení dotykových napětí (včetně krokových napětí) a zavlečených napětí
- Návrh a kontrola činnosti elektrických ochranných a jističových prvků
- Kontrola stability paralelně pracujících synchronních strojů
- Kontrola napěťových poměrů při zkratu a při rozběhu pohonů s asynchronními motory
- Stanovení napětí indukovaných soustavami vvn a zvn ve sdělovacích vedeních, v pláštích kabelů a v kovových potrubích uložených v zemi nebo na povrchu země
- Kontrola šíření a vliv vyšších harmonických v elektrizační soustavě
- Posouzení výskytu přepětí při zemních zkratech a zemních spojeních

Pro většinu těchto aplikací není zapotřebí znát celý časový průběh zkratového proudu popsany v kapitole 4.4. Výpočet časového průběhu zkratového proudu ve větších sítích obsahující velké množství zdrojů a elektrických prvků by vykazoval i jistá úskalí. V praxi se tedy spokojíme s výpočtem zjednodušeným, kterým vypočteme jen určité **charakteristické hodnoty** zkratového proudu, které odpovídají mezním hodnotám zkratového proudu (charakteristické hodnoty je pak možné vypočítat pro dva stavy, kdy budou nabývat svých maximálních hodnot a minimálních: maximální zkratové proudy, minimální zkratové proudy)

- Počáteční rázový zkratový proud I_k''
- Nárazový zkratový proud i_p
- Vypínací zkratový proud I_b
- Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}
- Ustálený zkratový proud I_k
- Doba trvání zkratu t_k
- Stejnoseměrná složka zkratového proudu $i_{d.c.}$

Pro výpočet charakteristických hodnot zkratového proudu byla v průběhu doby vypracována řada více či méně zjednodušených postupů. Pro výpočet nesouměrných zkratů je využívána metoda **rozkladu do souměrných složkových soustav**. Výpočetní metody se pro různé potřeby mohou lišit. Např. pro výpočet zkratů elektricky blízkých je možné použití zkratových křivek a tabulek stanovených pro „typové stroje“, nebo je prováděn analytický výpočet s použitím vzorců respektujících různost elektrických parametrů v podélné a příčné ose stroje. Při výpočtech elektricky blízkých zkratů se může uplatnit vliv napěťové regulace synchronních generátorů, vliv vysokého podílu stejnosměrné složky zkratového proudu v okamžiku jeho vypínání, nebo např. vliv provozního stavu stroje před zkratem.

Rozdílný může být také přístup k problematice „společné cesty“ zkratových příspěvků z různých zdrojů zkratových proudů. Zde se jedná především o řešení zkratů v zauzlených tzv. mřížových sítích.

Fyzikálně odůvodněný a relativně přesný výpočet rozložení symetrických zkratových proudů v okamžiku vzniku zkratu (určení I_k'' ve všech větvích zkratového obvodu) vychází z **metody superpozice**. Výpočet zkratových proudů v tomto případě navazuje na předchozí výpočet ustáleného chodu před vznikem zkratu, tedy na výpočet rozložení proudů a napětí před zkratem. Touto metodou je vypočteno rozložení počátečních rázových zkratových proudů v soustavě. Z těchto proudů jsou pak dále odvozeny další charakteristické hodnoty zkratových proudů. Tato metoda ovšem vykazuje jisté úskalí, neboť pro různé rozložení zátěže na jednotlivé generátory mají tyto generátory různá vnitřní napětí a tedy různé hodnoty zkratových proudů pro totéž místo zkratu. Výpočtem ovšem chceme většinou zjistit zkrat nejméně příznivý a proto je zapotřebí zadat vhodné rozložení zatížení zdrojů i odběrů. Tato úloha je řešená převážně empiricky.

Standardní postup výpočtu zkratů je založen na **metodě ekvivalentního napěťového zdroje** v místě zkratu. Tento postup je uveden v platné normě [7] a v dalším textu se na něj zaměříme.

Text kapitoly zpracován podle [11].

4.7 Metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu

Norma [7] zavádí pro výpočet zkratových proudů ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu, jakožto jediný aktivní napěťový zdroj ve zkratovém obvodu (soustavě). Ostatní zbylé napěťové zdroje (síťové napaječe, synchronní stroje, asynchronní stroje) jsou nahrazeny svojí vnitřní impedancí a místo vnitřních napětí zdrojů jsou uvažovány zkratující spoje. Toto zjednodušení umožňuje přeskočit výpočty spojené s výpočtem toků výkonů v různých stavech před zkratem. Dále nejsou potřeba informace o polohách přepínačů odboček transformátorů, buzení generátorů.

Tabulka 4-2 Napěťový součinitel c [7]

Jmenovité napětí U_n	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	Maximálních zkratových proudů $c_{max}^{1)}$	Minimálních zkratových proudů c_{min}
Nízké napětí 100 V až 1000 V	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí >1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ >35 kV		
1) $c_{max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav 2) Pokud není jmenovité napětí definováno, potom $c_{max}U_n = U_m$ nebo $c_{max}U_n = 0,90 \times U_m$ 3) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V. 4) Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %		

Napětí ekvivalentního napěťového zdroje je odvozeno ze jmenovitého (fázového) napětí sítě v místě zkratu a je vynásobeno napěťovým součinitelem c

$$E = \frac{cU_n}{\sqrt{3}} \quad (4-10)$$

- Kde U_n je jmenovité napětí sítě v místě zkratu (sdružená hodnota)
- c je napěťový součinitel, je zaveden z důvodu kolísání napětí v závislosti na čase a místě, přepínání odboček transformátorů, zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí a z důvodu chování generátorů a motorů při přechodném ději.

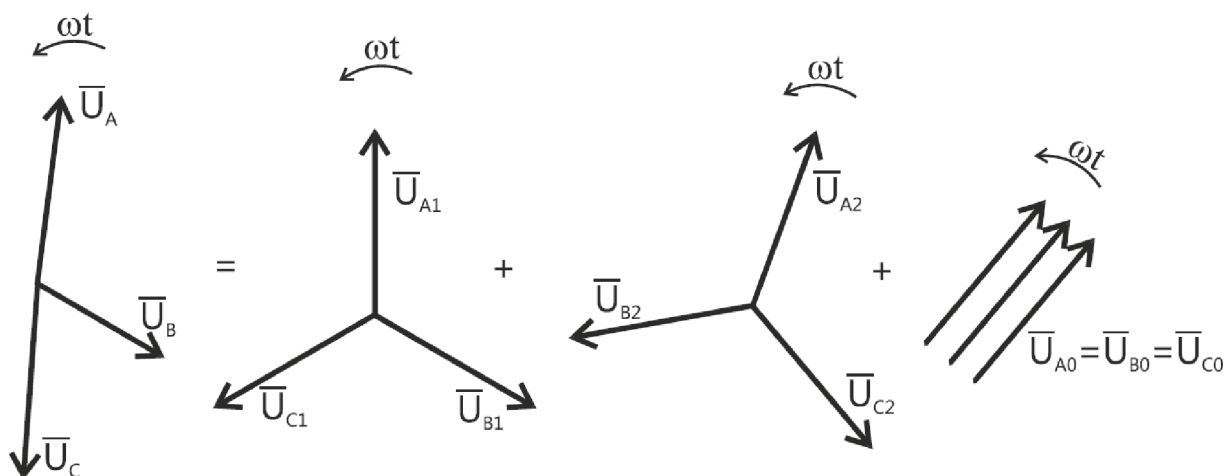
Výpočtem se stanovují podle potřeby maximální a minimální zkratové proudy. Hodnoty napěťového součinitele jsou uvedeny v Tabulka 4-2.

Zpracováno podle [7], [11].

4.8 Metoda souměrných složek

Při výpočtu nesouměrných zkratů lze s výhodou využít metody rozkladu nesouměrných soustav do souměrných složek. Norma pro výpočet nesouměrných zkratů vychází právě z této metody. V následující části práce se tedy budeme věnovat metodě souměrných složek, která trojfázový nesymetrický problém převede na řešení několika souměrných problémů, které je možné metodou superpozice převést zpět na celkový nesouměrný problém. Metodu souměrných složek poprvé prezentoval v roce 1918 C.L.Fortescue. Nesouměrné poruchy nastávají mnohem častěji u venkovních vedení. Naproti tomu u kabelových vedení vzniklý oblouk při jednofázové poruše většinou vede k poškození zbylých nepoškozených fází a k přechodu jednopólové poruchy v poruchu třípólovou. Pravděpodobnost výskytu jednotlivých poruch byl uveden v Tabulka 4-1. I když se u venkovních vedení trojfázová porucha příliš často nevyskytuje, i tak je zapotřebí se jí zabývat z hlediska dimenzování, protože velikost zkratového proudu při této poruše bývá největší.

Uvažujme nesymetrickou soustavu fázorů napětí $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ podle Obr. 4-7



Obr. 4-7 Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory [8]

Fázor \bar{U}_A původní nesouměrné soustavy fázorů lze získat jako součet odpovídajících fázorů souměrných soustav sousledné, zpětné a netočivé, obdobně pro fázi B a C

$$\bar{U}_A = \bar{U}_{A1} + \bar{U}_{A2} + \bar{U}_{A0} \quad (4-11)$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0}$$

$$\bar{U}_C = \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2} + \bar{U}_{C0}$$

V dalším textu při odvozování budeme dále značit indexem 1 souslednou složku, 2 zpětnou a 0 netočivou složku.

Zavedeme operátor natočení jako

$$\bar{a} = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\bar{a}^2 = 1e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4-12)$$

$$1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0$$

$$\bar{a}^3 = 1, \bar{a}^4 = \bar{a}$$

Pakliže využijeme operátoru natočení a zvolíme jako referenční fázi A v soustavě sousledné, zpětné a netočivé lze soustavu (4-11) podle Obr. 4-7 přepsat jako

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_{A1}, \bar{U}_2 = \bar{U}_{A2}, \bar{U}_0 = \bar{U}_{A0}$$

pak

$$\bar{U}_A = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 \quad (4-13)$$

$$\bar{U}_B = \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 + \bar{U}_0$$

$$\bar{U}_C = \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 + \bar{U}_0$$

Maticově lze zapsat

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

Zkráceně

$$[\bar{U}_F] = [\bar{F}] \cdot [\bar{U}_S] \quad (4-15)$$

- Kde $[\bar{U}_F]$ značí vektor nesymetrické soustavy fázorů, $[\bar{U}_S]$ značí symetrickou soustavu fázorů (přesně řečeno jde o vektor referenčních fázorů složek sousledné, zpětné a netočivé) a $[\bar{F}]$ značí desymetrizační transformační matici

Desymetrizační matice je regulární a má tedy nenulový determinant

$$|\bar{F}| = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{vmatrix} = \bar{a} + \bar{a}^4 + \bar{a} - \bar{a}^2 - \bar{a}^2 - \bar{a}^2 = 3(\bar{a} - \bar{a}^2) = 3j\sqrt{3} \quad (4-16)$$

Lze tedy provést její inverzi

$$\bar{F}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

Pak lze pro přechod z nesouměrné soustavy fázorů do souměrných soustav psát

$$\bar{U}_S = \bar{F}^{-1} \bar{U}_F \quad (4-18)$$

V rozepsané podobě

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad (4-19)$$

Pro jednotlivé fázory

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a} \bar{U}_B + \bar{a}^2 \bar{U}_C) \\ \bar{U}_2 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a}^2 \bar{U}_B + \bar{a} \bar{U}_C) \\ \bar{U}_0 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \end{aligned} \quad (4-20)$$

Obdobnou úvahu jako při získání vztahů (4-13) a (4-20) lze aplikovat na nesymetrickou soustavu proudů, pro úplnost zde tedy uvedeme výsledek

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_B &= \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \\ \bar{I}_C &= \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0 \end{aligned} \quad (4-21)$$

Proudy souměrných složek

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{1}{3} (\bar{I}_A + \bar{a} \bar{I}_B + \bar{a}^2 \bar{I}_C) \\ \bar{I}_2 &= \frac{1}{3} (\bar{I}_A + \bar{a}^2 \bar{I}_B + \bar{a} \bar{I}_C) \\ \bar{I}_0 &= \frac{1}{3} (\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C) \end{aligned} \quad (4-22)$$

Všechny tři soustavy (sousedná, zpětná a netočivá) lze považovat za samostatné.

Nyní uvažujme jednoduchou symetrickou trojfázovou soustavu s alternátorem jako zdrojem napětí. Obvod dále obsahuje impedanci složenou z impedance alternátoru a impedance vnějších částí obvodu. Souměrné složky vnitřního napětí alternátoru označíme $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_0$, souměrné složky napětí v místě zkratu $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_0$, a složkové impedance $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_0$. Pro uvažovaný obvod lze psát

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= \bar{U}_1 + \bar{Z}_1 \bar{I}_1 \\ \bar{E}_2 &= \bar{U}_2 + \bar{Z}_2 \bar{I}_2 \\ \bar{E}_0 &= \bar{U}_0 + \bar{Z}_0 \bar{I}_0 \end{aligned} \quad (4-23)$$

V praxi je alternátor zdrojem jen sousledné složky napětí, platí

$$\bar{E}_1 = \bar{E} \quad (4-24)$$

$$\bar{E}_2 = 0$$

$$\bar{E}_0 = 0$$

Soustavu rovnic (4-23) s využitím (4-24) lze pak přepsat

$$\bar{U}_1 = \bar{E} - \bar{Z}_1 \bar{I}_1$$

$$\bar{U}_2 = -\bar{Z}_2 \bar{I}_2 \quad (4-25)$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{Z}_0 \bar{I}_0$$

Pro odvozené rovnice (4-25) lze odvodit následující závěry

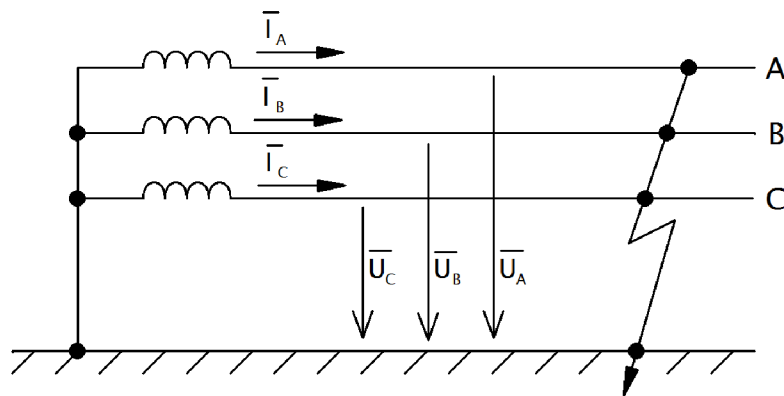
- 1) Zdrojem napětí sousledné složkové soustavy je alternátor.
- 2) Průvodcem proudu zpětné a netočivé soustavy je napěťová nesymetrie v místě poruchy.

V místě poruchy je zapotřebí určit šest veličin ($\bar{I}_0, \bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{U}_0, \bar{U}_1, \bar{U}_2$) a tedy uvedené tři rovnice je zapotřebí doplnit dalšími třemi rovnicemi podle typu uvažované poruchy.

Kapitola zpracována podle [8], [10].

4.8.1 Trojfázový zemní zkrat

Trojfázový zemní zkrat lze schematicky znázornit následovně



Obr. 4-8 Trojfázový zemní zkrat

Podle Obr. 4-8 lze získat následující tři rovnice, uvažujeme soustavu před zkratem v chodu naprázdno

$$\bar{U}_A = \bar{U}_B = \bar{U}_C = 0 \quad (4-26)$$

Z těchto rovností lze pak pro (4-13) psát

$$\bar{U}_A = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0$$

$$\bar{U}_B = \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0 \quad (4-27)$$

$$\bar{U}_C = \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0$$

Sečtením těchto rovnic zjistíme

$$(1 + \bar{a}^2 + \bar{a}) \bar{U}_1 + (1 + \bar{a} + \bar{a}^2) \bar{U}_2 + 3 \bar{U}_0 = 0 \quad (4-28)$$

S uvážením (4-12) lze z (4-28) zjistit $\bar{U}_0 = 0$. Zpětným dosazením této hodnoty do (4-27) a následným řešením tří rovnic o dvou neznámých \bar{U}_1, \bar{U}_2 lze získat rovnost

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = 0 \quad (4-29)$$

Dosazením (4-29) do (4-25) pak

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1} \quad (4-30)$$

$$\bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{I}_0 = 0$$

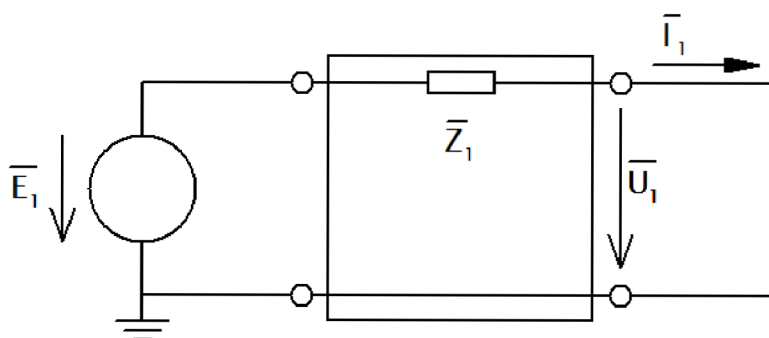
Dosazením souměrných proudů (4-30) do (4-21) dostáváme vztahy pro výpočet proudů v jednotlivých fázích

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1}$$

$$\bar{I}_B = \bar{a}^2 \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1} \quad (4-31)$$

$$\bar{I}_C = \bar{a} \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1}$$

Z odvozených rovnic (4-30) lze pro trojfázovou poruchu nakreslit následující náhradní schéma.

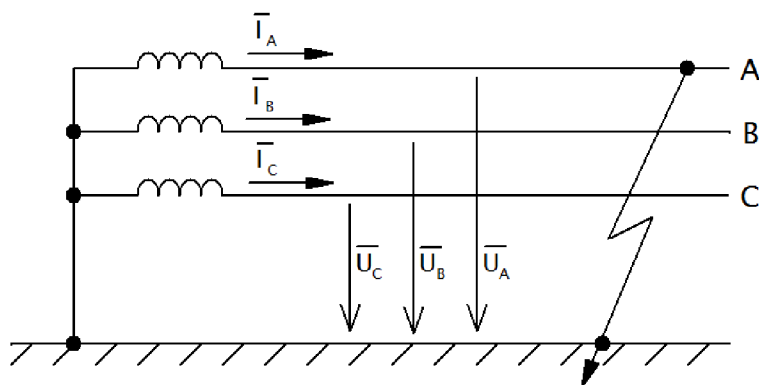


Obr. 4-9 Náhradní schéma při trojfázovém zkratu

Text zpracován podle [8].

4.8.2 Jednofázový zkrat

Opět vyjdeme z předpokladu, že soustava je před zkratem v chodu naprázdno. Schematicky tuto poruchu vykresluje Obr. 4-10



Obr. 4-10 Jednofázový zkrat

Z obrázku lze stanovit následující tři rovnice

$$\bar{U}_A = 0, \quad \bar{I}_B = \bar{I}_C = 0 \quad (4-32)$$

Dosazením $\bar{I}_B = \bar{I}_C = 0$ do (4-22)

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{1}{3} \bar{I}_A \quad (4-33)$$

Z první rovnice (4-13) lze s využitím podmínky (4-32) psát

$$\bar{U}_A = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0 \quad (4-34)$$

A sečtením všech rovnic (4-25) obdržíme druhou rovnost

$$\bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = \bar{E} - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 - \bar{Z}_2 \bar{I}_2 - \bar{Z}_0 \bar{I}_0 \quad (4-35)$$

Porovnáním rovností (4-34) a (4-35) a s využitím rovnosti složkových proudů (4-33) lze získat

$$0 = \bar{E} - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 - \bar{Z}_2 \bar{I}_2 - \bar{Z}_0 \bar{I}_0$$

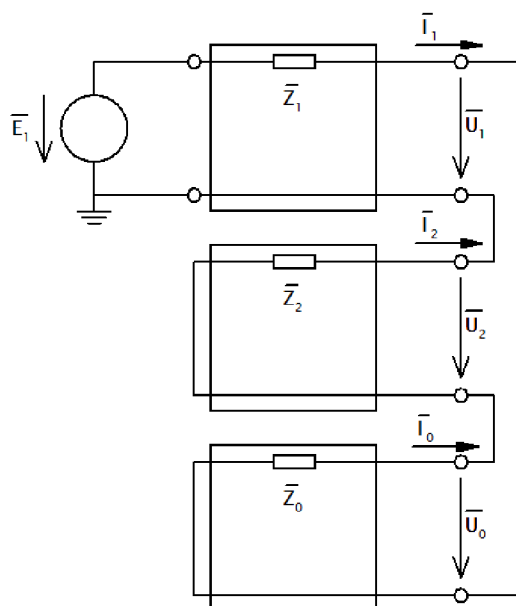
$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \quad (4-36)$$

Pak pro fázory nesouměrných proudů podle (4-33) a (4-32)

$$\bar{I}_A = \frac{3 \cdot \bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \quad (4-37)$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_C = 0$$

Na základě rovnic (4-33) můžeme propojit náhradní složková schémata



Obr. 4-11 Náhradní schéma při jednofázové poruše

Odvození provedeno podle [8].

4.9 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Základní výčet charakteristických hodnot byl uveden v kapitole 4.6. V následující kapitole si jednotlivé hodnoty popíšeme. Popis charakteristických hodnot zkratového proudu zpracován podle [7] a [1].

4.9.1 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' je efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu. Norma dále uvádí pro výpočet zkratu následující vztahy, s uvážením ekvivalentního napěťového zdroje (jeho fázi položíme rovnu nule)

$$\bar{I}_k'' = k_1 \cdot \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_k} = k_1 \cdot \frac{E \angle 0^\circ}{\bar{Z}_k} = k_1 \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_k} \quad (4-38)$$

- Kde \bar{Z}_k je celková výpočtová zkratová impedance, pro třífázový zkrat jde tedy o souslednou zkratovou impedanci \bar{Z}_1 podle odvození v kapitole 4.8.1.
- k_1 je součinitel pro různé druhy zkratu, (lze nalézt v normě)

Třífázový zkrat

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} |\bar{Z}_1|} \quad (4-39)$$

Jednofázový zkrat

$$\bar{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \quad (4-40)$$

4.9.2 Nárazový zkratový proud i_p

Udává maximální možnou okamžitou hodnotu předpokládaného zkratového proudu, které lze dosáhnout tehdy, jestliže zkrat nastane v takovém okamžiku, že se vyvine největší stejnosměrná složka zkratového proudu. Této hodnoty bývá dosaženo během první půlvlny průběhu zkratového proudu a v daném ideálním nejméně příznivém případě to je přibližně v čase $t = 0,01$ s (při 50 Hz). Hodnota nárazového zkratového proudu je rozhodující pro určení silových účinků zkratového proudu. Je odvozena z velikosti počátečního rázového zkratového proudu

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad (4-41)$$

Kde součinitel κ závisí na poměru R/X

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (4-42)$$

Hodnotu κ lze určit i z diagramů uvedených v normě. Součinitel κ stanovený podle (4-42) lze použít pro všechny typy zkratu stejný (tedy jak pro třífázový tak i pro dvoufázový).

Při výpočtu κ podle (4-42) je zapotřebí pro synchronní stroje použít místo skutečných rezistancí tzv. fiktivních rezistancí R_{Gf} uvedených v normě a pro asynchronní motory pak normou udaných poměrů R_M/X_M .

Výpočet κ podle (4-42) lze takto stanovit jen v sítích nezauzlených, tj. bez společné cesty. Pro síť zauzlené (mřížové se společnou cestou) je zapotřebí součinitel κ určit jinou metodou. Více lze nalézt v normě. [7]

4.9.3 Stejnosměrná složka zkratového proudu $i_{d.c.}$

Stejnosměrná složka zkratového proudu je střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k'' e^{-\frac{2\pi f t R}{X}} \quad (4-43)$$

Kde t značí čas. Tento vztah opět platí jen pro nezauzlené síť. Stejnosměrná složka se počítá obvykle v čase t_k tedy v čase vypnutí zkratu.

4.9.4 Souměrný vypínací zkratový proud I_b

Jde o efektivní hodnotu střídavého zkratového proudu v okamžiku vypnutí zkratu t_k . Vypínací zkratový proud se určuje pro kontrolu vypínací schopnosti spínacích přístrojů. Při kontrole vypínací schopnosti spínacích přístrojů je zapotřebí počítat i stejnosměrnou složku zkratového proudu, která ještě nemusela v čase t_k zaniknout.

U elektricky vzdálených zkratů se souměrné vypínací zkratové proudy rovnají počátečním rázovým zkratovým proudům.

$$I_b = I_k'', I_{b1} = I_{k1}'' \quad (4-44)$$

Pro elektricky blízké zkraty je zapotřebí použít přepočítávacího součinitele $\mu \ll 0,1 >$

$$I_b = \mu I_k'' \quad (4-45)$$

- μ je součinitel vyjadřující zmenšování střídavé složky zkratového proudu s časem. Jeho velikost lze odečíst z výrazů nebo diagramů uvedených v normě. Hodnota součinitele se podle normy určí v závislosti na době vypnutí zkratu t_k a na poměrné velikosti počátečního

rázového zkratového proudu na svorkách stroje I_{kG}''/I_{rG} , kterým synchronní stroj přispívá do zkratu.

4.9.4.1 Nesymetrický vypínací zkratový proud

Pakliže bychom označili stejnosměrnou složku zkratového proudu v čase vypnutí (stejnosemřná složka vypínacího zkratového proudu) jako

$$i_{b,d.c.} = \sqrt{2} \cdot I_k'' e^{-2\pi f \frac{R}{X} t_k} \quad (4-46)$$

Pak ze souměrného vypínacího zkratového proudu a jeho stejnosměrné složky (4-46) lze stanovit celkový nesymetrický vypínací zkratový proud jako

$$I_{b,a} = \sqrt{I_b^2 + i_{b,d.c.}^2}$$

4.9.5 Ustálený zkratový proud I_k

Je efektivní hodnota zkratového proudu, který protéká obvodem po odeznění přechodného děje.

4.9.6 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}

Ekvivalentní oteplovací zkratový proud je definován jako efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a je s časem proměnný.

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (4-47)$$

- m je součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu
- n je součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu

Hodnoty těchto součinitelů lze nalézt v normě. Ekvivalentní oteplovací zkratový proud se používá při kontrole zařízení na tepelné účinky zkratového proudu.

4.10 Zjednodušující předpoklady výpočtu

Při výpočtu maximálních i minimálních zkratových proudů norma vychází z následujících zjednodušení [7]

- Po dobu trvání zkratové poruchy se nemění typ zkratu, tj. jednofázový zkrat zůstává jednofázový a nepřechází v třífázový (jak by se dalo např. u kabelových vedení předpokládat)
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, jelikož pro síťové transformátory je zaveden korekční součinitel K_T
- Uvažují se kovové zkraty, vliv oblouku se zanedbává
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány, kromě paralelních admitancí v netočivé soustavě
- Uvažují se jmenovité impedance strojů
- Synchronní stroje s vyniklými póly se modelují jako stroje s válcovým rotorem

Vzhledem k rozsahu elektrizační soustavy, množství a obtížím při získávání vstupních hodnot výpočtu, numerické náročnosti a potřeby častějších opakovaných výpočtů při návrhu a kontrole

elektrizační soustavy nebo jejich částí je vhodné uvážit další možná zjednodušení. Tato zjednodušení jsou ovšem prováděna na úkor přesnosti výpočtu. Podle [1] lze uvážit tato další zjednodušení

1. Za zdroje zkratových proudů se uvažují pouze větší synchronní stroje o výkonu větším jak 0,5 MVA (ve skutečnosti jsou zdroji zkratového proudu všechny prvky ES s nahromaděnou energií v magnetickém nebo elektrickém poli)
2. Pro generátory, transformátory a venkovní vedení vvn a zvn je možné uvažovat jen podélnou reaktnaci. Příčnou admitanci a podélnou rezistanci je možné zanedbat, jelikož proudy příčnou admitancí jsou podstatně menší.
3. Předpokládá se lineární charakteristika podélné impedance všech prvků elektrizační soustavy a neměnnost parametrů během zkratu
4. Charakteristické hodnoty jsou uvažovány při maximální stejnosměrné složce
5. Soustava před zkratem se uvažuje symetrická

4.11 Zkratové impedance

Pro výpočet zkratových proudů je zapotřebí vypočítat impedance jednotlivých elektrických prvků náhradního schématu. Při použití metody ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu podle normy je zapotřebí impedance jednotlivých prvků vynásobit korekčním součinitelem pro daný prvek (K_G pro generátory, K_T pro transformátory K_S pro výpočet elektrárenských bloků). Impedanční korekční součinitelé jsou zavedeny z důvodu respektování odlišnosti vnitřních napětí zdrojů od napětí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, nebo také z důvodu poloh odboček transformátorů, které nemusí být v základní poloze.

Při výpočtu nesouměrných zkratů je dále zapotřebí stanovit velikosti zkratových impedancí ve všech souměrných složkách (podle typu poruchy) – tj. souměrné, zpětné a netočivé. Pro síťové napaječe, transformátory, venkovní vedení, kabely, reaktory a podobné zařízení jsou si sousledná a zpětná zkratová impedance rovny $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. Netočivou zkratovou impedancí lze určit $\bar{Z}_0 = \bar{U}_0 / \bar{I}_0$ ze střídavého napětí uvažovaného mezi třemi paralelními vodiči a společným zpětným vedením (na příklad zemí, zemnicím lanem, nulovým vodičem, kabelovým pláštěm a kabelovým pancířem). V tomto případě zpětným vedením protéká trojnásobek proudu netočivé složky. Více k měření složkových impedancí lze nalézt v normě.

Text kapitoly i jednotlivých podkapitol byl vytvořen podle [7] a [9].

4.11.1 Síťové napaječe

Sousledná zkratová impedance sítě při zadaném počátečním souměrném rázovém zkratovém proudu v místě připojení napaječe I_{kQ}'' lze vypočítat

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''} \quad (4-48)$$

- U_{nQ} je jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napaječe Q
- c je napěťový součinitel pro napětí U_{nQ} Tabulka 4-2
- I_{kQ}'' je počáteční souměrný rázový zkratový proud v bodě připojení napaječe Q

Při znalosti poměru R_Q/X_Q lze reaktanci síťového napaječe vypočítat jako

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (4-49)$$

Pro případ síťových napaječů napájených venkovním vedením o jmenovitém napětí vyšším jak 35 kV lze uvažovat $R_Q = 0$, tj. $\bar{Z}_Q = 0 + jX_Q$. V ostatních případech, pokud neznáme R_Q je možné použít $R_Q = 0,1X_Q$, kde $X_Q = 0,995 Z_Q$.

V závislosti na konfiguraci vinutí a uzemnění uzlů transformátorů se v některých případech může uvažovat i s netočivou zkratovou impedancí síťových napaječů.

Hodnoty počátečních souměrných rázových zkratových proudů I_{kQ} pro síťové napaječe musí udat provozovatel přenosové nebo distribuční soustavy. Pokud je znám počáteční souměrný rázový zkratový výkon síťového napaječe S_{kQ} je možné Z_Q vypočítat

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}''} \quad (4-50)$$

Kde

$$S_{kQ}'' = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} I_{kQ}'' \quad (4-51)$$

4.11.2 Dvouvinuťové transformátory

Souslednou zkratovou impedancí $\bar{Z}_T = R_T + jX_T$ lze vypočítat ze jmenovitých údajů transformátoru (poloha přepínače odboček transformátorů se neuvažuje)

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (4-52)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (4-53)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4-54)$$

- 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} jsou jmenovité ztráty nakrátko transformátoru
- u_{kr} je jmenovité napětí nakrátko v procentech
- u_{Rr} je činná složka jmenovitého napětí nakrátko transformátoru

Kde činnou složku nakrátko na činném odporu u_{Rr} lze získat z $u_{Rr} = \Delta P_{krT}/S_{rT}$ a dále pro $u_{kr} = \sqrt{u_{Rr}^2 + u_{Xr}^2}$. Potřebné údaje pro výpočet $\bar{Z}_{T1} = \bar{Z}_{T2}$ lze najít na štítku popřípadě musí být zjištěny od výrobce. Údaje o netočivé impedanci lze také nalézt na štítku nebo musí být získány od výrobce.

Impedanci souslednou, zpětnou i netočivou dvouvinuťových transformátorů s/bez přepínače odboček je nutné při výpočtech korigovat pomocí součinitele K_T , kde výsledná korigovaná impedance transformátoru

$$\bar{Z}_{TK} = K_T \cdot \bar{Z}_T \quad (4-55)$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot x_T}$$

- \bar{Z}_{TK} je korigovaná impedance transformátoru
- K_T je korekční součinitel pro transformátory
- c_{max} je napěťový součinitel podle Tabulka 4-2, zvolený podle jmenovitého napětí připojeného ke straně nižšího napětí transformátoru
- x_T je poměrná reaktance transformátoru

$$x_T = \frac{X_T \cdot S_{rT}}{U_{rT}^2} \quad (4-56)$$

V normě lze také nalézt vztah pro výpočet korekčního součinitele z dlouhodobě známých provozních podmínek. Korekční součinitel podle (4-55) se nesmí použít pro blokové transformátory.

Netočivou složku impedance transformátoru je zapotřebí určit s ohledem na způsob zapojení transformátoru a s ohledem na velikost impedance uzemnění případně vyvedeného středu transformátoru. Údaje pro výpočet lze opět získat od výrobce nebo ze štítku transformátoru. Způsob zapojení transformátorů v netočivé soustavě je uveden např. v [12].

4.11.3 Trojvinut'ové transformátory

Sousledné zkratové impedance $\bar{Z}_A, \bar{Z}_B, \bar{Z}_C$, vztažené na stranu A, pro náhradní Y schéma transformátoru lze vypočítat z hodnot napětí nakrátko (označení viz. Obr. 4-12)

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{AB} &= \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} && \text{(strana C rozpojena)} \\ \bar{Z}_{AC} &= \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} && \text{(strana B rozpojena)} \\ \bar{Z}_{BC} &= \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} && \text{(strana A rozpojena)} \end{aligned} \quad (4-57)$$

Kde

$$\begin{aligned} u_{XrAB} &= \sqrt{u_{krAB}^2 - u_{RrAB}^2} \\ u_{XrAC} &= \sqrt{u_{krAC}^2 - u_{RrAC}^2} \\ u_{XrBC} &= \sqrt{u_{krBC}^2 - u_{RrBC}^2} \end{aligned} \quad (4-58)$$

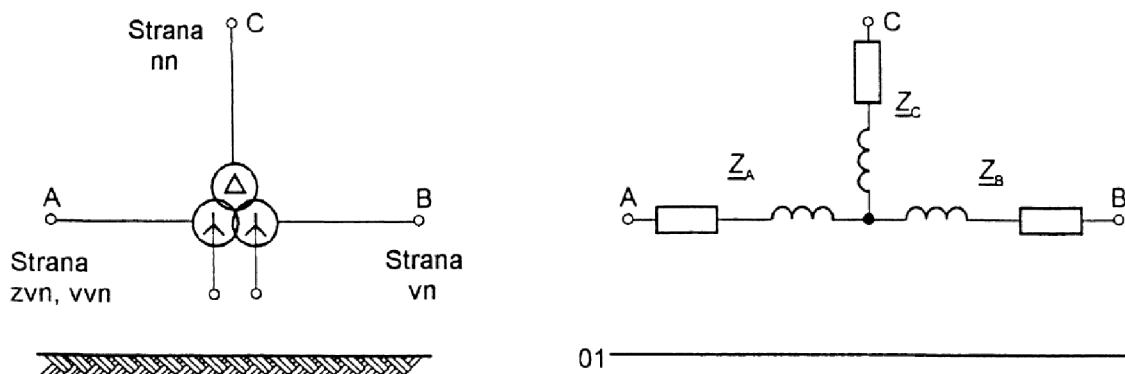
Impedance $\bar{Z}_{AB}, \bar{Z}_{AC}, \bar{Z}_{BC}$ ve všech třech složkách (sousledné, zpětné, netočivé) je zapotřebí korigovat korekčními činiteli

$$\begin{aligned} K_{TAB} &= 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAB}} \\ K_{TAC} &= 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAC}} \end{aligned} \quad (4-59)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TBC}}$$

Pak korigované impedance

$$\bar{Z}_{ABK} = K_{TAB} \bar{Z}_{AB}; \bar{Z}_{ACK} = K_{TAC} \bar{Z}_{AC}; \bar{Z}_{BCK} = K_{TBC} \bar{Z}_{BC} \quad (4-60)$$



Obr. 4-12 Trojvnuťový transformátor - označení zapojení [7]

A následně pomocí vztahů určit výsledné impedance

$$\bar{Z}_{TAK} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{ABK} + \bar{Z}_{ACK} - \bar{Z}_{BCK})$$

$$\bar{Z}_{TBK} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{BCK} + \bar{Z}_{ABK} - \bar{Z}_{ACK})$$

$$\bar{Z}_{TCK} = \frac{1}{2} (\bar{Z}_{ACK} + \bar{Z}_{BCK} - \bar{Z}_{ABK})$$

- 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 uvedeného v procentech mezi stranami A a B
- u_{RrAC}, u_{XrAC} jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami A a C
- u_{RrBC}, u_{XrBC} jsou jmenovité činné a induktivní složky napětí nakrátko uvedeného v procentech mezi stranami B a C

Netočivé impedance trojvnuťových transformátorů $\bar{Z}_{T0} = R_{T0} + jX_{T0}$ mohou být získány od výrobce. Způsoby jejich zapojení v netočivé složce lze nalézt v [12]. Pokud je zapotřebí počítat i s impedancí uzemnění \bar{Z}_N , korekčního součinitele se na ni nepoužije.

4.11.4 Venkovní vedení a kabely

Souslednou zkratovou impedancí $\bar{Z}_L = R_L + jX_L$ vedení lze vypočítat z jejich parametrů (průřez, rozteč vodičů, materiál atd.), případně lze použít katalogových hodnot výrobce nebo hodnot změřených. Pro venkovní vedení lze uvažovat $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. Rezistance na jednotku délky R_{Le} venkovních vedení při teplotě vodiče 20 °C lze vypočítat

$$R_{Le} = \frac{\rho}{q_n} \quad (4-62)$$

- ρ je rezistivita při 20°C
 - (a) 1/54 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ pro měď
 - (b) 1/34 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ pro hliník
 - (c) 1/31 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ pro slitinu hliníku
- q_n je jmenovitý průřez vedení

Reaktance na jednotku délky (předpokládá se transponované vedení)

$$X_{Le} = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (4-63)$$

- $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
- $d = \sqrt[3]{d_{L1L2}d_{L2L3}d_{L3L1}}$ geometrická střední vzdálenost mezi vodiči, či střední vzdálenost
- r je poloměr jednoduchého vodiče, v případě svazkových vodičů $r = \sqrt[n]{nrR_S^{n-1}}$, R_S je poloměr svazku
- n počet vodičů ve svazku, pro jednoduchý vodič $n = 1$

Při výpočtu zkratů pro teploty odlišné od 20°C je zapotřebí přepočítat rezistanci podle vztahu

$$R_L = [1 + \alpha_\theta(\theta - 20^\circ\text{C})]R_{L20}$$

- θ je teplota vodiče na konci zkratu v °C
- α_0 součinitel který platí s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitinu hliníku, = 0,004/K
- R_{L20} je rezistence podle (4-62) při 20°C

Hodnoty netočivých impedancí vedení se mohou lišit podle různosti výrobních postupů jednotlivých výrobců. Tyto hodnoty lze zjistit od výrobce, měřením nebo z různých příruček. Např. v [13], nebo [6] nebo [14].

4.11.5 Synchronní generátory

Při výpočtu zkratových proudů v sítích napájených přímo synchronními generátory (bez vloženého blokového transformátoru) je zapotřebí vypočítat souslednou korigovanou zkratovou impedanci synchronního generátoru

$$\bar{Z}_{GK} = K_G \bar{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (4-64)$$

- \bar{Z}_G je rázová impedance generátoru v sousledné soustavě, $\bar{Z}_G = R_G + jX_d''$

Kde pro korekční součinitel se použije (použije se pro všechny složky-souslednou, zpětnou a netočivou)

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

- c_{max} napěťový součinitel z Tabulka 4-2
- U_n je jmenovité napětí soustavy
- U_{rG} je jmenovité napětí generátoru
- φ_{rG} je fázový úhel mezi \bar{I}_{rG} a $\bar{U}_{rG}/\sqrt{3}$
- x_d'' je poměrná rázová reaktance generátoru vztahená ke jmenovité impedanci

$$x_d'' = \frac{X_d''}{Z_{rG}}, \quad Z_{rG} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad (4-65)$$

Při výpočtu I_k'' lze použít fiktivní rezistence R_{Gf} , které je také zapotřebí použít pro výpočet nárazového proudu i_p

$$R_{Gf} = 0,05 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,07 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,15 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} \leq 1 \text{ kV}$$

Fiktivní rezistence jsou stanoveny tak, aby respektovaly zanikání střídavé a stejnosměrné složky zkratového proudu v průběhu první půlperrody po vzniku zkratu. Zároveň jsou stanoveny tak, aby vyhovovaly při výpočtu nárazového zkratového proudu i_p .

Pro zpětnou složku zkratové impedance generátoru platí

$$\bar{Z}_{GK2} = K_G(R_{G2} + jX_{G2}) \approx K_G\bar{Z}_G = K_G(R_G + jX_d'') \quad (4-66)$$

Pro generátor s odlišnými hodnotami rázové reaktance v ose d a q lze použít pro hodnotu zpětné složkové reaktance generátoru

$$X_{G2} = \frac{(X_d'' + X_q'')}{2} \quad (4-67)$$

Korekční součinitel se nepoužije na impedanci \bar{Z}_N uvažovanou mezi uzlem generátoru a zemí.

4.11.6 Ostatní zkratové impedance

Více informací k výpočtu zkratových impedancí pro prvky, které zde nebyly uvedeny lze nalézt v normě [7]. Jde např. o zkratové impedance synchronních kompenzátorů a motorů, reaktorech omezující zkratové proudy, statické měniče, kondenzátory a nemotorické zátěže, zkratové impedance elektrárenských bloků, asynchronních motorů.

4.12 Postup výpočtu zkratových proudů

Výpočet zkratových proudů můžeme z hlediska veličin provést dvěma způsoby.

- 1) Ve skutečných hodnotách (pojmenovaných)
- 2) V poměrných hodnotách (nebo procentních)

Výpočtem podle normy se stanovují maximální a minimální zkratové proudy. Maximálních zkratových proudů bude dosaženo, pokud zkrat nastane při zatížené síti. Naopak minimálních zkratových proudů bude dosaženo při zkratu z chodu naprázdno.

Výpočet je obecně prováděn s komplexními čísly. Postup výpočtu v poměrných jednotkách lze shrnout následovně:

- 1) Sestavení základního schématu a sběr veškerých dat potřebných pro výpočet. Jde především o shromáždění dat o jednotlivých elektrických prvcích schématu potřebných pro výpočet zkratových impedancí podle kapitoly 4.11. Při sběru dat se bere v potaz místo zkratu, pro které budou zkratové proudy počítány.
- 2) Volba vztažného napětí U_V , za vztažné napětí je vhodné brát sdruženou hodnotu napětí v místě zkratu. Dále je zapotřebí zvolit vztažný výkon S_V . Ten lze obdobně jako vztažné napětí volit libovolně. Je vhodné za vztažný výkon zvolit výkon generátorů, což může

zjednodušit numerické výpočty, či nějaké vhodné „pěkné“ číslo (např. 100 MVA). V [8] je doporučeno vztažný výkon zvolit roven sumě jmenovitých výkonů generátorů.

- 3) Vypočtou se zkratové impedance jednotlivých zařízení podle kapitoly 4.11. Pokud se ve zkratovém obvodu vyskytuje více napěťových hladin, musí se zkratové impedance přepočíst pomocí jmenovitých převodů transformátorů na napětí v místě zkratu. Pokud je výpočet prováděn v poměrných hodnotách, převedou se impedance na poměrné hodnoty pomocí vztažného napětí a výkonu.
- 4) Sestavení náhradního schématu podle typu zkratu. Podle metody ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu se v náhradním schématu veškeré aktivní elektrické zdroje nahradí zkratovací propojkou a v sousledné složce se v místě zkratu připojí ekvivalentní napěťový zdroj. Pro trojfázový zkrat stačí počítat jen se souslednou složkou zkratové impedance. Pro nesouměrné zkraty je zapotřebí počítat i se zpětnou a netočivou složkou, podle typu poruchy. Sestavené složkové schéma lze propojit podle odvození v kapitole 4.8.
- 5) Zjednodušení náhradního schématu na celkovou zkratovou impedanci do místa zkratu. Při zjednodušování lze použít klasických metod zjednodušování elektrických obvodů (sériové a paralelní kombinace, transfigurace D-Y, Y-D). Při výpočtu nesouměrných zkratů je zapotřebí zjednodušovat jednotlivé složkové soustavy: samostatně na celkovou souslednou zkratovou impedanci, celkovou zpětnou složkovou impedanci (zpravidla se rovná sousledné), celkovou netočivou zkratovou impedanci.
- 6) Výpočet počátečního rázového zkratového proudu I_k'' tekoucího místem zkratu, podle vztahů v kapitole 4.9.1.
- 7) Podle potřeby se určí další požadované parametry. Např. výpočet ostatních charakteristických hodnot zkratového proudu (nárazový zkratový proud i_p , atp. podle kapitoly 4.9), nebo výpočet zkratových příspěvků jednotlivých zdrojů, výpočet rozložení napětí v jednotlivých uzlech atp.

Přepočet pomocí druhých mocnin převodů transformátorů si uvedeme na jednoduchém případě, uvažujme dva sériově spojené prvky:

- 1) vedení L1 s jmenovitým napětím $U_{r,110} = 110$ kV a impedancí vztaženou k jeho jmenovitému napětí \bar{Z}_{L110}
- 2) transformátor se jmenovitým převodem $t_r = 110/22$ kV připojený na konec vedení L1

Pokud bychom počítali zkrat na sekundární straně transformátoru, tedy na napěťové hladině 22 kV, je zapotřebí impedanci vedení L1 před transformátorem přepočíst na napětí na sekundární straně transformátoru. Přepočtená impedance vedení $\bar{Z}_{L110,p}$ na nižší napětí pak tedy

$$\bar{Z}_{L110,p} = \bar{Z}_{L110} \cdot \left(\frac{1}{t_r}\right)^2 = \bar{Z}_{L110} \cdot \left(\frac{1}{\frac{110}{22}}\right)^2 \quad (4-68)$$

Pro opačný přepočet (z 22kV na 110 kV) by platil přepočet opačný.

Pokud provedeme výpočet v poměrných hodnotách, je vhodné veškeré poměrné veličiny značit malým písmem a veličiny ve skutečných hodnotách psát velkými písmeny, z důvodu přehlednosti. Po zvolení vztažného napětí U_V a vztažného výkonu S_V lze stanovit zbylé vztažné veličiny

Vztažný proud

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} \quad (4-69)$$

Vztažná impedance

$$Z_V = \frac{U_V^2}{S_V} \quad (4-70)$$

Veškeré veličiny náhradního obvodu v pojmenovaných hodnotách (přepočtené na U_V) lze pak podělením příslušnou vztažnou veličinou (U_V , S_V , I_V , Z_V) převést na poměrné

- přepočet výkonu

$$s = \frac{S}{S_V} \quad (4-71)$$

- přepočet napětí

$$u = \frac{U}{U_V} \quad (4-72)$$

- přepočet proudu

$$i = \frac{I}{I_V} = I \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_V}{S_V} \quad (4-73)$$

- přepočet impedance

$$z = \frac{Z}{Z_V} = Z \cdot \frac{S_V}{U_V^2} \quad (4-74)$$

4.12.1 Maximální zkratové proudy

Maximální zkratové proudy jsou zapotřebí při dimenzování zařízení na mechanické a tepelné účinky zkratových proudů. Při jejich výpočtu podle normy je zapotřebí uvažovat

- Napěťový součinitel c_{\max} podle Tabulka 4-2
- Uvažovat konfiguraci soustavy takovou, aby vedla k maximálním možným zkratovým proudům
- Je zapotřebí uvažovat příspěvky motorů ke zkratovému proudu
- Rezistance venkovních vedení a kabelů se uvažuje při 20 °C.

4.12.2 Minimální zkratové proudy

Minimální zkratové proudy je vhodné počítat např. pro správné nastavení elektrických ochran, jištění elektrických zařízení, motorů atp.

- Použije se c_{\min} podle Tabulka 4-2
- Zvolí se konfigurace sítě taková, aby vedla k nejmenší hodnotě výsledných zkratových proudů
- Příspěvky motorů se zanedbávají
- Rezsistance venkovních vedení a kabelů se uvažuje při nejvyšší dovolené teplotě.

5 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA SPOLEČNOSTI E.ON – OBLAST SOKOLNIC

Společnost E.ON Distribuce a.s. je provozovatelem elektrické distribuční soustavy o napěťových hladinách vvn – 110 kV, vn – 22 kV a nn – 0,4 kV. Oblast působení společnosti E.ON Distribuce a.s. v rámci České republiky je soustředěna především do oblasti jižní části České republiky zahrnující kraje Jihočeský a Jihomoravský, dále pak část kraje Vysočina a část Zlínského kraje.



Obr. 5-1 Územní působnost distribuční společnosti E.ON [15]

V rámci distribuční společnosti je pak síť rozdělena z hlediska dispečerského řízení a spádových oblastí na oblast západ (okolí Českých Budějovic) a oblast východ (okolí Brna). Distribuční soustava je v obou těchto oblastech napájena z přenosové soustavy společnosti ČEPS, a.s. prostřednictvím nadřazených transformací 400/220/110 kV a taktéž z menších závodních elektráren a lokálních zdrojů. Tato práce se bude dále zabývat distribuční sítí v oblasti E.ON východ, která je napájena prostřednictvím těchto nadřazených transformací

- Čebín	400/110 kV	2x350 MVA, 1x250 MVA
- Otrokovice	400/110 kV	2x350 MVA, 1x250 MVA
- Slavětice	400/110 kV	2x250 MVA, 2x250 MVA
- Sokolnice	400/220/110 kV	1x400 MVA (400/220 kV) 1x350 MVA (400/110 kV) 2x200 MVA (220/110 kV)
- Mírovka	400/110 kV	1x250 MVA (pro oblast východ) 1x250 MVA (pro oblast západ)

Distribuční síť 110 kV je v oblasti západ napájena prostřednictvím transformátorů 400/110 kV přenosové soustavy zapojených paralelně. V oblasti východ je distribuční síť 110 kV provozována v devíti (v zimní období v jedenácti) oddělených systémech příslušejících jednotlivým transformátorům 400/110 kV (popř. 220/110 kV) s maximálně možným zakruhováním jednotlivých síťových celků. Volba rozpojovacích míst je taková, aby se způsob provozu z hlediska elektrických ztrát blížil paralelnímu chodu.

Distribuční síť 22 kV společnosti E.ON Distribuce je napájena prostřednictvím distribučních transformací 110/22 kV a je provozována především paprskově. Distribuční soustava 22 kV pak dále napájí distribuční síť 0,4 kV.

Prostřednictvím distribuční soustavy společnosti E.ON je napájeno přes 1 400 000 odběratelů v oblasti o rozsahu 26 500 km². Celková délka vedení vvn činní přibližně 3870 km a instalovaný výkon trafostanic vvn/vn činní 4580 MVA. Informace o distribuční soustavě E.ON zpracovány podle [16].

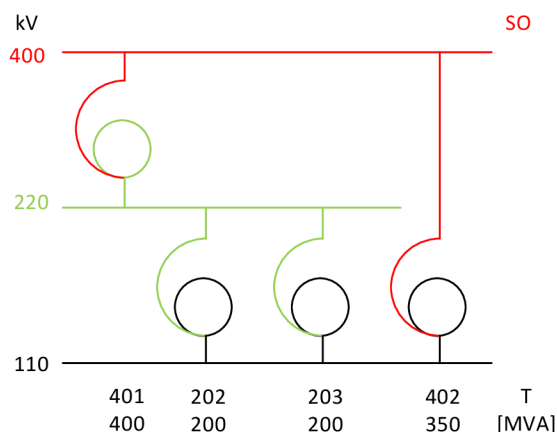
V další části se zaměříme na oblast napájenou z nadřazené transformační stanice Sokolnice.

5.1 Oblast napájená z transformovny Sokolnice

V této kapitole následuje popis jednotlivých rozvodů

5.1.1 Rozvodna Sokolnice (SO)

Rozvodna Sokolnice se nachází přibližně 11 km jihovýchodně od Brna. Do uzlové transformační stanice Sokolnice je v současné době přivedeno napájení z přenosové soustavy prostřednictvím jak vedeními 400 kV (V417, V423, V424, V435, V436, V497), tak 220 kV (V203, V207, V243, V244, V251, V252, V280). Transformaci z úrovně zvn na vvn lze znázornit následujícím schématem

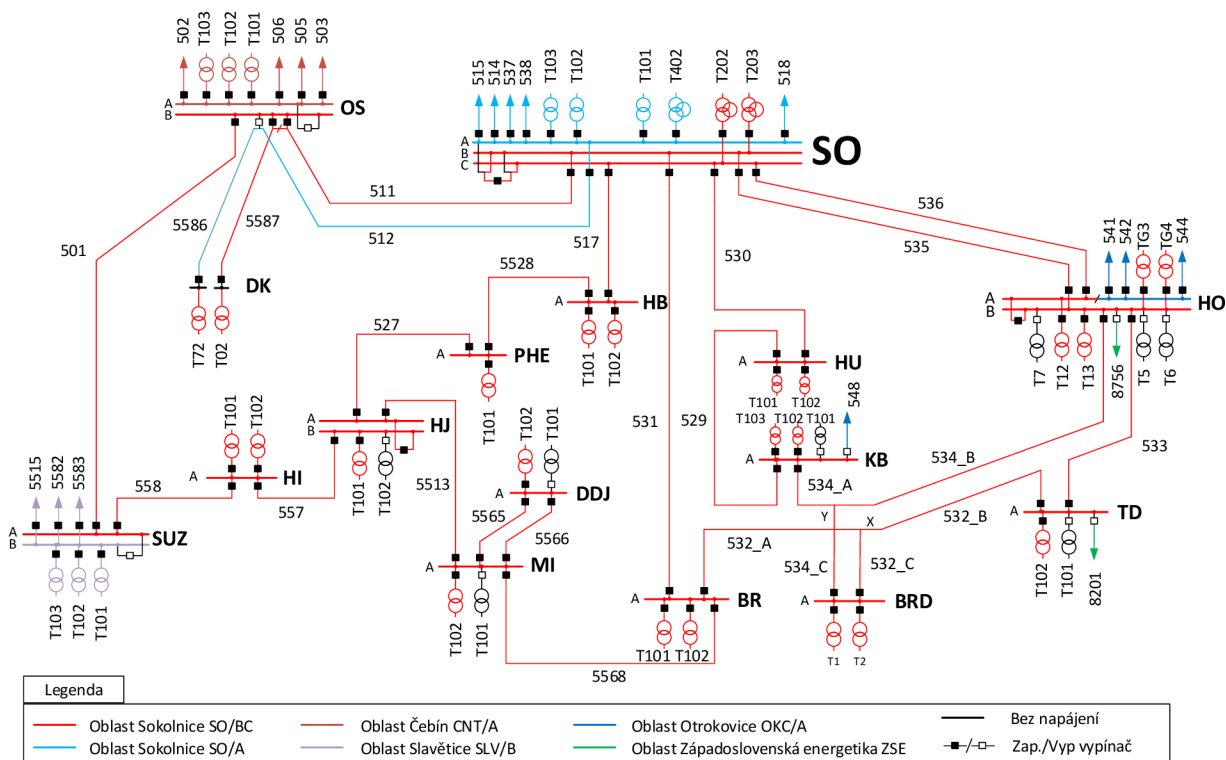


Obr. 5-2 Transformační schéma rozvodny Sokolnice [17]

Rozvodna Sokolnice je na úrovni 110 kV vybavena trojitým systémem přípojnic A, B, C doplněným o přípojnicí pomocnou. Dále je vybavena dvěma kombinovanými spínači přípojnic a přípojnice A, B, C jsou dále vybaveny podélným dělením.

Z rozvodny Sokolnice jsou dále napájeny dvě uzlové oblasti. K přípojnicí A je přivedeno napájení prostřednictvím transformátoru T402 400/110 kV o výkonu 350 MVA. Z přípojnicí A je pak prostřednictvím vedení 514, 515, 518, 537, 538 napájena jihovýchodní část Brna a oblast východně od Brna sahající až po Vyškov. K přípojnicí A jsou dále připojeny tři distribuční transformátory 110/22 kV: T101 a T103 o výkonu 40 MVA, T102 o výkonu 25 MVA. Z této přípojnicí je dále pomocí vyčleněných vedení 512 a 5586 přivedeno napětí k vlastní spotřebě Jaderné elektrárny Dukovany.

Přípojnicí B a C jsou spojeny příčným spínačem přípojnic a jsou napájeny dvojicí transformátorů 220/110 kV T202 a T203 oba o výkonu 200 MVA. Dvojice transformátorů tak pracuje v paralelním (můstkovém zapojení). Tyto přípojnicí prostřednictvím vedení 511, 517, 530, 531, 535 a 536 zajišťují napájení oblasti jižně od Sokolnic zahrnující oblast od Znojma až po Hodonín. Schéma řešené oblasti vykresluje následující obrázek



Obr. 5-3 Schéma uzlové oblasti Sokolnice, T202, T203

5.1.1.1 Můstkové zapojení transformátorů

V této práci bude nadále pod termínem můstkové zapojení nadále myšlena konfigurace sítě zřejmá i z Obr. 5-3. Jde o způsob provozu uzlové oblasti (UO), kdy UO je napájena více paralelně spolupracujícími transformátory. V rámci UO Sokolnice se jedná o provoz transformátorů T202 a T203, kdy každý z transformátorů napájí odlišnou přípojnici (tj. C a B). Tyto přípojnice jsou propojeny příčným spínačem přípojníc. Toto zapojení se dále vyznačuje dalším provozním opatřením, kdy jednotlivá vedení okružních celků v rámci UO Sokolnice jsou rozdělena mezi systém přípojníc tak, aby při výpadku jedné z přípojníc v rozvodně bylo zabezpečeno napájení okružní sítě alespoň z jedné strany. V rámci řešené sítě tak můžeme vytvořit více okruhů např. V511, V501, V558, V557, V527, V5528 a V517. Z obrázku je také zřejmé, že okrajová vedení V511 a V517 jsou připojeny k rozdílným přípojnicím. Tak tedy např. při výpadku přípojnice C v SO bude odpojeno také vedení V517. Napájení zůstane zachováno v této části okružní sítě prostřednictvím vedení V511. Z obrázku je také patrný způsob provozu okružních celků, které jsou navzájem propojeny a „paralelně spolupracují“. Napájení tak bude zachováno také prostřednictvím vedení V531, V535 atp.

Jednou z výhod můstkového provozu transformátorů je zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie při výskytu poruchy na přípojnici v rozvodně, kdy dodávka elektrické energie zůstane zachována s beznapětovou pauzou. Další výhodou je zlepšení napěťových poměrů v síti.

Nevýhodou takového provozu sítě je ovšem nárůst zkratových poměrů v důsledku poklesu zkratové impedance.

Pro paralelní spolupráci více transformátorů je zapotřebí dodržet následující podmínky:

- Shodné napětí nakrátko
- Shodný jmenovitý převod a rozsah odboček transformátorů

- Shodný jmenovitý úhel

Zdroj [19] dále uvádí, že důsledkem nedodržení těchto podmínek je nerovnoměrné zatížení transformátorů ve skupině a tím i omezení přenášeného výkonu transformátory. Dalším důsledkem může také být průtok vyrovnávacího proudu mezi paralelně spolupracujícími transformátory, který vytváří neúčelné zatížení

5.1.2 Rozvodny v oblasti Sokolnice SO/BC

Následuje popis rozvoden v uzlové oblasti Sokolnice SO/BC.

Břeclav (BR)

Rozvodna Břeclav je vybavena jednou přípojnici s podélným dělením. Rozvodna je připojena k distribuční síti vvn vedeními 531, 532_A a 5568. Dále jsou zde instalovány dva distribuční transformátory 110/22 kV T101 a T102 každý o jednotkovém výkonu 40 MVA.

Břeclav ČD (BRD)

Rozvodna Břeclav ČD je vybavena jednou přípojnici s podélným dělením. Rozvodna je připojena k distribuční síti vedeními vvn typu T číslo 532_C, 534_C a jsou zde instalovány dva transformátory 110/25 kV T1 a T2 o jednotkových výkonech 13,3 MVA. Provozovatelem rozvodny je společnost SŽDC.

Dolní Dunajovice (DDJ)

Rozvodna Dolní Dunajovice je vybavena jednou přípojnici s podélným dělením. K distribuční síti je připojena dvojitým vedením vvn číslo 5565 a 5566. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory T101 a T102 110/22 kV každý o výkonu 10 MVA. Rozvodna se nachází v areálu podzemních zásobníků plynu společnosti RWE.

Dukovany (DK)

Rozvodna Dukovany je určena k napájení vlastní spotřeby Jaderné elektrárny Dukovany. Jsou zde dva transformátory T02 a T72 každý napájený z rozdílné uzlové oblasti Sokolnic (SO/A a SO/BC). Oba transformátory mají jednotkový výkon 40 MVA.

Hrušovany u Brna (HB)

Rozvodna je vybavena jednou přípojnici s podélným dělením. Rozvodna je k distribuční síti připojena vedeními vvn číslo 517 a 5528. V rozvodně jsou instalovány distribuční transformátory 110/22 kV T101 a T102 každý o výkonu 40 MVA.

Hodonice (HI)

Rozvodna Hodonice je vybavena jednou přípojnici s podélným dělením. K distribuční síti vvn je připojena vedeními 557 a 558. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory T101 a T102 110/22 kV každý o výkonu 25 MVA.

Hrušovany nad Jevišovkou (HJ)

Rozvodna Hrušovany nad Jevišovkou je vybavena dvěma přípojnici spojenými příčným spínačem přípojníc. Rozvodna je k distribuční síti připojena vvn vedeními 527, 557, 5513. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory T101 a T102 110/22 kV, každý o výkonu 40 MVA. Do této rozvodny je rovněž vyveden výkon turbogenerátoru 12 MVA tamního Cukrovaru společnosti AGRENA.

Hodonín (HO)

Rozvodna Hodonín je vybavena dvojitým systémem přípojnic s podélným dělením. Polovina přípojnice A je napájena z uzlové oblasti Otrokovice vedeními vvn 541, 542, 544. Zbylá polovina přípojnice A je pomocí příčného spínače přípojnic spojena s přípojnicí B. Přípojnice B je napájena z uzlové transformovny Sokolnice SO/BC vedeními vvn číslo 533, 534, 535, 536. K těmto přípojnicím jsou rovněž připojeny tři transformátory 110/22 kV T6, T7, T13 o výkonu 40 MVA, dále transformátor T12 o výkonu 16 MVA a transformátor T5 o výkonu 12,5 MVA. Do přípojnice B je pak přes transformátory TG3 a TG4 vyveden výkon elektrárny Hodonín. Rozvodnu Hodonín lze pak pomocí přeshraničního vedení 110 kV č. 8756 propojit s rozvodnou Holič na území Slovenska vlastněné Západoslovenskou energetikou ZSE.

Hustopeče (HU)

Rozvodna Hustopeče je vybavena jednou přípojnicí s podélným dělením. K distribuční síti vvn je připojena vedeními 529 a 530. V rozvodně jsou rovněž instalovány dva transformátory 110/22 kV T101 a T102 každý o výkonu 25 MVA.

Klobouky (KB)

Rozvodna Klobouky je vybavena jednou přípojnicí. Rozvodna je propojena s uzlovou oblastí Sokolnice prostřednictvím vedení vvn 529 a 534. Rozvodna je možné rovněž spojit vvn vedením 548 s rozvodnou Kyjov napájenou z uzlové oblasti Otrokovice OKC/A. Vedení 548 je v rozvodně Klobouky odpojeno. V rozvodně jsou dále instalovány dva transformátory T101 a T102 110/6 kV každý o výkonu 10 MVA, které jsou vlastnictvím společnosti ČEPRO a.s. Dále je zde transformátor T103 110/22 kV o výkonu 25 MVA.

Mikulov (MI)

Rozvodna Mikulov je vybavena jednou přípojnicí s podélným dělením. Rozvodna je s distribuční sítí vvn spojena vedeními 5513, 5568 a dále je z ní připojena vedeními 5565, 5566 rozvodna Dolní Dunajovice (DDJ). V rozvodně jsou nainstalovány dva distribuční transformátory 110/22 kV T101 o výkonu 25 MVA a T102 o výkonu 40 MVA.

Oslavany (OS)

Rozvodna Oslavany je vybavena dvojitým systémem přípojnic, které nejsou při normálním provozu spojeny příčným spínačem přípojnic. Přípojnice B je propojena s uzlovou oblastí Sokolnic SO/BC vedeními 110 kV 501 a 511. Dále je k přípojnicí B připojeno vedení 5587 spojující rozvodnu Oslavany s rozvodnou Dukovany. Přípojnice A je pak spojena s uzlovou oblastí Čebín CNT/A vedeními 110 kV číslo 502, 503, 505, 506. K přípojnicí A jsou dále připojeny dva transformátory 110/22 kV T102 a T103 každý o výkonu 40 MVA a dále jeden transformátor T101 o výkonu 25 MVA.

Pohořelice (PHE)

Rozvodna Pohořelice je vybavena jednou přípojnicí s podélným dělením. Rozvodna je s distribuční sítí vvn propojena vedeními 110 kV č. 527 a 5528. V rozvodně je rovněž instalován jeden transformátor 110/22 kV o výkonu 25 MVA.

Suchohrdly u Znojma (SUZ)

Rozvodna je vybavena dvojitým systémem přípojnic. Přípojnice A je napájena z uzlové oblasti Sokolnice SO/BC vedeními 501 a 558. Přípojnice B je napájena z uzlové oblasti Slavětice SLV/B vedeními 5582 a 5583. Vedením 5515 je pak k distribuční síti připojena rozvodna vodní elektrárny

Vranov nad Dyjí (3x hydroalternátor 6,7 MVA) a fotovoltaická elektrárna Lesná o výkonu 16 MVA. K přípojnicí B jsou dále připojeny tři transformátory 110/22 kV T101, T102, T103 každý o výkonu 40 MVA.

Tvrdonice (TD)

Rozvodna je vybavena jednou přípojnicí napájenou vedeními 532_B a 533_B. V rozvodně jsou instalovány dva transformátory 110/22 kV T101 o výkonu 25 MVA a T102 o výkonu 16 MVA. Rozvodnu lze také propojit přeshraničním vedením 110 kV 8201 s distribuční sítí Západoslovenské energetiky s rozvodnou Senica.

Tabulka 5-1 Seznam dispečerských zkratek rozvodn

Dispečerská zkratka	Rozvodna	Dispečerská zkratka	Rozvodna
BR	<i>Břeclav</i>	KB	<i>Klobouky</i>
BRD	<i>Břeclav ČD</i>	MI	<i>Mikulov</i>
CNT	<i>Čebín</i>	OKC	<i>Otrokovice</i>
DDJ	<i>Dolní Dunajovice</i>	OS	<i>Oslavany</i>
DK	<i>Dukovany</i>	PHE	<i>Pohořelice</i>
HB	<i>Hrušovany u Brna</i>	SLV	<i>Slavětice</i>
HI	<i>Hodonice</i>	SO	<i>Sokolnice</i>
HJ	<i>Hrušovany nad Jevišovkou</i>	SUZ	<i>Suchohrdly u Znojma</i>
HO	<i>Hodonín</i>	TD	<i>Tvrdonice</i>
HU	<i>Hustopeče</i>		

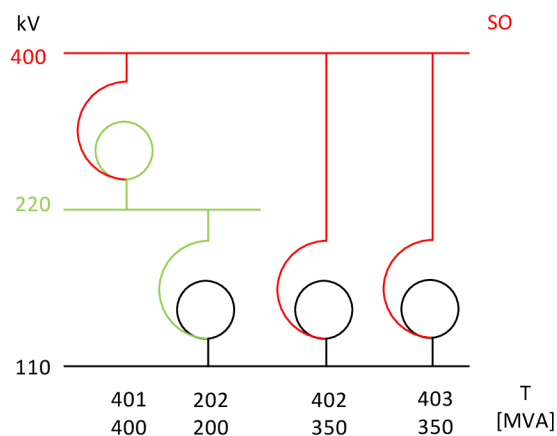
5.2 Charakteristika řešeného problému v oblasti Sokolnic

Dříve než se pustíme do výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v oblasti Sokolnic, je zapotřebí blíže charakterizovat řešený problém.

Transformace napětí z přenosové soustavy na úroveň 110 kV v transformovně Sokolnice probíhá v současné době podle schématu *Obr. 5-2*. Trojitý systém přípojnic je v Sokolnicích rozdělen na napájení dvou oblastí:

- 1. oblast se nachází severně od rozvodny Sokolnice a zahrnuje i část Brna. Podle dlouhodobého sledování lze předpokládat, že maximální zatížení v této oblasti nepřekračuje 200 MVA. Tuto oblast v této konfiguraci napájí transformátor T402 400/110 kV o výkonu 350 MVA.
- 2. oblast se nachází jižně od rozvodny Sokolnice. Z dlouhodobého sledování lze předpokládat, že maximální zatížení v této oblasti se pohybuje nad 200 MVA. Tato oblast je v této konfiguraci napájena dvojicí paralelně spolupracujících transformátorů T202 a T203 220/110 kV, každý o výkonu 200 MVA.

Na rok 2017 je plánována rekonstrukce transformovny Sokolnice (více informací [18]), kdy po výměně transformátoru T203 za nový transformátor T403 (400/110 kV, 350 MVA) bude transformační schéma rozvodny Sokolnice vypadat následovně



Obr. 5-4 Transformační schéma rozvodny Sokolnice po roce 2017

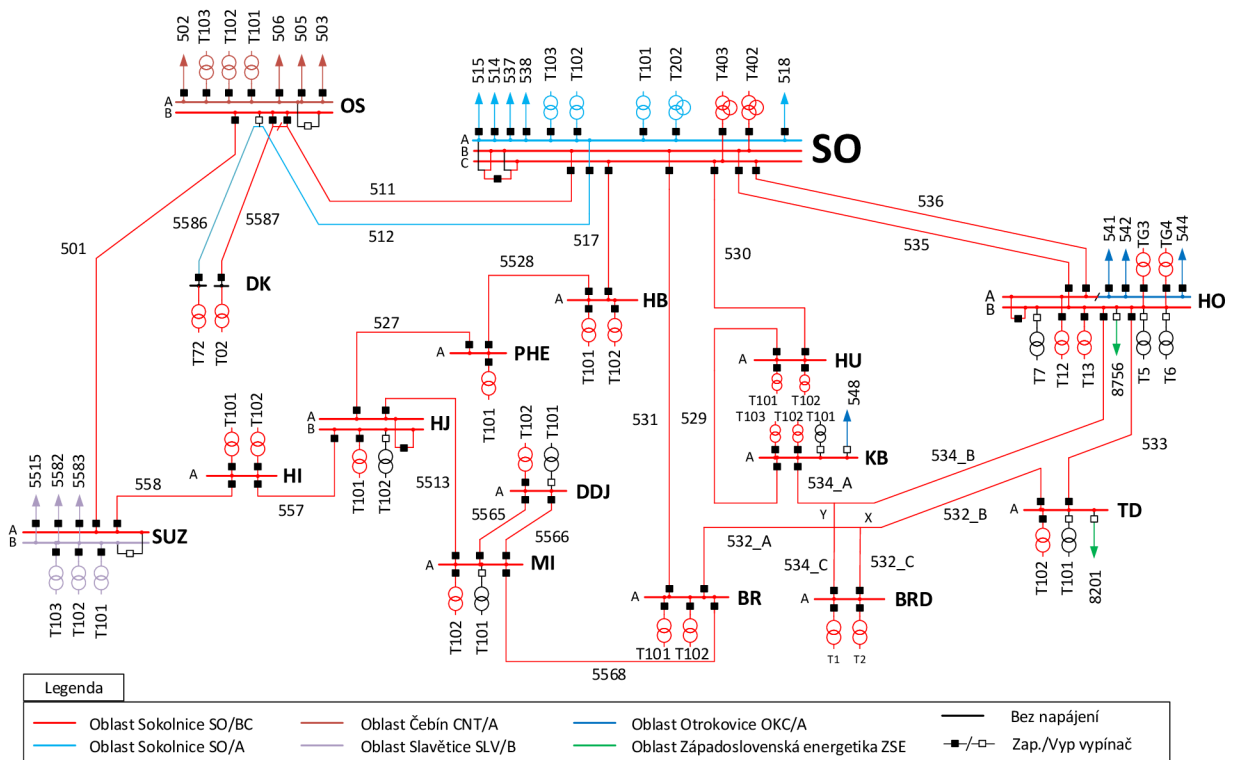
Posílení transformovny Sokolnice nabízí nové možnosti, jak rozdělit transformátory pro napájení výše uvedených dvou oblastí.

V této práci bude řešena následující napájecí konfigurace:

- 1. oblast má topologii zapojení stejnou jako před rekonstrukcí, ale bude napájena samostatným transformátorem T202 (220/110 kV, 200 MVA)
- 2. oblast má topologii zapojení taktéž totožnou jako před rekonstrukcí, ale bude napájena dvěma transformátory - T402 (400/110 kV, 350 MVA) a novým T403 (400/110 kV, 350 MVA), které budou zapojeny paralelně

V následující části práce bude řešena změna poměrů v druhé výše zmíněné oblasti (Sokolnice jih) s můstkovým provozem transformátorů T402 a T403 a porovnána se stávající provozovanou variantou - můstkovým zapojením transformátorů T202 a T203. Bude se tedy jednat o porovnání výsledků ustáleného chodu (dovolené meze napětí, proudové zatížení, elektrické ztráty). Zároveň bude uvažována pro obě konfigurace porucha (výpadek) přípojnice C v transformovně Sokolnice a tedy možnost, že pro pokrytí zatížení celé 2. oblasti zůstane jen jeden transformátor T203 popř. T402. Pro obě varianty zatížení budou také vypočteny zkratové proudy a bude provedeno vyhodnocení z hlediska zkratových odolností všech rozvodů.

Konfigurace napájení po roce 2017 a topologie zapojení 2. popisované oblasti (Sokolnice jih) lze znázornit následujícím schématem



Obr. 5-5 Schéma uzlové oblasti Sokolnice po rekonstrukci

Podle zjištěných výsledků pak budou nakonec navrženy potřebná technická opatření potřebná před uvedením do provozu.

6 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY PŘI CHODU T202 A T203, SOUČASNÝ STAV

Veškeré výpočty byly provedeny za pomoci řídicího programu SINAUT SPECTRUM 4.4. Jde o dispečerský řídicí program, ve kterém je zanesena kompletní topologie řízené oblasti – pro náš případ jde tedy o kompletní topologii distribuční soustavy 110 kV ve vlastnictví společnosti E.ON Distribuce. Tento řídicí software umožňuje dispečerům ovládat jednotlivé prvky distribuční sítě (odpojovače, vypínače atp.) v reálném čase. Do tohoto systému jsou taktéž v reálném čase importovány údaje o polohách a stavech všech elektrických zařízení a zároveň údaje o měření. Tím software tedy umožňuje dispečerům jednotlivé prvky distribuční soustavy nejen ovládat, ale také v reálném čase sledovat naměřené hodnoty a následně na ně příslušnou akcí reagovat.

Součástí řídicího programu je i možnost provádět analýzy (studie) založené na údajích uložených z vybraného časového okamžiku. Tedy např. je možné v určitém libovolném čase vytvořit kopii aktuálního stavu sítě (výřez), kdy se uloží hodnoty napětí v jednotlivých uzlech sítě, údaje o velikosti odběrů a dodávek do distribuční sítě atp. V našem případě tedy takto využijeme velikosti odběrů, které použijeme pro každou počítanou variantu stejné. Zároveň v režimu „studie“ lze jednotlivými prvky distribuční sítě libovolně manipulovat, aniž by se prováděné manipulace projevil ve skutečné síti.

V rámci této práce byl proveden takovýto „výřez“ sítě v pondělí 23.3.2015 v 9 hod. 38 min. Při výpočtu ustáleného chodu sítě program využívá Newtonovu iterační metodu, jednotlivé prvky sítě jsou nahrazeny svými π články. Pro výpočet zkratových proudů lze v programu vybrat z různých výpočtových metod. Pro výpočet zkratových proudů v této práci byla využita metoda ekvivalentního napěťového zdroje podle IEC 60909, v rámci této práce prezentovaná v kapitole 4. Napěťový součinitel $c = 1,1$. Vypočtené hodnoty program vyexportuje v textovém editoru *.txt. Tyto výsledky jsou dostupné k této práci na jejím konci v **příloze**.

Výsledky výpočtu ustáleného chodu budou vyhodnoceny následovně:

- Výstupem výpočtu budou uzlová napětí U , jejich velikost bude ve všech uzlech sítě (v rozvodnách) porovnána s hodnotami $U_n \pm 10 \%$, tedy tak aby platila následující nerovnost

$$99 \text{ kV} \leq U \leq 121 \text{ kV} \quad (6-1)$$

- Dalším výstupem výpočtu budou proudy i jednotlivých zařízení (vedení, transformátory) – procentuální hodnoty. Zatížení jmenovitým proudem odpovídá hodnota procentuálního proudu 100 % a zatížení jmenovitým proudem je zároveň zatížení maximální dovolené. Bude tedy provedena kontrola na zatížení jednotlivých prvků tak, že bezporuchový chod zařízení je při procentuálním proudu zařízení menším jak 100 %.

$$100 \% \geq i \quad (6-2)$$

- Dalším výstupem výpočtu bude celková bilance výkonu v počítané oblasti a porovnání celkových činných ztrát.
- Dalším výstupem výpočtu budou vypočtené zkratové proudy a výkony vyskytující se v jednotlivých rozvodnách. Vypočtené hodnoty budou dále porovnány se jmenovitou zkratovou odolností příslušných rozvodů.
- Výše zmíněné podmínky budou vyhodnoceny pro každou vypočtenou variantu. V další části práce pak bude provedeno porovnání změn veličin pro obě dříve zmíněné napájecí varianty, tedy můstkový provoz T202, T203 oproti T402, T403.

Zkratová odolnost rozvodu je dána vypínací schopností nejslabšího výkonového vypínače instalovaného v dané rozvodně a je udána velikostí trojfázového výkonu S_{kvyp} . Vyhodnocení zkratové odolnosti vychází z toho, že zkratová odolnost rozvodny nemůže být při trojfázové a ani při jednofázové poruše překročena.

6.1 Můstkový provoz T202 a T203

Následují výsledky výpočtu z programu Sinaut Spectrum. Uzlová oblast Sokolnice je napájena transformátory T202 a T203. T202 je připojen k přípojnici C a T203 je připojen k přípojnici B. Přípojnice B a C jsou v rozvodně Sokolnice spojeny příčným spínačem přípojnic. Schéma zapojení sítě je i s vyznačenými polohami vypínačů zobrazeno na Obr. 5-3. Popis jednotlivých rozvodů byl uveden v kapitole 5.1.

V následující tabulce jsou uvedeny uzlová napětí, která se vyskytnou v jednotlivých rozvodnách při můstkovém provozu transformátorů T202 a T203

Tabulka 6-1 Napětové poměry, paralelně T202 a T203

Rozvodna	U	δ	Rozvodna	U	δ
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
BR	118,0	-1,03	HU	118,1	-0,94
BRD	118,8	-0,59	KB	118,2	-0,91
DDJ	117,7	-1,24	MI	117,7	-1,24
DK	118,1	-0,96	OS	118,1	-0,96
HB	117,9	-0,91	PHE	117,8	-1,02
HI	117,6	-1,08	SO	118,2	-0,87
HJ	117,8	-1,04	SUZ	117,7	-1,07
HO	119,2	-0,25	TD	118,3	-0,80

Z hodnot uzlových napětí je zřejmé, že se všechny hodnoty pohybují v dovoleném rozmezí 99-121 kV. **Žluté** podbarvení značí rozvodnu s nejvyšší hodnotou napětí (Hodonín 119,2 kV), **modré** podbarvení značí naopak nejnižší velikost napětí (Hodonice 117,6 kV). Bilanční uzel byl při výpočtu zvolen v rozvodně Sokolnice. Do rozvodny Hodonín byl vyveden výkon tamější elektrárny, která udržovala velikost napětí v rozvodně Hodonín na hodnotě 119,2 kV (uzel HO byl zvolen jako P, U).

V následující tabulce jsou uvedeny zatížení jednotlivých vedení

Tabulka 6-2 Zatížení vedení, paralelně T202 a T203

Označení	Rozvodna 1	Rozvodna 2	I_{nL}	P_1	Q_1	I_1	P_2	Q_2	I_2	ΔP_L	i_L
			[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[%]
501	OS	SUZ	450	-2,3	-1,1	12,6	2,3	2,7	17,4	0,004	3,9
511	OS	SO	450	2,2	0,6	11,3	-2,2	0,5	11,2	0,001	2,5
517	HB	SO	680	6,4	9,5	56,2	-6,4	-8,2	51,1	0,008	8,3
527	HJ	PHE	455	1,5	1,4	10,0	-1,5	0,0	7,2	0	2,2
529	HU	KB	450	1,2	1,6	9,7	-1,2	-0,7	6,6	0,001	2,2
530	HU	SO	450	2,1	1,3	12,1	-2,1	-0,4	10,4	0,001	2,7
531	BR	SO	450	2,3	1,5	13,4	-2,3	0,4	11,4	0,003	3,0
532_A	BR	X	450	25,0	5,6	125,5	-25,0	-5,5	125,4	0,016	27,9
532_B	TD	X	450	-25,1	-5,4	125,2	25,0	5,5	125,3	0,029	27,8

532_C	BRD	X	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0	0,1
533	HO	TD	450	-25,8	-7,9	130,8	25,7	8,2	131,7	0,120	29,3
534_A	KB	Y	450	7,6	3,9	41,6	-7,6	-2,2	38,5	0,024	9,2
534_B	HO	Y	450	-12,9	-1,1	62,9	12,9	1,7	63,2	0,030	14,0
534_C	BRD	Y	450	-5,3	0,6	25,9	5,3	-0,5	25,9	0,002	5,8
535	HO	SO	450	-7,0	-0,6	34,0	7,0	2,9	36,9	0,039	8,2
536	HO	SO	450	-7,1	-0,9	34,6	7,1	3,3	38,0	0,036	8,4
557	HI	HJ	450	1,9	1,5	12,1	-1,9	-0,8	10,2	0,001	2,7
558	HI	SUZ	450	2,3	3,0	18,6	-2,3	-2,7	17,4	0,002	4,1
5513	HJ	MI	450	-6,1	1,2	30,6	6,1	-0,5	30,1	0,008	6,8
5528	HB	PHE	455	-7,4	-1,8	37,1	7,4	2,2	37,7	0,006	8,3
5565	DDJ	MI	450	0,3	0,1	1,6	-0,3	0,1	1,6	0	0,4
5566	DDJ	MI	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	0	0,2
5568	BR	MI	450	-4,2	-0,7	20,7	4,2	2,0	22,6	0,006	5,0
5587	DK	OS	450	-0,1	0,2	1,3	0,1	0,5	2,6	0	0,6
$\Sigma \Delta P_L$ [MW]										0,337	

V tabulce vedení je uvedeno označení a jmenovitý proud vedení I_{nL} . Dále jsou zde uvedeny dvě rozvodny, které vedení spojuje. Hodnoty P_1 , Q_1 , I_1 jsou veličiny, které se vztahují k rozvodně 1 a hodnoty P_2 , Q_2 , I_2 jsou veličiny, které se vztahují k rozvodně 2. Znaménka u činných výkonů značí směr přenosu výkonů. Např. pro vedení 501 výkon odtéká z rozvodny OS do vedení a je z tohoto vedení dodáván do rozvodny SUZ. Znaménka u jalových výkonů určují charakter výkonu v souladu s konvencí podle *Tabulka 3-1*. V předposledním sloupci tabulky jsou uvedeny činné ztráty ΔP_L ve vedení. Celkové činné ztráty ve vedení při můstkovém provozu T202 a T203 činily 337 kW. V posledním sloupci je pak uvedeno procentuální zatížení vedení i_L . Z vypočtených hodnot je patrné, že žádné vedení není proudově přetíženo a nejvyššího zatížení dosahují vedení 533 a 532 (29,3, resp. 27,9 %, žlutě podbarveno). *Pozn. Na vedení 532 a 534 je připojena rozvodna Břeclav ČD vedením typu T. Body rozdělení jsou označeny na Obr. 5-3 písmeny X a Y. Vedení 532 a 534 jsou pak v tabulce uvedeny s příponou _A, _B, _C. Označení odpovídá příslušným úsekům vedení podle schématu.*

V následující tabulce je uvedeno zatížení jednotlivých transformátorů

Tabulka 6-3 Zatížení transformátorů, paralelně T202 a T203

Rozvodna	Označení	t_r	S_{nT}	I_{nT}	P_T	Q_T	ΔP_T	I_T	i_T
		[-]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVA]	[MW]	[A]	[%]
BR	T101	110/22	40	210	-8,4	-2,5	0,049	43,0	20,5
	T102	110/22	40	210	-14,7	-3,9	0,049	74,6	35,5
BRD	T1	110/25	13,3	70	-2,7	-5,7	-	30,4	43,4
	T2	110/25	13,3	70	-2,7	6,2	-	32,6	46,6
DDJ	T102	110/22	10	52	-0,3	-0,1	-	1,6	3,1
DK	T02	110/---	40	210	0,1	-0,2	-	1,3	0,6
HB	T101	110/22	40	210	0,0	0,0	0,021	0,2	0,1
	T102	110/22	40	210	1,0	-7,7	0,042	37,9	18,0
HI	T101	110/22	25	131	3,1	-2,0	0,035	18,1	13,8
	T102	110/22	25	131	-7,3	-2,5	0,040	38,1	29,1
HJ	T101	110/22	40	210	6,6	-1,8	0,023	33,6	16,0

HO	TG3	110/10	63	331	34,2	7,8	0,099	169,9	51,3
	TG4	110/10	63	331	30,5	9,2	0,092	154,4	46,6
	T12	110/22	16	84	-4,0	-4,2	-	28,1	33,5
	T13	110/22	40	210	-7,9	-2,3	0,048	39,7	18,9
HU	T101	110/22	25	131	-3,3	-2,9	0,016	21,4	16,3
	T102	110/22	25	131	0,0	0,0	0,014	0,1	0,1
KB	T102	110/6	10	52	-0,7	-1,2	-	6,7	12,9
	T103	110/22	25	131	-5,7	-2,9	0,036	31,4	24,0
MI	T102	110/22	40	210	-10,0	-1,8	0,039	49,7	23,7
PHE	T101	110/22	25	131	-5,9	-2,2	0,020	30,8	23,5
SO	T202	220/110	200	1050	-0,5	1,8	0	9,2	0,9
	T203	220/110	200	1050	-0,4	0,1	0	2,2	0,2
TD	T102	110/22	16	84	-0,6	-2,8	-	14,1	16,8
$\Sigma \Delta P_T$ [MW]							0,623		

V tabulce zatížení transformátorů jsou uvedeny jmenovité převody transformátorů t_T , jmenovité výkony S_{nT} a jmenovité proudy transformátorů I_{nT} . Dále jsou v tabulce uvedeny činné P_T a jalové Q_T výkony transformátorů. Zelené podbarvení značí transformátory dodávající výkon do uzlové oblasti, zbylé nepodbarvené buňky značí transformátory odebírající výkon. Odběr nebo dodávku činného výkonu lze také určit ze znamének u činných výkonů tak, že znaménko „+“ značí dodávku činného výkonu, naopak znaménko „-“ značí, že se jedná o odběr činného výkonu. Charakter dodávaného nebo odebíraného výkonu lze určit ze znamének jalových výkonů transformátorů, pro která platí znaménková konvence podle *Tabulka 3-1*. V tabulce jsou dále uvedeny činné ztráty jednotlivých transformátorů ΔP_T . Některé buňky nejsou vyplněny, jelikož tyto transformátory nejsou ve vlastnictví společnosti E.ON. Na konci tabulky jsou sečteny veškeré činné ztráty transformátorů $\Sigma \Delta P_T$, které jsou rovny 623 kW. V tabulce jsou také uvedené proudové zatížení transformátorů I_T , které jsou dále přepočteny na procentuální hodnoty i_T . Nejvyšší zatížení bylo spočteno pro transformátory obou bloků elektrárny Hodonín TG3 a TG4 a dále pro dva transformátory ve vlastnictví společnosti SŽDC T1 a T2 v rozvodně BRD (žlutě podbarveno). Zatížení pro žádný transformátor nepřesáhlo hodnotu 55 %.

Z hodnot v tabulce je také patrné velice malé zatížení nadřazených transformátorů T202 (0,9%) a T203 (0,2%). Ze znamének činných výkonů je také možné vidět, že výkon není těmito transformátory do uzlové oblasti dodáván, nýbrž odebírán a tedy pro danou uzlovou oblast Sokolnice a její konkrétní konfiguraci došlo k tomu, že výrobní elektrické energie dodávaná do distribuční soustavy 110 kV přesahovala aktuální spotřebu a její přebytek byl přes nadřazené transformace 220/110 kV předáván dál do přenosové soustavy.

Tabulka 6-4 Výkonová bilance, paralelně T202 a T203

P_{dod}	P_{odb}	ΔP_T	ΔP_L	$\Sigma \Delta P$
[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
75,5	-75,1	0,623	0,337	0,960

Tabulka 6-4 udává výkonovou bilanci uzlové oblasti Sokolnice při můstkovém provozu T202 a T203. Celkový dodávaný výkon do uzlové oblasti činí 75,5 MW. Celková spotřeba pak činí 75,1 MW a celkové ztráty činného výkonu ve vedení a transformátorech jsou 0,96 MW, tedy přibližně 1,3 % dodávaného výkonu.

Můžeme ověřit, že platí $Výroba = Spotřeba + Ztráty = 75,1 + 0,337 = 75,437$ MW. Rozdíl 0,063 MW je způsoben zaokrouhlováním, jelikož údaje o výkonech transformátorů jsou vypočteny s přesností na jedno desetinné místo.

Tabulka 6-5 Zkratové poměry, paralelně T202 a T203

Rozvodna	Zkratová odolnost S_{kvyp}	S_{k3}''	I_{k3}''	S_{k1}''	I_{k1}''	s_{k3}''	s_{k1}''
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]
BR	3500	1411,6	7,409	1996,2	10,477	40,3	57,0
BRD	3500	1079,7	5,667	888,8	4,665	30,8	25,4
DDJ	3500	900,5	4,727	797,9	4,188	25,7	22,8
DK	3500	656,6	3,446	456,4	2,395	18,8	13,0
HB	3500	2289,1	12,015	3123,2	16,393	65,4	89,2
HI	3500	967,9	5,080	894,6	4,695	27,7	25,6
HJ	3500	1362,3	7,150	1302,6	6,837	38,9	37,2
HO	2500	1824,6	9,577	1889,1	9,915	73,0	75,6
HU	3500	1221,4	6,410	1088,2	5,712	34,9	31,1
KB	3500	947,6	4,973	809,6	4,249	27,1	23,1
MI	3500	1061,3	5,570	1005,1	5,275	30,3	28,7
OS	3500	1122,2	5,890	816,4	4,285	32,1	23,3
PHE	3500	1581,2	8,299	1593,3	8,363	45,2	45,5
SO	5000	4049,9	21,257	3215,2	16,875	81,0	64,3
SUZ	3500	908,5	4,768	755,8	3,967	26,0	21,6
TD	3500	1418,2	7,444	1606,7	8,433	40,5	45,9

Tabulka 6-5 udává zkratovou odolnost a velikost třífázových a jednofázových zkratových proudů v jednotlivých rozvodnách při zkratových poruchách na přípojnicích. Nejbliže se zkratové odolnosti přiblíží hodnoty při třífázovém zkratu v rozvodnách Sokolnice a Hodonín (81 a 73 %). Při jednofázovém zkratu se limitním hodnotám nejvíce přiblíží zkratové poměry v rozvodně Hrušovany u Brna a také v rozvodně Hodonín (89,2 a 75,6 %). (Žluté podbarvení). Při paralelním chodu T202 a T203 nicméně zkratové výkony v žádné rozvodně nepřesáhnou příslušné zkratové odolnosti.

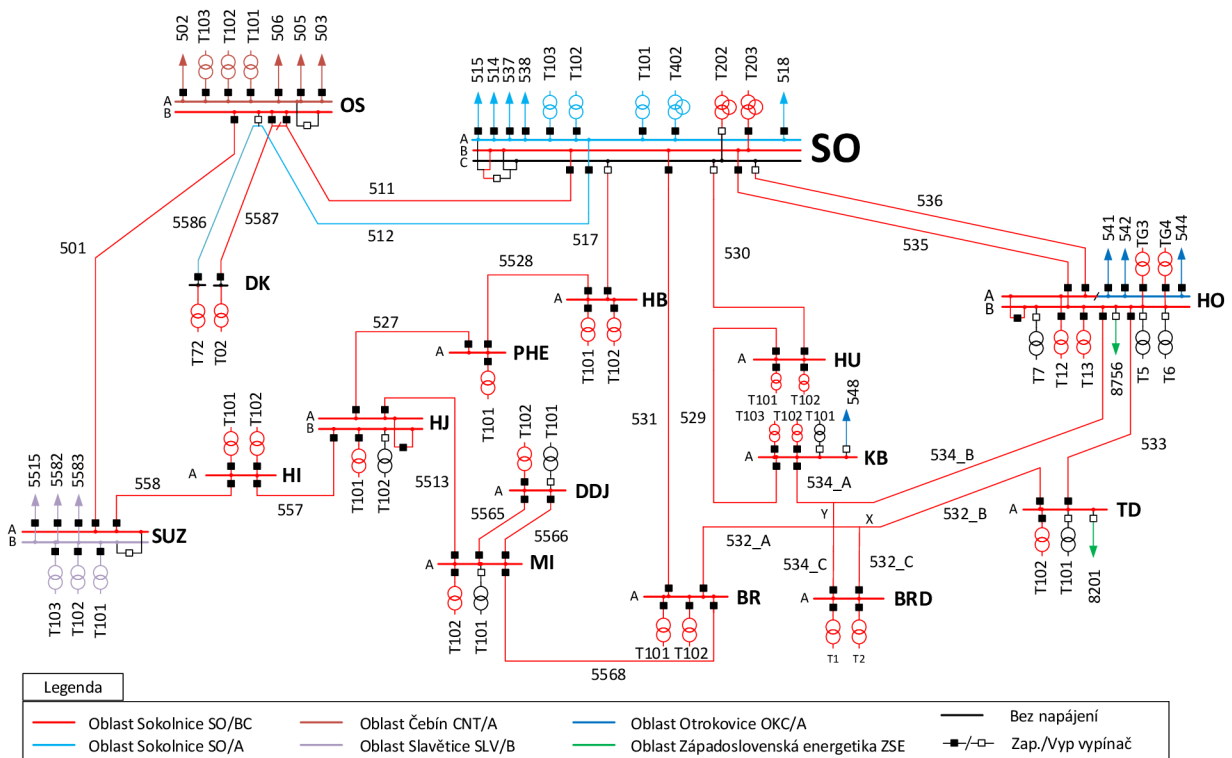
6.1.1 Zhodnocení můstkového provozu T202 a T203

Všechny sledované veličiny při paralelním chodu T202 a T203 se pohybují v dovolené toleranci. Nejvyšší napětí bylo spočteno v rozvodně Hodonín 119,2 kV. Nejnižší hodnota pak v rozvodně Hodonice 117,6 kV. Nejvíce zatěžovanými vedeními jsou 532 a 533 s procentuálním proudovým zatížením 27,9 % a 29,3 %. Nejvíce zatíženými transformátory jsou transformátory v rozvodně Hodonína TG3 a TG4 (51,3 a 46,6 %) a transformátory T1 a T2 v rozvodně Břeclav ČD (43,4 a 46,6 %). Celková výroba je 75,5 MW a celková spotřeba 75,1 MW. Celkové ztráty činného výkonu pak 0,96 MW (1,3%). Nejnepříznivější třífázové zkratové poruchy na přípojnicích nastanou pro dané zapojení v Sokolnicích (81 %) a Hodoníně (73 %). Nejvíce se zkratovým odolnostem při jednofázových poruchách přiblíží velikosti zkratových výkonů v rozvodně Hrušovany u Brna (89,2 %) a v rozvodně Hodonín (75,6 %).

Některé další informace k výsledkům výpočtu jsou uvedeny u jednotlivých tabulek: Tabulka 6-1, Tabulka 6-2, Tabulka 6-3, Tabulka 6-4 a Tabulka 6-5.

6.2 Můstkový provoz T202 a T203, výpadek přípojnice C v SO

V této kapitole je proveden výpočet a vyhodnocení ustáleného chodu a zkratových poměrů v uzlové oblasti Sokolnice při poruše. Uvažovanou poruchou v rámci výpočtu byl výpadek přípojnice C v rozvodně Sokolnice a tedy stav, kdy celou oblast napájí jen jeden transformátor 220/110 kV T203. Je zde provedena kontrola napěťových poměrů v jednotlivých rozvodnách, velikost proudového zatížení jednotlivých vedení a transformátorů, bilance výkonů a elektrických ztrát. Schéma zapojení uzlové oblasti Sokolnice při poruše je znázorněno na následujícím obrázku. Černě zbarvená přípojnice C v SO značí výpadek napájení a všechny prvky jsou od této přípojnice odpojeny.



Obr. 6-1 Schéma uzlové oblasti Sokolnice, T202, T203, při poruše

Tabulka 6-6 Napěťové poměry, T202, T203, porucha

Rozvodna	U	δ	Rozvodna	U	δ
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
BR	117,6	-0,99	HU	117,7	-1,04
BRD	118,7	-0,51	KB	117,9	-0,93
DDJ	116,5	-1,34	MI	116,5	-1,34
DK	117,6	-1,00	OS	117,6	-1,00
HB	115,7	-1,19	PHE	115,9	-1,24
HI	116,4	-1,21	SO	118,1	-0,86
HJ	116,2	-1,20	SUZ	116,6	-1,18
HO	119,1	-0,12	TD	118,0	-0,73

Všechna vypočtená napětí při výpadku přípojnice C v rozvodně Sokolnice jsou v dovolené toleranci. **Nejnižší** hodnota napětí byla vypočtena v rozvodně Hrušovany u Brna 115,7 kV (modře podbarveno). **Nejvyšší** hodnota napětí byla vypočtena v rozvodně Hodonín 119,1 kV, kde tuto

hodnotu napětí se snaží změnou výroby udržovat elektrárna Hodonín. (regulační uzel P, U). Fáze napětí nepřekročila $-1,5^\circ$.

Tabulka 6-7 Zatížení vedení, T202, T203 porucha

Označení	Rozvodna 1	Rozvodna 2	I_{nL}	P_1	Q_1	I_1	P_2	Q_2	I_2	ΔP_L	i_L
			[A]	[MW]	[MVA _r]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[A]	[MW]	[%]
501	OS	SUZ	450	-4,8	-4,8	33,2	4,8	6,3	39,0	0,024	8,7
511	OS	SO	450	4,7	4,2	31,1	-4,7	-3,2	27,9	0,011	6,9
517	HB	SO	680	0,0	1,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0	0,8
527	HJ	PHE	455	-5,0	-7,1	43,2	5,0	8,5	48,9	0,007	10,7
529	HU	KB	450	3,3	2,0	18,7	-3,3	-1,0	16,9	0,003	4,2
530	HU	SO	450	0,0	1,0	4,7	0,0	0,0	0,0	0	1,0
531	BR	SO	450	2,5	3,2	20,1	-2,5	-1,3	14,0	0,006	4,5
532_A	BR	X	450	28,8	9,0	148,2	-28,8	-9,0	148,0	0,023	32,9
532_B	TD	X	450	-28,9	-8,9	147,7	28,8	8,9	148,0	0,041	32,9
532_C	BRD	X	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0	0,1
533	HO	TD	450	-29,6	-11,5	154,1	29,5	11,7	155,2	0,166	34,5
534_A	KB	Y	450	9,7	4,3	51,8	-9,7	-2,7	49,0	0,038	11,5
534_B	HO	Y	450	-15,1	-1,5	73,4	15,0	2,1	73,8	0,042	16,4
534_C	BRD	Y	450	5,3	-0,5	25,9	-5,3	0,6	25,9	0,002	5,8
535	HO	SO	450	-8,1	-0,4	39,4	8,1	2,7	41,7	0,052	9,3
536	HO	SO	450	0,0	2,5	12,0	0,0	0,0	0,0	0,001	2,7
557	HI	HJ	450	-0,5	-2,0	10,4	0,5	2,7	13,8	0,001	3,1
558	HI	SUZ	450	4,8	6,6	40,2	-4,8	-6,3	39,0	0,006	8,9
5513	HJ	MI	450	-2,2	6,2	32,8	2,1	-5,5	29,3	0,008	7,3
5528	HB	PHE	455	-0,9	6,7	33,7	0,9	-6,3	31,6	0,004	7,4
5565	DDJ	MI	450	0,3	0,1	1,6	-0,3	0,1	1,6	0	0,4
5566	DDJ	MI	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	0	0,2
5568	BR	MI	450	-8,2	-5,8	49,3	8,1	7,0	53,2	0,033	11,8
5587	DK	OS	450	-0,1	0,2	1,3	0,1	0,5	2,6	0	0,6
										$\Sigma \Delta P_L$ [MW]	0,468

V Tabulka 6-7 jsou uvedeny proudové zatížení jednotlivých vedení. Nejvíce zatíženými vedeními při výpadku přípojnice C jsou vedení 532 a 533, jejichž proudové zatížení nepřekročí 35 %. Z vypočtených hodnot je zřejmé, že žádné vedení tedy není proudově přetížené. Celkové ztráty činného výkonu ve vedení činí 468 kW.

Tabulka 6-8 Zatížení transformátorů, T202, T203 porucha

Rozvodna	Označení	t_r	S_{nT}	I_{nT}	P_T	Q_T	ΔP_T	I_T	i_T
		[-]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[A]	[%]
BR	T101	110/22	40	210	-8,4	-2,5	0,049	43,1	20,5
	T102	110/22	40	210	-14,7	-3,9	0,049	74,9	35,7
BRD	T1	110/25	13,3	70	-2,7	-5,7	-	30,5	43,6
	T2	110/25	13,3	70	-2,7	6,2	-	32,7	46,7
DDJ	T102	110/22	10	52	-0,3	-0,1	-	1,6	3,1
DK	T02		40	210	0,1	-0,2	-	1,3	0,6

HB	T101	110/22	40	210	0,0	0,0	0,020	0,2	0,1
	T102	110/22	40	210	1,0	-7,7	0,041	38,7	18,4
HI	T101	110/22	25	131	3,1	-2,0	0,034	18,3	14,0
	T102	110/22	25	131	-7,3	-2,5	0,040	38,6	29,5
HJ	T101	110/22	40	210	6,6	-1,9	0,023	34,0	16,2
HO	TG3	110/10	63	331	34,2	8,1	0,099	170,3	51,5
	TG4	110/10	63	331	30,5	9,5	0,093	154,9	46,8
	T12	110/22	16	84	-4,0	-4,2	-	28,1	33,5
	T13	110/22	40	210	-7,9	-2,3	0,048	39,7	18,9
HU	T101	110/22	25	131	-3,3	-2,9	0,016	21,5	16,4
	T102	110/22	25	131	0,0	0,0	0,014	0,1	0,1
KB	T102	110/6	10	52	-0,7	-1,2	-	6,7	12,9
	T103	110/22	25	131	-5,7	-2,9	0,036	31,5	24,0
MI	T102	110/22	40	210	-10,0	-1,8	0,039	50,2	23,9
PHE	T101	110/22	25	131	-5,9	-2,2	0,020	31,3	23,9
SO	T202	220/110	200	1050	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0
	T203	220/110	200	1050	-0,8	1,8	0,000	9,6	0,9
TD	T102	110/22	16	84	-0,6	-2,8	-	14,2	16,9
$\Sigma \Delta P_T$ [MW]							0,621		

Z Tabulka 6-8 je zřejmé, že žádný z transformátorů při výpadku přípojnice C v SO nebude proudově přetížen. Uzlová oblast Sokolnice v tomto případě bude s nadřazenou přenosovou soustavou spojena transformátorem T203. Transformátor T202 zůstane odpojen (nulové zatížení). Nejvíce zatíženými transformátory při výpadku přípojnice v SO zůstanou transformátory TG3 a TG4 v rozvodně Hodonín a dva transformátory společnosti SŽDC v rozvodně Břeclav ČD, tedy stejně jako při bezporuchovém chodu T202 a T203. Žádný z transformátorů nebude zatížen více jak na 52 % svého jmenovitého proudu. Celkové ztráty činného výkonu v transformátorech činní 621 kW. Zelené podbarvení značí transformátory dodávající výkon do UO.

Tabulka 6-9 Výkonová bilance, T202 a T203 při poruše

P_{dod}	P_{odb}	ΔP_T	ΔP_L	$\Sigma \Delta P$
[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
75,5	-75,0	0,621	0,468	1,089

Celkový dodávaný výkon do oblasti činí 75,5 MW a celkový odběr činí 75 MW. Ztráty činného výkonu dosahují 1,089 MW, tedy přibližně 1,44 %. Po provedení kontroly Výroba = Spotřeba + Ztráty = 75 + 0,468 = 75,468 MW. Rozdíl 0,032 MW vzniká v důsledku zaokrouhlování.

Tabulka 6-10 Zkratové poměry, T202, T203 při poruše

Rozvodna	Zkratová odolnost S_{kvyp}	S_{k3}''	I_{k3}''	S_{k1}''	I_{k1}''	S_{k3}'''	S_{k1}'''
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]
BR	3500	1142,8	5,998	1633,4	8,573	32,7	46,7
BRD	3500	740,8	3,888	701,2	3,680	21,2	20,0
DDJ	3500	617,1	3,239	627,7	3,295	17,6	17,9
DK	3500	603,9	3,169	417,9	2,193	17,3	11,9
HB	3500	452,7	2,376	665,7	3,494	12,9	19,0
HI	3500	624,5	3,278	666,1	3,496	17,8	19,0
HJ	3500	627,7	3,294	747,3	3,922	17,9	21,4

HO	2500	1297,7	6,811	1444,5	7,582	51,9	57,8
HU	3500	326,6	1,714	370,2	1,943	9,3	10,6
KB	3500	431,3	2,264	462,6	2,428	12,3	13,2
MI	3500	688,6	3,614	749,3	3,933	19,7	21,4
OS	3500	976,4	5,125	700,9	3,679	27,9	20,0
PHE	3500	527,1	2,766	680,0	3,569	15,1	19,4
SO	5000	2994,2	15,716	1742,2	9,144	59,9	34,8
SUZ	3500	639,1	3,354	607,5	3,189	18,3	17,4
TD	3500	1140,5	5,986	1354,0	7,107	32,6	38,7

Tabulka 6-10 udává zkratovou odolnost a velikost zkratových poměrů v jednotlivých rozvodnách při zkratových poruchách na přípojnicích. Nejbliže se zkratové odolnosti přiblíží hodnoty při třífázovém zkratu v rozvodně Sokolnice 59,9 %. Při jednofázovém zkratu se limitním hodnotám nejvíce přiblíží zkratové poměry v rozvodně Hodonín 57,8 % (Žluté podbarvení). Zkratové výkony v žádné z rozveden nepřesáhnou příslušné zkratové odolnosti.

6.2.1 Zhodnocení můstkového provozu T202 a T203 při poruše

Všechny sledované veličiny pro paralelní chod T202 a T203 s uvažovaným výpadkem přípojnice C v SO se pohybují v dovolené toleranci. Nejvyšší napětí bylo spočteno v rozvodně Hodonín 119,1 kV. Nejnižší hodnota pak v rozvodně Hrušovany u Brna 115,7 kV. Nejvíce zatěžovanými vedeními jsou 532 a 533 s proudovým zatížením 32,9 % a 34,5 %. Nejvíce zatíženými transformátory jsou transformátory v rozvodně Hodonína TG3 a TG4 (51,5 a 46,8 %) a transformátory T1 a T2 v rozvodně Břeclav ČD (43,6 a 46,7 %). Celková výroba je 75,5 MW a celková spotřeba 75 MW. Celkové ztráty činného výkonu pak jsou 1,089 MW (1,44 %). Nejnepříznivější třífázová zkratová porucha nastane v rozvodně Sokolnice 59,9 %. Nejvíce se zkratové odolnosti při jednofázové zkratové poruše přiblíží velikosti zkratových výkonů v rozvodně Hrušovany u Brna 57,8 %. Zkratová odolnost není v žádné z rozveden překročena.

Uzlovou oblast Sokolnice je tedy možné provozovat i s napájením jen jedním transformátorem T203, aniž by nastaly vážnější komplikace.

Některé další informace k výsledkům výpočtu jsou uvedeny u jednotlivých tabulek: Tabulka 6-6, Tabulka 6-7, Tabulka 6-8, Tabulka 6-9 a Tabulka 6-10.

7 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY PŘI CHODU T402 A T403

V této kapitole budou uvedeny výsledky výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v UO Sokolnice po rekonstrukci transformační stanice Sokolnice. Uzlová oblast Sokolnice bude napájena dvěma transformátory 400/110 kV T402 a T403. Schéma uzlové oblasti Sokolnice po zavedení přímé transformace z 400 na 110 kV pomocí dvou transformátorů pak přejde na Obr. 5-5.

7.1 Můstkový provoz T402 a T403

V následující tabulce jsou uvedeny napěťové poměry v uzlové oblasti Sokolnice napájené dvěma transformátory T402 a T403

Tabulka 7-1 Napěťové poměry, paralelně T402 a T403

Rozvodna	U	δ	Rozvodna	U	δ
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
BR	123,9	0,35	HU	125,0	0,27
BRD	124,0	0,88	KB	124,4	0,42
DDJ	124,4	0,03	MI	124,4	0,03
DK	125,6	0,14	OS	125,6	0,14
HB	125,5	0,19	PHE	125,2	0,12
HI	124,9	0,07	SO	125,8	0,21
HJ	125,0	0,13	SUZ	125,1	0,08
HO	123,9	1,29	TD	123,9	0,63

Velikost napětí ve všech rozvodnách překračuje dovolenou toleranci. Tato nepřesnost vznikla nejspíše z důvodu nesprávně namodelovaného nového transformátoru T403 v rozvodně Sokolnice, tedy nesprávným nastavením odboček transformátorů T403 a T402 tak, aby byly splněny podmínky paralelního chodu. (viz. dále u popisu zatížení transformátorů *Tabulka 7-3*, nebo také celkové zhodnocení v kapitole 7.1.1)

Tabulka 7-2 Zatížení vedení, paralelně T402 a T403

Označení	Rozvodna 1	Rozvodna 2	I_{nL}	P_1	Q_1	I_1	P_2	Q_2	I_2	ΔP_L	i_L
			[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[%]
501	OS	SUZ	450	-2,3	-2,5	15,8	2,3	4,3	22,6	0,007	5,0
511	OS	SO	450	2,3	1,9	13,6	-2,3	-0,7	10,9	0,002	3,0
517	HB	SO	680	6,2	14,6	72,9	-6,2	-13,5	68,1	0,013	10,7
527	HJ	PHE	455	1,2	6,7	31,5	-1,2	-5,1	24,3	0,003	6,9
529	HU	KB	450	1,2	-7,6	35,7	-1,2	8,6	40,4	0,016	9,0
530	HU	SO	450	2,1	10,6	49,7	-2,1	-9,5	44,8	0,025	11,0
531	BR	SO	450	2,4	12,3	58,3	-2,4	-10,3	48,7	0,064	13,0
532_A	BR	X	450	25,2	-12,6	131,3	-25,2	12,6	131,5	0,019	29,2
532_B	TD	X	450	-25,3	12,8	132,0	25,2	-12,7	131,7	0,032	29,3
532_C	BRD	X	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,4	0	0,1
533	HO	TD	450	-26,0	10,3	130,4	25,9	-10,0	129,3	0,117	29,0
534_A	KB	Y	450	7,6	-5,5	43,5	-7,6	7,3	49,2	0,032	10,9

534_B	HO	Y	450	-13,0	8,5	72,3	12,9	-7,9	70,5	0,039	16,1
534_C	BRD	Y	450	5,3	-0,5	24,8	-5,3	0,6	24,8	0	5,5
535	HO	SO	450	-6,6	13,9	71,5	6,4	-11,5	60,4	0,140	15,9
536	HO	SO	450	-7,3	13,8	72,8	7,1	-11,4	61,9	0,129	16,2
557	HI	HJ	450	1,9	-0,1	8,8	-1,9	0,9	9,8	0,001	2,2
558	HI	SUZ	450	2,3	4,6	24,1	-2,3	-4,3	22,6	0,002	5,4
5513	HJ	MI	450	-5,9	-5,8	38,2	5,9	6,6	41,1	0,014	9,1
5528	HB	PHE	455	-7,1	-6,8	45,4	7,1	7,3	47,0	0,009	10,3
5565	DDJ	MI	450	0,3	0,1	1,5	-0,3	0,1	1,5	0	0,3
5566	DDJ	MI	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,1	0	0,2
5568	BR	MI	450	-4,4	6,6	37,1	4,4	-5,2	31,7	0,015	8,2
5587	DK	OS	450	-0,1	0,2	1,2	0,1	0,6	2,9	0	0,6
$\Sigma \Delta P_L$ [MW]										0,679	

V Tabulka 7-2 jsou uvedeny velikosti zatížení jednotlivých vedení při můstkovém provozu T402 a T403. Žádné vedení není proudově přetíženo a **nejvíce** zatěžovanými vedeními jsou 532 a 533 s zatížením okolo 30 %. Při výpočtu byl typ uzlu v rozvodně Hodonín zvolen jako P, U. Elektrárna Hodonín se tedy svým regulačním výkonem snažila zvýšené napětí v síti vykompenzovat změnou velikosti výroby jalového výkonu. Tomu odpovídá i zvýšený přenos jalových výkonů. Proudové zatížení vedení tedy oproti paralelnímu provozu T202 a T203 mírně vzrostlo. Celkové činné ztráty ve vedení činily 679 kW.

Tabulka 7-3 Zatížení transformátorů, paralelně T402 a T403

Rozvodna	Označení	t_r	S_{nT}	I_{nT}	P_T	Q_T	ΔP_T	I_T	i_T
		[-]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[A]	[%]
BR	T101	110/22	40	210	-8,4	-2,5	0,053	40,9	19,5
	T102	110/22	40	210	-14,7	-3,8	0,050	71,0	33,8
BRD	T1	110/25	13,3	70	-2,7	-5,7	-	29,1	41,6
	T2	110/25	13,3	70	-2,7	6,2	-	31,3	44,7
DDJ	T102	110/22	10	52	-0,3	-0,1	-	1,5	2,9
DK	T02		40	210	0,1	-0,2	-	1,2	0,6
HB	T101	110/22	40	210	0,0	0,0	0,024	0,2	0,1
	T102	110/22	40	210	1,0	-7,7	0,046	35,8	17,0
HI	T101	110/22	25	131	3,1	-2,0	0,038	17,1	13,1
	T102	110/22	25	131	-7,3	-2,5	0,042	35,9	27,4
HJ	T101	110/22	40	210	6,6	-1,8	0,025	31,6	15,0
HO	TG3	110/10	63	331	34,2	-20,7	0,109	186,2	56,3
	TG4	110/10	63	331	30,5	-19,2	0,101	168,1	50,8
	T12	110/22	16	84	-4,0	-4,2	-	27,1	32,3
	T13	110/22	40	210	-7,9	-2,3	0,051	38,2	18,2
HU	T101	110/22	25	131	-3,3	-2,9	0,017	20,3	15,5
	T102	110/22	25	131	0,0	0,0	0,016	0,1	0,1
KB	T102	110/6	10	52	-0,7	-1,2	-	6,3	12,1
	T103	110/22	25	131	-5,7	-2,9	0,039	29,9	22,8
MI	T102	110/22	40	210	-10,0	-1,8	0,042	47,0	22,4
PHE	T101	110/22	25	131	-5,9	-2,2	0,021	29,0	22,1
SO	T402	400/110	350	1837	8,4	-114,6	0,024	527,3	28,7

	T403	400/110	350	1837	-8,9	171,5	0,053	788,3	42,9
TD	T102	110/22	16	84	-0,6	-2,8	-	13,5	16,1
$\Sigma \Delta P_T$ [MW]							0,751		

V *Tabulka 7-3* jsou uvedeny zatížení transformátorů. Z výsledků výpočtu lze konstatovat, že žádný transformátor není proudově přetížen. Zelené podbarvení značí transformátory dodávající výkon, žluté podbarvení značí nejvíce zatěžované transformátory. Nejvíce zatíženými transformátory (všechny méně jak 60 %) jsou stejně jako při výpočtu paralelního provozu T202 a T203 transformátory v rozvodně Břeclav ČD T1, T2 a v rozvodně Hodonín TG3 a TG4. Celkové ztráty činného výkonu dosahují 751 kW. V tabulce jsou také červeně podbarveny hodnoty zatížení transformátorů T402 a T403. Tyto hodnoty naznačují, že mezi paralelně zapojenými transformátory tekl vyrovnávací proud. Transformátor T402 do rozvodny Sokolnice dodává výkon $8,4 - j114,6$ MVA, jehož část protéká přes příčný spínač přípojnic a transformátor T403 pak z rozvodny Sokolnice odebírá výkon $-8,9 + j171,5$ MVA. Hodnoty proudového zatížení a tedy i údaje o velikosti činných ztrát u těchto transformátorů zahrnují v sobě chybu způsobenou právě tímto přetokem výkonů mezi těmito transformátory. Taktéž je možné pozorovat zvýšenou výrobu jalového výkonu v elektrárně Hodonín a tím i zvýšené zatížení transformátorů TG3 a TG4 (oproti chodu T202 a T203).

Tabulka 7-4 Výkonová bilance, paralelně T402 a T403

P_{dod}	P_{odb}	ΔP_T	ΔP_L	$\Sigma \Delta P$
[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
83,9	-83,1	0,751	0,679	1,430

V *Tabulka 7-4* je uveden celkový dodávaný výkon do uzlové oblasti Sokolnic 83,9 MW. Celkový odebíraný výkon z UO Sokolnice při můstkovém provozu T402 a T403 činí 83,1 MW. K těmto hodnotám je zapotřebí podotknout, že v nich je započtena velikost vyrovnávacího výkonu a proto, i když se pro všechny počítané varianty velikost činných odběrů nemění, se tyto hodnoty liší od hodnot v předchozích výpočtech (oproti např. *Tabulka 6-4*). I přes uvedenou chybu lze provést kontrolní výpočet $\text{Výroba} = \text{Spotřeba} + \text{Ztráty} = 83,1 + 0,679 = 83,779$ MW. Rozdíl 0,121 MW je způsoben zaokrouhlováním. Celkové činné ztráty by při takovémto chodu soustavy činily 1,43 MW tedy 1,7 % dodávaného výkonu.

Tabulka 7-5 Zkratové poměry, paralelně T402 a T403

Rozvodna	Zkratová odolnost S_{kvyp}	S_{k3}''	I_{k3}''	S_{k1}''	I_{k1}''	S_{k3}''	S_{k1}''
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]
BR	3500	1510,4	7,927	2127,7	11,168	43,2	60,8
BRD	3500	1128,9	5,925	910,5	4,779	32,3	26,0
DDJ	3500	945,5	4,962	821,1	4,310	27,0	23,5
DK	3500	683,3	3,586	464,4	2,437	19,5	13,3
HB	3500	2654,1	13,930	3569,5	18,735	75,8	102,0
HI	3500	1024,8	5,379	926,3	4,862	29,3	26,5
HJ	3500	1476,6	7,750	1370,2	7,192	42,2	39,1
HO	2500	1957,5	10,274	1981,6	10,401	78,3	79,3
HU	3500	1307,9	6,865	1131,5	5,939	37,4	32,3
KB	3500	992,7	5,210	831,0	4,362	28,4	23,7
MI	3500	1124,3	5,901	1042,2	5,470	32,1	29,8
OS	3500	1202,6	6,312	842,1	4,420	34,4	24,1

PHE	3500	1742,0	9,143	1698,6	8,915	49,8	48,5
SO	5000	5377,7	28,226	3641,7	19,114	107,6	72,8
SUZ	3500	958,7	5,032	778,3	4,085	27,4	22,2
TD	3500	1511,4	7,933	1685,2	8,845	43,2	48,1

Posledním výstupem výpočtu při můstkovém provozu T402 a T403 je velikost zkratových proudů při zkratových poruchách na přípojnicích. Jelikož program při výpočtu počítal metodou ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, nesprávné nastavení odboček transformátorů T402 a T403 nemá na výsledky výpočtu žádný vliv a hodnoty lze považovat za správné (metoda uvažuje polohy odboček v základní poloze). Z vypočtených hodnot je zřejmé, že zkratová odolnost rozvodny Sokolnice bude při trojfázové poruše nedostatečná. Procentuálně bude zkratová odolnost při této poruše překročena o 7,6 % v rozvodně Sokolnice. V rozvodně Hrušovany u Brna bude také při můstkovém provozu transformátorů T402 a T403 zkratová odolnost překročena a to o 2 % při jednofázové poruše. V tabulce jsou dále **žlutě** zvýrazněny zatížení zkratovými výkony dosahujícími tři čtvrtin (75 %) zkratových odolností.

7.1.1 Zhodnocení můstkového provozu T402 a T403

Při simulaci můstkového provozu T402 a T403 byl špatně namodelován transformátor T403, což se při následném výpočtu projevilo zvýšenými vypočtenými napětími v síti. Z dříve uvedených podmínek pro paralelní spolupráci transformátorů (*kapitola 5.1.1*) nebyla v této práci splněna podmínka shodného převodu obou transformátorů, kdy oba transformátory měly nastaveny odbočky v různých polohách. Kromě zvýšených napětí v síti také narostlo zatížení transformátorů T402 a T403 v důsledku průtoku vyrovnávacího proudu mezi nimi.

Vypočtená napětí se pohybují v rozsahu 123,9 až 125,8 kV, což je více než dovolená mez. K výsledkům lze tedy říct následující: V důsledku zvýšených napětí a zvýšenému přenosu jalových výkonů po vedení došlo i ke zvýšení proudového zatížení jednotlivých vedení. I přes uvedenou chybu výpočtu, nejsou ani vedení a ani transformátory proudově přetíženy. Nejvíce zatíženými vedeními jsou 532 a 533 s zatížením přibližně 29 % a nejvíce zatíženými transformátory jsou T1 a T2 v rozvodně Břeclav ČD (41,6 a 44,7 %), dále TG3 a TG4 v HO se zatížením 56,3 a 50,8 %. Transformátory T402 a T403 jsou zatíženy především přetokem vyrovnávacího výkonu mezi nimi. Celkový dodávaný výkon činí 83,9 MW a celkový odebíraný pak 83,1 MW. V těchto hodnotách je zahrnut i vyrovnávací výkon mezi transformátory T402 a T403. Celkové činné ztráty výkonu jsou 1,43 MW (1,7 %). **Velikost vypočtených zkratových proudů není chybným namodelováním transformátoru T403 nijak ovlivněna** (metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu počítá se jmenovitými napětími a odbočkami transformátorů v základní poloze). Zkratová odolnost je při tomto zapojení překročena v rozvodnách Sokolnice (107,6% 3f) a Hrušovany u Brna (102 % 1f). V rozvodně Hodonín dosahuje pak zatížení zkratovým výkonem téměř 80 % při trojfázové i jednofázové poruše. K výsledku lze tedy konstatovat, že i pokud by byly splněny podmínky paralelní spolupráce transformátorů T402 a T403, hodnoty napětí by bylo možné nastavit v dovolených mezích a žádný z prvků sítě by nejspíše nebyl proudově přetížen. Tato konfigurace ovšem nevyhovuje z hlediska zkratových odolností dvou rozveden **a před jejím uvedením do provozu je zapotřebí provést technická opatření k zabezpečení bezpečného a bezporuchového chodu sítě.**

Některé další informace k výsledkům výpočtu jsou uvedeny u jednotlivých tabulek: *Tabulka 7-1, Tabulka 7-2, Tabulka 7-3, Tabulka 7-4 a Tabulka 7-5.*

Tabulka 7-7 Zatížení vedení, T402 a T403, porucha

Označení	Rozvodna 1	Rozvodna 2	I_{nL}	P_1	Q_1	I_1	P_2	Q_2	I_2	ΔP_L	i_L
			[A]	[MW]	[MVA _r]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[A]	[MW]	[%]
501	OS	SUZ	450	-4,8	-6,1	37,3	4,7	7,6	43,7	0,030	9,7
511	OS	SO	450	4,7	5,5	35,0	-4,7	-4,5	31,1	0,014	7,8
517	HB	SO	680	0,0	1,1	5,2	0,0	0,0	0,0	0	0,8
527	HJ	PHE	455	-5,0	-7,0	42,2	5,0	8,4	48,1	0,007	10,6
529	HU	KB	450	3,3	1,9	18,6	-3,3	-1,0	16,7	0,003	4,1
530	HU	SO	450	0,0	1,0	4,7	0,0	0,0	0,0	0	1,0
531	BR	SO	450	2,5	7,4	37,9	-2,5	-5,5	29,1	0,025	8,4
532_A	BR	X	450	28,9	3,3	141,2	-28,9	-3,2	141,1	0,020	31,4
532_B	TD	X	450	-29,0	-3,1	141,0	28,9	3,1	141,1	0,036	31,4
532_C	BRD	X	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,001	0,1
533	HO	TD	450	-29,7	-5,7	145,5	29,6	5,9	146,1	0,148	32,5
534_A	KB	Y	450	9,7	4,2	51,3	-9,7	-2,6	48,5	0,037	11,4
534_B	HO	Y	450	-15,1	-1,4	72,7	15,0	2,0	73,1	0,041	16,2
534_C	BRD	Y	450	5,3	-0,5	25,7	-5,3	0,6	25,7	0	5,7
535	HO	SO	450	-8,1	4,8	45,1	8,0	-2,4	40,2	0,058	10,0
536	HO	SO	450	0,0	2,5	12,1	0,0	0,0	0,0	0,001	2,7
557	HI	HJ	450	-0,5	-3,4	16,7	0,5	4,1	20,3	0,003	4,5
558	HI	SUZ	450	4,7	7,9	45,1	-4,7	-7,6	43,7	0,007	10,0
5513	HJ	MI	450	-2,1	4,8	25,7	2,1	-4,1	22,4	0,005	5,7
5528	HB	PHE	455	-0,9	6,7	33,1	0,9	-6,2	31,0	0,004	7,3
5565	DDJ	MI	450	0,3	0,1	1,6	-0,3	0,1	1,6	0	0,4
5566	DDJ	MI	450	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,0	0	0,2
5568	BR	MI	450	-8,2	-4,3	44,9	8,2	5,6	48,3	0,027	10,7
5587	DK	OS	450	-0,1	0,2	1,2	0,1	0,6	2,7	0	0,6
$\Sigma \Delta P_L$ [MW]										0,467	

V Tabulka 7-7 jsou uvedeny hodnoty proudového zatížení vedení při výpadku přípojnice C v SO při můstkovém provozu T402 a T403. Z hodnot proudového zatížení je zřejmé, že žádné vedení nebude proudově přetíženo. Nejvíce proudově zatěžovanými vedeními budou vedení 532 a 533, jejichž zatížení dosahuje přibližně 32 %. Celkové ztráty činného výkonu ve vedení jsou 467 kW.

Tabulka 7-8 Zatížení transformátorů, T402 a T403, porucha

Rozvodna	Označení	t_r	S_{nT}	I_{nT}	P_T	Q_T	ΔP_T	I_T	i_T
		[-]	[MVA]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[MW]	[A]	[%]
BR	T101	110/22	40	210	-8,4	-2,5	0,050	42,6	20,3
	T102	110/22	40	210	-14,7	-3,9	0,049	74,0	35,2
BRD	T1	110/25	13,3	70	-2,7	-5,7	-	30,2	43,1
	T2	110/25	13,3	70	-2,7	6,2	-	32,4	46,3
DDJ	T102	110/22	10	52	-0,3	-0,1	-	1,6	3,1
DK	T02		40	210	0,1	-0,2	-	1,2	0,6
HB	T101	110/22	40	210	0,0	0,0	0,021	0,2	0,1
	T102	110/22	40	210	1,0	-7,7	0,042	38,1	18,1

HI	T101	110/22	25	131	3,1	-2,0	0,035	18,0	13,7
	T102	110/22	25	131	-7,3	-2,5	0,041	38,0	29,0
HJ	T101	110/22	40	210	6,6	-1,8	0,023	33,5	16,0
HO	TG3	110/10	63	331	34,2	2,5	0,097	164,8	49,8
	TG4	110/10	63	331	30,5	3,9	0,090	147,9	44,7
	T12	110/22	16	84	-4,0	-4,2	-	27,9	33,2
	T13	110/22	40	210	-7,9	-2,3	0,049	39,4	18,8
HU	T101	110/22	25	131	-3,3	-2,9	0,016	21,3	16,3
	T102	110/22	25	131	0,0	0,0	0,014	0,1	0,1
KB	T102	110/6	10	52	-0,7	-1,2	-	6,6	12,7
	T103	110/22	25	131	-5,7	-2,9	0,037	31,3	23,9
MI	T102	110/22	40	210	-10,0	-1,8	0,040	49,5	23,6
PHE	T101	110/22	25	131	-5,9	-2,2	0,020	30,9	23,6
SO	T402	400/110	350	1837	-0,8	12,4	0,000	59,8	3,3
	T403	400/110	350	1837	0,0	0,0	0,000	0,0	0,0
TD	T102	110/22	16	84	-0,6	-2,8	-	14,0	16,7
$\Sigma \Delta P_T$ [MW]							0,624		

V Tabulka 7-8 jsou uvedeny hodnoty zatížení transformátorů při výpadku přípojnice C v SO. Z hodnot procentuálního proudového zatížení je zřejmé, že žádný transformátor nebude proudově přetížen. Nejvíce zatěžovanými transformátory budou transformátory v rozvodně Břeclav ČD a v rozvodně Hodonín, zatížení nepřesáhne 50 % (žlutě podbarveno). Zelené podbarvení značí transformátory dodávající výkon, zbylé transformátory výkon z UO odebírají. Celkové ztráty činného výkonu při této konfiguraci sítě činí 624 kW. Transformátor T402 je zatížen na 3,3 % a dodává přebytek vyráběného výkonu v distribuční síti do přenosové soustavy. T403 je odpojen, zatížení = 0%.

Tabulka 7-9 Výkonová bilance, T402 a T403, porucha

P_{dod}	P_{odb}	ΔP_T	ΔP_L	$\Sigma \Delta P$
[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
75,5	-75,0	0,624	0,467	1,091

Celkový dodávaný výkon do UO je 75,5 MW a celkový odebíraný výkon 75 MW. Celkové činné ztráty činí 1,091 MW tedy 1,44 % dodávaného výkonu. Kontrolním výpočtem ještě ověříme $\text{Výroba} = \text{Spotřeba} + \text{Ztráty} = 75 + 0,467 = 75,467$ MW. Rozdíl 0,033 MW je způsoben zaokrouhlováním.

Tabulka 7-10 Zkratové poměry, T402 a T403, porucha

Rozvodna	Zkratová odolnost S_{kvyp}	S_{k3}''	I_{k3}''	S_{k1}''	I_{k1}''	S_{k3}''	S_{k1}''
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[%]	[%]
BR	3500	1164,9	6,114	1663,2	8,730	33,3	47,5
BRD	3500	747,4	3,923	704,9	3,700	21,4	20,1
DDJ	3500	624,3	3,277	632,6	3,320	17,8	18,1
DK	3500	612,9	3,217	414,2	2,174	17,5	11,8
HB	3500	456,8	2,398	671,6	3,525	13,1	19,2
HI	3500	632,9	3,322	671,4	3,524	18,1	19,2
HJ	3500	635,7	3,336	754,7	3,961	18,2	21,6
HO	2500	1318,0	6,918	1459,5	7,660	52,7	58,4

HU	3500	327,9	1,721	371,3	1,949	9,4	10,6
KB	3500	433,6	2,276	464,3	2,437	12,4	13,3
MI	3500	697,6	3,661	756,3	3,970	19,9	21,6
OS	3500	1000,3	5,250	690,5	3,624	28,6	19,7
PHE	3500	532,7	2,796	686,2	3,602	15,2	19,6
SO	5000	3231,4	16,960	1602,7	8,412	64,6	32,1
SUZ	3500	648,1	3,402	610,9	3,206	18,5	17,5
TD	3500	1160,5	6,091	1372,4	7,203	33,2	39,2

Tabulka 7-10 Tabulka 6-10 udává výsledky výpočtu zkratových poměrů pro síť napájenou transformátory T402 a T403 s uvažovanou poruchou (T403 odpojen). Nejbližše se zkratové odolnosti přiblíží hodnoty při třífázovém zkratu v rozvodně Sokolnice 64,6 %. Při jednofázovém zkratu se limitním hodnotám nejvíce přiblíží zkratové poměry v rozvodně Hodonín 58,4 % a v rozvodně Břeclav 47,5 % (Žluté podbarvení). Zkratové výkony v žádné z rozveden nepřesáhnou příslušné zkratové odolnosti.

7.2.1 Zhodnocení můstkového provozu T402 a T403 při poruše

Všechny sledované veličiny při paralelním chodu T402 a T403 se pohybují v dovolené toleranci. Nejvyšší napětí bylo spočteno v rozvodně Hodonín a Sokolnice 120,1 kV. Nejnižší hodnota pak v rozvodně Hrušovany u Brna 117,3 kV. Nejvíce zatěžovanými vedeními jsou 532 a 533 s procentuálním proudovým zatížením 31,4 % a 32,5 %. Nejvíce zatíženými transformátory jsou transformátory v rozvodně Hodonína TG3 a TG4 (49,8 a 44,7 %) a transformátory T1 a T2 v rozvodně Břeclav ČD (43,1 a 46,3 %). Celková výroba je 75,5 MW a celková spotřeba 75 MW. Celkové ztráty činného výkonu pak 1,091 MW (1,44 %). Nejnepříznivější třífázová zkratová porucha nastane v rozvodně Sokolnice 64,6 %. Nejvíce se zkratové odolnosti při jednofázové zkratové poruše přiblíží velikosti zkratových výkonů v rozvodnách Hodonín 58,4 % a v rozvodně Břeclav 47,5 %. Zkratová odolnost není v žádné z rozveden překročena.

Některé další informace k výsledkům výpočtu jsou uvedeny u jednotlivých tabulek: Tabulka 7-6, Tabulka 7-7, Tabulka 7-8 a Tabulka 7-9.

8 SROVNÁNÍ A VYHODNOCENÍ NAPÁJECÍCH VARIANT PRO UO SOKOLNICE

V této kapitole jsou uvedena porovnání:

- Můstkový provoz T202 a T203 s provozem T402 a T403, bez poruch
- Můstkový provoz T202 a T203 s provozem T202 a T203 s uvažovanou poruchou
- Můstkový provoz T402 a T403 s provozem T402 a T403 s uvažovanou poruchou

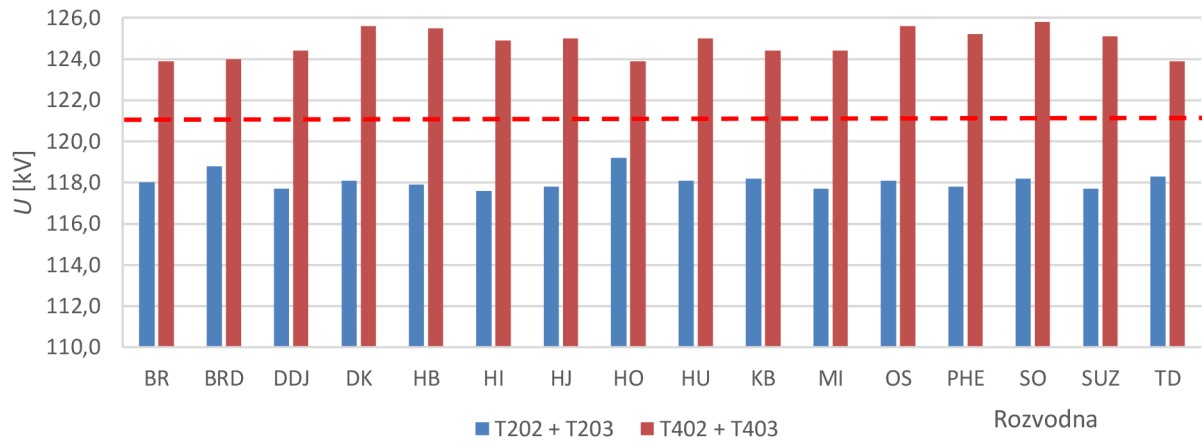
8.1 Porovnání T202, T203 s T402, T403

V této kapitole je provedeno porovnání dvou napájecích variant bez mimořádných stavů. Výsledky výpočtu pro každou z variant byly samostatně prezentovány v *kapitolách 6.1 a 7.1*. Nejprve provedeme porovnání změn elektrických veličin při ustáleném chodu

Tabulka 8-1 Napětové poměry při chodu T202, T203, srovnání s T402, T403

Rozvodna	T202 + T203	T402 + T403	Porovnání	
	U		ΔU	
	[kV]		[kV]	[%]
BR	118,0	123,9	5,9	5,0
BRD	118,8	124,0	5,2	4,4
DDJ	117,7	124,4	6,7	5,7
DK	118,1	125,6	7,5	6,4
HB	117,9	125,5	7,6	6,4
HI	117,6	124,9	7,3	6,2
HJ	117,8	125,0	7,2	6,1
HO	119,2	123,9	4,7	3,9
HU	118,1	125,0	6,9	5,8
KB	118,2	124,4	6,2	5,2
MI	117,7	124,4	6,7	5,7
OS	118,1	125,6	7,5	6,4
PHE	117,8	125,2	7,4	6,3
SO	118,2	125,8	7,6	6,4
SUZ	117,7	125,1	7,4	6,3
TD	118,3	123,9	5,6	4,7

V *Tabulka 8-1* jsou uvedeny napětové poměry pro obě uvažované varianty. Dále je zde uvedena absolutní a procentuální velikost změny napětí ΔU mezi oběma situacemi. Jelikož byl při výpočtu chybně namodelován transformátor T403 (více viz. *kapitola 7.1.1*), výsledky nelze objektivně porovnávat. Velikost napětí při chodu sítě s T402 a T403 přesahuje dovolenou toleranci 121 kV. Rozdíl mezi napětími je také patrný z *Obr. 8-1*, kde je červenou přerušovanou čarou vyznačena horní mez pro napětí: 121 kV.



Obr. 8-1 Napěťové poměry, porovnání T202, T203 s T402, T403

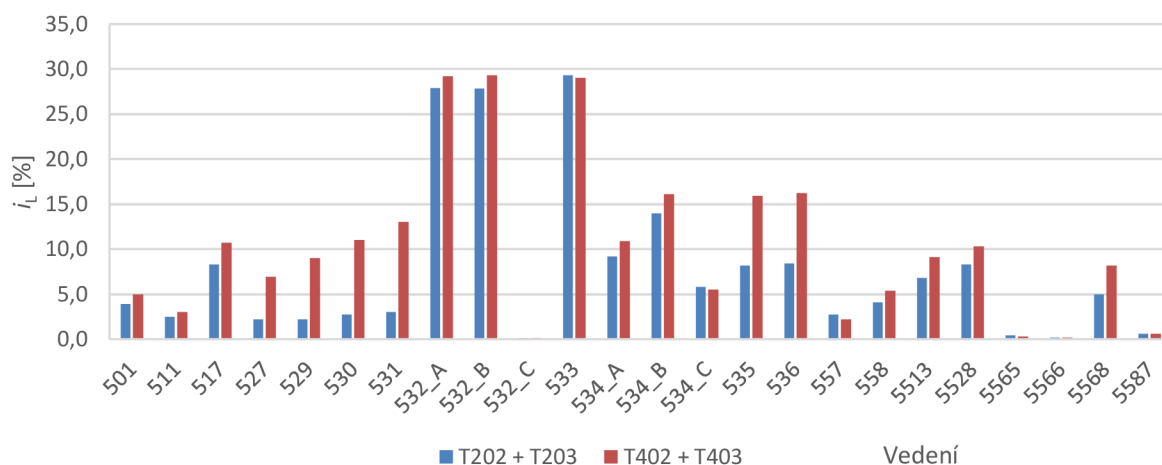
Porovnání zatížení vedení

Tabulka 8-2 Zatížení vedení, porovnání při T202, T203 a T402, T403

Označení	Rozvodna 1	Rozvodna 2	T202 + T203	T402 + T403	Porovnání
			i_L [%]	i_L [%]	Δi_L [%]
501	OS	SUZ	3,9	5,0	1,1
511	OS	SO	2,5	3,0	0,5
517	HB	SO	8,3	10,7	2,4
527	HJ	PHE	2,2	6,9	4,7
529	HU	KB	2,2	9,0	6,8
530	HU	SO	2,7	11,0	8,3
531	BR	SO	3,0	13,0	10,0
532_A	BR	X	27,9	29,2	1,3
532_B	TD	X	27,8	29,3	1,5
532_C	BRD	X	0,1	0,1	0,0
533	HO	TD	29,3	29,0	-0,3
534_A	KB	Y	9,2	10,9	1,7
534_B	HO	Y	14,0	16,1	2,1
534_C	BRD	Y	5,8	5,5	-0,3
535	HO	SO	8,2	15,9	7,7
536	HO	SO	8,4	16,2	7,8
557	HI	HJ	2,7	2,2	-0,5
558	HI	SUZ	4,1	5,4	1,3
5513	HJ	MI	6,8	9,1	2,3
5528	HB	PHE	8,3	10,3	2,0
5565	DDJ	MI	0,4	0,3	-0,1
5566	DDJ	MI	0,2	0,2	0,0
5568	BR	MI	5,0	8,2	3,2
5587	DK	OS	0,6	0,6	0,0

Zatížení vedení při můstkovém provozu T402 a T403 oproti T202 a T203 nepatrně vzrostlo. To je způsobeno v důsledku přenosu větších jalových výkonů. K největší změně došlo u vedení

531, u kterého proudové zatížení vzrostlo o 10 % (žluté podbarvení). Zatížení vedení pro obě varianty nepřesahuje 30 % jmenovitého zatížení a pohybuje se tedy v dovolené toleranci. Procentní zatížení vedení je také uvedeno pro obě varianty v následujícím obrázku



Obr. 8-2 Zatížení vedení, porovnání T202, T203 s T402, T403

Porovnání zatížení transformátorů

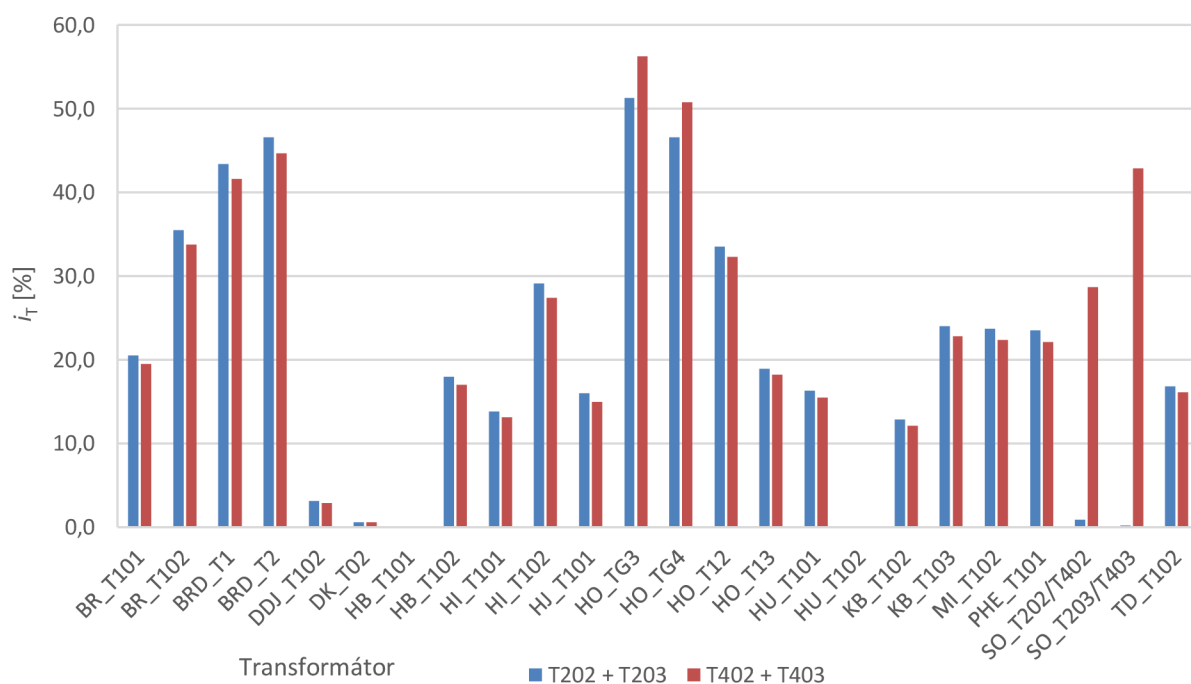
Tabulka 8-3 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T402, T403

Rozvodna	Označení	T202 + T203	T402 + T403	Porovnání
		i_T [%]	i_T [%]	Δi_T [%]
BR	T101	20,5	19,5	-1,0
	T102	35,5	33,8	-1,7
BRD	T1	43,4	41,6	-1,8
	T2	46,6	44,7	-1,9
DDJ	T102	3,1	2,9	-0,2
DK	T02	0,6	0,6	0,0
HB	T101	0,1	0,1	0,0
	T102	18,0	17	-1,0
HI	T101	13,8	13,1	-0,7
	T102	29,1	27,4	-1,7
HJ	T101	16,0	15	-1,0
HO	TG3	51,3	56,3	5,0
	TG4	46,6	50,8	4,2
	T12	33,5	32,3	-1,2
	T13	18,9	18,2	-0,7
HU	T101	16,3	15,5	-0,8
	T102	0,1	0,1	0,0
KB	T102	12,9	12,1	-0,8
	T103	24,0	22,8	-1,2
MI	T102	23,7	22,4	-1,3
PHE	T101	23,5	22,1	-1,4

SO	T202/T402	0,9	28,7	-
	T203/T403	0,2	42,9	-
TD	T102	16,8	16,1	-0,7

V Tabulka 8-3 jsou uvedeny proudové zatížení a procentuální změny zatížení transformátorů při můstkovém provozu T202, T203 a T402, T403. Zelené podbarvení značí transformátory dodávající výkon. Z hodnot zatížení transformátorů je zřejmé, že žádný transformátor není při žádné z obou variant proudově přetížen a hodnoty zatížení transformátorů se pohybuje pod 60 % jmenovitého proudu (nejvyšší zatížení – modře podbarveno). Nejvyšší kladná procentní změna zatížení nastane v HO u transformátorů TG3 a TG4 o 5 resp. 4,2 % v důsledku navýšení výroby jalového kompenzačního výkonu (žlutě podbarveno). U většiny transformátorů při chodu s transformátory T402 a T403 dojde k nepatrnému poklesu zatížení (změna do 2%). Nejvyšší pokles zatížení nastane u transformátorů T1 a T2 v BRD a to o -1,8 a -1,9 % (fialově podbarveno).

Procentní změna zatížení u transformátorů T202, T203, T402 a T403 zde není spočtena. Z výsledků výpočtu je ovšem zřejmý velký nárůst přenášeného výkonu transformátory T402 a T403 oproti T202 a T203, který vzniká v důsledku přetoku velkého vyrovnávacího výkonu mezi chybně namodelovanými transformátory T402 a T403 (červeně podbarveno). Změnu zatížení transformátorů lze také porovnat v následujícím obrázku



Obr. 8-3 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T402, T403

Porovnání elektrických ztrát

Tabulka 8-4 Činné ztráty, porovnání T202, T203 s T402, T403

		T202 + T203	T402 + T403	Rozdíl
ΔP_T	[MW]	0,623	0,751	0,128
ΔP_L	[MW]	0,337	0,679	0,342
$\Sigma \Delta P$	[MW]	0,960	1,430	0,470
$\Sigma \Delta P$	[%]	1,3	1,7	0,4

Porovnáním celkových činných ztrát při můstkovém provozu T202 a T203 s můstkovým provozem T402 a T403 lze dospět k závěru, že celkové elektrické ztráty při provozu T402, T403 vzrostou o 0,4 % celkového dodávaného výkonu, tedy o 0,470 MW. Tento nárůst je způsoben zvýšeným zatížením elektrických vedení a také zvýšenými ztrátami v transformátorech T402 a T403 zatížených převážně vyrovnávacím výkonem. Z vypočtených hodnot je také zřejmý nepatrný nárůst činných ztrát v transformátorech.

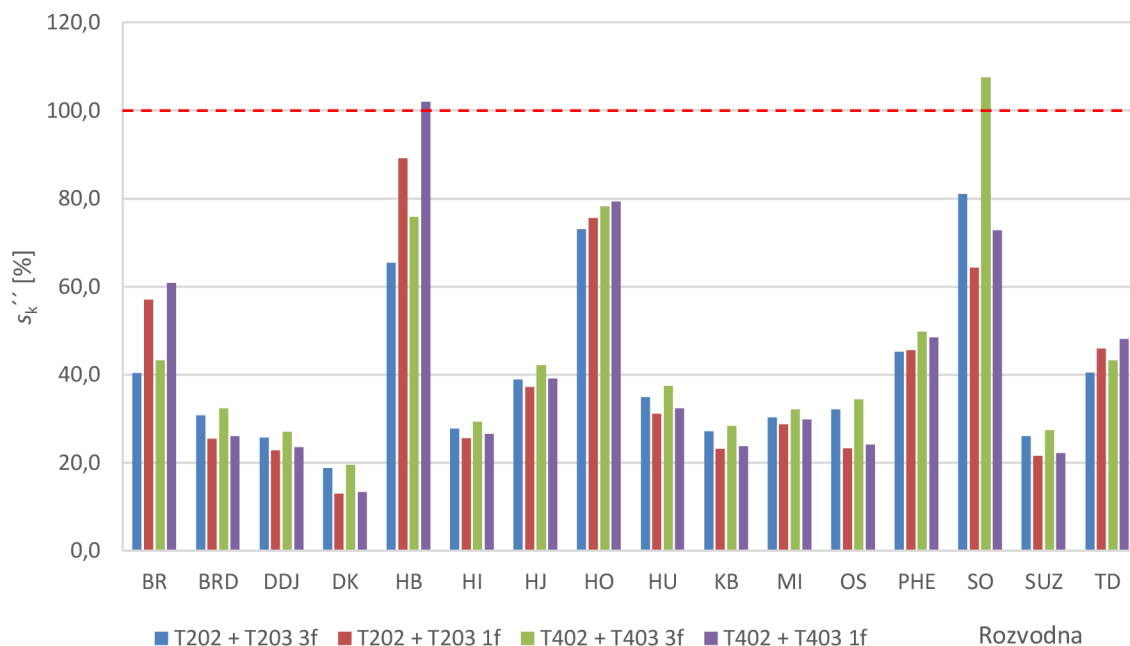
Porovnání zkratových poměrů

Tabulka 8-5 Zkratové poměry, porovnání T202, T203 s T402, T403

Rozvodna	Zkratová odolnost S_{kvyp} [MVA]	T202+T203		T402+T403		Porovnání	
		s_{k3}''	s_{k1}''	s_{k3}''	s_{k1}''	$\Delta s_{k3}''$	$\Delta s_{k1}''$
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
BR	3500	40,3	57,0	43,2	60,8	2,9	3,8
BRD	3500	30,8	25,4	32,3	26,0	1,5	0,6
DDJ	3500	25,7	22,8	27,0	23,5	1,3	0,7
DK	3500	18,8	13,0	19,5	13,3	0,7	0,3
HB	3500	65,4	89,2	75,8	102,0	10,4	12,8
HI	3500	27,7	25,6	29,3	26,5	1,6	0,9
HJ	3500	38,9	37,2	42,2	39,1	3,3	1,9
HO	2500	73,0	75,6	78,3	79,3	5,3	3,7
HU	3500	34,9	31,1	37,4	32,3	2,5	1,2
KB	3500	27,1	23,1	28,4	23,7	1,3	0,6
MI	3500	30,3	28,7	32,1	29,8	1,8	1,1
OS	3500	32,1	23,3	34,4	24,1	2,3	0,8
PHE	3500	45,2	45,5	49,8	48,5	4,6	3,0
SO	5000	81,0	64,3	107,6	72,8	26,6	8,5
SUZ	3500	26,0	21,6	27,4	22,2	1,4	0,6
TD	3500	40,5	45,9	43,2	48,1	2,7	2,2

V Tabulka 8-5 je uvedeno zatížení rozveden zkratovými výkony jako procento její zkratové odolnosti. Z výsledků je zřejmé, že při chodu sítě s T202, T203 není v žádné z rozveden překročena její zkratová odolnost. Při chodu sítě s T402, T403 již ovšem dojde k překročení zkratové odolnosti a to při trojpolové poruše v rozvodně Sokolnice (107,6 %) a při jednopólové poruše v rozvodně Hrušovany u Brna (102 %), (červeně podbarveno). V tabulce jsou dále žlutě podbarveny hodnoty zatížení zkratovým výkonem dosahujícím více jak 70 % její zkratové odolnosti. Poslední dva sloupce tabulky pak uvádějí nárůst zkratových výkonů mezi oběma variantami. Z hodnot je zřejmé, že ve většině rozveden dojde jen k nepatrnému (přibližně 5 %) nárůstu zkratových výkonů. K největšímu nárůstu dojde právě v rozvodnách Hrušovany u Brna a Sokolnice (žlutě podbarveno). Za zmínku ještě stojí zkratová odolnost rozvodny Hodonín, která je z uvedených rozveden nejmenší 2500 MVA. Při obou napájecích variantách je tato rozvodna při zkratové poruše zatížena téměř 80 % své zkratové odolnosti, což svědčí o malé, ovšem zatím dostatečné výkonové rezervě.

Procentní zatížení zkratovým výkonem je také přehledně uvedeno v následujícím obrázku, červená přerušovaná čára značí maximální možný zkratový výkon odpovídající zkratové odolnosti dané rozvodny.



Obr. 8-4 Zatížení zkratovým výkonem, 3f i 1f, porovnání T202, T203 s T402, T403

8.2 Porovnání T202, T203 s mimořádným stavem

V této kapitole budou srovnány výsledky výpočtu ustáleného chodu můstkového provozu T202 a T203 s provozem T202 a T203 s výpadkem přípojnice C v SO. Při výpadku zůstává v provozu transformátor T203, transformátor T202 zůstane odpojen. Výsledky výpočtu byly samostatně prezentovány v kapitolách 6.1 a 6.2.

Tabulka 8-6 Napěťové poměry, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

Rozvodna	T202 + T203	T203, výpadek C	Porovnání	
	U		ΔU	
	[kV]		[kV]	[%]
BR	118,0	117,6	-0,4	-0,3
BRD	118,8	118,7	-0,1	-0,1
DDJ	117,7	116,5	-1,2	-1,0
DK	118,1	117,6	-0,5	-0,4
HB	117,9	115,7	-2,2	-1,9
HI	117,6	116,4	-1,2	-1,0
HJ	117,8	116,2	-1,6	-1,4
HO	119,2	119,1	-0,1	-0,1
HU	118,1	117,7	-0,4	-0,3
KB	118,2	117,9	-0,3	-0,3
MI	117,7	116,5	-1,2	-1,0
OS	118,1	117,6	-0,5	-0,4
PHE	117,8	115,9	-1,9	-1,6
SO	118,2	118,1	-0,1	-0,1
SUZ	117,7	116,6	-1,1	-0,9
TD	118,3	118,0	-0,3	-0,3

V Tabulka 8-6 jsou uvedeny napěťové poměry při bezporuchovém můstkovém provozu T202, T203 a jsou zde porovnány s napěťovými poměry při výpadku přípojnice C v rozvodně Sokolnice. Z výsledků je zřejmé, že se napětí ve všech rozvodnách pohybuje v dovolených tolerancích a to i po výpadku přípojnice C v SO. V důsledku napájení UO Sokolnice jen jedním transformátorem 220/110 kV T203 lze předpokládat pokles zkratových výkonů a tedy i pokles napětí v jednotlivých rozvodnách, což dokazují i výsledky výpočtu (T202 je při výpadku přípojnice odpojen, ΔU nabývá převážně záporných hodnot). Pokles napětí se pohybuje v jednotkách procent a k nejvyššímu poklesu dojde v rozvodně Hrušovany u Brna (-1,9 %) čemuž odpovídá pokles sdruženého napětí o 2,2 kV (žlutě podbarveno). Je zapotřebí také poznamenat, že do UO Sokolnice pracovala elektrárna Hodonín, která se svým regulačním jalovým výkonem snažila poklesu napětí zabránit. (uzel v HO byl typu P, V). V Obr. 8-5 jsou vyneseny napěťové poměry a jsou zde také červenou přerušovanou čarou zvýrazněny limitní velikosti napětí



Obr. 8-5 Napěťové poměry, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

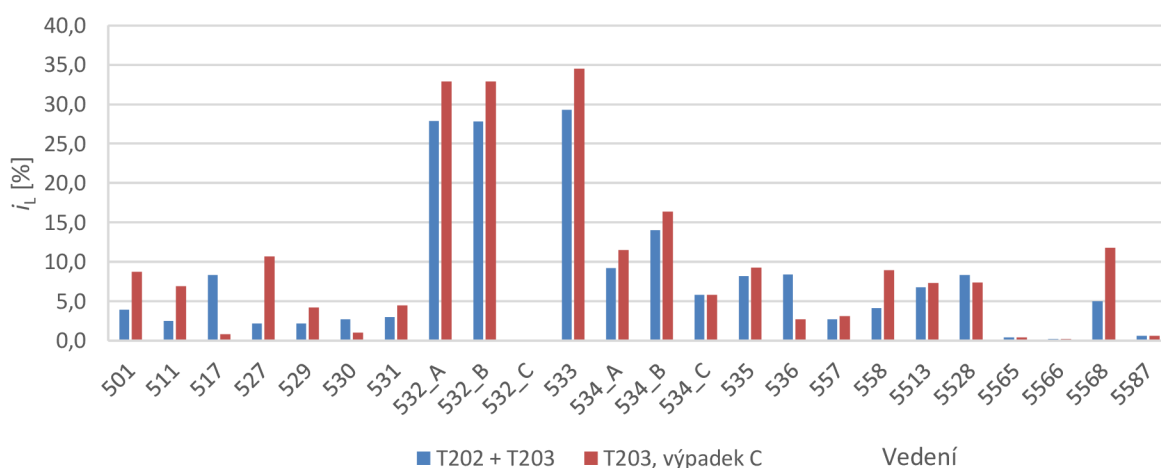
Porovnání zatížení vedení

Tabulka 8-7 Zatížení vedení, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

Označení	Rozvodna 1	Rozvodna 2	T202 + T203	T203, výpadek C	Porovnání
			i_L [%]	i_L [%]	Δi_L [%]
501	OS	SUZ	3,9	8,7	4,8
511	OS	SO	2,5	6,9	4,4
517	HB	SO	8,3	0,8	-7,5
527	HJ	PHE	2,2	10,7	8,5
529	HU	KB	2,2	4,2	2,0
530	HU	SO	2,7	1	-1,7

531	BR	SO	3,0	4,5	1,5
532_A	BR	X	27,9	32,9	5,0
532_B	TD	X	27,8	32,9	5,1
532_C	BRD	X	0,1	0,1	0,0
533	HO	TD	29,3	34,5	5,2
534_A	KB	Y	9,2	11,5	2,3
534_B	HO	Y	14,0	16,4	2,4
534_C	BRD	Y	5,8	5,8	0,0
535	HO	SO	8,2	9,3	1,1
536	HO	SO	8,4	2,7	-5,7
557	HI	HJ	2,7	3,1	0,4
558	HI	SUZ	4,1	8,9	4,8
5513	HJ	MI	6,8	7,3	0,5
5528	HB	PHE	8,3	7,4	-0,9
5565	DDJ	MI	0,4	0,4	0,0
5566	DDJ	MI	0,2	0,2	0,0
5568	BR	MI	5,0	11,8	6,8
5587	DK	OS	0,6	0,6	0,0

V *Tabulka 8-7* jsou uvedeny proudové zatížení jednotlivých vedení při bezporuchovém provozu T202, T203 a při výpadku přípojnice C v SO, tedy při poruše. Při obou variantách nedojde k proudovému přetížení žádného z vedení. Nejvíce zatěžovanými vedeními jsou v obou případech vedení 532 a 534 s procentním proudovým zatížením přibližně 28 (33) % a 29 (35) %. Zatížení obou zmíněných vedení po výpadku přípojnice C tedy vzroste přibližně o 5% (žluté zvýraznění). V posledním sloupci jsou pak zeleně podbarveny vedení 517 a 529, u kterých dojde k největšímu poklesu (nárůstu) proudového zatížení konkrétně o -7,5 (+8,5) %. Zatížení vedení je také vyneseno v *Obr. 8-6*



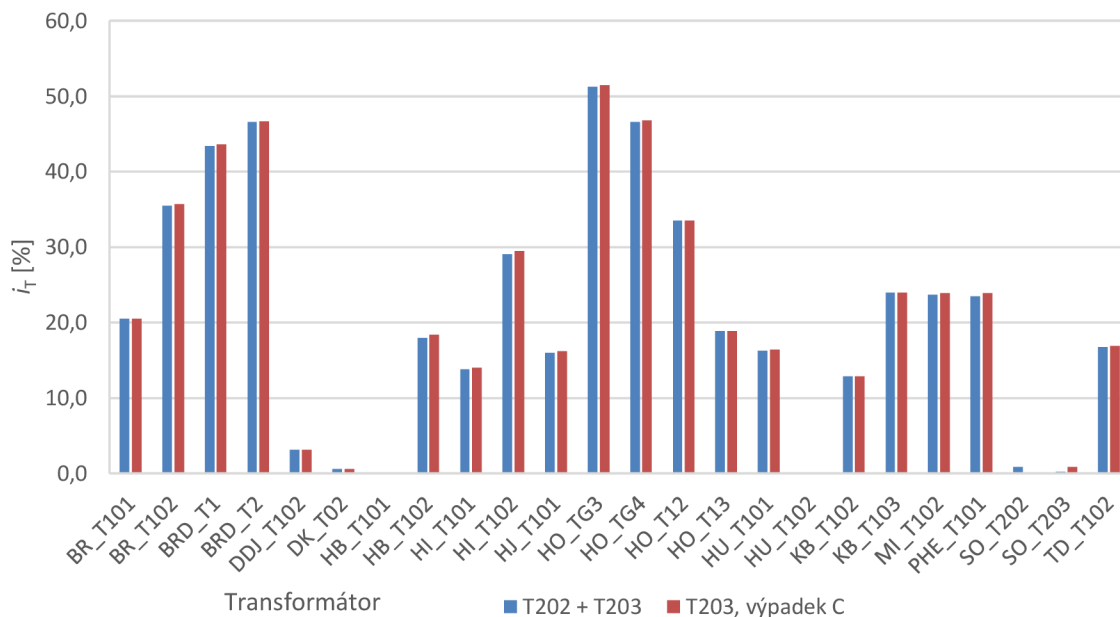
Obr. 8-6 Zatížení vedení, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

Porovnání zatížení transformátorů

Tabulka 8-8 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

Rozvodna	Označení	T202 + T203	T203, výpadek C	Porovnání
		i_T [%]	i_T [%]	Δi_T [%]
BR	T101	20,5	20,5	0,0
	T102	35,5	35,7	0,2
BRD	T1	43,4	43,6	0,2
	T2	46,6	46,7	0,1
DDJ	T102	3,1	3,1	0,0
DK	T02	0,6	0,6	0,0
HB	T101	0,1	0,1	0,0
	T102	18,0	18,4	0,4
HI	T101	13,8	14,0	0,2
	T102	29,1	29,5	0,4
HJ	T101	16,0	16,2	0,2
HO	TG3	51,3	51,5	0,2
	TG4	46,6	46,8	0,2
	T12	33,5	33,5	0,0
	T13	18,9	18,9	0,0
HU	T101	16,3	16,4	0,1
	T102	0,1	0,1	0,0
KB	T102	12,9	12,9	0,0
	T103	24,0	24,0	0,0
MI	T102	23,7	23,9	0,2
PHE	T101	23,5	23,9	0,4
SO	T202	0,9	0,0	-0,9
	T203	0,2	0,9	0,7
TD	T102	16,8	16,9	0,1

V Tabulka 8-8 jsou uvedeny procentní proudové zatížení transformátorů pro bezporuchový provoz T202, T203 a pro výpadek přípojnice C v SO. Zelené podbarvení značí transformátory dodávající výkon. Z vypočtených hodnot je zřejmé, že žádný z transformátorů není proudově přetížen. Nejvíce zatěžované transformátory pro obě porovnávané varianty jsou transformátory T1 a T2 v rozvodně BRD 43,4 a 46,6 % (resp. při poruše 43,6 a 46,7) a transformátory TG3 a TG4 v rozvodně Hodonín se zatížením 51,3 a 46,6 % (resp. při poruše 51,5 a 46,8 %), (žlutě podbarveno). V tabulce je také uvedena procentuální změna zatížení mezi bezporuchovým chodem a výpadkem přípojnice C. Velikost změn zatížení je nepatrná a pohybuje se v řádu desetin procent. Z tabulky je také zřejmý pokles (resp. nárůst) zatížení transformátoru T202 a T203 (fialově podbarveno). Při výpadku přípojnice C v SO zůstane T202 odpojen a UO Sokolnice je pak s přenosovou soustavou propojena jen pomocí transformace T203. Zatížení transformátorů je také vyneseno v Obr. 8-7.



Obr. 8-7 Zatížení transformátorů, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

Porovnání elektrických ztrát

Tabulka 8-9 Činné ztráty, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

		T202 + T203	T203, výpadek C	Rozdíl
ΔP_T	[MW]	0,623	0,621	-0,002
ΔP_L	[MW]	0,337	0,468	0,131
$\Sigma \Delta P$	[MW]	0,960	1,089	0,129
$\Sigma \Delta P$	[%]	1,27	1,44	0,171

Celkové činné ztráty v síti při bezporuchovém provozu T202, T203 činí 1,27 % dodávaného výkonu a při poruše a výpadku přípojnice C v SO celkové ztráty v síti vzrostou na 1,44 % dodávaného výkonu. Nárůst ztrát o 0,171 % je zapříčiněn především nárůstem elektrických ztrát ve vedení. Nárůst ztrát je také logicky odůvoditelný, neboť při výpadku přípojnice C v SO dojde k odpojení vedení číslo 517, 530 a 536, čímž se sníží celkové zakruhování napájených oblastí z rozvodny Sokolnice. Tedy například rozvodna Hustopeče a Klobouky jsou po poruše napájeny jen z jedné strany, což znamená, že dodávka výkonu do těchto rozvodů je provedena jen jedním vedením (namísto dvou paralelních cest v bezporuchovém stavu).

Porovnání zkratových poměrů

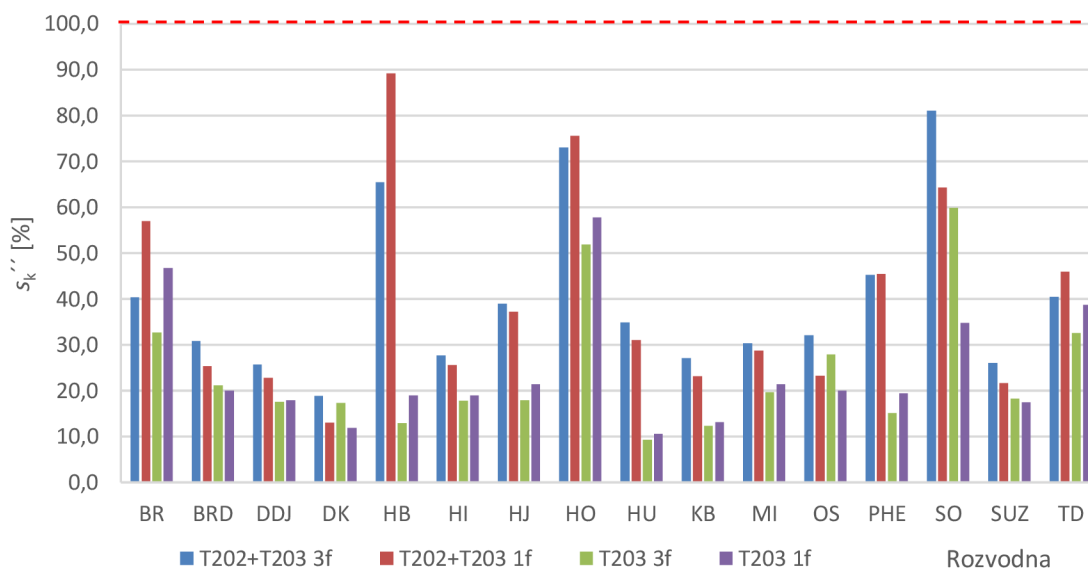
Tabulka 8-10 Zkratové poměry, porovnání T202, T203 s T203 a výpadkem přípojnice C v SO

Rozvodna	Zkratová odolnost S_{kvyp} [MVA]	T202+T203		T203		Porovnání	
		s_{k3}''	s_{k1}''	s_{k3}''	s_{k1}''	$\Delta s_{k3}''$	$\Delta s_{k1}''$
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
BR	3500	40,3	57,0	32,7	46,7	-7,6	-10,3
BRD	3500	30,8	25,4	21,2	20	-9,6	-5,4
DDJ	3500	25,7	22,8	17,6	17,9	-8,1	-4,9

DK	3500	18,8	13,0	17,3	11,9	-1,5	-1,1
HB	3500	65,4	89,2	12,9	19	-52,5	-70,2
HI	3500	27,7	25,6	17,8	19	-9,9	-6,6
HJ	3500	38,9	37,2	17,9	21,4	-21,0	-15,8
HO	2500	73,0	75,6	51,9	57,8	-21,1	-17,8
HU	3500	34,9	31,1	9,3	10,6	-25,6	-20,5
KB	3500	27,1	23,1	12,3	13,2	-14,8	-9,9
MI	3500	30,3	28,7	19,7	21,4	-10,6	-7,3
OS	3500	32,1	23,3	27,9	20	-4,2	-3,3
PHE	3500	45,2	45,5	15,1	19,4	-30,1	-26,1
SO	5000	81,0	64,3	59,9	34,8	-21,1	-29,5
SUZ	3500	26,0	21,6	18,3	17,4	-7,7	-4,2
TD	3500	40,5	45,9	32,6	38,7	-7,9	-7,2

V Tabulka 8-10 je uvedeno zatížení rozveden zkratovými výkony jako procento její zkratové odolnosti. Ze zkratových výkonů je zřejmé, že zkratová odolnost není překročena jak při můstkovém provozu transformátorů T202 a T203, tak ani po výpadku přípojnice C (sloupec T203). V tabulce jsou dále žlutě podbarveny hodnoty zatížení zkratovým výkonem dosahujícím více jak 70 % její zkratové odolnosti. V posledních dvou sloupcích tabulky je pak možné sledovat značný pokles zkratových výkonů po výpadku přípojnice C a napájení zbylé soustavy jen jedním transformátorem T203. K největšímu poklesu (-52,5 třífázový a -70,2 % jednofázový) dojde v rozvodně Hrušovany u Brna (žlutě podbarveno).

Procentní zatížení zkratovým výkonem je také přehledně uvedeno v následujícím obrázku, červená přerušovaná čára značí maximální možný zkratový výkon odpovídající zkratové odolnosti dané rozvodny.



Obr. 8-8 Zatížení zkratovým výkonem, 3f i 1f, porovnání T202, T203 se stavem po poruše T203

8.3 Porovnání T402, T403 s mimořádným stavem

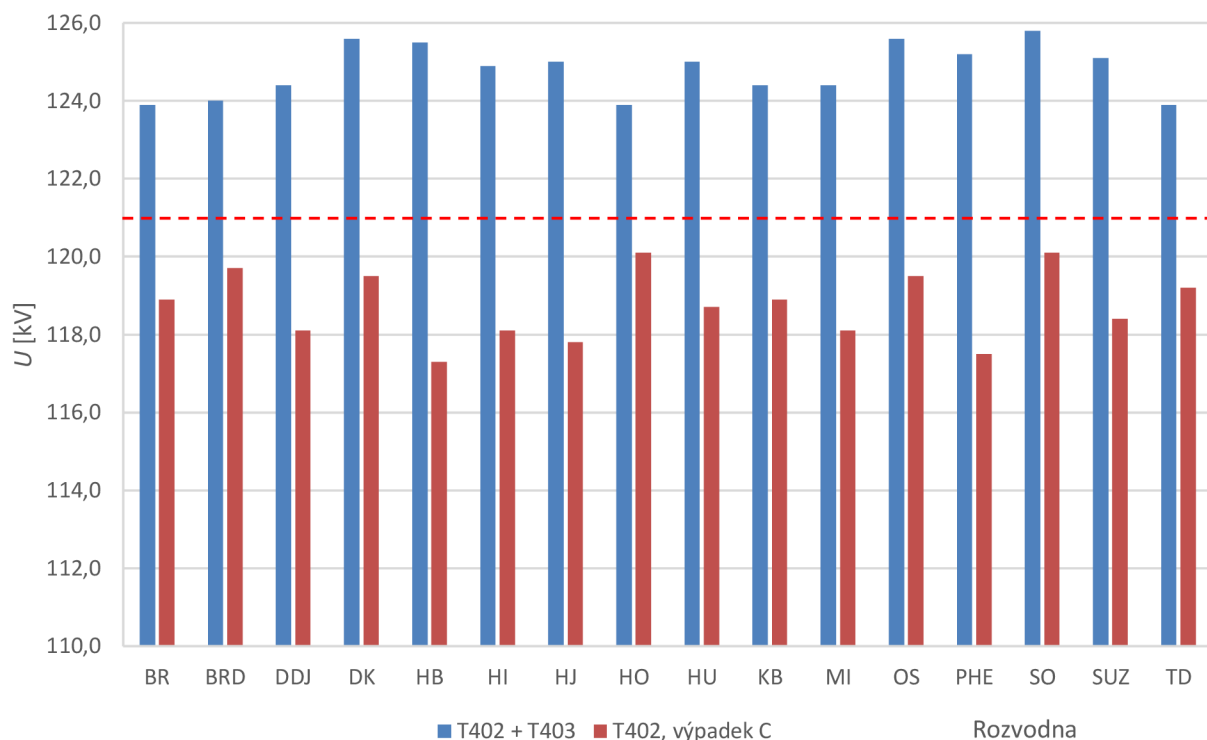
V této kapitole budou porovnány výsledky výpočtu ustáleného chodu při napájení UO Sokolnice pomocí dvou transformátorů 400/110 kV T402 a T403 se stavem, při němž dojde k poruše na přípojnicí C v rozvodně Sokolnice a k jejímu odpojení. Napájení UO Sokolnice tak bude zajištěno jen jedním transformátorem T402. Výsledky výpočtu byly samostatně prezentovány v *kapitolách 7.1 a 7.2*.

Porovnání napěťových poměrů

Tabulka 8-11 Napěťové poměry, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

Rozvodna	T402 + T403	T402, výpadek C	Porovnání	
	U		ΔU	
	[kV]		[kV]	[%]
BR	123,9	118,9	-5,0	-4,0
BRD	124,0	119,7	-4,3	-3,5
DDJ	124,4	118,1	-6,3	-5,1
DK	125,6	119,5	-6,1	-4,9
HB	125,5	117,3	-8,2	-6,5
HI	124,9	118,1	-6,8	-5,4
HJ	125,0	117,8	-7,2	-5,8
HO	123,9	120,1	-3,8	-3,1
HU	125,0	118,7	-6,3	-5,0
KB	124,4	118,9	-5,5	-4,4
MI	124,4	118,1	-6,3	-5,1
OS	125,6	119,5	-6,1	-4,9
PHE	125,2	117,5	-7,7	-6,2
SO	125,8	120,1	-5,7	-4,5
SUZ	125,1	118,4	-6,7	-5,4
TD	123,9	119,2	-4,7	-3,8

Jelikož v rámci výpočtu byl špatně namodelován transformátor T402 a nebyly dodrženy podmínky pro paralelní spolupráci dvou transformátorů, nelze provést objektivní zhodnocení změn napěťových poměrů v bezporuchovém a poruchovém stavu. Velikost napětí při bezporuchovém stavu je nad horní hranici dovolené odchylky napětí 121 kV (pohybuje se v rozmezí 123,9 až 125,8 kV) a tedy není zaručen bezporuchový provoz soustavy. V případě výpadku přípojnice C dojde k poklesu napětí a ta se již všechna pohybují v dovolené toleranci. **Žlutě** jsou zvýrazněny největší hodnoty napětí 120,1 kV v rozvodnách Sokolnice a Hodonín při uvažované poruše. Velikost napětí je také vynesena v následujícím obrázku, kde červená přerušovaná čára vyznačuje horní mez dovolené odchylky napětí.



Obr. 8-9 Napěťové poměry, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

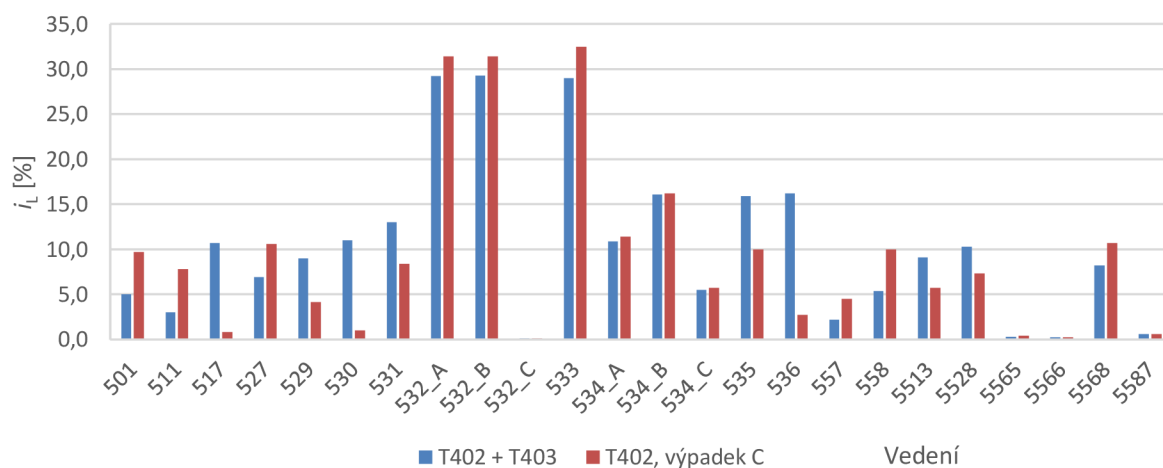
Porovnání zatížení vedení

Tabulka 8-12 Zatížení vedení, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

Označení	Rozvodna 1	Rozvodna 2	T402 + T403	T402, výpadek C	Porovnání
			i_L [%]	i_L [%]	Δi_L [%]
501	OS	SUZ	5,0	9,7	4,7
511	OS	SO	3,0	7,8	4,8
517	HB	SO	10,7	0,8	-9,9
527	HJ	PHE	6,9	10,6	3,7
529	HU	KB	9,0	4,1	-4,9
530	HU	SO	11,0	1	-10,0
531	BR	SO	13,0	8,4	-4,6
532_A	BR	X	29,2	31,4	2,2
532_B	TD	X	29,3	31,4	2,1
532_C	BRD	X	0,1	0,1	0,0
533	HO	TD	29,0	32,5	3,5
534_A	KB	Y	10,9	11,4	0,5
534_B	HO	Y	16,1	16,2	0,1
534_C	BRD	Y	5,5	5,7	0,2
535	HO	SO	15,9	10	-5,9
536	HO	SO	16,2	2,7	-13,5
557	HI	HJ	2,2	4,5	2,3
558	HI	SUZ	5,4	10	4,6

5513	HJ	MI	9,1	5,7	-3,4
5528	HB	PHE	10,3	7,3	-3,0
5565	DDJ	MI	0,3	0,4	0,1
5566	DDJ	MI	0,2	0,2	0,0
5568	BR	MI	8,2	10,7	2,5
5587	DK	OS	0,6	0,6	0,0

V Tabulka 8-12 jsou uvedeny procentuální hodnoty proudového zatížení vedení při bezporuchovém napájení můstkově zapojenými transformátory T402 a T403 a dále při simulované poruše a výpadku přípojnice C v rozvodně Sokolnice. Při výpadku přípojnice dojde k odpojení vedení 517, 530 a 536 od rozvodny Sokolnice a také k odpojení transformátoru T403. Napájení UO Sokolnice je pak zajištěno samostatným transformátorem T402. Jak bylo již zmíněno u porovnání napěťových poměrů, tak při výpočtu bezporuchového chodu T402 a T403 byl chybně namodelován transformátor T403 což se projevilo nesprávnými hodnotami napětí. Jelikož byl do UO Sokolnice vyveden výkon elektrárny Hodonín a typ uzlu byl zde zvolen jako P, U, bylo využito regulační výkonové kapacity elektrárny Hodonín ke snížení zvýšeného napětí v síti. Tyto vlivy se nepříznivě projevily také na zatížení vedení a i transformátorů, kdy po vedení byly zvýšeny přenosy jalových výkonů. Zmíněná fakta tedy do jisté míry zkreslují vypočtené hodnoty pro bezporuchový chod T402 a T403 a je zapotřebí je mít na zřeteli. K samotným výsledkům je pak možné říci následující: nejvíce zatíženými vedeními byly v obou stavech vedení 532 a 533 s zatížením v bezporuchovém stavu přibližně 29 % a po poruše se zatížením přibližně 32 % (žlutě podbarveno). Nejvyšší pokles proudového zatížení lze pozorovat u odpojených vedení 517 (-9,9 %), 530 (-10 %) a 536 (-13,5 %), (zeleně podbarveno). Nejvyšší proudový nárůst zatížení pak nastal u vedení 501 (4,7 %), 511 (4,8 %) a 558 (4,6 %), (modře podbarveno). I přes uvedené chyby při výpočtu se ovšem proudová zatížení jednotlivých vedení pohybují v dovolené toleranci. Proudové zatížení vedení je také vyneseno v následujícím obrázku



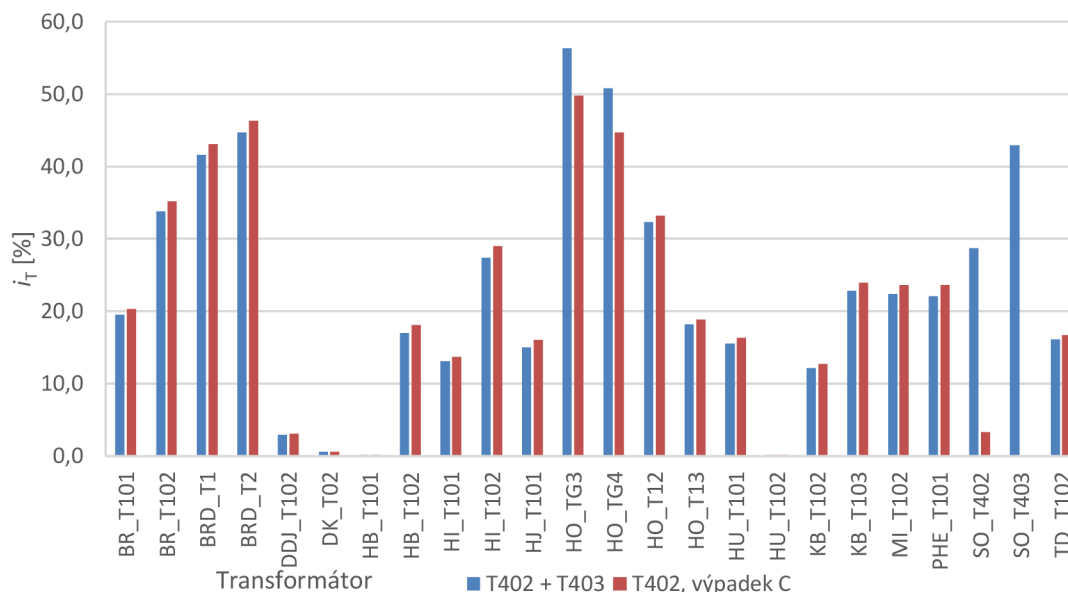
Obr. 8-10 Zatížení vedení, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

Porovnání zatížení transformátorů

Tabulka 8-13 Zatížení transformátorů, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

Rozvodna	Označení	T402 + T403	T402, výpadek C	Porovnání
		i_T [%]	i_T [%]	Δi_T [%]
BR	T101	19,5	20,3	0,8
	T102	33,8	35,2	1,4
BRD	T1	41,6	43,1	1,5
	T2	44,7	46,3	1,6
DDJ	T102	2,9	3,1	0,2
DK	T02	0,6	0,6	0,0
HB	T101	0,1	0,1	0,0
	T102	17,0	18,1	1,1
HI	T101	13,1	13,7	0,6
	T102	27,4	29,0	1,6
HJ	T101	15,0	16,0	1,0
HO	TG3	56,3	49,8	-6,5
	TG4	50,8	44,7	-6,1
	T12	32,3	33,2	0,9
	T13	18,2	18,8	0,6
HU	T101	15,5	16,3	0,8
	T102	0,1	0,1	0,0
KB	T102	12,1	12,7	0,6
	T103	22,8	23,9	1,1
MI	T102	22,4	23,6	1,2
PHE	T101	22,1	23,6	1,5
SO	T402	28,7	3,3	-25,4
	T403	42,9	0,0	-42,9
TD	T102	16,1	16,7	0,6

Žádný z transformátorů není ani v bezporuchovém stavu ani při poruchovém stavu proudově přetížen. Nejvíce zatěžovanými transformátory při obou stavech byly T1 a T2 v rozvodně BRD jejichž zatížení nepřesáhlo hodnotu 50 % a dále pak transformátory TG3 a TG4 v rozvodně Hodonín jejichž zatížení bylo v bezporuchovém stavu 56,3 a 50,8 % a při simulované poruše pak 49,8 a 44,7 %. Přibližně 6 % procentní pokles u transformátorů TG3 a TG4 je v důsledku změny dodávky jalového výkonu do distribuční sítě, jelikož byl typ uzlu při výpočtu ustáleného chodu v rozvodně Hodonín zvolen jako P, U. (nejvíce zatěžované transformátory jsou podbarveny žlutě). Zelené podbarvení značí transformátory dodávající výkon. V tabulce jsou dále červeně podbarveny proudová zatížení a jejich změny u transformátorů T402 a T403. Tyto hodnoty v sobě zahrnují chybu způsobenou průtokem vyrovnávacího proudu mezi těmito transformátory. Z hodnot změn zatížení je také patrný nepatrný nárůst v řádu jednotek procent téměř u všech transformátorů při simulované poruše. Velikost zatížení transformátorů je také zobrazena v následujícím obrázku



Obr. 8-11 Zatížení transformátorů, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

Porovnání elektrických ztrát

Tabulka 8-14 Činné ztráty, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

		T402 + T403	T402, výpadek C	Rozdíl
ΔP_T	[MW]	0,751	0,624	-0,127
ΔP_L	[MW]	0,679	0,467	-0,212
$\Sigma \Delta P$	[MW]	1,430	1,091	-0,339
$\Sigma \Delta P$	[%]	1,70	1,30	-0,404

Celkové činné ztráty při bezporuchovém provozu T402 a T403 činí 1,7 % celkového dodávaného výkonu a při výpadku přípojnice C v SO celkové činné ztráty poklesnou jen na 1,3 % dodávaného výkonu. Tento pokles je především v důsledku započtení neúměrně vysokých elektrických ztrát v transformátorech T402 a T403 (jsou zatíženy vyrovnávacím proudem) při bezporuchovém provozu a dále pak také v důsledku poklesu ztrát ve vedení při simulované poruše. (pokles přenášeného jalového výkonu, popsáno v části Porovnání zatížení vedení). Jelikož by teoreticky mělo dojít k nárůstu elektrických ztrát, stejně jako v kapitole 8.2 (situace je do značné míry obdobná), ale paradoxně dojde k poklesu o 0,4 %, jeví se pro toto porovnání z hlediska minimalizace ztrát výhodnější napájení jen jedním transformátorem T402 namísto dvou. Tato chyba je ovšem opět zapříčiněna chybně namodelovaným transformátorem T403 a nesplněnými podmínkami pro paralelní provoz transformátorů.

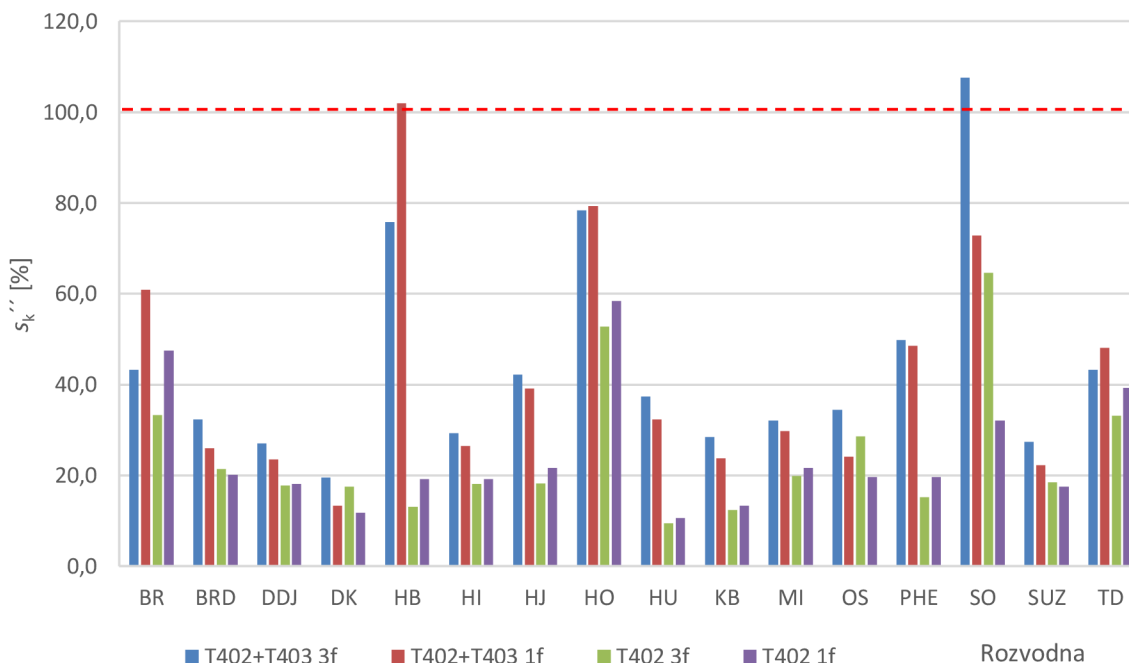
Porovnání zkratových poměrů

Tabulka 8-15 Zkratové poměry, porovnání T402, T403 s T402 a výpadkem přípojnice C v SO

Rozvodna	Zkratová odolnost S_{kvyp} [MVA]	T402+T403		T402		Porovnání	
		s_{k3}'' [%]	s_{k1}'' [%]	s_{k3}'' [%]	s_{k1}'' [%]	$\Delta s_{k3}''$ [%]	$\Delta s_{k1}''$ [%]
BR	3500	43,2	60,8	33,3	47,5	-9,9	-13,3
BRD	3500	32,3	26,0	21,4	20,1	-10,9	-5,9

DDJ	3500	27,0	23,5	17,8	18,1	-9,2	-5,4
DK	3500	19,5	13,3	17,5	11,8	-2,0	-1,5
HB	3500	75,8	102,0	13,1	19,2	-62,7	-82,8
HI	3500	29,3	26,5	18,1	19,2	-11,2	-7,3
HJ	3500	42,2	39,1	18,2	21,6	-24,0	-17,5
HO	2500	78,3	79,3	52,7	58,4	-25,6	-20,9
HU	3500	37,4	32,3	9,4	10,6	-28,0	-21,7
KB	3500	28,4	23,7	12,4	13,3	-16,0	-10,4
MI	3500	32,1	29,8	19,9	21,6	-12,2	-8,2
OS	3500	34,4	24,1	28,6	19,7	-5,8	-4,4
PHE	3500	49,8	48,5	15,2	19,6	-34,6	-28,9
SO	5000	107,6	72,8	64,6	32,1	-43,0	-40,7
SUZ	3500	27,4	22,2	18,5	17,5	-8,9	-4,7
TD	3500	43,2	48,1	33,2	39,2	-10,0	-8,9

V Tabulka 8-15 je uvedeno zatížení rozveden zkratovými výkony jako procento její zkratové odolnosti. Z výsledků je zřejmé, že při můstkovém provozu transformátorů T402, T403 dojde k překročení zkratové odolnosti a to při trojpolové poruše v rozvodně Sokolnice (107,6 %) a při jednopólové poruše v rozvodně Hrušovany u Brna (102 %), (červeně podbarveno). V tabulce jsou dále žlutě podbarveny hodnoty zatížení zkratovým výkonem dosahujícím více jak 70 % její zkratové odolnosti. V posledních dvou sloupcích tabulky je pak možné sledovat značný pokles zkratových výkonů po výpadku přípojnice C a napájení zbylé soustavy jen jedním transformátorem T402. K největšímu poklesu (-62,7 třífázový a -82,8 % jednofázový) dojde v rozvodně Hrušovany u Brna a také v rozvodně Sokolnice (-43 % a -40,7 %), (žlutě podbarveno). Procentní zatížení zkratovým výkonem je také přehledně uvedeno v následujícím obrázku, červená přerušovaná čára značí maximální možný zkratový výkon odpovídající zkratové odolnosti dané rozvodny.



Obr. 8-12 Zatížení zkratovým výkonem, 3f i 1f, porovnání T402, T403 se stavem po poruše T402

9 NÁVRH TECHNICKÝCH OPATŘENÍ

K výsledkům prezentovaných v kapitolách 6 a 7 jsou v této kapitole navrženy **nezbytná a doporučená** technická opatření.

Pokud bychom se zaměřili na jednotlivé skupiny prvků, tak co se týče **proudového zatížení vedení a transformátorů, není zapotřebí přijímat žádná technická opatření.**

Co se týká zkratových odolností rozveden, zde je zapotřebí přijmout jak opatření nezbytná tak brát na zřetel opatření doporučená.

Při výpočtu **zkratových poměrů** pro současnou provozovanou variantu – **můstkový provoz T202 a T203** nejsou překročeny zkratové odolnosti rozveden a to ani při simulované poruše a tedy **není zapotřebí žádných technických opatření.**

Z výsledků výpočtu ovšem vyplývá, že pro budoucí plánovaný provoz **můstkově zapojených transformátorů T402 a T403 je zapotřebí přijmout následující nezbytná technická opatření:**

- Při simulovaném vzniku trojpolové zkratové poruchy na přípojnici v rozvodně Sokolnice by některé vypínače nemusely tuto zkratovou poruchu vypnout. Současná zkratová odolnost transformovny Sokolnice je 5000 MVA a při uvedené poruše lze očekávat trojfázový zkratový výkon 5377,7 MVA což je překročení přibližně o 7,6 %. Proto je pro budoucí můstkový provoz transformátorů T402 a T403 zapotřebí posílit zkratovou odolnost této rozvodny tak, aby veškeré prvky v této rozvodně tuto hodnotu vydržely bez poškození. V řadě zkratových odolností se tedy bude jednat o **posílení zkratové odolnosti rozvodny Sokolnice na 7500 MVA.**
- Při simulované poruše v rozvodně Hrušovany u Brna byl výpočtem stanoven zkratový výkon při jednofázové poruše na 3569,5 MVA, přičemž zkratová odolnost této rozvodny je 3500 MVA. Zkratová odolnost tak bude překročena přibližně o 2 %. **Bude tedy nezbytné posílit zkratovou odolnost rozvodny Hrušovany u Brna na vyšší z řady zkratových odolností, tedy na 5000 MVA.**

K hodnotám zkratových proudů je pak možné uvést **následující doporučená technická opatření:**

- Pro všechny počítané varianty zapojení se zatížení zkratovým výkonem v rozvodně Hodonín často pohybovalo ve vysokých hodnotách. Pro obě varianty provozu můstku (220/110 i 400/110) se pak zatížení zkratovým výkonem pohybovalo téměř na hranici 80 %. Tato hodnota poskytuje dostatečnou rezervu, ale při případném připojení nového zdroje do UO Sokolnice by tato hodnota mohla být překročena. Za zmínku také stojí, že tato rozvodna má z celé UO Sokolnice nejmenší zkratovou odolnost 2500 MVA a tak by bylo vhodné zvážit její rekonstrukci a případné posílení na 3500 MVA.

10 ZÁVĚR

Práci lze rozdělit na teoretickou a praktickou část. Teoretická část práce se skládá ze dvou kapitol:

V první kapitole je uveden rozbor a postup výpočtu ustáleného chodu sítí velmi vysokého napětí. Jelikož velikost výroby a odběrů bývá v praxi zadána velikostí výkonů, výpočet ustáleného chodu je nelineární úlohou a pro její řešení je zapotřebí zvolit některou z iteračních metod. V rámci této práce je uveden rozbor Newtonovy iterační metody s její aplikací na rovnice popisující ustálený chod sítě.

Druhá kapitola se pak věnuje výpočtům zkratových proudů. Jsou zde popsány příčiny vzniku zkratových poruch i jejich vlivy na elektrická zařízení. V práci je pak uveden popis časového průběhu zkratového proudu. Pro praktické výpočty není zapotřebí znát časový průběh zkratového proudu a tak s jistými zjednodušeními lze výpočtem stanovovat jen určité charakteristické hodnoty zkratových proudů, které pro potřeby dimenzování postačují. V této kapitole je pak tedy popsána metoda Ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu podle normy ČSN EN 60909 užívaná právě k výpočtu jen charakteristických hodnot zkratových proudů. Pro výpočet nesouměrných zkratových poruch je v této kapitole také proveden rozbor metody souměrných složek.

Teoretický rozbor je pak využit v druhé části práce pro lepší orientaci a analýzu samotného výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v části sítě Sokolnice.

Druhá praktická část této práce je tedy zaměřena na hlavní cíl této práce, kterým je vyhodnotit současný provoz UO Sokolnice a zároveň provést simulaci, výpočet a vyhodnocení budoucího provozu UO Sokolnice po plánované rekonstrukci. Přesný popis rekonstrukce je popsán v kapitole 5.2. Zjednodušeně lze říci, že jde o výměnu jednoho současného transformátoru 220/110 kV T203 za nový 400/110 kV T403. Po provedení příslušných manipulací s transformátory v rozvodně pak v rámci výpočtu byly řešeny následující varianty provozu UO Sokolnice: 1. můstkový provoz T202 a T203 (současný stav) – 2. můstkový provoz T402 a T403 (možno provozovat po roce 2017). Pro obě varianty pak bylo také počítáno s jedním mimořádným stavem, kterým byla porucha v uzlové rozvodně Sokolnice. Tuto poruchu představoval výpadek jedné přípojnice a tedy stav, ve kterém je celá uzlová oblast Sokolnice napájena jen jedním z dvojice paralelně spolupracujících transformátorů - T203 a v druhém případě T402. V rámci této práce jsou tedy řešeny celkem čtyři varianty zapojení UO Sokolnice.

Praktická část práce je tedy složena z více kapitol. První z nich je věnována popisu části distribuční sítě 110 kV společnosti E.ON v UO Sokolnice. Další dvě kapitoly se samostatně věnují prezentaci a diskusi výsledků výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v UO Sokolnice pro všechny čtyři řešené varianty.

V další části práce je pak provedeno porovnání výsledků výpočtu a v poslední kapitole jsou pak navrženy technická opatření nezbytná pro budoucí můstkový bezporuchový provoz transformátorů T402 a T403.

Před samotnou diskusí výsledků je zapotřebí uvést okolnosti, které výsledky výpočtu do značné míry zkreslují. Samotné datum výpočtu bylo zvoleno na 23. březen, kdy byl předpoklad zvýšeného zatížení soustavy (zimní období). Jelikož v den výpočtu bylo jasno a slunečný den, bilance výkonů v řešené UO Sokolnice byla kladná a tedy směr toku výkonu byl z distribuční soustavy 110 kV do přenosové soustavy 220 a 400 kV. To bylo zapříčiněno dvěma základními

faktory. Prvním byla vyvedená výroba elektrárny Hodonín do UO Sokolnice, která činila téměř 65 MW. Tato dodávka výkonu pokrývala značnou část celkové spotřeby. Druhým faktorem byl samotný fakt slunečného dne. Z údajů o měření výroby fotovoltaických elektráren v UO Sokolnice připojených do distribuční sítě 22 kV byla zjištěna aktuální výroba při výpočtu dosahující přibližně 100 MW. Do UO Sokolnice byly dále vyvedeny výkony některých dalších zdrojů. Pokud bychom tedy chtěli porovnat z hlediska proudového zatížení nejneprůzračnější variantu, bylo by zapotřebí výpočet provést v jiný čas i s ohledem na počasí.

Další okolností ovlivňující výsledky výpočtu je chyba provedená při samotné simulaci. Z důvodu nedostatečné znalosti výpočetního programu byl špatně namodelován nový transformátor T403 a při výpočtu můstkového provozu T402 a T403 nebyly dodrženy podmínky paralelního chodu obou transformátorů. Transformátory T402 a T403 neměly nastaveny odbočky ve stejné poloze a disponovaly tak rozdílným převodem. Tato chyba se projevila zvýšenými hodnotami napětí a průtokem vyrovnávacího proudu mezi oběma transformátory, který je tak neúčelně zatěžoval. I přes včasné odhalení chyby v protokolech výpočtu a snahu o opětovné provedení nebylo možné simulaci provést do termínu dokončení této práce, jelikož v tomto období zároveň docházelo k implementaci nového řídicího softwaru na Dispečinku 110 kV v Brně. Pro můstkový provoz T402, T403 je tedy použito výsledků zahrnujících chybu způsobenou rozdílným převodem transformátorů. Nyní je možné přistoupit k samotným výsledkům výpočtu.

Každá ze čtyř řešených variant má uvedeno své celkové zhodnocení v kapitolách 6.1.1, 6.2.1, 7.1.1 a 7.2.1. Výsledky se do jisté míry shodují a tak lze konstatovat následující:

Při žádné z řešených variant zapojení nejsou ani vedení ani transformátory proudově přetíženy. Nejvíce proudově ztěžovanými **vedeními** jsou vedení V532 a V533. Proudové zatížení se při obou můstkových prozvozech T202, T203 i T402, T403 pohybuje pod hranicí 30 %. Po uvažovaném výpadku přípojnice v rozvodně Sokolnice zůstávají tato vedení nadále nejvíce zatížená a jejich proudové zatížení v obou případech naroste přibližně k hranici 35%.

Nejvíce zatěžovanými **transformátory** jsou blokové transformátory TG3 a TG4 v rozvodně Hodonín se zatížením přibližně (44,7-56,3 %). Jelikož se jedná o blokové transformátory, jejich zatížení je již dimenzováno pro výkon daného bloku a není zde předpoklad pro zatížení vyšší jak jmenovité. Výpadek přípojnice v rozvodně Sokolnice se na jeho zatížení projevil rozdílem v řádu jednotek procent. Nejvíce pak byly zatíženy při můstkovém provozu T402 a T403 a to z důvodu zvýšené dodávky jalového výkonu (uzel v rozvodně Hodonín byl při výpočtu zvolen P, U), kdy se elektrárna Hodonín snažila zvýšenou výrobou jalového výkonu o snížení zvýšeného napětí v důsledku nedodržení podmínek paralelního chodu T402 a T403. Druhými nejvíce zatíženými transformátory byly T1 a T2 rozvodně Břeclav ČD se zatížením pro všechny varianty do 47 %.

Za zmínku také stojí zhodnocení proudového **zatížení transformátorů T202, T203, T402, T403**. Jelikož bilance výkonů v síti byla téměř vyrovnaná, nelze zatížení těchto transformátorů objektivně zhodnotit, neboť při můstkovém provozu transformátorů T202, T203 byly oba zatíženy přibližně na 1 % jejich jmenovitého výkonu. Při výpadku přípojnice se pak zatížení těchto transformátorů měnilo v jednotkách desetin procent. Při můstkovém provozu T402 a T403 je při hodnocení jejich zatížení opět zapotřebí brát na zřetel, že mezi transformátory protékal vyrovnávací výkon, který transformátory zatěžoval na 29 a 43 %. Pokud by byly transformátory namodelovány správně (ve skutečnosti by zapůsobily automatiky samočinného přepínání odboček pod zatížením), transformátory by byly zatíženy obdobně jako při můstkovém chodu T202 a T203 (tedy v řádu desetin až jednotek procent).

Z hlediska **napětových poměrů**, lze opět konstatovat, že veškerá napětí se pohybují v dovolené toleranci 99-121 kV pro všechny varianty zapojení, vyjímaje můstkového provozu T402, T403 u kterého se projevuje chyba převodu transformátorů. Na zlepšení napětových poměrů se také kladným způsobem podílela elektrárna Hodonín změnou vyráběného jalového výkonu. Pokles napětí při chodu T202 a T203 a uvažované poruše se pohybuje v řádu jednotek procent.

Z hlediska **bilance výkonů** činil celkový odběr ~ 75 MW. Celková výroba vyvedená do UO Sokolnice pak představovala 75,5 MW (hodnoty výroby a odběru při můstkovém provozu T402 a T403 jsou odlišné v důsledku započteného vyrovnávacího výkonu). Celkové **ztráty činného výkonu** pak činily pro můstkové provoz T202, T203 a T402, T403 - 0,96 MW (1,3 %) a 1,43 MW (1,7 %). Při uvažované poruše pak pro variantu s T203 činily 1,089 MW (1,44 %) a pro variantu s T402 pak 1,091 MW (1,44 %). Z hodnot je zřejmé, že při můstkovém provozu T202, T203 a při uvažované poruše dojde k nepatrnému navýšení ztrát o 0,2 %. Činné ztráty při poruše a chodu T402 jsou téměř totožné jako pro chod s T202 (1,089 x 1,091 MW). Činné ztráty pro můstkové zapojení T402 a T403 jsou zatíženy chybou zvýšeného zatížení vedení přenášeným jalovým výkonem v důsledku zvýšených napětí v síti a nelze je tedy objektivně zhodnotit a porovnávat. Dá se ovšem předpokládat, že při správném namodelování transformátoru T402 a T403 by dosahovaly přibližně stejných hodnot jako pro můstkový provoz T202 a T203.

Posledním sledovaným parametrem byly velikosti **zkratových poměrů** (výkonů) při uvažovaných zkratových poruchách v jednotlivých rozvodnách na přípojnicích. Vypočtené zkratové výkony byly porovnány se zkratovými odolnostmi rozveden daných vypínací schopností výkonových vypínačů. Z hlediska zkratových poměrů lze konstatovat, že kromě můstkového provozu transformátorů T402, T403 dosahovaly zkratové výkony hodnot menších, než na jaké jsou dané rozvodny nadimenzovány. Rozvodny kde se zkratový výkon nejvíce přiblížil zkratovým odolnostem byly pro všechny vypočtené varianty rozvodny: Sokolnice, Hodonín a Hrušovany u Brna. Zkratové odolnosti byly porovnány se zkratovými výkony při trojfázovém a jednofázovém zkratu. Při můstkovém zapojení transformátorů T202 a T203 zkratové výkony dosahovaly v rozvodně Sokolnice 81 % (třífázový), v Hrušovanech u Brna 90 % (jednofázový zkrat) zkratové odolnosti. V rozvodně Hodonín pak zatížení zkratovým výkonem dosahovalo 75 %. Při můstkovém provozu T402, T403 pak v rozvodně Sokolnice dojde k překročení zkratové odolnosti 107,6 % (třífázový zkrat) a také v rozvodně Hrušovany u Brna 102 % (jednofázový zkrat). Z výsledků výpočtu zkratových poměrů při bezmůstkovém provozu je pak zřejmý značný pokles zkratových poměrů (viz. porovnání Tabulka 8-10 a Tabulka 8-15). Z porovnání je také zřejmý neblahý důsledek můstkového provozu transformátorů zvn/vvn. Zvýšená spolehlivost dodávky elektrické energie (při výpadku jedno z transformátoru je napájení zajištěno druhým) a také zlepšení napětových poměrů v síti je doprovázeno značným nárůstem zkratových poměrů v dané oblasti. Pro rozvodny s překročenou zkratovou odolností jsou v kapitole 9 navržena nezbytná a doporučená technická opatření, která je zapotřebí uskutečnit před uvedením do provozu můstkového zapojení transformátorů T402 a T403.

Některé další informace a vyhodnocení výsledků výpočtu jsou uvedeny vždy pod příslušnou tabulkou v kapitolách 6, 7 a 8. Z hlediska názorného porovnání změn sledovaných veličin jsou pak v kapitole 8 vykresleny grafické závislosti.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V., SKALA, P. *Distribuce elektrické energie*. VUT v Brně. 2003. Dostupné z: www.vutbr.cz, [intranet], elektronický učební text.
- [2] HALUZÍK, E. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. VUT v Brně. 1983. 126 s.
- [3] SAADAT, H. *Power system analysis*. Boston: WCB/McGraw-Hill. 1999. ISBN 00-756-1634-3.
- [4] STOTT, B. *Review of load-flow calculation methods. Proceedings of the IEEE*. 1974, vol. 62, issue 7, s. 916-929. DOI: 10.1109/PROC.1974.9544. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1451474>
- [5] KOLCUN, M., CHLADNÝ, V., VARGA, L. *Počítačová analýza elektrizačnej sústavy*. Technická univerzita Košice. 2006. ISBN 80-8073-453-4.
- [6] HODINKA, M. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. VUT v Brně, 1985, 239 s.
- [7] ČSN EN 60909-0:2002. *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách: Část 0: Výpočet proudů, idt IEC 60909-0:2001/Cor. 1:2002-02*. Český normalizační institut, 2002
- [8] TOMAN, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., ORSÁGOVÁ, J., PAAR, M., TOPOLÁNEK, D. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [9] VOKÁL, J. *Výpočty zkratů v technické praxi* [online]. 2012 [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: www.powerwiki.cz/wiki/Vyuka
- [10] BLAŽEK, V., PAAR, M. *Přenosové sítě*. VUT v Brně. 2007. Dostupné z: www.vutbr.cz [intranet], elektronický učební text.
- [11] MÁŠLO, K. a kol. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. 2013, ISBN 978-80-260-44671-1
- [12] IEC/TR 60909-4:2000 *Short circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents.*, 2000.
- [13] ČSN IEC 60909-2:1997 (33 3024), *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 2: Data pro výpočet zkratových proudů podle IEC 60909-0*
- [14] PAUZA, J. *Zkratové proudy v elektrických rozvodech*. Vyd. 1. SNTL Praha, 1970, 246 s.
- [15] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Roční zpráva o provozu ES v ČR 2011* [online]. 2012 [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2011.pdf/0a6d2cad-019e-49df-8fa4-8b11767c9ace
- [16] E.ON DISTRIBUCE, a.s. *Popis distribuční soustavy E.ON* [online]. Brno. 2006 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/technical_information/EON-popis_ds.pdf
- [17] E.ON DISTRIBUCE, a.s. *Schéma sítí 400, 220 a 110 kV v oblasti působnosti* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/technical_information/EON-schema_ds.pdf
- [18] ČEPS, a.s. *Plán rozvoje přenosové soustavy České republiky 2015-2024* [online]. 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Technicka-infrastruktura/Stranky/Rozvoj-PS.aspx>

- [19] ORSÁGOVÁ, J. *Elektrické stanice a vedení*. VUT v Brně. 2013. Dostupné z: www.vutbr.cz, [intranet], elektronický učební text

Příloha (CD)

K této práci je na CD přiloženo:

- Kompletní dispečerská mapa distribucí sítě 110 kV společnosti E.ON.
- Výstupní protokoly z programu SINAUT SPECTRUM pro všechny vypočtené varianty.