



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

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

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETER MÚDRY

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Peter Múdry

ID: 119541

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

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

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie výpočtu ustáleného chodu sítě 110 kV.
2. Teorie výpočtu zkratových poměrů v sítích vvn a zvn.
3. Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV pro dvě varianty zapojení:
 - a) samostatný provoz uzlových oblastí Čebín – Sokolnice,
 - b) paralelní provoz uzlových oblastí Čebín – Sokolnice.
4. Výpočet zkratových poměrů v DS 110 kV při jednopólovém a třípólovém zkratu v síti 110 kV pro obě varianty zapojení DS 110 kV.
5. Vyhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro obě varianty zapojení.
6. Návrh provozních a technických opatření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

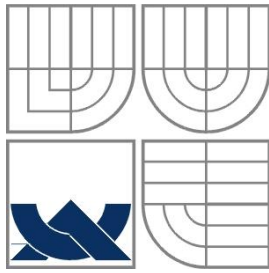
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

MÚDRY, P. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON při paralelním provozu uzlových oblastí R Čebín a R Sokolnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 114 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc..

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

.....



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 při paralelním provozu
uzlových oblastí R Čebín a R Sokolnice**

Bc. Peter Múdry

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

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 at
parallel operation of nodal areas of Čebín
substation and Sokolnice substation**

by

Bc. Peter Múdry

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

V súčasnosti v distribučnej sieti 110 kV spoločnosti E.ON je uzlová oblasť rozvodni Čebín a rozvodni Sokolnice prevádzkovaná samostatne. Na každú uzlovú oblasť pripadá jeden napájací transformátor 400/110 kV. V prípade akejkol'vek poruchy na jednom z transformátorov prípadne na prípojnici do ktorej daný transformátor pracuje, dôjde k výpadku dodávky elektrickej energie v danej uzlovej oblasti. Tento problém má byť vyriešený za pomoci paralelnej prevádzky uzlovej oblasti rozvodni Čebín a rozvodni Sokolnice.

Hlavnou a tiež praktickou úlohou tejto práce je navrhnúť tzv. mostíkové zapojenie vhodné pre paralelnú prevádzku uzlových oblastí (napájacích transformátorov 400/110 kV). Pre samostatnú a paralelnú prevádzku uzlových oblastí sú pomocou výpočtového programu prevedené výpočty ustáleného chodu a skratových pomerov v distribučnej sieti 110 kV. Z výpočtov ustáleného chodu sú vyhodnocované a kontrolované napäťové pomery v rozvodniach 110 kV, zaťaženie transformátorov (400/110 kV a 110/vn kV) a pomery na vedeniach 110 kV. Na základe skratových pomerov sú kontrolované skratové odolnosti rozvodní. Na záver sú porovnané výhody a nevýhody samostatnej respektíve paralelnej prevádzky uzlových oblastí. Ak je potrebné, sú navrhnuté technické opatrenia nevyhnutné pre zavedenie paralelnej prevádzky uzlovej oblasti Čebín a uzlovej oblasti Sokolnice.

Teoretická časť práce sa zaoberá výpočtom ustáleného chodu pomocou iteračných metód a to Newtonovej a Gauss-Seidlovej metódy. Ďalej je popísaná metóda výpočtu skratových prúdov, charakteristické hodnoty a časové priebehy skratového prúdu.

KLÍČOVÁ SLOVA: elektrizačná sústava, distribučná sieť 110 kV, uzlová oblasť rozvodni Čebín a rozvodni Sokolnice, iteračné metódy, metóda ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu, ustálený chod, skrat, skratové pomery

ABSTRACT

In the distribution network 110 kV of E.ON Company there are the nodal areas of Čebín substation and Sokolnice substation which are operated separately at the present time. There is one 400/110 kV transformer for each nodal area. In case of fault on one of these transformers or on busbar in which the set transformer is working, it comes to an outage of electric supply in the set nodal area. This problem has to be solved with help of the parallel operation of nodal areas of Čebín substation and Sokolnice substation.

The main and also the practical task of this work is to design the bridge connection appropriate for parallel operation of nodal areas (supply transformers 400/110 kV). With help of a computing program there were made calculations of steady state and short-circuit conditions in distribution network 110 kV for separated and parallel operation of nodal areas. Voltage conditions, load of transformers (400/110 kV and 110/vn kV) and conditions on 110 kV lines are evaluated and controlled as the result of steady state calculations. Based on short-circuit conditions there is controlled the short-circuit resistance of the substations. Finally there are compared advantages and disadvantages of separated and parallel operations of nodal areas. If necessary, technical arrangements required for introduction of parallel operation of nodal areas of Čebín substation and Sokolnice substation will be designed.

The theoretical part of the work deals with calculation of steady state with help of iterative methods, namely Newton's and Gauss-Seidel methods. There are further described the method of calculating short-circuit currents, characteristic values and time behaviours of short-circuit current.

KEY WORDS: electricity system, distribution network 110 kV, nodal area of Čebín substation and Sokolnice substation, iterative methods, method of equivalent voltage source at the short-circuit location, steady state, short-circuit, short-circuit conditions

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	11
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD	20
2 CIEĽ PRÁCE	21
3 USTÁLENÝ CHOD V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE.....	22
3.1 ZJEDNODUŠUJÚCE PREDPOKLADY.....	22
3.2 KLASIFIKÁCIA UZLOV A PODMIENKY URČITOSTI CHODU SIETE	23
3.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU AKO LINEÁRNA ÚLOHA.....	24
3.3.1 ELIMINÁCIA BILANČNÉHO UZLA.....	26
3.4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU AKO NELINEÁRNA ÚLOHA	26
3.4.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU GAUSS – SEIDLOVOU METÓDOU	28
3.4.2 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNOU METÓDOU	29
4 PRECHODNÉ JAVY V ES.....	35
4.1 SKRATY V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE.....	36
4.1.1 PRÍČINY VZNIKU SKRATU.....	38
4.1.2 NÁSLEDKY SKRATU	38
4.2 PRIEBEH SKRATOVÉHO PRÚDU	39
4.2.1 ČASOVÝ PRIEBEH SKRATOVÉHO PRÚDU PODEĽA ČSN 60909	43
4.3 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY SKRATOVÉHO PRÚDU	46
5 METÓDA VÝPOČTU SKRATOVÝCH PRÚDOV.....	49
5.1 ZJEDNODUŠENIA PRI SKRATOVÝCH VÝPOČTOCH.....	49
5.2 MAXIMÁLNE SKRATOVÉ PRÚDY.....	50
5.3 MINIMÁLNE SKRATOVÉ PRÚDY.....	50
5.4 EKVIVALENTNÝ NAPÄŤOVÝ ZDROJ V MIESTE SKRATU	50
5.5 POUŽITIE SÚMERNÝCH ZLOŽIEK	51
6 SKRATOVÉ IMPEDANCIE ELEKTRICKÝCH ZARIADENÍ	55
6.1 SIEŤOVÉ NAPÁJAČE.....	55
6.2 TRANSFORMÁTORY.....	56
6.2.1 DVOJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	56
6.2.2 TROJVINUŤOVÉ TRANSFORMÁTORY	56
6.2.3 KOREKČNÉ SÚČINITELE PRE IMPEDANCIE DVOJ- A TROJVINUŤOVÝCH SIEŤOVÝCH TRANSFORMÁTOROV	58
6.3 SYNCHRÓNNE GENERÁTORY	58
6.4 VONKAJŠIE VEDENIA A KÁBLE.....	60
6.5 ASYNCHRÓNNE MOTORY	60

7 VÝPOČET SKRATOVÝCH PRÚDOV	62
7.1 POSTUP VÝPOČTU	62
7.2 PREPOČET SKRATOVÝCH IMPEDANCIÍ	62
7.2.1 VÝPOČET V SKUTOČNÝCH HODNOTÁCH	62
7.2.2 VÝPOČET V POMERNÝCH HODNOTÁCH	62
7.3 TROJFÁZOVÝ ZEMNÝ SKRAT	63
7.4 JEDNOFÁZOVÝ SKRAT	64
8 POPIS DISTRIBUČNEJ SÚSTAVY E.ON- VÝCHOD	66
8.1 UZLOVÁ OBLASŤ ČEBÍN	66
8.2 UZLOVÁ OBLASŤ SOKOLNICE	67
8.3 POPIS ROZVODNÍ 110/VN KV V UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE	67
8.3.1 POPIS ROZVODNÍ V UO R ČEBÍN	67
8.3.2 POPIS ROZVODNÍ V UO R SOKOLNICE	68
8.3.3 POPIS ROZVODNÍ NAPÁJANÝCH Z UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE	70
9 VÝPOČET PRI SAMOSTATNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE	71
9.1 USTÁLENÝ CHOD	71
9.2 SKRATOVÉ POMERY	76
9.3 ZHODNOTENIE VÝPOČTOV	77
10 VÝPOČET PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE	79
10.1 USTÁLENÝ CHOD	80
10.2 SKRATOVÉ POMERY	82
10.3 ZHODNOTENIE VÝPOČTOV	83
10.4 MIMORIADNE STAVY PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE	84
10.4.1 USTÁLENÝ CHOD PRI VÝPADKU TRANSFORMÁTORA T402 V R 110 KV ČEBÍN	85
10.4.2 USTÁLENÝ CHOD PRI VÝPADKU TRANSFORMÁTORA T402 V R 110 KV SOKOLNICE	87
10.4.3 USTÁLENÝ CHOD PRI VÝPADKU PRÍPOJNICE (A) V R 110 KV KOMÁROV	90
10.4.4 ZHODNOTENIE VÝPOČTOV PRI MIMORIADNYCH STAVOCH	93
11 POROVNANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	95
11.1 POROVNANIE SAMOSTATNEJ A PARALELNEJ PREVÁDZKY UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE	95
11.1.1 USTÁLENÝ CHOD	95
11.1.2 SKRATOVÉ POMERY	98
11.1.3 VYHODNOTENIE	99
11.2 POROVNANIE PARALELNEJ PREVÁDZKY UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE S PARALELNOU PREVÁDZKOU PRI MIMORIADNYCH STAVOCH	100
11.2.1 USTÁLENÝ CHOD	101
11.2.2 VYHODNOTENIE	104
12 NÁVRH PREVÁDZKOVÝCH A TECHNICKÝCH OPATRENÍ	106
13 ZÁVER	107
POUŽITÁ LITERATURA	109
PRÍLOHA (CD)	109

PRÍLOHA A- SCHÉMA ZAPOJENIA PRI SAMOSTATNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE.....	110
PRÍLOHA B- SCHÉMA MOSTÍKOVÉHO ZAPOJENIA PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE	111
PRÍLOHA C- SCHÉMA MOSTÍKOVÉHO ZAPOJENIA PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE (VÝPADOK T402 CNT)	112
PRÍLOHA D- SCHÉMA MOSTÍKOVÉHO ZAPOJENIA PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE (VÝPADOK T402 SO)	113
PRÍLOHA E- SCHÉMA MOSTÍKOVÉHO ZAPOJENIA PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE (VÝPADOK PRÍPOJNICE KV-A).....	114

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Náhradná schéma ES (náhrada admitanciami)</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-2 Fázorový diagram dodávkového uzla siete s indukčným charakterom.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-3 Náhrada prvkov siete medzi uzlami (i) a (j) II- článkom</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-4 Jednoduchý prenos s uvažovaním pozdĺžnej reaktancie.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3-5 Napäťové pomery pri zmene odberu P v uzle j pri stálom odbere Q</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-6 Napäťové pomery pri zmene odberu Q v uzle j pri stálom odbere P</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-1 Druhy skratov</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-2 Časový priebeh súmerného skratového prúdu.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 4-3 Časový priebeh skratového prúdu s maximálne vyvinutou jednosmernou zložkou.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 4-4 Priebeh skratového prúdu elektricky vzdialeného skratu s konštantnou striedavou zložkou.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4-5 Priebeh skratového prúdu elektricky blízkeho skratu s klesajúcou striedavou zložkou ..</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4-6 Zložky skratového prúdu.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4-7 Priebeh súmerného a nesúmerného skratového prúdu.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5-1 Rozloženie nesúmernej sústavy na sústavu súmerných zložiek</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5-2 Súsledná zložka skratovej impedancie $Z_{(1)}$ v mieste skratu F</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 5-3 Spätná zložka skratovej impedancie $Z_{(2)}$ v mieste skratu F</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5-4 Netočivá zložka skratovej impedancie $Z_{(0)}$ v mieste skratu F</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 5-5 Náhradná schéma obvodu súslednej, spätnej a netočivej zložky.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 6-1 Trojvinuťový transformátor</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 7-1 Trojfázový zemný skrat</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 7-2 Náhradná zložková schéma pre trojfázový skrat.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 7-3 Jednofázový skrat</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 7-4 Náhradná zložková schéma pre jednofázový skrat.....</i>	<i>65</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Uvažovanie elektrických parametrov pre príslušné vedenia	23
Tab. 3-2 Pomer $R:X$ vedení vvn a zvn	23
Tab. 3-3 Orientácia výkonov P a Q pri rôznom charaktere prúdu a type uzla.....	27
Tab. 4-1 Pravdepodobnosť výskytu rôznych druhov skratov v sieti.....	37
Tab. 4-2 Napäťový súčiniteľ c podľa ČSN 60909	48
Tab. 9-1 Napäťové pomery v rozvodniach siete 110 kV- samostatná prevádzka.....	72
Tab. 9-2 Transformátory 400/110 kV - samostatná prevádzka.....	73
Tab. 9-3 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - samostatná prevádzka	73
Tab. 9-4 Transformátory 110/vn kV (odber výkonu) - samostatná prevádzka.....	73
Tab. 9-5 Pomery na vedeniach 110 kV- samostatná prevádzka.....	75
Tab. 9-6 Bilancia činných výkonov - samostatná prevádzka	76
Tab. 9-7 Skratové pomery- samostatná prevádzka	77
Tab. 10-1 Napäťové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka	80
Tab. 10-2 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka	80
Tab. 10-3 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka	81
Tab. 10-4 Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka	81
Tab. 10-5 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka	82
Tab. 10-6 Skratové pomery- paralelná prevádzka	82
Tab. 10-7 Napäťové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)	85
Tab. 10-8 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín).....	86
Tab. 10-9 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín).....	86
Tab. 10-10 Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)	86
Tab. 10-11 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)	87
Tab. 10-12 Napäťové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice).....	88
Tab. 10-13 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice).....	88
Tab. 10-14 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice).....	88
Tab. 10-15 Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice)	89
Tab. 10-16 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice).....	90

<i>Tab. 10-17 Napätové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 10-18 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 10-19 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 10-20 Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A).....</i>	<i>91</i>
<i>Tab. 10-21 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A).....</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 11-1 Napätové pomery v rozvodniach siete 110 kV- pri samostatnej a paralelnej prevádzke</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 11-2 Prúdové zaťaženie transformátorov 400/110 kV- pri samostatnej a paralelnej prevádzke</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 11-3 Prúdové zaťaženie transformátorov 110/vn kV (dodávka výkonu)- pri samostatnej a paralelnej prevádzke</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 11-4 Prúdové zaťaženie vedení 110 kV - pri samostatnej a paralelnej prevádzke</i>	<i>97</i>
<i>Tab. 11-5 Celkové straty v sieti 110 kV - pri samostatnej a paralelnej prevádzke</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 11-6 Skratové pomery - pri samostatnej a paralelnej prevádzke.....</i>	<i>98</i>
<i>Tab. 11-7 Napätové pomery v rozvodniach siete 110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov.....</i>	<i>101</i>
<i>Tab. 11-8 Prúdové zaťaženie transformátorov 400/110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 11-9 Prúdové zaťaženie transformátorov 110/vn kV (dodávka výkonu)- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov.....</i>	<i>102</i>
<i>Tab. 11-10 Prúdové zaťaženie vedení 110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov.....</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 11-11 Celkové straty v sieti 110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov.....</i>	<i>104</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
$\overline{abc}, \underline{abc}$	komplexná veličina (značená s pruhom hore alebo dole)	
A	počiatočná hodnota jednosmernej zložky skratového prúdu	A
\bar{a}	operátor natočenia	-
B	kapacitná susceptancia	S
C	kapacita	F
c	napät'ový súčiniteľ	-
d	geometrická stredná vzdialenosť medzi vodičmi	m
E	napätie ekvivalentného napät'ového zdroja	V
$\bar{E}_{1, 2, 0}$	súsledná, spätná a netočivá zložka napätia zdroja	V
e	Eulerovo číslo	-
f	frekvencia	Hz
f	označenie funkcie	-
G	konduktancia	S
$I_{\max V}$	maximálny prúd vedením	A
I_T	vypočítaný prúd tečúci transformátorom	A
I_V	vypočítaný prúd vedením	A
I_b	symetrický vypínací skratový prúd	A
I_k	efektívna hodnota ustáleného skratového prúdu,	A
I'_k	počiatočná efektívna hodnota prechodného skratového prúdu	A
I''_k	počiatočný súmerný rázový skratový prúd (efektívna hodnota)	A
I''_{k1}	počiatočný rázový skratový prúd pri jednofázovom skrate	A
I''_{k3}	počiatočný rázový skratový prúd pri trojfázovom skrate	A
I_{LR}	súmerný záberový prúd asynchrónneho motora	A
I_r	menovitý prúd elektrického zariadenia	A
I_{th}	ekvivalentný otepľovací prúd	A
$\bar{I}_{1, 2, 0}$	všeob. súsledná, spätná a netočivá zložka prúdu	A
$\bar{I}_{a, b, c}$	fázor prúdu vo fáze a, b, c	A
\bar{I}_i	fázor prúdu v i -tom uzle	A
\bar{I}_i^*	komplexne združený prúd v i -tom uzle	A
i	okamžitá veľkosť prúdu	A
i	pomerná hodnota prúdu	-
i_{zT}	percentuálne prúdové zaťaženie transformátora	%
i_{zV}	percentuálne prúdové zaťaženie vedenia	%
$i_{d.c.}(t)$	jednosmerná zložka časového priebehu skratového prúdu	A
i_k	okamžitá hodnota skratového prúdu (nesúmerného)	A
$i_k(t)$	časový priebeh nesúmerného skratového prúdu	A

$i'_k(t)$	prechodná složka časového průběhu skratového proudu	A
$i''_k(t)$	rázová složka časového průběhu skratového proudu	A
$i_{ka}, i_{d.c.}$	okamžitá hodnota jednosměrné (aperiodické) složky skratového proudu	A
i_{ks}	okamžitá hodnota sùmerného striedavého skratového proudu	A
$i_{ks}(t)$	sùmerná složka časového průběhu skratového proudu	A
$i_{ku}(t)$	ustálená složka časového průběhu skratového proudu	A
i_p	nárazový skratový proud	A
\bar{i}_{ij}	fázor vetvového proudu medzi uzlymi i a j	A
J	Jacobián	-
j	imaginárna jednotka	-
K	korekčný súčiniteľ impedancie	-
k	počet uzlov typu (P, Q)	-
L	indukčnosť	H
m	činiteľ pre tepelné účinky jednosmernej složky skratového proudu	-
n	celkový počet uzlov v sieti	-
n	činiteľ pre tepelné účinky striedavej složky skratového proudu	-
n	počet vodičov vo zväzku	-
P	činný výkon	W
P_{dodT}	činný výkon dodávaný transformátorom	W
P_{odbT}	činný výkon odoberaný transformátorom	W
P_V	prenosová schopnosť vedenia	W
P_{krT}	menovité straty nakrátko transformátora	W
$P_{i(\text{zadané})}$	zadaný činný výkon v i -tom uzle	W
P_i	činný výkon v i -tom uzle	W
Q	jalový výkon	VAr
$Q_{i(\text{zadané})}$	zadaný jalový výkon v i -tom uzle	VAr
Q_i	jalový výkon v i -tom uzle	VAr
q_n	menovitý prierez	mm ²
Q_{dodT}	jalový výkon dodávaný transformátorom	VAr
Q_{odbT}	jalový výkon odoberaný transformátorom	VAr
R	rezistancia	Ω
R'	činná rezistancia na jednotku dĺžky	Ω/m
R_{Gf}	fiktívna rezistancia generátora	Ω
r	polomer	m
S	zdanlivý výkon	VA
\bar{S}	komplexný výkon	VA
\bar{S}_i	komplexný výkon v i -tom uzle	VA
$[\bar{S}]$	symetrizačná transformačná matica	-
S''_{k1}	počiatočný rázový skratový výkon pri jednofázovom skrate	VA

S''_{k3}	počiatočný rázový skratový výkon pri trojfázovom skrate	VA
S_r	menovitý zdanlivý výkon elektrického zariadenia	VA
s	pomerná hodnota zdanlivého výkonu	-
S''_{zk1}	percentuálne zaťaženie počiatočným rázovým skratovým výkonom pri jednofázovom skrate	%
S''_{zk3}	percentuálne zaťaženie počiatočným rázovým skratovým výkonom pri trojfázovom skrate	%
$[\bar{T}]$	desymetrizačná transformačná matica	-
T_k	doba trvania skratu	s
t	čas	s
t_r	menovitý prevod transformátora	-
W_C	energia v kapacite	J
W_L	energia v indukčnosti	J
U	efektívna hodnota napätia (absolútna hodnota)	V
U_m	najvyššie napätie zariadenia	V
U_n	združená hodnota menovitého napätia siete	V
U_r	združené hodnota menovitého napätia elektrického zariadenia	V
$\bar{U}_{1, 2, 0}$	všeob. súsledná, spätná a netočivá zložka napätia	V
\bar{U}_F	nesymetrická sústava fázorov napätí	V
\bar{U}_S	symetrická sústava fázorov napätí	V
$\bar{U}_{a, b, c}$	fázor napätia vo fáze a, b, c	V
$\bar{U}_{a1, a2, a0}$	súsledná, spätná a netočivá zložka napätia pre fázu a	V
$\bar{U}_{b1, b2, b0}$	súsledná, spätná a netočivá zložka napätia pre fázu b	V
$\bar{U}_{c1, c2, c0}$	súsledná, spätná a netočivá zložka napätia pre fázu c	V
\bar{U}_j	fázor napätia v j -tom uzle	V
u	okamžitá veľkosť napätia	V
u	pomerná hodnota napätia	-
u_0	okamžitá hodnota napätia na začiatku poruchy	V
u_{kr}	menovité napätie nakrátko transformátora v percentách	%
u_{Rr}	činná zložka menovitého napätia nakrátko transformátora v percentách	%
X	induktívna reaktancia	Ω
X'	reaktancia na jednotku dĺžky	Ω/m
X_d	synchrónna reaktancia generátora	Ω
X'_d	prechodná reaktancia generátora	Ω
X''_d	rázová reaktancia generátora v pozdĺžnej osi	Ω
X''_q	rázová reaktancia generátora v priečnej osi	Ω
x	premenná alebo pomerná reaktancia	-
\bar{Y}	priečna admitancia	S
\bar{Y}_{ii}	diagonálny prvok admitančnej uzlovej matice	S

\bar{Y}_{ij}	mimodiagonálny prvok admitančnej uzlovej matice	S
y	premenná	-
\bar{y}_{ij}	vetvová admitancia medzi uzlami i a j	S
\bar{Z}	pozdĺžna impedancia	Ω
\bar{Z}_k	skratová impedancia	Ω
$\bar{Z}_{c0}, \underline{Z}_{(0)}$	netočivá zložka výslednej impedancie k miestu skratu	Ω
$\bar{Z}_{c1}, \underline{Z}_{(1)}$	súsledná zložka výslednej impedancie k miestu skratu	Ω
$\bar{Z}_{c2}, \underline{Z}_{(2)}$	spättná zložka výslednej impedancie k miestu skratu	Ω
z	pomerná hodnota impedancie	-
ΔU_i	diferencia veľkosti napätí	V
$\Delta S''_{zk1}$	rozdiel medzi zaťažienami počiatočnými rázovými skratovými výkonmi pri jednofázovom skrate	%
$\Delta S''_{zk3}$	rozdiel medzi zaťažienami počiatočnými rázovými skratovými výkonmi pri trojfázovom skrate	%
Δx_i	diferencie koreňov	-
Δy_i	rozdiel zadanej hodnoty pravej strany a odhadu koreňa	-
ΔP	zmena činného výkonu	W
ΔQ	zmena jalového výkonu	VAr
Δi_{zT}	rozdiel medzi prúdovými zaťažienami transformátorov	%
Δi_{zV}	rozdiel medzi prúdovými zaťažienami vedení	%
ΔP_T	straty činného výkonu na transformátore	W
ΔP_V	straty činného výkonu na vedení	W
ΔU	rozdiel medzi absolútnymi hodnotami napätia	V
$\Delta \Sigma \Delta P$	rozdiel medzi celkovými stratami siete	W
ΣP_{dodT}	celkový dodávaný činný výkon transformátormi	W
ΣP_{odbT}	celkový odoberaný činný výkon transformátormi	W
$\Sigma \Delta P$	celkové straty siete	W
$\Sigma \Delta P_T$	celkový straty činného výkonu na transformátoroch	W
$\Delta \delta_i$	diferencia uhlov napätí	°
ΔP_{ij}	straty činného výkonu medzi i -tým a j -tým uzlom	W
ΔQ_{ij}	straty jalového výkonu medzi i -tým a j -tým uzlom	VAr
Φ	funkcia zahrnujúca členy s vyššími mocninami druhej a vyššej derivácie f	-
α	uhol prúdu	°
α	uhol admitancie	°
α	počiatočná fáza fázoru napätia v okamžiku vzniku skratu	°
δ	uhol napätia	°
ε	presnosť výpočtu	%
κ	súčiniteľ nárazového skratového prúdu	-
π	Ludolfovo číslo	-

φ	fázový posun napětia a prúdu	°
μ_0	absolutná permeabilita vákua	H/m
τ'_d, T'_k	tranzitná časová konštanta	s
τ''_d, T''_k	subtranzitná časová konštanta	s
$\tau_s, T_{d.c.}$	časová konštanta jednosmernej zložky skratového prúdu	s
φ_k	uhol impedancie obvodu skratového prúdu	°
ω	uhlová rýchlosť	rad.s ⁻¹

Skratky

APG	prevádzkovateľ PS v Rakúsku
ČEPS	prevádzkovateľ PS v Českej republika
DS	distribučná sústava
ES	elektrizačná sústava
nn	nízke napätie
PpS	podporné služby
PS	prenosová sústava
R	rozvodňa
SEPS	prevádzkovateľ PS v Slovenskej republike
UO	uzlová oblasť
vn	vysoké napätie
vvn	veľmi vysoké napätie
zvn	zvlášť vysoké napätie
AD	Adamov
BNP	Brno- Příkop
BOB	Brno-Bohunice
CNT	Čebín
CML	Brno- elektrárň Červený Mlýn
KPO	Brno- Královopolská
MEY	Brno- Medlánky
MOB	Brno-Moravany
BNC	Brno – Černovice
BU	Bučovice
DK	Dukovany- vlastná spotreba
MED	Modřice u Brna- ČD
MQ	Mokrá- Cementárna
SLB	Slavkov u Brna
VY	Vyškov
ZBB	Brno- Zbrojovka
ZET	Brno- Zetor

BNT	Brno-Teplárna
HUV	Brno-Husovice
KV	Brno-Komárov
LI	Brno-Líšeň
VMA	Brno-Maloměřice, Výtopna
OS	Oslavany
SO	Sokolnice

Dolné indexy

(0) príp. 0	netočivá zložka
(1) príp. 1	súsledná zložka
(2) príp. 2	spätaná zložka
a, b, c	vodiče (fázy) trojfázovej striedavej sústavy
c	celková (výsledná impedancia)
d.c.	jednosmerný prúd
f	fiktívny
i	označenie i -tého uzla
j	označenie j -tého uzla
k príp. k_3	trojfázový skrat
k_1	jednofázový skrat
L	vedenie, vodič
LR	zabrzdený motor
M	asynchrónny motor
n	menovitá hodnota
p	prepočítaná hodnota (impedancie)
Q	bod pripojenia sieťového napájača
r	menovitá hodnota zariadenia
S	elektrárenský blok
T	transformátor
V	vzťažné (napätie, prúd, výkon) alebo vedenie
z	zaťaženie

Horné indexy

'	prechodná (skratová) hodnota alebo rezistencia (reaktancia) na jednotku dĺžky
''	počiatočná rázová (skratová) hodnota
k	k -tá iterácia

1 ÚVOD

Elektrizačná sústava (ES) je podsystem elektroenergetiky a je to vzájomne prepojený súbor zariadení podieľajúcich sa na výrobe, prenose, transformácii, rozvode (distribúcii) a spotrebe elektrickej energie. Procesy spojené s výrobou cez prenos a rozvod až po spotrebu sú veľmi dynamické. A to z toho dôvodu, že množstvo vyrobenej energie musí v každom okamžiku zodpovedať energii spotrebovanej ak neuvažujeme straty.

Zabezpečenie bezporuchového stavu a riadenie ES ako celku vrátane medzinárodnej spolupráce prináša radu problémov, ktoré je potreba riešiť komplexne. Pri uvážení skutočne dobrého výpočtu jednotlivých úloh chápaných oddelene, sa v rámci prevádzky ES môže výpočet ukázať technicky aj ekonomicky nevyhovujúci. Na druhej strane je nutné si uvedomiť, že v takto komplexnom pojatí ES nie je jednoduché zostaviť príslušný matematický model, ktorý by verne zobrazoval všetky väzby v rámci sústavy, kde by sme boli schopný dodať odpovedajúce a presné vstupné informácie a tak získať optimálne riešenie prevádzky. Ide o značne zložitý problém a preto sme nútený sa obmedziť na čiastkové riešenie jednotlivých problémov chodu ES, ktoré sme schopný zvládnuť v primeranom čase prípravy vstupných dát a doby trvania výpočtu.

Základným prevádzkovým stavom každého dynamického systému je rovnovážny stav, charakterizovaný nemennosťou stavových veličín systému. Odpovedajúcim prevádzkovým stavom ES je jej ustálený chod. Môžeme si položiť otázku, či je ustálený chod elektrizačnej sústavy v skutočnosti rovnovážny stav systému, ak sa predsa okamžité hodnoty striedavých napätí a prúdov v čase menia. Dôvodom, prečo môžeme i za týchto okolností odpovedať kladne, je skutočnosť, že všetky základné prevádzkové parametre ES, ktoré určujú všetky fyzikálne procesy prebiehajúce v sústave, ako je rozdeľovanie energie, oteplenie článkov atd., sa v ustálenom chode nemenia. Sú to napr. efektívne hodnoty prúdov a napätí, stredné hodnoty výkonov, momenty na hriadeli atd. Ustálený chod ES matematicky popisujeme sústavou algebrických nelineárnych rovníc, ktoré vzhľadom k rozsiahlosti ES riešime za pomoci výpočtovej techniky.

Akákoľvek zmena týchto parametrov má za následok narušenie ustáleného chodu a vznik prechodného deja. Počas prechodného javu niektorý z prevádzkových parametrov narastá nad všetky medze a dochádza k narušeniu stability chodu ES. Po odznení prechodného deja prechádza ES do nového ustáleného chodu. Rýchlosť prechodného deja je rozhodujúca z toho hľadiska, že akým spôsobom budeme modelovať ES a to ako dynamický systém so sústredenými alebo s rozloženými parametrami.

Skrat patrí medzi stredne rýchle prechodné javy a je najčastejšou príčinou vzniku elektromagnetických prechodných javov v ES. Pod pojmom skrat rozumieme nechcené spojenie medzi fázami navzájom, medzi fázami a zemou, ktoré vedie ku skráteniu elektrických obvodov a tým ku vzniku nežiaducich skratových prúdov. V mieste skratu dochádza k poklesu napätia a úbytky napätia vzrastajú od miesta skratu smerom ku zdrojom, a preto pokles napätia sa môže prejaviť prakticky v celej ES. Nepriaznivé účinky skratových porúch sú sprevádzané hlavne tepelným a mechanickým namáhaním postihnutých prvkov ES. Aby skratové prúdy nevedli k havárii elektrických zariadení cez, ktoré prechádzajú, je nutné všetky prvky ES dimenzovať tak, aby účinkom skratových prúdov bezpečne odolali.

2 CIEĽ PRÁCE

Hlavným cieľom práce a tiež praktickou časťou práce je návrh tzv. mostíkového zapojenia použitého pre paralelnú prevádzku uzlovej oblasti (UO) rozvodni Čebín a rozvodni Sokolnice. Pri mostíkovom zapojení transformátora T402 v R 110 kV Čebín a transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice, dôjde ku zvýšeniu spoľahlivosti dodávky elektrickej energie v danej oblasti, čo je hlavný účel tohto zapojenia.

Pre súčasnú (samostatnú) prevádzku UO rozvodni Čebín a rozvodni Sokolnice, pre navrhnuté mostíkové zapojenie a pre mostíkové zapojenie v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov (vybrané výpadky prvkov siete 110 kV) sú prevedené výpočty ustáleného chodu a skratových pomerov. Následne sú výsledky výpočtov vyhodnotené a porovnané dve varianty zapojenia (súčasná a mostíková). Pre výpočty ustáleného chodu sú vyhodnocované a kontrolované napäťové pomery v rozvodniach, zaťaženie transformátorov (400/110 kV a 110/vn kV), zaťaženie vedení a bilancia činných výkonov. U skratových výpočtov sú vyhodnocované a kontrolované skratové odolnosti rozvodní. V prípade, že niektoré prvky siete 110 kV sú preťažené, nutné technické opatrenia sú navrhnuté. Nakoniec sú zhodnotené výhody respektíve nevýhody samostatnej a paralelnej prevádzky UO rozvodni Čebín a rozvodni Sokolnice.

Výpočet ustáleného chodu a skratových pomerov je realizovaný pomocou výpočtového programu a potrebná teória k jednotlivým výpočtom je popísaná v teoretickej časti práce. Sú tu popísané iteračné metódy (Newtonova a Gauss- Seidlova) vhodné pre výpočet ustáleného chodu. Ďalej sú tu popísané metódy pre výpočet skratových pomerov v sieťach vvn a zvn podľa platných noriem.

3 USTÁLENÝ CHOD V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE

Ustálený chod elektrizačnej sústavy (ES) je taký stav, pri ktorom nastáva rovnováha všetkých veličín charakterizujúcich jej chod (napätia, prúdy, výkony a mechanické momenty v rotačných zdrojoch a spotrebičoch). Pri tomto prevádzkovom stave je možné považovať premenné parametre ES za konštantné. Tento prevádzkový stav je taký, pri ktorom v zariadeniach neprebiehajú krátkodobé prechodné deje súvisiace s poruchami (skratovými), s údermi blesku do vedenia alebo jeho blízkosti, pripojovaním a odpojovaním vedení, zdrojov, kompenzačných prostriedkov (kondenzátory a tlmivky), prepínaním odbočiek vinutia regulačných transformátorov za prevádzky apod. V skutočnosti ustálený chod neexistuje preto, že dochádza k neustálej zmene počtu a zaťaženia spotrebiteľov ale i zdrojov a teda ku zmene efektívnych hodnôt prúdu a napätia. Tieto zmeny sú však z časového hľadiska pomalé a preto sa neuvažujú.

Pre riadenie prevádzky a tiež pri návrhu ďalšieho rozvoja ES je potrebná znalosť činných a jalových výkonov, prúdov a napäťových pomerov na jednotlivých prvkoch a v uzloch ES. Hodnoty vypočítané v ustálenom chode slúžia ako vstupné údaje pri riešení prechodných javov (skraty, statická a dynamická stabilita) a pri rade optimalizačných úloh ako je hospodárne rozdeľovanie výroby činných a jalových výkonov, optimálna regulácia napätia, hodnotenie spoľahlivosti ES a pod. Riešenie ustáleného chodu sa dopĺňa kontrolou, či nie je niektorý prenosový prvok preťažený. Výpočet sa prevádzka väčšinou pre maximálne a minimálne zaťaženie siete.

V praxi sú dodávky a odbery zadávané činnými a jalovými výkonmi. To má za následok, že chod siete nie je možné popísať sústavou lineárnych rovníc. Takže pre presný výpočet ustáleného chodu je nutné použiť sústavu nelineárnych rovníc, ktoré sa riešia niektorou z iteračných metód. Výpočet iteračnými metódami je časovo náročný a konvergencia výpočtu nie je zaručená. Pre výpočty ustáleného chodu, kde nie je požadovaná veľká presnosť, sa úloha linearizuje. Sú to napr. výpočty pre dlhodobé plánovanie rozvoja ES alebo výpočty spoľahlivosti. Výkony zadané v jednotlivých uzloch sa podelia strednou hodnotou očakávaného napätia v uzloch siete alebo menovitým napätím a tým sa získa prúd. Pre zostavenie základných lineárnych rovníc ustáleného chodu je možné použiť niektorú metódu riešenia lineárnych obvodov ako sú metóda uzlových napätí (MUN) alebo metóda slučkových prúdov (MSP). V praxi sa najčastejšie používa metóda uzlových napätí kvôli jednoduchému algoritmu výpočtu vlastných a vzájomných uzlových admitancií a jednoduchému prepojeniu jednotlivých vetví siete. Predpokladá sa, že ES pozostáva zo súmerných zdrojov, súmerných prenosových prvkov a odberov. Potom je možné sústavu riešiť ako jednofázovú sieť.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [1] [2] [3] [4].

3.1 Zjednodušujúce predpoklady

Ustálený chod ES v sieťach vvn a zvn sa rieši pri uvažovaní nasledujúcich zjednodušujúcich predpokladov:

1. Parametre vedenia prípadne transformátorov a ostatných prvkov sú konštanty nezávislé na prúde alebo napätí.
2. Napätie zdrojov a prúdy odberov sú harmonickými funkciami času s frekvenciou 50 Hz.
3. U trojfázových sústav predpokladáme symetriu prvkov v parametroch a u odberov a zdrojov v prúdoch a napätiach.

Rozľahlosť sietí vvn a zvn a veľkosti napätí majú za následok, že prúdy v priečnom smere prenosu (konduktanciami a kapacitami vodičov) sú rádovo porovnateľné s prúdmi odberov a majú teda podstatný vplyv na straty výkonu a úbytok napätia. Pri riešení ustáleného chodu je teda nutné uvažovať pozdĺžnu impedanciu \bar{Z} a priečnu admitanciu \bar{Y} .

$$\bar{Z} = R + X = R + j \cdot \omega \cdot L \quad (3.1)$$

$$\bar{Y} = G + B = G + j \cdot \omega \cdot C$$

kde R je rezistancia vedenia,
 X je indukčná reaktancia vedenia,
 L je indukčnosť vedenia,
 G je konduktancia vedenia,
 B je kapacitná susceptancia vedenia,
 C je kapacita vedenia.

Pre riešenie ustáleného chodu sa zvyčajne pri vedeniach príslušného menovitého napätia uvažujú iba elektrické parametre podľa Tab. 3-1 [1 časť 2 str.27]. Parametre v zátvorkách je potrebné uvažovať pri presnejších výpočtoch.

Tab. 3-1 Uvažovanie elektrických parametrov pre príslušné vedenia

vedenie	menovité napätie (kV)	elektrické parametre vedenia	
		vonkajšie vedenie	káblové vedenie
nn	0,4	$R,(L)$	$R,(L)$
vn	6,10,22,35	$R,L,(C)$	$R,(L),C$
vvn	110,220	$R,L,C,(G)$	$R,(L),C,G$
zvn	400	R,L,C,G	-

V sieťach vvn je možné zanedbať rezistanciu vedenia pri pomere $R: X > 1: 3$. Tab. 3-2 [1 časť 3 str.72] zobrazuje pomery $R: X$ vo vedeniach vvn a zvn.

Tab. 3-2 Pomer $R:X$ vedení vvn a zvn

Vedenie	Pomer $R: X$
110 kV	1:2 až 1:10
220 kV	1:6 až 1:10
400 kV	1:11 až 1:13

Text kapitoly bol vytvorený podľa [1] [2].

3.2 Klasifikácia uzlov a podmienky určítosti chodu siete

Ustálený chod v ES je jednoznačne určený znalosťou týchto veličín:

- absolútna hodnota napätia U ,
- uhol napätia δ ,

- činný výkon P ,
- jalový výkon Q .

Obyčajne dve z týchto veličín sú v uzle zadané a chýbajúce sa získajú riešením ustáleného chodu ES. Podľa toho, ktoré uzlové veličiny sú zadané, delíme uzly na 3 základné triedy:

1. **Trieda (U, δ)** – bilanční uzol. Tento uzol označujeme v náhradnej schéme číslom 1, v ktorom je zadané napätie a jeho uhol. Neznáme v tomto type uzla sú činný a jalový výkon. Tento uzol má za úlohu hradiť prípadnú nerovnováhu v bilancii uzlových výkonov a navyiac musí hradiť straty činného a jalového výkonu v sieti, ktoré sú známe až po ukončení výpočtu a určení výkonovej bilancie. Obyčajne za bilančný uzol volíme jeden zo zdrojov o dostatočnom výkone.
2. **Trieda (P, Q)** – napájacie, respektíve odberové uzly. V týchto uzloch je zadaný činný a jalový výkon. Dodávku a odber rozlišujeme znamienkami \pm . Riešením ustáleného chodu získame napätie a jeho uhol.
3. **Trieda (U, P)** - regulačné alebo kompenzačné uzly. V týchto uzloch je zadaný činný výkon a absolútna hodnota napätia. Riešením ustáleného chodu získavame jalový výkon (odoberaný alebo dodávaný), potrebný na dodržanie zadanej hodnoty napätia v uzle a uhol tohto napätia.

Pri praktických výpočtoch ustáleného chodu v ES obyčajne zadávame:

- jeden bilančný uzol (U, δ),
- k uzlov (P, Q),
- $(n-k-1)$ uzlov (U, P), kde n je celkový počet uzlov v sieti,

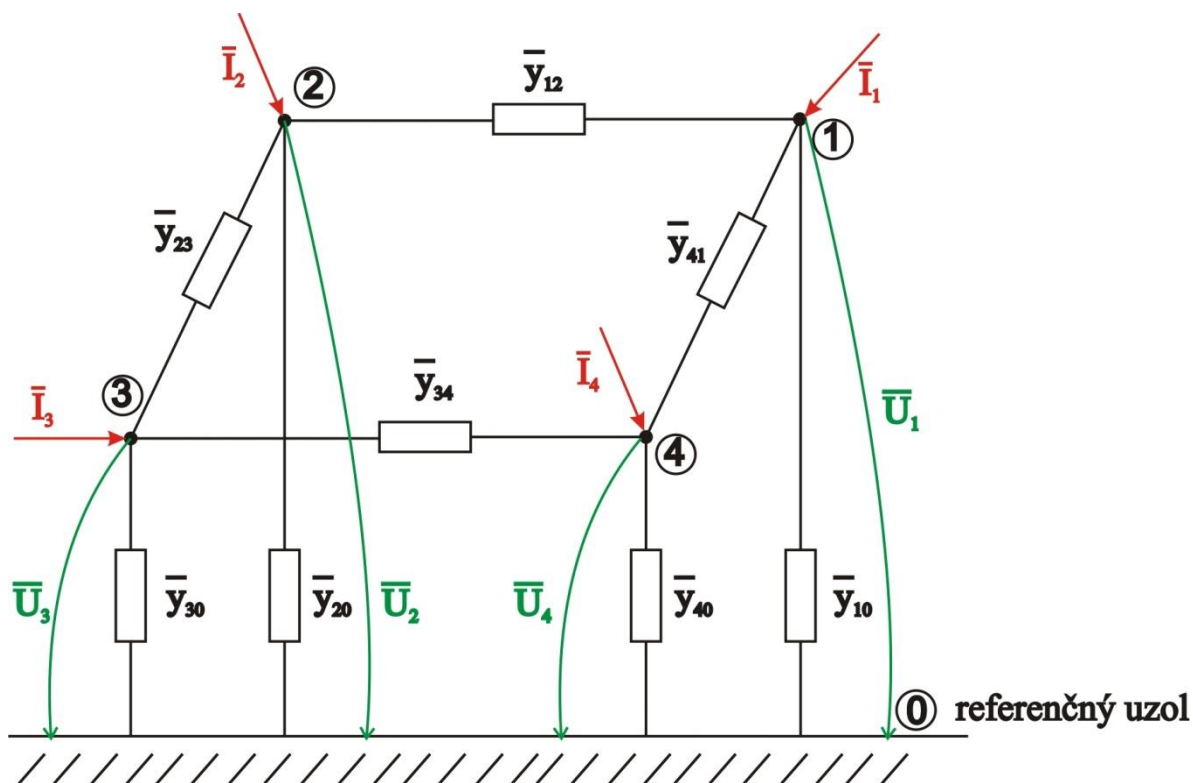
takže pre riešenie máme k dispozícii $2(n-1)$ rovníc popisujúcich ustálený chod.

Rýchlosť konvergencie zvolenej iteračnej metódy závisí na konfigurácii siete a voľbe bilančného uzla, kde by mal byť k dispozícii zdroj, ktorý hradí výkonové straty v sieti a prípadnú nerovnováhu v bilancii dodávok a odberov. Ďalej tiež závisí na počte a umiestnení uzlov triedy (P, Q) a (U, P). Bilančný uzol je vhodné umiestňovať do „elektrického stredu“ siete. Tejto podmienke vyhovuje obvykle uzol majúci najväčšiu vlastnú admitanciu- najväčší diagonálny prvok v admitančnej uzlovej matici. Nie vždy je v tomto uzle k dispozícii „voľný generátor“. Je možné voliť generátor na krytie strát i v inom uzle ako v ktorom volíme pevné- zadané napätie a uhol. V tomto prípade je nutné rozšíriť uvedenú základnú klasifikáciu uzlov a bližšie špecifikovať podmienky určitého chodu siete. Ďalej môžeme krytie strát v sieti rozdeliť určitým podielom na všetky generátory pracujúce v sústave. To však komplikuje matematické riešenie úlohy a preto v ďalšom budeme uvažovať, že sieť obsahuje len uzly základných tried (U, δ), (P, Q) a (U, P).

Text kapitoly bol vytvorený podľa [1] [3].

3.3 Výpočet ustáleného chodu ako lineárna úloha

Pri riešení ustáleného chodu ako lineárnej úlohy predpokladáme, že sú zadané odoberané a dodávané prúdy do uzlov siete. Prvky ES sú zadané ich pozdĺžnymi a priečnymi admitanciami. Prenosové a rozvodné vedenia sa najčastejšie nahradzujú článkom typu Π , transformátory Γ alebo Π článkom. Priečne admitancie sú spojené medzi príslušným uzolom siete a uzolom referenčným – „zem“ o nulovom potenciále. Predpokladáme, že parametre všetkých prvkov sú prepočítané na jedno vzťahné napätie a teda ES môžeme nahradiť galvanickým spojením prvkov napr. podľa Obr. 3-1 [3 str.11].



Obr. 3-1 Náhradná schéma ES (náhrada admitanciami)

Sieť na Obr. 3-1 môžeme matematicky popísať sústavou rovníc pri použití metódy uzlových napätí

$$\begin{array}{l} 1. \text{ uzol:} \\ 2. \text{ uzol:} \\ 3. \text{ uzol:} \\ 4. \text{ uzol:} \end{array} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

kde $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3, \bar{U}_4$ sú neznáme uzlové napätia,

$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$ zadané uzlové prúdy, kde znamienko (+) značí dodávku, (-) odber.

Sústavu rovníc (3.2) môžeme skrátene napísať v maticovom tvare

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

kde prvky admitančnej uzlovej matice $[\bar{Y}]$ sú zostavené podľa algoritmu vyplývajúceho z II. Kirchhoffova zákona takto:

- i – tý diagonálny prvok $[\bar{Y}_{ii}]$ je tvorený súčtom admitancií všetkých vetiev incidenčných s i -tým uzlom,
- mimodiagonálny prvok $[\bar{Y}_{ij}] (i \neq j)$ je tvorený záporne vzatým súčtom admitancií všetkých vetiev spojujúcich i –tý uzol s j -tým uzlom.

Pritom predpokladáme, že vetvy nemajú vzájomné indukčné väzby. Takže napr. pre diagonálny a mimodiagonálny prvok pre sieť z Obr. 3-1 platí

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

Pre rozlíšenie značíme prvky admitančnej uzlovej matice a uzlové veličiny veľkými písmenami a admitancie jednotlivých vetví a vetvové prúdy malými písmenami.

Sústavu rovníc (3.2) môžeme zapísať v tvare

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

kde n je počet uzlov v sieti mimo uzol referenčný, ktorému pre zjednodušenie priradíme pevné číslo 0.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [3].

3.3.1 Eliminácia bilančného uzla

Sústava rovníc (3.2) zostavená podľa II. Kirchhoffova zákona pre sieť na Obr. 3-1 je nezávislá, takže matica $[\bar{Y}]$ je regulárna. Uzol nazývaný bilančný, bude hradiť neznáme prúdy tečúce v priečných vetvách a bude vyrovnávať bilanciu medzi dodávkami a odbermi. Aby v rovniciach (3.2) až (3.5) bol rovnaký počet neznámych ako je počet rovníc, je nutné v bilančnom uzle zadať známe napätie. Pre formálne zjednodušenie ďalšieho zápisu priradíme bilančnému uzlu pevné číslo 1.

Keďže v bilančnom uzle máme zadané napätie \bar{U}_1 môžeme sústavu rovníc (3.2) prepísať do tvaru

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

a analogicky rovnicu (3.5)

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

Po vypočítaní neznámych napätí $\bar{U}_2, \bar{U}_3, \dots, \bar{U}_n$, neznámy prúd v bilančnom uzle dopočítame pri určení prúdov v jednotlivých vetvách siete. Vypustenie rovnice pre bilančný uzol vo vzťahu (3.6) a (3.7) nazývame **elimináciou bilančného uzla**. Sústavu rovníc (3.7) riešime napr. eliminačnou metódou, alebo iteračnými metódami či priečnou inverziou admitančnej uzlovej matice rádu $(n-1)$. Po výpočte uzlových napätí určíme rozdelenie prúdov vo vetvách náhradnej schémy podľa

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

kde \bar{i}_{pq} je prúd tečúci vetvou o admitancii \bar{y}_{pq} z uzlu p do uzlu q .

Text kapitoly bol vytvorený podľa [3].

3.4 Výpočet ustáleného chodu ako nelineárna úloha

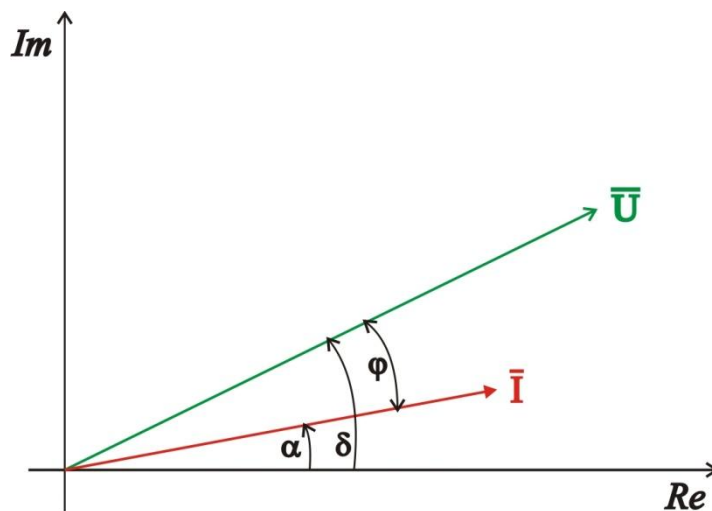
V prípade, že v uzle je zadaný činný a jalový výkon, potom pre i -tý uzol platí

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

kde \bar{I}_i^* je komplexne združený prúd k prúdu \bar{I}_i .

Znamienko u činného a jalového výkonu podľa rovnice (3.9) je vysvetlené na fázorovom diagrame napätia a prúdu na Obr. 3-2 [3 str.13] v uzle so zdrojom. Pretože ide o zdroj, činný výkon je dodávaný do siete. Fázorový diagram ukazuje výrobu činného a jalového výkonu (prúdu) s induktívnym fázovým posunom. Potom dodávaný zdanlivý výkon do uzla siete je

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



Obr. 3-2 Fázorový diagram dodávkového uzla siete s induktívnym charakterom

kde fázový posun napätia a prúdu $\varphi = \delta - \alpha$. Z toho vyplýva, že keď je induktívny posun prúdu voči napätiu (prúd je oneskorený za napätím) potom je $\varphi > 0, P > 0$ a $Q > 0$.

V prípade odberu uvažujeme záporný prúd. Tým pádom sa mení znamienko u činného a jalového výkonu v porovnaní s dodávkovým uzlom. Prehľad znamienok u činného a jalového výkonu pri rôznom charaktere prúdu a type uzlu poskytuje Tab. 3-3 [3 str.14], pri uvažovanej orientácii toku výkonu (prúdu) smerom do uzlu.

Tab. 3-3 Orientácia výkonov P a Q pri rôznom charaktere prúdu a type uzla

Uzol \ Posun prúdu	Zdroj $P > 0$	Odber $P < 0$
induktívny $\varphi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
kapacitný $\varphi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$

Z rovnice (3.9) pre prúd platí

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

po následnom dosadení do (3.7) dostaneme

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

V rovniciach (3.7) a (3.12) bola uskutočnená eliminácia bilančného uzla, ktorá je spojená s voľbou napätia \bar{U}_1 . Bilančný uzol hradí rozdiel medzi dodávkami a odbermi a ešte straty činného a jalového výkonu.

Vzhľadom k tomu, že sú zadané výkony v uzloch siete (dodávky a odbery), napätie bilančného uzla a admitancie \bar{Y}_{ij} , vedie výpočet neznámych napätí k riešeniu sústavy nelineárnych (kvadratických) rovníc (3.12). Na riešenie sústavy rovníc (3.12) sa najčastejšie používajú iteračné

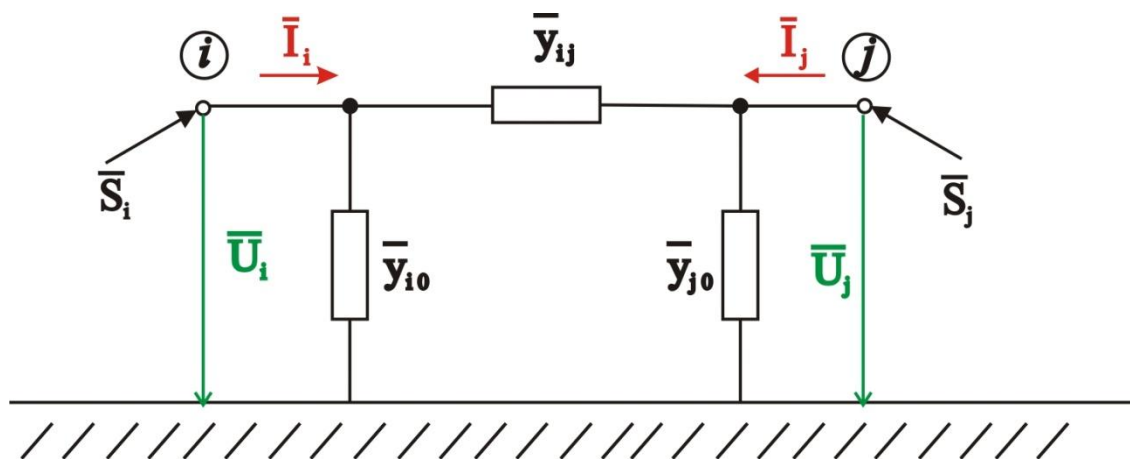
metódy a to Gauss-Seidlova a Newtonova iteračná metóda. Po výpočte hľadaných uzlových napätí sa určia toky výkonov v sieti a následne výkonové straty.

Pokiaľ nahradíme jednotlivé prvky siete Π -článkom vid. Obr.3-3 [3 str.14], potom prúd tečúci do uzli i je

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

a výkon

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



Obr. 3-3 Náhrada prvkov siete medzi uzlami (i) a (j) Π -článkom

Podľa dohody ak je $P_i > 0$ potom činný výkon tečie smerom do uzla i . Znamienko u jalového výkonu potom určuje, či ide výkon induktívny alebo kapacitný.

Analogicky prúd a výkon tečúci do uzla j

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

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

Straty činného a jalového výkonu v náhradnom článku typu Π na Obr.3-3 sú algebraickým súčtom výkonov tečúcich do uzlov i, j

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

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

V týchto úvahách je trojfázová sieť nahradená jednofázovým ekvivalentnom, takže všetky rovnice platia pre fázové hodnoty napätia a výkon prenášaný jednou fázou.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [3].

3.4.1 Výpočet ustáleného chodu Gauss – Seidlovou metódou

Gauss- Seidlova metóda je charakterizovaná jednoduchým algoritmom výpočtu a potrebuje oproti iným iteračným metódam pomerne krátku dobu výpočtu na jeden iteračný krok. Nevýhoda tejto metódy je relatívne pomalá konvergencia a to najmä u málo zauzlených sietí. Je nutné voliť vysokú presnosť výpočtu inak môže dôjsť k tomu, že nepresne vypočítané napätia spôsobia značnú chybu v tokoch výkonov. Tieto nevýhody čiastočne odstraňuje Newtonova iteračná metóda.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [3].

3.4.2 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iteračnou metódou

Newtonová metóda má tú výhodu, že veľmi rýchlo konverguje a väčšinou potrebný počet iterácií pri požadovanej presnosti ε závisí málo na veľkosti riešenej siete. Nevýhodou tejto metódy je potreba dlhšieho času na výpočet jednej iterácie v porovnaní s Gauss- Seidlovou metódou.

Riešená sústava nelineárnych rovníc má tvar

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

Po prvé uskutočnime odhad koreňov v nulej iterácii $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Odhadnuté hodnoty koreňov sa líšia od ich presnej hodnoty o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Takže presná hodnota koreňov je $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n$.

Teraz môžeme sústavu rovníc (3.17) prepísať do nasledujúceho tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (3.18)$$

Každú rovnicu zo sústavy (3.18) je možné rozpísať v Taylorovú radu funkcie viac premenných v bode $x_i^{(0)}$. Napr. pre prvú rovnicu z (3.18) platí

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi_1 = y_1 \quad (3.19)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_i} \right|_0$ je parciálna derivácia v bode $x_i^{(0)}$ a ϕ_1 zahrňuje členy s vyššími mocninami $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ a druhé a vyššie derivácie funkcie f_1 .

Ak sú odhady koreňov blízke presnej hodnote, potom sú diferencie Δx_i malé a všetky členy s vyššími mocninami Δx_i je možné zanedbať, takže $\phi_1 \rightarrow 0$.

Ak označíme výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$ potom rovnicu (3.19) môžeme upraviť na tvar

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \quad (3.20)$$

kde $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdiel zadanej hodnoty pravej strany y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$ určenej dosadením odhadu koreňov do rovnice (3.19).

Týmto spôsobom je možné upraviť zostávajúce rovnice sústavy (3.18), čím získame sústavu lineárnych rovníc pre výpočet neznámych diferencií $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Sústavu môžeme zapísať v maticovom tvare a to nasledovne

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Rovnica (3.21) skrátene

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \quad (3.22)$$

kde $[J]$ je matica parciálnych derivácií tzv. Jacobián.

Zo sústavy rovníc (3.21) respektíve (3.22) vypočítame vektor hľadaných diferencií $[\Delta x]$ a určíme nové, opravené odhady koreňov

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \quad \text{pre } i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.23)$$

ktoré použijeme ako vstup v ďalšej iterácii. Hodnoty diferencií Δx_i nie sú úplne presné preto, že sme v Taylorovom rozvoji uvažovali len prvé derivácie.

Iteračný proces upresňovania koreňov sústavy rovníc (3.17) môžeme zapísať úpravou rovníc (3.22) a (3.23) do iteračného tvaru

$$[\Delta x^{(k)}] = [\Delta J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}] \quad (3.24)$$

a potom

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)} \quad (3.25)$$

kde index k určuje k -tu iteráciu.

Predpokladáme existenciu spojitej derivácie $\partial f_i / \partial x_j$ pre $i, j = 1, 2, \dots, n$, jednoznačnosť riešenia sústavy rovníc (3.21) a konvergenciu iteračného postupu, čo v praktických úlohách výpočtu ustáleného chodu býva väčšinou zaručené.

Teraz aplikujeme Newtonovú iteračnú metódu na rovnicu (3.12) popisujúcu ustálený chod siete. Rovnice prepíšeme do tvaru podľa (3.17)

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \cdot \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad \text{pre } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.26)$$

Pravú stranu rovnice (3.26) rozpíšeme na reálnu a imaginárnu časť. Najprv si fázor napätia a komplexné admitancie zapíšeme v polárnom tvare

$$\bar{U}_i = \bar{U}_i \angle \delta_i, \quad \bar{U}_i^* = \bar{U}_i \angle -\delta_i, \quad \bar{Y}_{ij} = \bar{Y}_{ij} \angle \alpha_{ij} \quad (3.27)$$

Dosadením polárneho tvaru napätia a admitancie do (3.26) dostávame po úprave a pri vedomosti, že $\cos(-x) = \cos(x)$ a $\sin(-x) = -\sin(x)$

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

pre $i = 2, 3, \dots, n$ (3.28)

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

čo je sústava $2(n-1)$ rovníc pre $(n-1)$ neznámych napätí a ich uhlov. Je tu predpoklad, že vo všetkých uzloch siete poznáme dodávky a odbery činného a jalového výkonu okrem bilančného uzlu 1, kde je zadané napätie U_1 a jeho uhol δ_1 (obvykle sa volí $\delta_1 = 0$).

Pre iteračný výpočet diferencií ΔU_i a $\Delta \delta_i$ podľa (3.21) pri aplikácii rovníc (3.28) dostávame sústavu

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2}, \frac{\partial P_2}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}, \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2}, \frac{\partial P_3}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2}, \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2}, \frac{\partial P_n}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}, \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial U_2}, \frac{\partial Q_2}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}, \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2}, \frac{\partial Q_3}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2}, \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2}, \frac{\partial Q_n}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}, \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \hline \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

V sústave rovníc (3.29) ΔU_i nereprezentuje úbytok napätia, ale diferenciu odhadu uzlového napätia od presnej hodnoty koreňov rovníc (3.28).

Sústava rovníc (3.29) môžeme skrátene zapísať v tvare

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

Vypočítame prvky Jacobiánu (parciálne derivácie) derivovaním rovníc (3.28) podľa jednotlivých premenných.

a) Prvky matice $\left[\frac{\partial P}{\partial U}\right]$

- diagonálne prvky

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

- mimodiagonálne prvky

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

b) Prvky matice $\left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right]$

- diagonálne prvky

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

- mimodiagonálne prvky

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

c) Prvky matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial U}\right]$

- diagonálne prvky

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

- mimodiagonálne prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad \text{pre } i \neq j \quad (3.36)$$

d) Prvky matice $\left[\frac{\partial Q}{\partial \delta}\right]$

- diagonálne prvky

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

- mimodiagonálne prvky

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

Algoritmus Newtonovej iteračnej metódy:

1. V nultom iteračnom kroku ($k=0$) sa odhadne napätie v uzloch siete a ich uhly (obvykle $\bar{U}_i^{(0)} = \bar{U}_1$ pre $i = 2, 3, \dots, n$).

2. Dosadením napätí do rovníc (3.28) vypočítame diferencie výkonov

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

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

3. Vypočítame prvky Jacobiánu a to dosadením odhadnutých napätí v nultom iteračnom kroku do rovníc (3.31) až (3.38).

4. Vyriešením sústavy lineárnych rovníc (3.29) získame diferencie $\Delta U_i^{(0)}$ a $\Delta \delta_i^{(0)}$ v nultom iteračnom kroku.

5. Vypočítame opravené hodnoty napätia a ich uhlov na konci prvého iteračného kroku

$$U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}$$

$$\delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)} \text{ pre } i = 2, 3, \dots, n.$$

6. Korigovanými napätiami a ich uhlami nahradíme pôvodné odhady ich veľkosti a opakujeme iteračný výpočet od bodu 2 po bod 6. Index (k) nadobúda hodnoty (0), (1), (2), ... podľa iteračných krokov. Výpočet sa považuje za ukončený ak je splnená nasledujúca podmienka

$$|P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

pre $i = 2, 3, \dots, n$

$$|Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$$

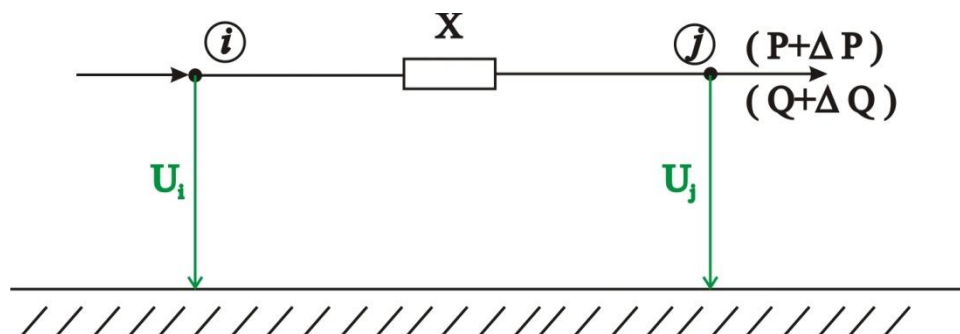
kde ε je požadovaná presnosť rozdielu zadaných výkonov a výkonov vypočítaných dosadením vypočítaných napätí a ich uhlov do rovnice (3.28).

Pre výpočty s menšou presnosťou je možné použiť nasledujúce zjednodušenia. Podstata tohto zjednodušenia je v tom, že v sieťach s prevažujúcou pozdĺžnou reaktanciou, pri malých zmenách absolútnej veľkosti napätia, sa činné výkony v uzloch menia nepatrne. Podobne pri malých zmenách uhlov uzlových napätí sa menia jalové výkony zanedbateľne. Tieto zmeny sa prejavujú v rovnici (3.30) nasledovne

$$\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] = [0] \quad ; \quad \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] = [0] \quad (3.39)$$

a následne rovnica (3.30) prejde na zjednodušený tvar vedúci k rýchlemu výpočtu.

$$[\Delta P] = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot \Delta \delta \quad ; \quad [\Delta Q] = \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \cdot \Delta U \quad (3.40)$$

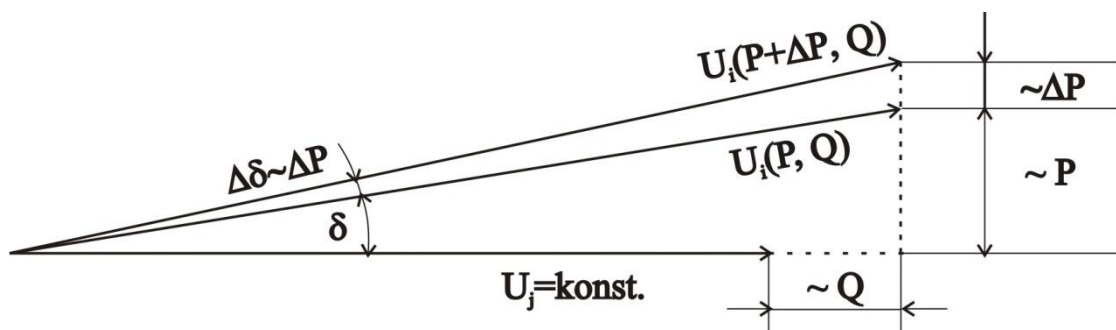


Obr. 3-4 Jednoduchý prenos s uvažovaním pozdĺžnej reaktancie

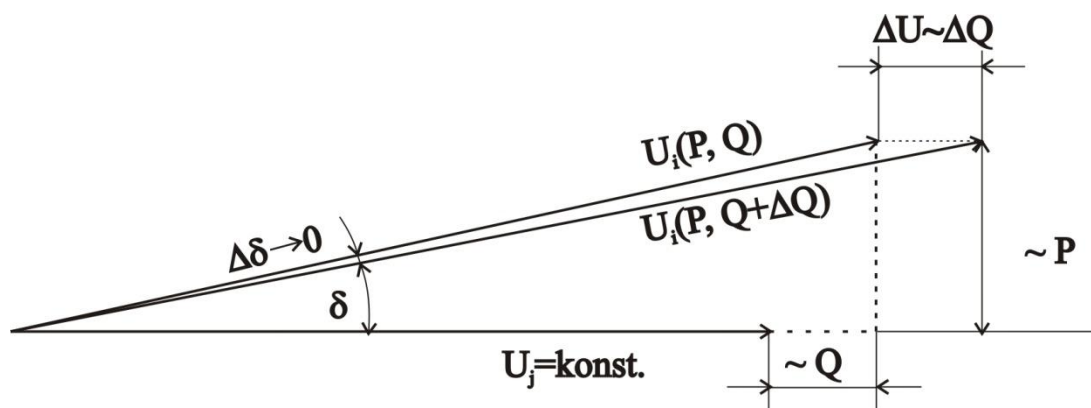
Majme jednoduchý prenos s uvažovaním len pozdĺžnej reaktancie vid. *Obr. 3-4* [3 str.21]. Na tomto prenose si ukážeme vplyv zmeny odoberaného výkonu na zmenu veľkosti napätia a jeho uhlu.

Na *Obr. 3-5* [3 str.21] sú zakreslené napäťové pomery pri odbere výkonu v uzle j o veľkosti P, Q a ďalej pri zmene činného odberu v uzle j o ΔP pri stálom odoberanom výkone Q . Je vidieť, že ak je napätie U_j konštantné, potom pri zmene činného odberu na hodnotu $(P + \Delta P)$ sa absolútna hodnota napätia v uzle i prakticky nemení, ale uhol sa zmení výrazne oproti pôvodnému napätiu a to o $\Delta\delta$. Tento fakt potvrdzuje správnosť zjednodušenia prvej rovnice (3.40), teda $\Delta P \sim \Delta\delta$.

Na *Obr. 3-6* [3 str.21] sú zakreslené napäťové pomery pri zmene jalového výkonu v uzle j o ΔQ a konštantnom činnom odbere P . Je vidieť, že zmena jalového výkonu podstatne ovplyvňuje zmenu absolútnej hodnoty napätia v uzle i pri $U_j = \text{konst.}$ a zanedbateľnú zmenu uhla $\Delta\delta$. Tento poznatok potvrdzuje správnosť zjednodušenia druhej rovnice (3.40), teda $\Delta Q \sim \Delta U$.



Obr. 3-5 Napäťové pomery pri zmene odberu P v uzle j pri stálom odbere Q



Obr. 3-6 Napäťové pomery pri zmene odberu Q v uzle j pri stálom odbere P

Text kapitoly bol vytvorený podľa [3].

4 PRECHODNÉ JAVY V ES

Prechodný stav ako už z pomenovania plynie, je stav, ktorý vzniká pri prechode ES z jedného ustáleného prevádzkového stavu do nového prevádzkového stavu. Prechodné javy ES sú spôsobené nenormálnymi javmi vznikajúcimi za prevádzky priamo v hlavnom obvode v dôsledku náhleho porušenia izolácie (vplyvom starnutia, cudzieho zavinenia, úderom blesku atď.) alebo v ovládacej sústave (chybná manipulácia s vypínacími prvkami). Prechodný stav je charakterizovaný zaníkaním prechodných zložiek veličín chodu ES najčastejšie formou tlmených vlastných oscilácií. Z hľadiska rozdelenia prechodných dejov v ES a voľby zjednodušenia pri ich riešení je dôležité porovnanie doby trvania zániku prechodných zložiek veličín chodu a ich periódy s periódou priemyslového prúdu. Prechodné deje rozdeľujeme:

1. **Pomalé - elektromechanické.** Ich doba trvania sa mení v širokých medziach, rádovo od desiatín sekúnd až po desiatky sekúnd. Preto pri ich riešení je možné zanedbať šírenie elektromagnetických vln v článkoch ES a väčšinou i elektromagnetické zotrvačnosti článkov. Preto sa používa v elektrickej časti sústavy náhrada pomocou sústredených parametrov. Vďaka veľkej perióde prechodných zložiek sa v prechodnom deji uplatňujú zotrvačné hmoty veľkých rotačných strojov v sústave. Ide hlavne o mechanický pohyb rotorov alternátorov, určeným jednak zákonitosťami vlastného pohybu rotorov, jednak elektromagnetickými silami, ktoré tento pohyb ovplyvňujú. Elektromagnetické sily pôsobiace na rotor ľubovoľného alternátora sú závislé na polohe rotorov všetkých ostatných paralelne pracujúcich alternátorov, pretože rotory všetkých alternátorov majú silné vzájomné väzby, sprostredkované prenosovými elektrickými článkami ES. Články elektrickej schémy ES plnia funkciu väzby, prenášajú mechanické sily z hriadele jedného alternátora na hriadeľ ostatných alternátorov.
2. **Stredne rýchle - elektromagnetické.** U nich je doba trvania v ráde desiatín sekúnd. Takže ich perióda je porovnateľná s periódou striedavého priemyslového prúdu. Vzhľadom k menšej rýchlosti ich priebehu je možné zanedbať konečnú rýchlosť šírenia elektromagnetických vln v článkoch ES. V priebehu elektromagnetických prechodných javov je možné zanedbať zmeny otáčok točiacich sa sústrojí, preto sa zanedbáva vplyv zotrvačných hmôt rotačných strojov. V elektrickej časti sústavy sa používa náhrada pomocou sústredených parametrov.
3. **Rýchle – vlnové.** Ich doba trvania sa udáva v mikrosekundách až milisekundách. Perióda prechodných zložiek je výrazne nižšia ako perióda striedavého priemyslového prúdu. Priebeh zmien prevádzkových parametrov ES je tak rýchly, že nie je možné zanedbať rýchlosť šírenia elektromagnetických vln v článkoch ES. Práve tento fakt vedie pri výpočte elektrickej časti k náhrade článkov pomocou náhradných obvodov s homogénne rozloženými parametrami. Vplyv zotrvačných hmôt je zanedbateľný.

Elektromechanické prechodné deje súvisia s náhlou zmenou zaťaženia zdrojov, pri ktorom vzniká nerovnováha medzi elektrickým a mechanickým momentom na hriadeľ generátora, čo ohrozuje synchronný chod. Príčinou týchto prechodných javov môžu byť zmeny v spojení siete uskutočňované obsluhou alebo automatikou podľa prevádzkových požiadaviek (veľkosť zaťaženia, odstavovanie pre kontroly a údržbu), prerušenie izolácie v dôsledku jej starnutia, vznik nepredpokladaného napätia (úder blesku), menej často náhlou veľkou zmenou výkonu odberu.

Elektromagnetické prechodné deje sú spôsobované skratovou poruchou, čo je náhla zmena izolačného odporu medzi krajnými vodičmi, stredným vodičom alebo zemou v uzemnenej sústave.

Vlnové prechodné deje sú vyvolané úderom blesku do prvkov ES alebo do ich tesnej blízkosti alebo sú spôsobené spínacími pochodmi.

Uvedené rozdelenie podľa doby periódy prechodných zložiek veličín chodu má význam len z hľadiska spôsobu riešenia tj. možnosti zjednodušenia matematického vyjadrenia deja. Tento typ delenia nemá zmysel z hľadiska príčin prechodného deja, pretože jedna príčina môže spôsobiť všetky 3 typy prechodných dejov (pomalé, stredne rýchle a rýchle).

Z vyššie uvedeného rozdelenia je vidieť značný rozdiel v dobe trvania vlnových procesov a prechodných javov elektromagnetických, elektromechanických. Táto skutočnosť umožňuje analyzovať obe uvedené skupiny prechodných javov oddelene, navzájom nezávisle. Elektromagnetický a elektromechanický prechodný jav prebiehajú pri prechode ES z jedného ustáleného stavu do nového a predstavujú jediný prechodný jav. Avšak v počiatočnom štádiu prechodného procesu určujú charakter jeho priebehu elektromagnetické prechodné javy. Elektromechanické prechodné javy sa neuplatnia, lebo sústroje s elektrickými točivými strojmi, pracujúcimi paralelne v ES, majú veľké mechanické zotrvačnosti. Preto za určitých podmienok je možné analyzovať oddelene elektromagnetické a elektromechanické prechodné javy.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [2] [4] [5].

4.1 Skraty v elektrizačnej sústave

Skratom (skratovou poruchou v ES) rozumieme elektromagnetický prechodný dej, ktorý je časovo obmedzený okamžikom náhleho zmenšenia impedancie medzi krajnými vodičmi prípadne stredným vodičom alebo zemou v niektorej časti ES (v mieste poruchy) a okamžikom odpojenia zdroja od miesta poruchy.

Pri skrate dochádza k náhlemu poklesu impedancie elektrického obvodu, k mimoriadnemu zmenšeniu napätia- pričom do miesta poruchy tečú skratové prúdy zo všetkých zdrojov ES, podľa ich výkonu a elektrickej vzdialenosti. Úbytky napätia rastú od miesta zdrojov k miestu do miesta skratu, takže pokles napätia sa prejaví v celej sústave. Najviac ohrozené je samozrejme miesto skratu, ktorým preteká výsledný skratový prúd.

Tento prúd ohrozuje zariadenia ES svojimi dynamickými (silovými) a tepelnými účinkami, preto je nutné tieto zariadenia kontrolovať na tieto účinky. Vedľa toho je potreba kontrolovať veľkosť zotaveného napätia po odopnutí skratu vypínačom. Zotavené napätia môže svojou strmosťou narušiť nie len izoláciu elektrických zariadení, ale i narušiť vlastný vypínací proces vo vypínači opätovným preskokom vypínacej dráhy a znovuzapálením oblúku medzi kontaktmi vypínača, čo môže viesť i k havárii vypínača.

Podľa odporu (prechodového) v mieste poruchy medzi krajnými vodičmi, stredným vodičom alebo zemou, skraty delíme na:

- **skraty dokonalé (kovové)**, so zanedbateľným prechodovým odporom (dokonalý styk kovových vodičov),
- **skraty nedokonalé**, s nedokonalým stykom vodičov, čo má za následok vznik oblúku, z čoho plynie ohrozenie miesta poruchy a jeho okolia požiarom.

Podľa spôsobu zaťažovania trojfázových zdrojov pri skratoch delíme skraty na:

1) skraty súmerné:

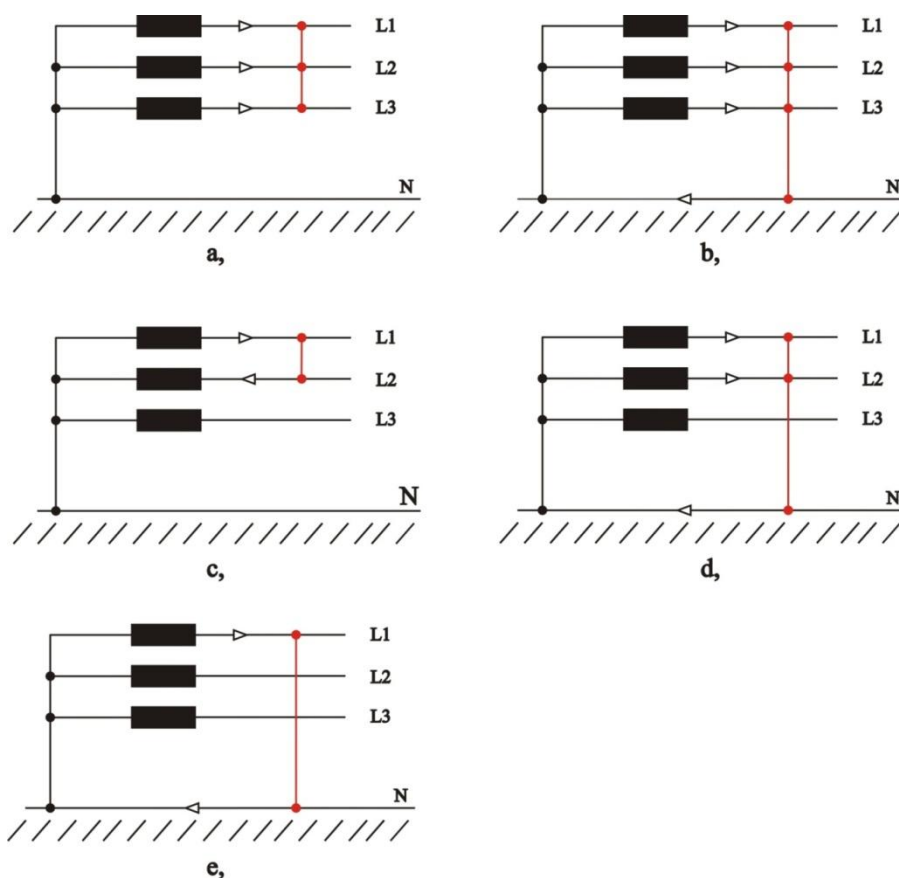
- trojfázový (Obr.4-1 a [7 str.85]),
- trojfázový zemný (Obr.4-1 b),

2) skraty nesúmerné

- dvojfázový (Obr.4-1 c),
- dvojfázový zemný (Obr.4-1 d),
- jednofázový (Obr.4-1 e).

U vonkajších vedení je pravdepodobnosť výskytu jednofázového skratu 90 % a viac. U káblových vedení prevažujú skraty trojfázové a trojfázové zemné. Tab. 4-1 [6 str.11] popisuje pravdepodobnosť výskytu rôznych druhov skratov v sieťach. U káblov väčšina nesúmerných skratov veľmi rýchlo prechádza na skrat súmerný vplyvom prepálenia izolácie. Silové a tepelné účinky skratových prúdov môžu byť u dokonalých nesúmerných skratov väčšie ako u súmerných. Skoro vždy je tomu tak u sietí vvn.

Doba trvania skratovej poruchy závisí od druhu vypínacieho zariadenia alebo automatiky určenej pre prerušenie skratového prúdu.



Obr. 4-1 Druhy skratov

Tab. 4-1 Pravdepodobnosť výskytu rôznych druhov skratov v sieťach

sieť	jednofázový	dvojfázový	dvojfázový zemný	trojfázový
vvn	65 %	10 %	20 %	5 %
110 kV	91 %	4,8 %	3,8 %	0,4 %
220 kV	93,1 %	0,6 %	5,4 %	0,9 %

Text kapitoly bol vytvorený podľa [4] [6].

4.1.1 Príčiny vzniku skratu

Medzi hlavné príčiny vzniku skratu patrí:

- **Nedokonalá izolácia** vzniknutá z nevhodných výrobných materiálov či technologických postupov. Ďalšou príčinou nedokonalkej izolácie môže byť nesprávna montáž (nepredpisové ukladanie káblov, nedodržanie technológie pri montáži káblových spojok, koncoviek). Dlhodobé preťažovanie káblových vedení môže tiež spôsobiť zhoršenie kvality izolácie. Samozrejme počas prevádzky dochádza k prirodzenému znehodnocovaniu (starnutiu) izolácie.
- **Vady elektrických zariadení** ako napr. popraskanie izolátorov, znečistenie a opálenie kontaktov apod. sú pomerne častou príčinou vzniku skratov
- **Nedostatočné dimenzovanie** s ohľadom na tepelné a mechanické namáhanie alebo malá doskoková vzdialenosť.
- **Cudzí zásah** do elektrického zariadenia spôsobuje najčastejšie skraty. Ide hlavne o mechanické poškodenie káblových vedení pri zemných prácach. Nemenej časté sú zásahy do vonkajších vedení spôsobené poveternostnými a prírodnými vplyvmi (pády stromov a vetví, dotyky vetví pri vetre).
- **Chybná manipulácia** a to hlavne s odpojovačmi, pri spínaní dvoch sietí, ktoré nie sú synchronizované.
- **Prepätie** je tiež častou príčinou skratov. Spôsobuje skraty hlavne v zariadeniach s nedostatočnou izoláciou a s nedostatočnými vzduchovými doskokovými vzdialenosťami alebo v priestoroch so sťaženými klimatickými podmienkami (vysoká vlhkosť). Prepätia sú atmosférické (vonkajšie) alebo prevádzkové (vnútorné).
 - **Atmosférické prepätia** vznikajú vo vonkajších vedeniach pri priamom údere blesku do vedenia alebo elektrostatickou indukciou pri výbojoch mimo vedenia.
 - **Prevádzkové prepätia** vznikajú:
 - pri spínaných pochodoch,
 - vplyvom rezonančných stavov,
 - pri zemnom spojení,
 - pri vypínaní malých indukčných prúdov (transformátorov naprázdno),
 - pri náhlejšom strate zaťaženia.

Všetky uvedené príčiny vzniku skratu, často nemusia pôsobiť jednotlivo, ale spoločne dve a viac príčin súčasne alebo následne po sebe.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [6] [8].

4.1.2 Následky skratu

Skraty sú sprevádzané nepriaznivými následkami, ktoré môžu ohroziť bezpečnosť prevádzky, zariadení, ale i bezpečnosť obsluhy.

Účinky skratových prúdov sú:

- **Tepelné účinky** vznikajú priechodom ekvivalentného otepľovacieho skratového prúdu skratovým obvodom, čím nastáva nadmerné oteplenie všetkých častí skratového obvodu so všetkými nepriaznivými následkami. Počas krátkej doby trvania skratu nemôže byť teplo odvedené do okolitého prostredia a spôsobuje veľké oteplenie vodičov, strojov a prístrojov.

- **Dynamické sily** sú spôsobené elektromagnetickým pôsobením prúdov v susedných vodičoch a sú im priamo úmerné. Najväčší silový ráz je spôsobený prvou amplitúdou skratového prúdu (nárazový skratový prúd).
- **Elektrický oblúk** môže prakticky vzniknúť vo všetkých prípadoch. Jeho účinky sú žiarenie a tlak, vyvolané energiou oblúku a tepelným a svetelným žiarením.
- **Indukované napätie** na susednom vedení (slaboprúde, zdelovacie alebo istiace) spôsobené skratovým prúdom. Pozdĺž týchto vedení sa môžu indukovať značné napätia, hlavne keď sa skratový prúd vracia späť zemou (skraty jednofázové a dvojfázové zemné).
- **Ohrozenie stability** chodu alternátorov vyvolávajú tým, že dochádza k náhlejšej zmene zaťaženia a k poklesu napätia na svorkách alternátorov.
- **Prepätie** sprevádzajúce skrat a to hlavne pri jeho vypínaní. Nebezpečná je hlavne strmá prepätia (zotavené napätie). Ak je strmá prepätia väčšia, ako je rýchlosť zotavujúcej sa elektrickej pevnosti vypínacej dráhy daného vypínača, dochádza k znovuzapáleniu oblúka vo vypínači.
- **Pokles napätia** v dôsledku skratu má vplyv jak na svetelné zdroje, tak i tepelné spotrebiče, ale hlavne ohrozuje prevádzku synchronných i komutátorových strojov.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [6] [8].

4.2 Priebeh skratového prúdu

Pri skratovej poruche dochádza k náhlejšej zmene impedancie na svorkách zdroja, čo má za následok prechodný jav vo všetkých prvkoch ES. Veľkým skratovým prúdom sa poruší rovnováha medzi magnetickým a elektrickým poľom. Dôjde k porušeniu rovnováhy energií, ktoré sú nahromadené v indukčnostiach ($W_L = \frac{1}{2} Li^2$) a kapacitách obvodu ($W_C = \frac{1}{2} Cu^2$). Každá zmena prúdu je spojená so zmenou energie v magnetickom poli a každá zmena napätia je spojená so zmenou energie v elektrickom poli. Rýchlosť zmeny energií odpovedajú určitému výkonu a preto, že výkony sa vyskytujú vždy len v konečných hodnotách, je potreba k týmto zmenám určitý čas.

Priebeh skratového prúdu je teda prechodný dej pri ktorom sústava prechádza do nového ustáleného stavu pomocou prechodných (zanikajúcich) zložiek prúdu a napätia s vlastnou periódou príslušných obvodov. U prechodného deju sledujeme jeho počiatok, prechodnú časť a ustálený skratový chod, keď došlo k utlmeniu prechodných dejov.

Stanovenie časového priebehu napätia a prúdu pri skrate sa obvykle zjednodušuje - zanedbávajú sa priečne admitancie prvkov ES vrátane odberov. Tým sa vylúči vplyv elektrického poľa a prechodnej zložky prúdu a napätia majú frekvenciu zdrojov alebo sú aperiodické. Rozloženie energie magnetického poľa v náhradnom obvode bez priečných admitancií a odberov sa oproti stavu pred skratom mení. Táto zmena je počas doby trvania skratu spojitá. Pri stálom buzení synchronných zdrojov skratového prúdu sa vplyvom reakcie kotvy znižuje energia magnetického poľa v nich.

Vplyvom zväčšujúceho sa prúdu sa zväčšuje energia v ostatných pasívnych prvkoch ES. V náhradnom obvode sa pomocou prechodných zložiek prúdu transformuje prebytok energie magnetických polí v zdrojoch do ostatných prvkov náhradného obvodu. Keby neprišlo k prerušeniu skratového prúdu, trval by prechodný dej až do zániku prechodných zložiek a vzniku nového rovnovážneho stavu s rovnakou celkovou hodnotou energie magnetického poľa

v prvkoch náhradného obvodu avšak s rozložením, ktoré zodpovedá ustálenému skratovému prúdu.

Za týchto zjednodušujúcich predpokladov (stále budenie, prvky ES sú nahradené len pozdĺžnou impedanciou induktívneho charakteru) je okamžitá hodnota skratového prúdu neharmonickou funkciou času s troma prechodnými zložkami, ktoré exponenciálne zanikajú

$$i_k = \sqrt{2} \left\{ \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} \quad (4.1)$$

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

kde α je počiatočná fáza fázoru napätia v okamžiku vzniku skratovej poruchy ($t=0$), ktorá je mierou okamžitej hodnoty napätia u_0 na začiatku poruchy

$$u_0 = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \alpha) \Big|_{t=0} = \sqrt{2} U \sin(\alpha), \quad (4.2)$$

φ_k je uhol impedancie obvodu skratového prúdu (impedancia medzi pôsobiskom vnútorného napätia zdroja a miestom poruchy),

I_k'' je počiatočná efektívna hodnota rázového (subtranzitného) skratového prúdu-počiatočný súmerný rázový skratový prúd,

I_k' je počiatočná efektívna hodnota prechodného (tranzitného) skratového prúdu,

I_k je efektívna hodnota ustáleného skratového prúdu,

τ_d'', τ_d' sú subtranzitná a tranzitná časová konštanta subtranzitnej a tranzitnej zložky skratového prúdu, je možné i značenie (T_k'', T_k'),

τ_s je časová konštanta jednosmernej zložky skratového prúdu, je možné i značenie ($T_{d.c.}$),

i_{ks} je okamžitá hodnota striedavého (súmerného) skratového prúdu,

i_{ka} je okamžitá hodnota jednosmernej (aperiodickej) zložky skratového prúdu, je možné i značenie ($i_{d.c.}$),

i_k je okamžitá hodnota (nesúmerného) skratového prúdu.

Pretože prvky ES sú nahradené iba pozdĺžnou reaktanciou (činné odpory sú zanedbateľné), má skratový prúd predovšetkým indukčný charakter a je približne oneskorený za napätím o $\pi/2$.

Z rovnice (4.1) je zrejme, že veľkosť skreslenia striedavého skratového prúdu jednosmernou zložkou ja závislá na okamžitej hodnote napätia pri vzniku skratovej poruchy, tj. na uhle α .

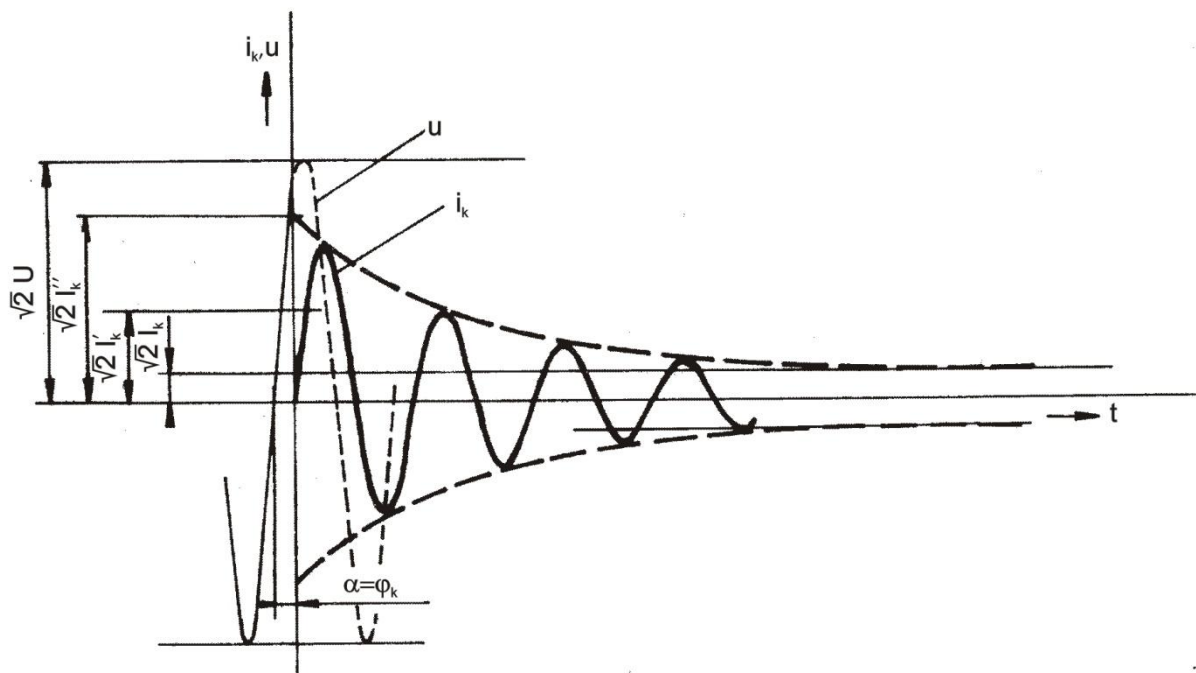
a) Priebeh súmerného skratového prúdu

Ak ku skratu dochádza v okamžiku, keď sínusové napätie prechádza svojím maximom, skratový prúd potom nazývame súmerným (symetrickým) skratovým prúdom.

Jednosmerná zložka nevznikne a skratový prúd bude súmerný iba v tej fáze trojfázovej sústavy, v ktorej platí

$$\alpha - \varphi_k = 0, \quad \alpha = \varphi_k \quad (4.3)$$

Počiatočná fáza fázoru napätia v okamžiku vzniku skratu ($t=0$) musí byť rovnaká ako je uhol skratovej impedancie. V takomto prípade prejde rovnica (4.1) do tvaru (4.4). Časový priebeh okamžitej hodnoty skratového prúdu je zobrazený na Obr. 4-2 [2 str.120].



Obr. 4-2 Časový priebeh súmerného skratového prúdu

Počiatková hodnota skratového prúdu je v tomto prípade (skrat vznikol pri chode naprázdno) nulová a pokiaľ by nedošlo k prerušeniu prúdu istiacim zariadením, tak by sa skratový prúd ustálil na harmonickom priebehu s amplitúdou $\sqrt{2}I_k$.

$$i_k = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t) \quad (4.4)$$

b) Priebeh skratového prúdu s maximálnou jednosmernou zložkou

Ak ku skratu dochádza v okamžiku, keď **sínusové napätie prechádza nulou**, potom skratový prúd začína zo svojej maximálnej hodnoty.

K vývinu najväčšej jednosmernej zložky dôjde vo fáze, pre ktorú v okamžiku vzniku skratu bude počiatková fáza fázoru napätia rovná

$$\alpha = \varphi_k - \frac{\pi}{2} \quad (4.5)$$

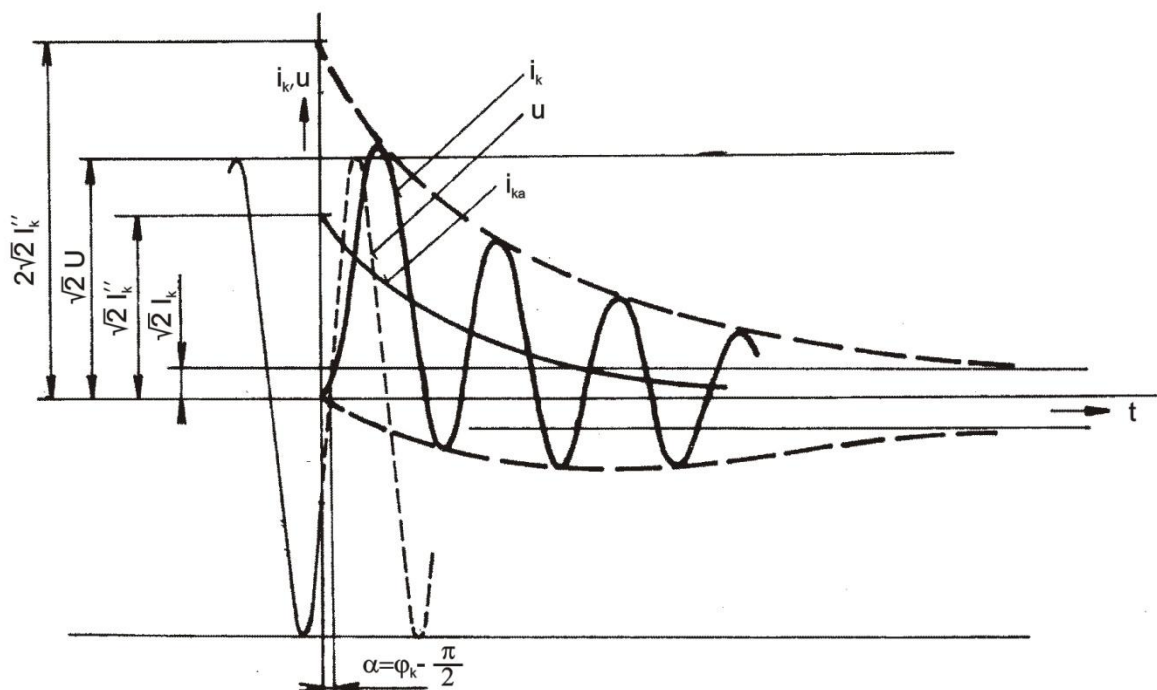
Ak vznikne skratová porucha v okamžiku, keď napätie nadobúda hodnoty

$$u_0 = \sqrt{2}U \sin\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.6)$$

bude striedavý prúd skreslený jednosmernou zložkou maximálne a bude platiť

$$i_k = \sqrt{2} \left\{ I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \cos(\omega t) \right\} \quad (4.7)$$

Pri úprave rovnice (4.1) na tvar (4.7) boli použité tieto matematické poznatky $\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -1$ a $\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos \omega t$. Časový priebeh okamžitej hodnoty skratového prúdu je zobrazený na Obr. 4-3 [2 str.121].



Obr. 4-3 Časový priebeh skratového prúdu s maximálne vyvinutou jednosmernou zložkou

Prvá amplitúda skratového prúdu v tomto prípade dosiahne takmer dvojnásobok amplitúdy striedavého skratového prúdu. Pre zariadenia z hľadiska mechanického dimenzovania je preto nutné uvažovať práve tento okamžik vzniku skratu. To isté platí pre tepelné účinky skratovej poruchy. Pri kontrole odolnosti zariadení proti tepelným a mechanickým účinkom skratového prúdu, bude vždy uvažovaný vznik poruchy v tomto, z hľadiska dimenzovania, najmenej priaznivom okamžiku.

Časové konštanty podľa exponenciály zanikajúcich prechodných zložiek τ_d'' , τ_d' , τ_s sú závislé na parametroch zdroja skratového prúdu (synchronných strojov v sieti) a na rezistancii a indukčnosti vonkajšieho obvodu skratového prúdu.

- Tranzitná časová konštanta samotných synchronných strojov býva (0,04 až 1,8)s podľa ich prevedenia a veľkosti a s impedanciou vonkajšieho skratového obvodu sa zväčšuje.
- Subtranzitná a jednosmerná časová konštanta sú niekoľkonásobne menšie a na impedancii skratového obvodu skoro vôbec nezávisia. Ubúdanie skratového prúdu u vzdialenej skratovej poruchy je preto pomalšie a v niektorých prípadoch zanedbateľné.

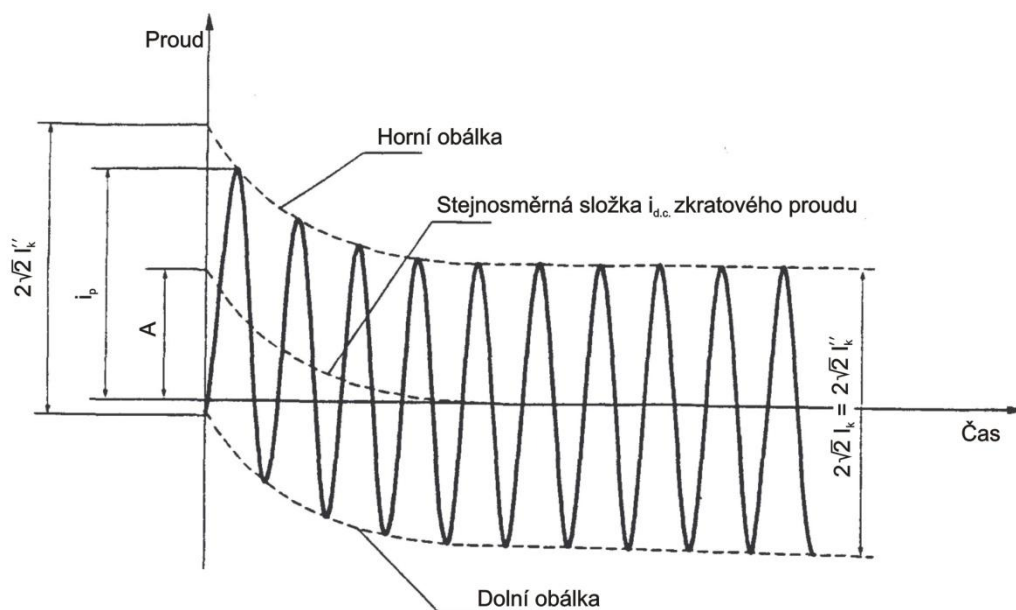
Subtranzitný, tranzitný a ustálený skratový prúd sú závislé na príslušných impedanciách synchronných strojov, ich vnútornom napätí a na impedancii vonkajšieho skratového obvodu. Takže sa dá konštatovať, že sú závislé na buzení synchronných strojov a ich zaťažení pred okamžikom skratu.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [4][2][7].

4.2.1 Časový priebeh skratového prúdu podľa ČSN 60909-0

Norma ČSN 60909-0 [11] uvádza dva priebehy skratového prúdu a to pre elektricky vzdialený a blízky skrat.

Elektricky vzdialený skrat – skrat, pri ktorom veľkosť striedavej zložky predpokladaného skratového prúdu zostáva v podstate konštantná vid'. Obr. 4-4 [11 str.18]. Tento typ skratu sa uvažuje ak je miesto skratu dostatočne elektricky vzdialené od zdrojov skratového prúdu, alebo ak je podiel asynchrónnych motorov na skratovom prúde zanedbateľný do 5 %.



Obr. 4-4 Priebeh skratového prúdu elektricky vzdialeného skratu s konštantnou striedavou zložkou

kde

I_k'' je počiatočný súmerný rázový skratový prúd,

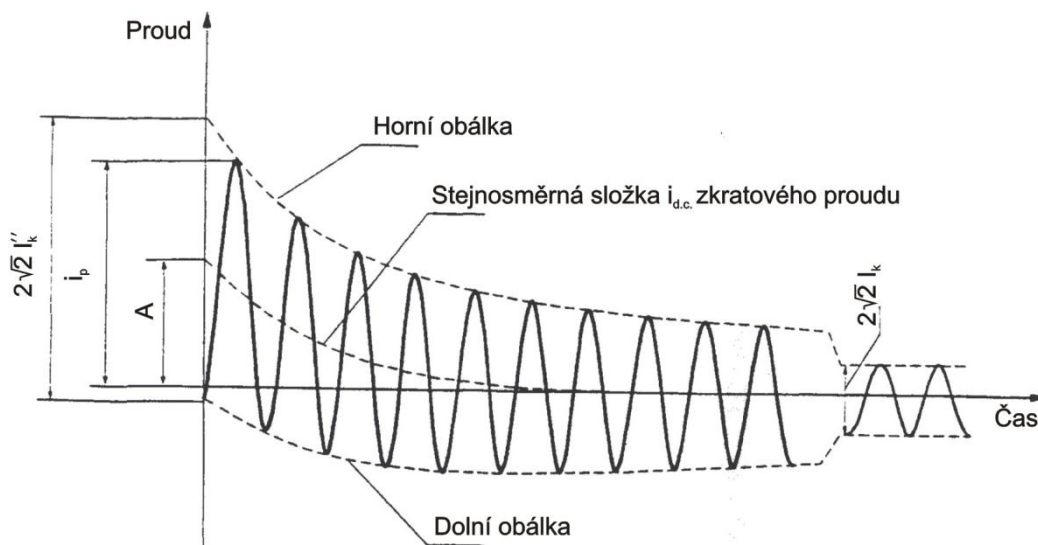
i_p je nárazový skratový prúd,

I_k je ustálený skratový prúd,

$i_{d.c.}$ je jednosmerná zložka skratového prúdu,

A je počiatočná hodnota jednosmernej zložky skratového prúdu.

Elektricky blízky skrat – skrat, pri ktorom príspevok aspoň jedného synchronného stroja k predpokladanému počiatočnému súmernému rázovému skratovému prúdu prekračuje dvojnásobok menovitého prúdu stroja, alebo skrat pri ktorom príspevok asynchrónnych motorov prekračuje 5% počiatočného súmerného rázového skratového prúdu I_k'' bez motorov. Tento typ skratu sa uvažuje ak synchronné stroje nie sú dostatočne elektricky vzdialené od miesta skratu, alebo pokiaľ nie je príspevok asynchrónnych motorov zanedbateľný. Striedavá zložka predpokladaného skratového prúdu je tlmená a klesá vid'. Obr. 4-5 [11 str.19].



Obr. 4-5 Priebeh skratového prúdu elektricky blízkeho skratu s klesajúcou striedavou zložkou

Vo všeobecnosti reálny časový priebeh skratového prúdu obsahuje:

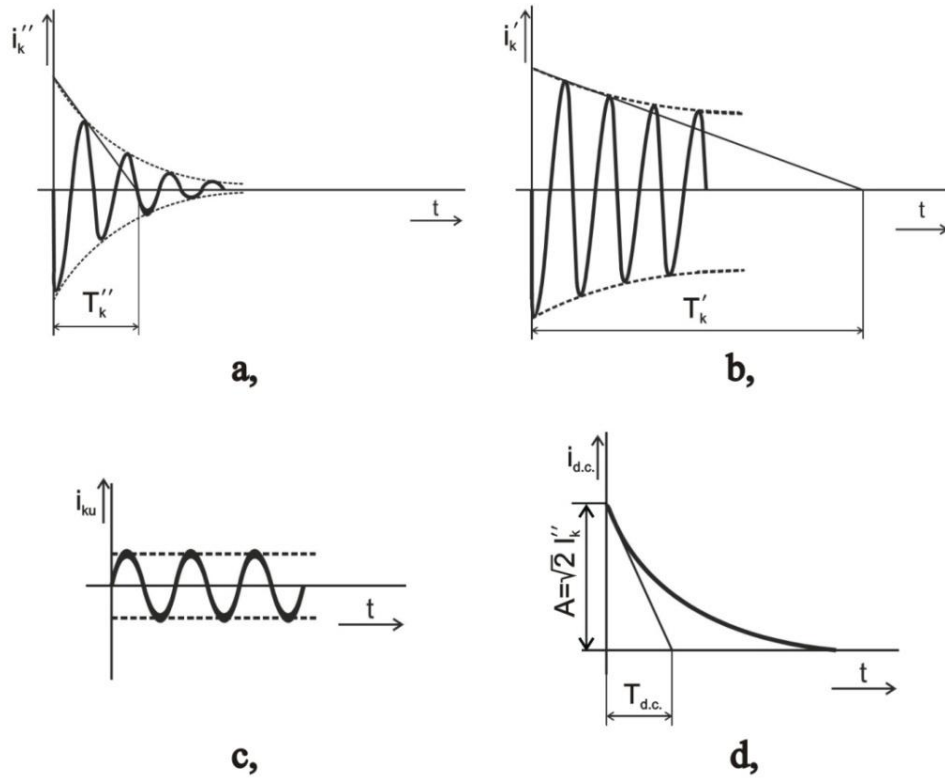
- **Rázovú** (subtranzitnú) zložku $i_k''(t)$ - ktorá má sínusový priebeh, frekvenciu sústavy a exponenciálne klesá s časovou konštantou T_k'' vid'. Obr.4-6 a [10 str.38]. Prejavuje sa na začiatku skratu a trvá menej než desatinu sekundy, je to zložka rýchlo doznievajúca.
- **Prechodnú** (tranzitnú) zložku $i_k'(t)$ - ktorá má sínusový priebeh, frekvenciu sústavy a exponenciálne klesá s časovou konštantou T_k' vid'. Obr.4-6 b. Doba zániku tejto zložky je rádovo v sekundách.
- **Ustálenú** zložku $i_{ku}(t)$ - ktorá má sínusový priebeh, frekvenciu sústavy a konštantnú amplitúdu vid'. Obr.4-6 c,
- **Jednosmernú** (aperiodickú) zložku $i_{d.c.}(t)$ - ktorá predstavuje exponenciálne klesajúci jednosmerný prúd s časovou konštantou $T_{d.c.}$ vid'. Obr.4-6 d. Veličina A predstavuje počiatočnú hodnotu jednosmernej zložky to znamená, že predstavuje veľkosť jednosmernej zložky skratového prúdu $i_{d.c.}$ v čase $t=0$.

Pre obvyklé podmienky v ES platí: $T_k' > T_{d.c.} > T_k''$.

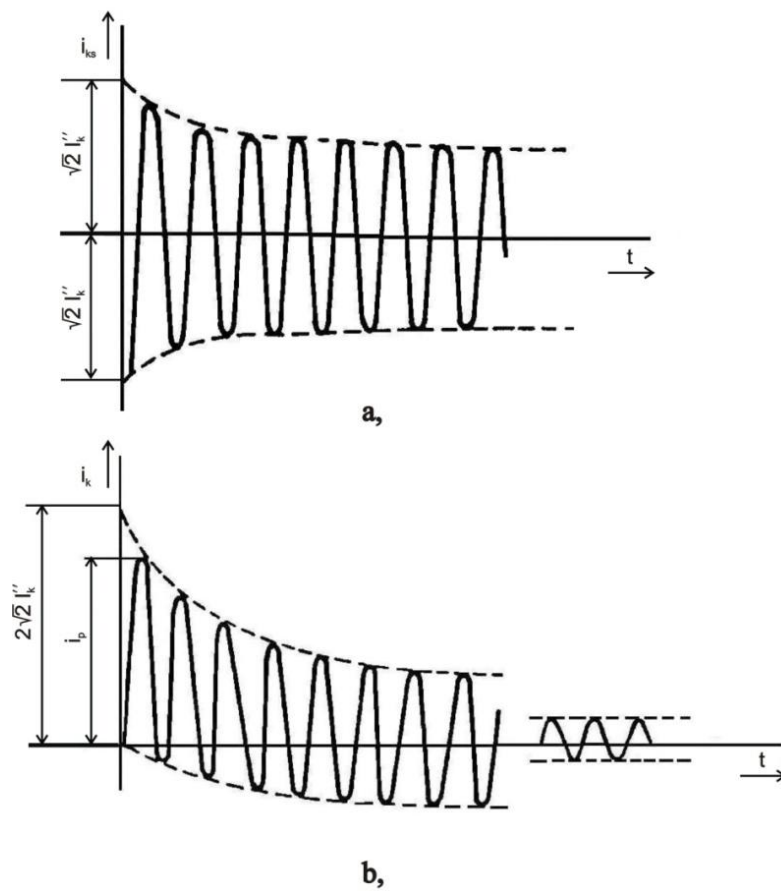
Superpozícia (súčet) časových priebehov rázovej $i_k''(t)$ (Obr.4-6 a), prechodnej $i_k'(t)$ (Obr.4-6 b) a ustálenej $i_{ku}(t)$ (Obr.4-6 c) zložky predstavuje súmerný skratový prúd $i_{ks}(t)$ (súmerný podľa časovej osi) vid'. Obr.4-7 a.

Súčet súmerného skratového prúdu $i_{ks}(t)$ (Obr.4-7 a) a jednosmernej zložky $i_{d.c.}(t)$ (Obr.4-6 d) je nesúmerný skratový prúd $i_k(t)$ vid'. Obr.4-7 b.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [7][10][11].



Obr. 4-6 Zložky skratového prúdu



Obr. 4-7 Priebeh súmerného a nesúmerného skratového prúdu

4.3 Charakteristické hodnoty skratového prúdu

Pri dimenzovaní elektrických zariadení a nastavení elektrických ochrán nie je nutné poznať celý časový priebeh skratového prúdu (4.7) ale postačia tzv. charakteristické hodnoty skratového prúdu, ktoré udáva norma [11]:

- počiatkový súmerný rázový skratový prúd I_k'' ,
- nárazový skratový prúd i_p ,
- jednosmerná (aperiodická) zložka skratového prúdu $i_{d.c.}$,
- symetrický vypínací skratový prúd I_b ,
- ustálený skratový prúd I_k ,
- ekvivalentný otepľovací prúd I_{th} ,
- doba trvania skratu T_k .

Maximálne hodnoty skratových prúdov sa určujú hlavne kvôli dimenzovaniu elektrických zariadení. Naopak pre nastavenie ochrán sa môžu určovať minimálne hodnoty skratových prúdov poprípade ich časové priebehy.

Počiatkový súmerný rázový skratový prúd I_k'' je efektívna hodnota striedavej súmernej zložky predpokladaného skratového prúdu v okamihu vzniku skratu, pri konštantnej impedancii a platí preň (všeobecne, trojfázový, jednofázový)

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|}$$

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_{(1)}|} \quad (4.8)$$

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|}$$

kde $c U_n / \sqrt{3}$ je napätie ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu,

U_n je združená hodnota menovitého napätia siete,

c je napäťový súčiniteľ udávajúci pomer medzi napätím ekvivalentného napäťového zdroja a menovitým napätím siete U_n deleným $\sqrt{3}$ (hodnoty sú uvedené v Tab.4-2 [11 str.22]). Nadobúda hodnoty 1 pre skrat z chodu naprázdno a 1,1 z chodu pri zaťažení u sietí vvn.

Z_k je skratová impedancia (jej určenie pre rôzne druhy skratov je uvedené v príslušnej norme [11]),

$Z_{(1),(2),(0)}$ je súsledná, spätná a netočivá skratová impedancia.

Nárazový skratový prúd i_p je maximálna možná okamžitá hodnota predpokladaného skratového prúdu. Je to najväčšia vrcholová hodnota skratového prúdu, ktorá nastáva pri prvom maxime v čase $t = 0,01$ s po vzniku skratu.

Na kontrolu silových (mechanických) účinkov skratového prúdu sa používa nárazový skratový prúd. Je to dané tým, že silové účinky skratového prúdu sú najväčšie pri jeho prvej amplitúde.

Výpočet trojfázového nárazového prúdu sa aplikuje na fázový vodič a okamih, v ktorom vznikne najväčší možný skratový prúd

Pri skratových výpočtoch sa nárazový skratový prúd určuje z počiatočného rázového skratového prúdu I_k'' podľa rovnice

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (4.9)$$

kde κ je súčiniteľ nárazového skratového prúdu.

Súčiniteľ κ sa podľa normy [11] určí pre pomer R/X alebo X/R z tabuliek alebo sa vypočíta pomocou nasledujúceho vzťahu

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (4.10)$$

Rovnica (4.9) a (4.10) predpokladá, že skrat vznikne pri priechode napätia nulou.

Výpočet pomeru X/R alebo obráteného pomeru R/X pre jednotlivé typy sietí určuje norma [11]. Všeobecne sa dá povedať, že ide o pomer rezistancie a reaktancie skratového obvodu. V neplatnej norme ČSN 33 3020 sa namiesto tohto pomeru používali časové konštanty.

Jednosmerná (aperiodická) zložka skratového prúdu $i_{d.c.}$ je stredná hodnota hornej a dolnej obalovej krivky priebehu skratového prúdu klesajúcej zo svojej počiatočnej hodnoty k nule, podľa Obr. 4-4 a Obr. 4-5. Vypočíta sa podľa nasledujúceho vzťahu

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2\pi f t R/X} \quad (4.11)$$

kde f je menovitý kmitočet,

t je čas (doba trvania skratu).

Symetrický vypínací skratový prúd I_b je efektívna hodnota úplnej periódy symetrickej zložky predpokladaného skratového prúdu v okamžiku oddelenia kontaktov prvého pólu spínacieho zariadenia.

Vypínací skratový prúd v mieste skratu sa skladá z symetrického skratového prúdu I_b a jednosmernej zložky skratového prúdu $i_{d.c.}$.

Súmerný vypínací skratový prúd sa používa spolu s jednosmernou zložkou vypínacieho skratového prúdu pri kontrole vhodnosti istiacich zariadení. Podľa normy je možné pre vzdialené skraty uvažovať súmerný vypínací skratový prúd rovný počiatočnému rázovému skratovému prúdu.

$$I_b = I_k'' \quad (4.12)$$

Ustálený skratový prúd I_k je efektívna hodnota súmerného skratového prúdu, ktorý preteká obvodom po doznení prechodných javov.

Ekvivalentný otepľovací prúd I_{th} je efektívna hodnota prúdu, ktorý má rovnaké tepelné účinky a rovnakú dobu trvania ako skutočný skratový prúd, ktorý môže obsahovať jednosmernú zložku a s časom sa mení.

Integrál $\int i^2 dt$ vid'. rovnica (4.13) určuje energiu vytváranú v odporovom prvku sústavy priechodom skratového prúdu. Norma [11] počíta túto energiu použitím súčiniteľa m pre časovo závislý tepelný účinok jednosmernej zložky skratového prúdu a súčiniteľa n pre časovo závislý tepelný účinok striedavej zložky skratového prúdu.

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k''^2 (m + n) T_k = I_{th}^2 T_k \quad (4.13)$$

Pre ekvivalentný otepľovací prúd platí

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (4.14)$$

Súčinitele m a n sa získajú z tabuliek uvedených v norme [11]. Ekvivalentný otepľovací prúd sa používa na kontrolu tepelných účinkov skratového prúdu.

Doba trvania skratu T_k je doba od začiatku vzniku skratu do okamžiku oddelenia kontaktov posledného pólu spínacieho zariadenia.

Tab. 4-2 Napäťový súčiniteľ c podľa ČSN 60909

Menovité napätie U_n	Napäťový súčiniteľ c pre výpočet	
	maximálnych skratových prúdov c_{max} ¹⁾	minimálnych skratových prúdov c_{min}
Nízke napätie 100 V až 1000 V (IEC 60038, tab.I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napätie > 1 kV až 35 kV (IEC 60038, tab.III)	1,10	1,00
Veľmi vysoké napätie ²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tab.IV)		

¹⁾ $c_{max} U_n$ by nemal prekročiť najvyššie napätie U_m pre zariadenia energetických sústav.
²⁾ Pokiaľ nie je definované menovité napätie, potom: $c_{max} U_n = U_m$ alebo $c_{min} U_n = 0,9U_m$.
³⁾ Pre sústavy nízkeho napätia s toleranciou +6%, napr. pre sústavy prechádzajúce z 380 V na 400 V.
⁴⁾ Pre sústavy nízkeho napätia s toleranciou +10%.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [2][11].

5 METÓDA VÝPOČTU SKRATOVÝCH PRÚDOV

5.1 Zjednodušenia pri skratových výpočtoch

Kvôli rozsahu ES, množstvu a problémom pri získavaní vstupných hodnôt výpočtu, numerickej náročnosti presnejších metód a častému použitiu za prevádzky, návrhu a kontrole ES alebo jej časti je nutné zjednodušenie výpočtu skratových pomerov. Sleduje sa tým možnosť aplikácie metód pre riešenie ustálených stavov na deje prechodné i za cenu určitej približnosti. Väčšinou sa pri výpočte skratových pomerov uvažujú nasledujúce zjednodušenia:

1. Ako zdroje skratového prúdu sa uvažujú len väčšie synchronne stroje (generátory, motory a rotačné kompenzátory o výkone väčšom ako 0,5 MVA). V skutočnosti sú zdrojom skratového prúdu všetky prvky ES s nahromadenou energiou v magnetickom alebo elektrickom poli.
2. Uvažuje sa, že skrat vznikol z chodu zdrojov skratového prúdu naprázdno alebo pri ich menovitom zaťažení. Napätia zdrojov sú súfázové (bez vzájomného oneskorenia) a u všetkých zdrojov v náhradnej schéme rovnaké. Zdroje pri tomto zjednodušení môžeme pripojiť do jedného uzla náhradného skratového obvodu.
3. Impedancia odberov sa neuvažuje.
4. Pričné admitancie prvkov ES je možné zanedbať a to z dôvodu, že prúd nimi je podstatne menší než prúd v pozdĺžnom smere a poklesom napätia pri skrate. Všetky prvky ES sa preto nahradzujú iba pozdĺžnou impedanciou. U generátorov, transformátorov a vonkajších vedení vvn a zvn sa uvažuje iba pozdĺžna reaktancia.
5. Predpokladá sa lineárna charakteristika pozdĺžnej impedancie všetkých prvkov ES a nemennosť parametrov prvkov počas skratu.
6. Zdroje skratového prúdu sa uvažujú pomocou subtranzitnej reaktancie, teda reaktancie, ktorú vykazuje zdroj na začiatku poruchy. Počas doby trvania skratu sa zväčšuje až na synchronnú reaktanciu, ak nedôjde do tej doby k prerušeniu skratového obvodu istiacim zariadením.
7. Charakteristické hodnoty skratového prúdu sú uvažované pri maximálne možnej jednosmernej zložke skratového prúdu.
8. Predpokladá sa dokonalý (kovový) skrat.
9. Sústava pred skratom sa predpokladá symetrická.
10. Sériové kondenzátory sa uvažujú len v tom prípade, ak nie sú v prípade skratu vyradené ochranou.
11. Paralelné kondenzátory sa zanedbávajú v prípade, že ich reaktancia je väčšia ako dvadsaťnásobok indukčnej reaktancie skratového obvodu. V opačnom prípade sa rešpektuje ako reaktancia so záporným znamienkom. Vybíjací prúd sa neuvažuje.
12. Magnetizačné prúdy transformátorov zanedbávame.

Výpočet minimálnych a maximálnych skratových prúdov podľa normy [11] vychádza z nasledujúcich zjednodušení:

- po dobu trvania skratového prúdu sa nemení typ skratu,
- po dobu skratu nedochádza k žiadnej zmene siete,
- uvažujú sa impedancie transformátorov pre prepínače odbočiek v základnej polohe,
- odpory oblúku sa neuvažujú,
- všetky kapacity vedení a paralelné admitancie a netočivé statické záťaže sú zanedbávané, okrem paralelných admitancií v netočivej sústave.

Takto zjednodušené výpočty zaisťujú dostatočnú presnosť výsledkov aj napriek tomu, že pre reálne sústavy nezodpovedajú úplne skutočnosti.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [2][4][10][11].

5.2 Maximálne skratové prúdy

Pri výpočte maximálnych skratových prúdov podľa normy [11] je nutné zvoliť nasledujúce podmienky:

- pre výpočet maximálnych skratových prúdov sa musí použiť napäťový súčiniteľ c_{\max} podľa Tab.4-2,
- vybrať konfiguráciu sústavy a maximálne príspevky od elektrární a sieťových napájačov tak, aby viedli k maximálnej hodnote skratového prúdu v mieste skratu alebo pre prijaté delenie siete pre obmedzenie skratového prúdu,
- pokiaľ je použitá ekvivalentná impedancia reprezentujúca vonkajšiu sieť, musí sa použiť minimálna ekvivalentná skratová impedancia, ktorá zodpovedá maximálnemu príspevku skratových prúdov od sieťových napájačov,
- motory musia byť zahrnuté podľa potreby v súlade s normou [11],
- uvažujú sa rezistancie vedení (vonkajších a káblových) pri teplote 20 °C.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

5.3 Minimálne skratové prúdy

Pri výpočte minimálnych skratových prúdov podľa normy [11] je nutné zvoliť nasledujúce podmienky:

- pre výpočet maximálnych skratových prúdov sa musí použiť napäťový súčiniteľ c_{\min} podľa Tab.4-2,
- vybrať konfiguráciu sústavy a minimálne príspevky od elektrární a sieťových napájačov tak, aby viedli k minimálnej hodnote skratového prúdu v mieste skratu,
- motory sa nesmú uvažovať,
- rezistencia vedení (vonkajších vedení a káblových vedení, vodičov a stredných vodičov) sa musí uvažovať pri najvyššej teplote.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

5.4 Ekvivalentný napäťový zdroj v mieste skratu

Metóda použitá pre výpočet skratových prúdov v norme [11] je založená na zavedení ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu.

Napätie ekvivalentného zdroja je napätie ideálneho zdroja priloženého v mieste skratu v súslednej zložkovej sústave a platí preň vzťah

$$E = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.1)$$

kde E je napätie ekvivalentného napäťového zdroja,
 c je napäťový súčiniteľ,
 U_n je združená hodnota menovitého napätia siete.

Ekvivalentný napäťový zdroj je jediným aktívnym napätím sústavy. Všetky sieťové napájače, synchrónne a asynchrónne stroje sú nahradzované svojimi vnútornými impedanciami.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [10][11].

5.5 Použitie súmerných zložiek

Výpočet skratových prúdov v trojfázových sústavách vyžaduje riešiť aj nesymetrické (nesúmerné) poruchové stavy. Z tohto dôvodu, s cieľom zjednodušenia výpočtov, v trojfázovej sústave môžeme každú nesúmernú sústavu fázorov napätí a prúdov nahradiť, podľa Fortescua, súmernými zložkami fázorov sústavy súslednej, spätnéj a netočivej. Nesúmernú trojfázovú sústavu reprezentovanú fázormi napätia $\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ (Obr.5-1 [10 str.69]) vo fázach a, b, c je možné jednoznačne rozložiť na tri trojfázové sústavy:

- na sústavu **súslednú** (synchrónnu):

$$\bar{U}_{a1} = \bar{U}_1; \quad \bar{U}_{b1} = \bar{a}^2 \bar{U}_{a1}; \quad \bar{U}_{c1} = \bar{a} \bar{U}_{a1} \quad (5.2)$$

- na sústavu **spätnú** (inverznú):

$$\bar{U}_{a2} = \bar{U}_2; \quad \bar{U}_{b2} = \bar{a} \bar{U}_{a2}; \quad \bar{U}_{c2} = \bar{a}^2 \bar{U}_{a2} \quad (5.3)$$

- na sústavu **netočivú** (nulovú):

$$\bar{U}_{a0} = \bar{U}_{b0} = \bar{U}_{c0} = \bar{U}_0 \quad (5.4)$$

Túto trojicu trojfázových sústav nazývame **sústavou súmerných zložiek**.

Trojfézová nesúmerná sústava i každá z jej troch súmerných zložiek sa otáčajú v matematicky kladnom smere uhlovou rýchlosťou ω . Súsledná sústava má rovnaký sled fáz ako daná nesúmerná sústava a spätná sústava má opačný sled fáz. Netočivá sústava je tvorená tromi rovnakými fázormi.

Pre operátory natočenia platí:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= 1 e^{j 120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \angle 120^\circ \\ \bar{a}^2 &= 1 e^{j 240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} = 1 \angle 240^\circ \end{aligned} \quad (5.5)$$

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

Nesúmernú sústavu fázorov napätia $\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$ môžeme nahradiť sústavou rovníc vyjadrených pomocou súmerných zložiek:

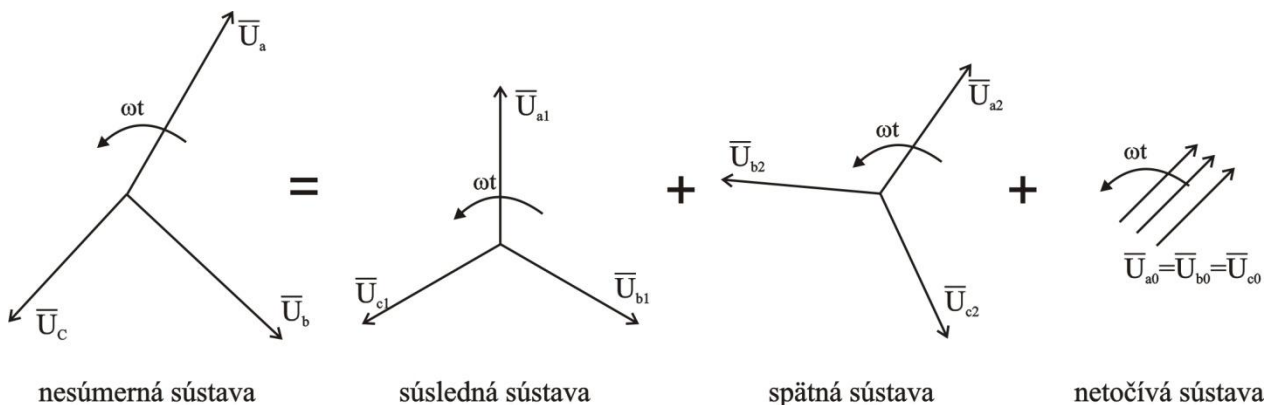
$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \bar{U}_{a0} + \bar{U}_{a1} + \bar{U}_{a2} \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_{b0} + \bar{U}_{b1} + \bar{U}_{b2} \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_{c0} + \bar{U}_{c1} + \bar{U}_{c2} \end{aligned} \quad (5.6)$$

a pokiaľ si zvolíme za referenčnú fázu a , môžeme sústavu (5.6) prepísať do tvaru:

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_0 + \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_0 + \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 \end{aligned} \quad (5.7)$$

Pre prúdy tečúce fázami a, b, c vyjadrené v sústave súmerných zložiek analogicky platí:

$$\begin{aligned}\bar{I}_a &= \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_0 + \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2\end{aligned}\quad (5.8)$$



Obr. 5-1 Rozloženie nesúmernej sústavy na sústavu súmerných zložiek

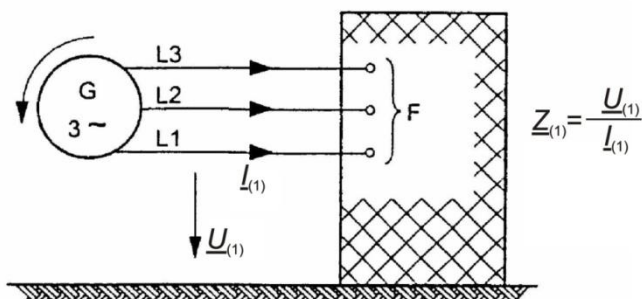
Norma [11] uvádza, že každá zložka zo sústavy súmerných zložiek má svoju vlastnú impedanciu. Avšak je nutné rozlišovať medzi skratovými impedanciami v mieste skratu F a skratovými impedanciami každého elektrického zariadenia.

Súslednú skratovú impedanciu $\underline{Z}_{(1)}$ v mieste skratu F určíme podľa Obr.5-2 [11 str.23], ak súmernú sústavu napätí súslednej zložky v odpovedajúcom poradí fáz (kladnom) priložíme do miesta skratu F, všetky synchronne a asynchronne stroje sú nahradené ich vnútornými impedanciami.

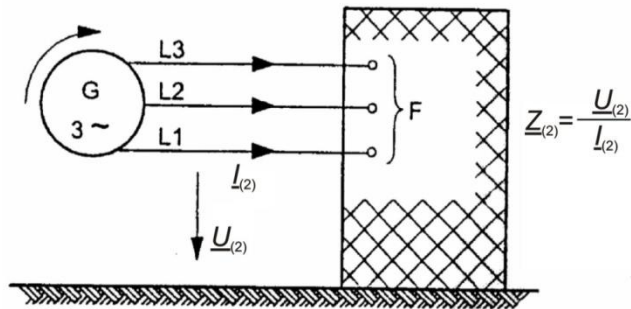
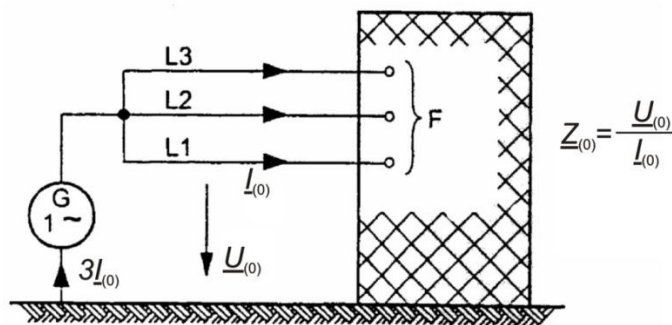
Spätnú skratovú impedanciu $\underline{Z}_{(2)}$ v mieste skratu F určíme podľa Obr.5-3 [11 str.23], ak súmernú sústavu napätí súslednej zložky v odpovedajúcom poradí fáz (zápornom) priložíme do miesta skratu F.

Netočivú skratovú impedanciu $\underline{Z}_{(0)}$ v mieste skratu F určíme podľa Obr.5-4 [11 str.23], ak priložíme striedavé napätie medzi tromi skratovanými fázami a spoločným spätným vedením (napríklad zemnicou sústavou, nulovým vodičom, zemnicími vodičmi, tieniacim káblu a plášťom káblu)

Hodnoty súsledných a spätných impedancií sa môžu navzájom líšiť iba v prípade točivých strojov (hydroalternátov). Ak sa počítajú elektricky vzdialené skraty, je dovolené uvažovať $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.



Obr. 5-2 Súsledná zložka skratovej impedancie $\underline{Z}_{(1)}$ v mieste skratu F

Obr. 5-3 Spätná zložka skratovej impedancie $\underline{Z}_{(2)}$ v mieste skratu FObr. 5-4 Netočivá zložka skratovej impedancie $\underline{Z}_{(0)}$ v mieste skratu F

Ak označíme nesymetrickú sústavu fázorov \bar{U}_F a symetrickú sústavu fázorov napätí \bar{U}_S , potom

$$\bar{U}_F = \begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} ; \quad \bar{U}_S = \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

čím sústavu rovníc (5.7) môžeme prepísať do tvaru

$$\bar{U}_F = \bar{T} \bar{U}_S \quad (5.10)$$

kde, \bar{T} je desymetrizačná transformačná matica

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Súmerné zložky fázorov napätia \bar{U}_S pri známych fázoroch napätia nesymetrickej sústavy \bar{U}_F vypočítame z maticovej rovnice

$$\bar{U}_S = \bar{S} \bar{U}_F \quad (5.12)$$

kde \bar{S} je štvorcová symetrizačná transformačná matica, pričom platí

$$\bar{S} = \bar{T}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Súmerné zložky fázorov $\bar{U}_0, \bar{U}_1, \bar{U}_2$ majú rovnakú frekvenciu ako je frekvencia fázorov nesúmernej sústavy \bar{U}_a, \bar{U}_b a \bar{U}_c .

Uvažujme jednoduchú symetrickú trojfázovú sústavu s alternátorom ako zdrojom napätia súslednej zložkovej sústavy. Skratový obvod zahrnuje impedanciu zloženú z impedancie alternátora impedancie vonkajšej časti obvodu. Hodnoty skratových prúdov v trojfázovej sústave vypočítame na základe vhodného matematického modelu. Tento model pozostáva z náhrady trojfázovej sústavy sústavou jednofázovou, pričom prevedieme rozklad nesúmernej sústavy, ktorá vznikla skratom, na tri súmerné sústavy. Pre tento rozklad platia rovnice

$$\begin{aligned}\bar{E}_1 &= \bar{Z}_{c1} \bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ \bar{E}_2 &= \bar{Z}_{c2} \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \\ \bar{E}_0 &= \bar{Z}_{c0} \bar{I}_0 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (5.14)$$

kde $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_0$ sú súmerné zložky napätia zdroja,

$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_0$ sú súmerné zložky napätia v mieste skratu,

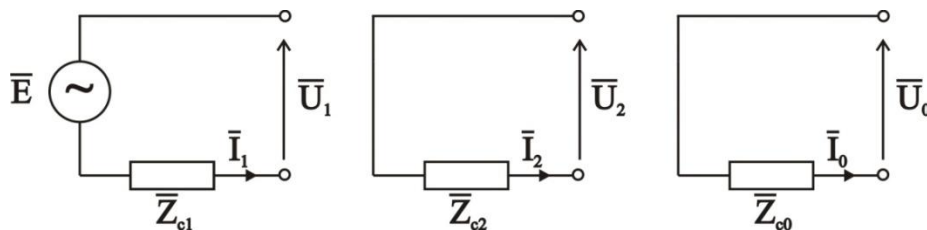
$\bar{Z}_{c1}, \bar{Z}_{c2}, \bar{Z}_{c0}$ sú súmerné zložky výsledných (celkových) impedancií k miestu skratu,

$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_0$ sú súmerné zložky skratového prúdu.

Pretože alternátor je vždy zdrojom len súslednej zložky napätia, platí ($\bar{E}_2 = \bar{E}_0 = 0$) a preto rovnicu (5.14) môžeme prepísať do tvaru (5.15). Súsledná zložka napätia zdroja \bar{E}_1 odpovedá napätiu ekvivalentného napät'ového zdroja v mieste skratu \bar{E} , preto je ďalej používané značenie \bar{E} bez indexu 1.

$$\begin{aligned}\bar{E} &= \bar{Z}_{c1} \bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ 0 &= \bar{Z}_{c2} \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \\ 0 &= \bar{Z}_{c0} \bar{I}_0 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (5.15)$$

Na základe rovníc (5.15) môžeme vytvoriť tri zložkové náhradné obvody pre riešenie skratov vid. Obr. 5-5 [1 časť 3 str.15].



Obr. 5-5 Náhradná schéma obvodu súslednej, spätnej a netočivej zložky

Tri samostatné obvody na Obr. 5-5 umožňujú vyriešiť skratové pomery v trojfázových obvodoch ich rôznym prepojením pre jednotlivé typy skratov. Ich výhoda je v tom, že trojfázové obvody sa požitím metódy náhradných obvodov riešia ako jednofázové.

Z rovníc (5.15) je zrejmé, že zdrojom napätia v súslednej zložkovej sústave je alternátor. Pôvodcom prúdu spätnej a netočivej sústavy je napät'ová nesymetria v mieste skratu.

Výsledný stav poruchy po vyriešení jednotlivých súmerných zložiek napätí a prúdov získame spätnou úpravou na trojfázovú nesymetrickú sústavu podľa (5.7) a (5.8).

Text kapitoly bol vytvorený podľa [1][7][11].

6 SKRATOVÉ IMPEDANCIE ELEKTRICKÝCH ZARIADENÍ

U sieťových napájačoch, transformátoroch, vonkajších vedení, kábloch, reaktoroch a podobných zariadeniach sú si súsledná a spätná skratová impedancia rovné $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$. Ak prvok ES neobsahuje žiadne magnetické väzby medzi fázami, potom jeho impedancia nezávisí na slede fáz pripojeného napätia. Pre symetrické zložky impedancie potom platí $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(0)}$ (platí pre reaktory).

Netočivá skratová impedancia $\underline{Z}_{(0)}$ sa určuje zo striedavého napätia uvažovaného medzi tromi paralelnými vodičmi a spoločným spätným vedením (napríklad zemou, zemiacím zariadením, nulovým vodičom, zemiacím vodičom, káblovým plášťom a káblovým pancierom). V tomto prípade preteká spätným vedením trojnásobok prúdu netočivej zložky. Pre uplatnenie netočivej zložky impedancie je rozhodujúci spôsob uzemnenia.

Impedancie generátorov (G), sieťových transformátorov (T) a elektrárenských blokov (S) sa musia vynásobiť korekčnými súčiniteľmi K_G , K_T , a K_S , ak sa skratové prúdy počítajú metódou ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

6.1 Sieťové napájače

Náhradnú súslednú impedanciu siete (sieťových napájačov), u ktorej je známy iba počiatočný súmerný rázový skratový prúd I''_{kQ} v bode pripojenia napájača Q, určíme nasledovne

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \quad (6.1)$$

Ak je známy pomer R_Q/X_Q , potom pre X_Q platí

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (6.2)$$

V prípade ak je skrat napájaný transformátorom zo siete vn, alebo vvn a zvn, u ktorej je známy iba počiatočný súmerný rázový skratový prúd I''_{kQ} v bode pripojenia napájača Q, potom je možné náhradnú súslednú skratovú impedanciu Z_{Qt} vzťahnutú k strane transformátora s nižším napätím určiť nasledovne

$$Z_{Qt} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (6.3)$$

kde U_{nQ} je menovité napätie sústavy v bode pripojenia napájača Q,

I''_{kQ} je počiatočný súmerný rázový skratový prúd v bode pripojenia napájača Q,

c je napäťový súčiniteľ pre napätie U_{nQ} ,

t_r je menovitý prevod transformátora, pri ktorom sa prepínač odbočiek nachádza v základnej polohe.

V prípade napájačov s menovitým napätím nad 35 kV napájaných z vonkajších vedení je možné náhradnú impedanciu Z_Q považovať za reaktanciu, t.j. $\underline{Z}_Q = 0 + j X_Q$. V iných prípadoch, ak nie je pre rezistanciu sieťových napájačov známa žiadna presná hodnota, je možné uvažovať $R_Q = 0,1 X_Q$ kde $X_Q = 0,995 Z_Q$.

O výpočte náhradnej netočivej skratovej impedancie siete v závislosti na konfigurácii vinutia a uzemnenia transformátora sa pojednáva v norme [14], kde v tabuľke 1 sú uvedené náhradné schémy netočivej skratovej impedancie transformátorov v závislosti na zapojení vinutí.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

6.2 Transformátory

6.2.1 Dvojvinuťové transformátory

Súsledné skratové impedancie dvojvinuťových transformátorov $\underline{Z}_T = R_T + j X_T$ s odbočkami regulovateľnými pre zaťaženie alebo bez nich je možné vypočítať

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (6.4)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 I_{rT}^2} \quad (6.5)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (6.6)$$

kde U_{rT} je menovité napätie transformátora na strane vyššieho alebo nižšieho napätia,

I_{rT} je menovitý prúd transformátora na strane vyššieho alebo nižšieho napätia,

S_{rT} je menovitý zdanlivý výkon transformátora,

P_{krT} sú menovité straty nakrátko transformátora,

u_{kr} je menovité napätie nakrátko v percentách,

u_{Rr} je činná zložka menovitého napätia nakrátko transformátora v percentách.

Činná zložka u_{Rr} sa môže vypočítať zo strát nakrátko P_{krT} vo vinutí pri menovitom prúde I_{rT} , obe hodnoty sa týkajú rovnamej strany transformátora.

U veľkých transformátorov je odpor tak malý, že je možné pri výpočte skratového prúdu predpokladať, že impedanciu predstavuje iba reaktancia. Pri výpočte nárazové skratového prúdu alebo jednosmernej zložky skratového prúdu je odpor nutné uvažovať.

Spätná skratová impedancia transformátora je rovnaká ako jeho súsledná $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_T = R_T + j X_T$. Údaje potrebné pre výpočet sa získajú zo štítka transformátora. Údaje o netočivej skratovej impedancii $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + j X_{(0)T}$ je možné získať zo štítka alebo od výrobcu.

Norma [13] poskytuje typové údaje dvojvinuťových transformátoroch používaných v sieťových napájačoch a v elektrárnach. V tabuľke 1 v norme [14] sú uvedené náhradné schémy netočivej skratovej impedancie transformátorov v závislosti na zapojení vinutí.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

6.2.2 Trojvinuťové transformátory

U trojvinuťových transformátorov je možné súsledné skratové impedancie \underline{Z}_A , \underline{Z}_B a \underline{Z}_C podľa Obr.6-1 [11 str.28] vypočítať pomocou troch skratových impedancií (vzťahnutých na stranu A transformátora) nasledovne

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{strana C rozpojená}) \quad (6.7)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{strana B rozpojená}) \quad (6.8)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{strana A rozpojená}) \quad (6.9)$$

Pre induktívnu zložku napätia nakrátko v percentách všeobecne platí

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (6.10)$$

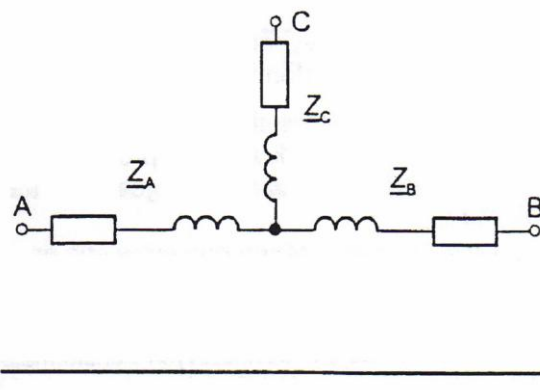
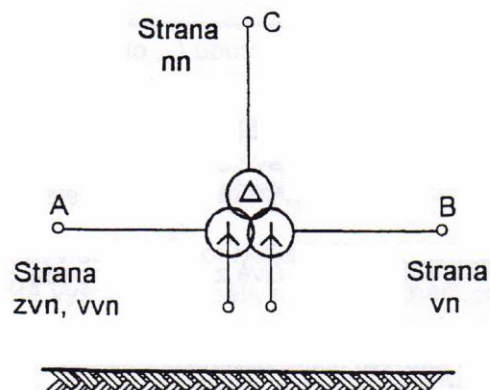
Súsledné skratové impedancie \underline{Z}_A , \underline{Z}_B a \underline{Z}_C

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (6.11)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (6.12)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (6.13)$$

- kde U_{rTA} je menovité napätie na strane A,
 S_{rTAB} je menovitý zdanlivý výkon medzi stranami A a B,
 S_{rTAC} je menovitý zdanlivý výkon medzi stranami A a C,
 S_{rTBC} je menovitý zdanlivý výkon medzi stranami B a C,
 u_{RrAB}, u_{XrAB} sú menovité činné a induktívne zložky napätia nakrátko uvedené v percentách medzi stranami A a B,
 u_{RrAC}, u_{XrAC} sú menovité činné a induktívne zložky napätia nakrátko uvedené v percentách medzi stranami A a C,
 u_{RrBC}, u_{XrBC} sú menovité činné a induktívne zložky napätia nakrátko uvedené v percentách medzi stranami B a C.



a, Označenie zapojenia vinutia

b, Náhradná schéma (súslednej zložkovej sústavy)

Obr. 6-1 Trojvinuťový transformátor

Netočivé impedancie trojvinuťových transformátorov sa môžu získať od výrobcov.

Norma [13] poskytuje typové údaje trojvinuťových transformátorov. V tabuľke 1 v norme [14] sú uvedené náhradné schémy netočivej skratovej impedancie transformátorov v závislosti na zapojení vinutí.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

6.2.3 Korekčné súčinitele pre impedancie dvoj- a trojvinuťových sieťových transformátorov

Sieťový transformátor je transformátor, ktorý spojuje dve alebo viac miest siete s rozdielnými napätiami.

U dvojvinuťových transformátorov s prepínačom odbočiek pri zaťažení aj bez, sa musí k impedanciám spočítaným podľa (6.4) až (6.6) zaviesť korekčný súčiniteľ K_T : $\underline{Z}_{TK} = K_T \underline{Z}_T$, kde $\underline{Z}_T = R_T + j X_T$.

$$K_T = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_T} \quad (6.14)$$

kde x_T je pomerná reaktancia transformátora,

c_{\max} je napät'ový súčiniteľ z Tab.4-2, odpovedá menovitému napätiu siete pripojeného ku strane nižšieho napätia sieťového transformátora.

Pre pomernú reaktanciu transformátora platí

$$x_T = \frac{X_T}{(U_{rT}^2/S_{rT})} \quad (6.15)$$

U trojvinuťových transformátorov sa určujú tri impedančné korekčné súčinitele

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{TAB}} \quad (6.16)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{TAC}} \quad (6.17)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 x_{TBC}} \quad (6.18)$$

Impedancie \underline{Z}_{AB} , \underline{Z}_{AC} a \underline{Z}_{BC} podľa (6.7) až (6.9) sa korigujú na hodnoty $\underline{Z}_{ABK} = K_{TAB} \underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{ACK} = K_{TAC} \underline{Z}_{AC}$, $\underline{Z}_{BCK} = K_{TBC} \underline{Z}_{BC}$. Z týchto impedancií sa pomocou rovníc (6.11) až (6.13) určia korigované ekvivalentné impedancie \underline{Z}_{AK} , \underline{Z}_{BK} a \underline{Z}_{CK} .

Spätne a netočivé impedancie transformátora (dvoj- a trojvinuťového) sa tiež musia prepočítať pomocou korekčného súčiniteľa. Impedancia medzi uzlom transformátora a zemou sa neprepočítava pomocou korekčného súčiniteľa.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11] [12].

6.3 Synchronne generátory

Pri výpočte počiatočných súmerných rázových skratových prúdov napájaných priamo z generátora bez blokového transformátora, je nutné použiť rázovú impedanciu generátora v súslednej sústave

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_d'' \quad (6.19)$$

Je nutné použiť korekčný činiteľ

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (6.20)$$

Pre pomernú rázovú reaktanciu generátora platí

$$x_d'' = \frac{X_d''}{(U_{rG}^2 / S_{rG})} \quad (6.21)$$

Korigovaná hodnota súslednej impedancie generátora

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (6.22)$$

kde c_{\max} je napäťový súčiniteľ z Tab.4-2,

U_n je menovité napätie sústavy,

U_{rG} je menovité napätie generátora,

S_{rG} je zdanlivý výkon generátora,

\underline{Z}_{GK} je korigovaná impedancia generátora,

\underline{Z}_G je rázová impedancia generátora v súslednej sústave,

φ_{rG} je fázový uhol medzi napätím a prúdom generátora,

X_d'' je rázová reaktancia generátora v pozdĺžnej osi,

x_d'' je pomerná rázová reaktancia generátora vzťahnutá k menovitej impedancii.

V prípade výpočtu prechodného skratového prúdu je u generátora nutné uvažovať prechodnú reaktanciu X_d' a pokiaľ sa počíta ustálený skratový prúd použije sa synchronná reaktancia X_d .

Pre fiktívne rezistancie generátorov R_{Gf} je možné použiť nasledujúce vzťahy

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

$$R_{Gf} = 0,07 X_d'' \text{ pre generátory s } U_{rG} \geq 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA,} \quad (6.23)$$

$$R_{Gf} = 0,15 X_d'' \text{ pre generátory s } U_{rG} \leq 1000 \text{ V.}$$

Spätná skratová impedancia turboalternátorov je približne rovnaká ako ich súsledná $\underline{Z}_{(2)G} = (R_{(2)G} + jX_{(2)G}) \approx \underline{Z}_{(1)G} = R_G + jX_d''$. V prípade hydroalternátorov, kde sú hodnoty rázovej reaktancie v pozdĺžnej osi X_d'' a rázovej reaktancie v priečnej osi X_q'' odlišné, vtedy sa určí spätná zložka skratovej reaktancie nasledovne

$$X_{(2)G} = \frac{(X_d'' + X_q'')}{2} \quad (6.24)$$

Netočivé impedancie generátorov sa môžu získať od výrobcov. Norma [13] poskytuje typové údaje generátorov.

Tak ako súsledná zložka skratovej impedancie, tak aj spätná a netočivá sa musia prepočítať pomocou korekčného súčiniteľa.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

6.4 Vonkajšie vedenia a káble

Súslednú skratovú impedanciu $Z_L = R_L + jX_L$ je možné vypočítať z parametrov vodiča, ako sú prierezy a rozstupy vodičov. Spätňá skratová impedancia vedení je rovná súslednej skratovej impedancii.

Činnú rezistanciu na jednotku dĺžky R'_L vonkajších vedení pri teplote 20 °C je možné vypočítať z menovitého prierezu q_n a rezistivity ρ

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (6.25)$$

Ak je teplota iná ako 20 °C je ju nutné rezistanciu prepočítať.

Pre rezistivitu je možné použiť hodnoty

$$\text{meď } \rho = \frac{1}{54} \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}; \text{ hliník } \rho = \frac{1}{34} \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}; \text{ zliatina hliníka } \rho = \frac{1}{31} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

Reaktancia na jednotku dĺžky X'_L pre vonkajšie vedenie transponované je

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (6.26)$$

kde d je geometrická stredná vzdialenosť medzi vodičmi,

r je polomer jednoduchého vodiča. V prípade zväzkových vodičov sa za r dosadí $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, kde R je polomer zväzku,

n je počet vodičov vo zväzku,

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

Meranie netočivých impedancií vonkajších vedení je uvedené v norme [14] alebo ich výpočet je uvedený v norme [13].

Súsledné a netočivé impedancie n_n a v_n káblov sa môžu použiť z údajov od výrobcov alebo z normy [13].

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

6.5 Asynchrónne motory

Motory vysokého a nízkeho napätia prispievajú k počiatočnému súmernému rázovému skratovému prúdu I''_k , k nárazovému skratovému prúdu i_p , k súmernému skratovému vypínaciemu prúdu I_b a u nesúmerných skratov tiež k ustálenému skratovému prúdu I_k .

Príspevok motorov v_n sa musí zahrnúť do výpočtu maximálneho skratového prúdu. Príspevok motorov n_n sa musí zahrnúť do výpočtov vo vlastnej spotrebe elektrárň a v priemyslových a podobných rozvodoch.

Impedanciu $Z_M = R_M + jX_M$ asynchrónnych motorov v súslednej a spätnej zložkovej sústave je možné určiť

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (6.27)$$

kde U_{rM} je menovité napätie motora,

I_{rM} je menovitý prúd motora,

S_{rM} je menovitý zdanlivý príkon motora,

I_{LR}/I_{rM} je pomer záberného prúdu k menovitému prúdu motora pri zabrzdennom motore.

Ak je známy pomer R_M/X_M , potom pre X_M platí

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad (6.28)$$

Nasledujúce vzťahy je možné použiť s dostatočnou presnosťou

$R_M/X_M = 0,10$, s $X_M = 0,995 Z_M$ pre motory vn s výkonom P_{rM} na dvojicu pólov ≥ 1 MW,

$R_M/X_M = 0,15$, s $X_M = 0,989 Z_M$ pre motory vn s výkonom P_{rM} na dvojicu pólov < 1 MW,

$R_M/X_M = 0,42$, s $X_M = 0,922 Z_M$ pre skupiny nn motorov vrátane pripojovacích káblov.

Netočivé impedancie motorov musí udať výrobca.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [11].

7 VÝPOČET SKRATOVÝCH PRÚDOV

Výpočet sa môže uskutočniť dvoma spôsobmi:

- **v skutočných hodnotách**- celý výpočet sa prevedie v skutočných fyzikálnych hodnotách (veličiny sa označujú veľkými písmenami),
- **v pomerných hodnotách**- veličiny sa počítajú v pomerných hodnotách, prepočet na tieto hodnoty sa prevádza pomocou vzťahných hodnôt napätia U_V a výkonu S_V (veličiny sa označujú malými písmenami).

Norma [11] odporúča počítat' skratové prúdy jak pre súmerné tak pre nesúmerné skraty, metódou súmerných zložiek. Ak sa počítajú skratové prúdy v sústavách s rozdielnymi napäťovými hladinami, je nutné prepočítať hodnoty impedancií z jednej napäťovej hladiny na inú, obvykle na tú napäťovú hladinu, v ktorej sa má určiť skratový prúd.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [10] [11].

7.1 Postup výpočtu

- 1) Zostaví sa základná schéma zapojenia a uvedú sa parametre jednotlivých prvkov a jednotlivé menovité hodnoty sietí. Označia sa miesta, kde sa budú počítat' skraty. Zvolí sa vzťahné napätie U_V a vzťahný výkon S_V (vzťahné napätie volíme podľa napäťovej hladiny, kde došlo ku skratu a vzťahný výkon volíme ako sumu menovitých výkonov generátorov).
- 2) Určíme skratové impedancie jednotlivých zariadení a prepočítajú sa do miesta skratu (na vzťahnú napäťovú hladinu U_V , pomocou prevodu transformátorov).
- 3) Zostavíme náhradnú schému zo skratových impedancií. V prípade trojfázového skratu uvažujeme len súsledné skratové impedancie, u nesymetrických skratov sa použijú súsledné, spätné a netočivé skratové impedancie.
- 4) Náhradná schéma sa zjednoduší na výslednú impedanciu do miesta skratu.
- 5) Vypočíta sa súmerný rázový skratový prúd I_k'' tečúci miestom skratu a ostatné charakteristické hodnoty skratového prúdu. V prípade potreby sa určia príspevky jednotlivých zdrojov skratu (synchronne stroje a asynchronne motory).

Text kapitoly bol vytvorený podľa [10].

7.2 Prepočet skratových impedancií

7.2.1 Výpočet v skutočných hodnotách

Prepočet skutočnej hodnoty impedancie \bar{Z}_n (vzťahnutá na menovité napätie zariadenia U_n) na skutočnú prepočítanú hodnotu impedancie \bar{Z}_p (vzťahnutá už na vzťahné napätie U_V) sa rieši pomocou nasledujúceho vzťahu

$$\bar{Z}_p = \bar{Z}_n \cdot \left(\frac{U_V}{U_n} \right)^2 \quad (7.1)$$

Text kapitoly bol vytvorený podľa [2] [10].

7.2.2 Výpočet v pomerných hodnotách

Na začiatku výpočtu je zvolené vzťahné napätie U_V a výkon S_V . Potom pre vzťahný prúd I_V a vzťahnú impedanciu Z_V platí

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} U_V}; \quad Z_V = \frac{U_V^2}{S_V} \quad (7.2)$$

Všetky veličiny v skutočných jednotkách (už prepočítané na vzťahnú napät'ovú hladinu) je možné prepočítať na pomerné hodnoty delením príslušnou vzťahnou hodnotou (U_V, I_V, S_V). Takže pre pomerné hodnoty napätia u , prúdu i a výkonu s platia nasledovné vzťahy

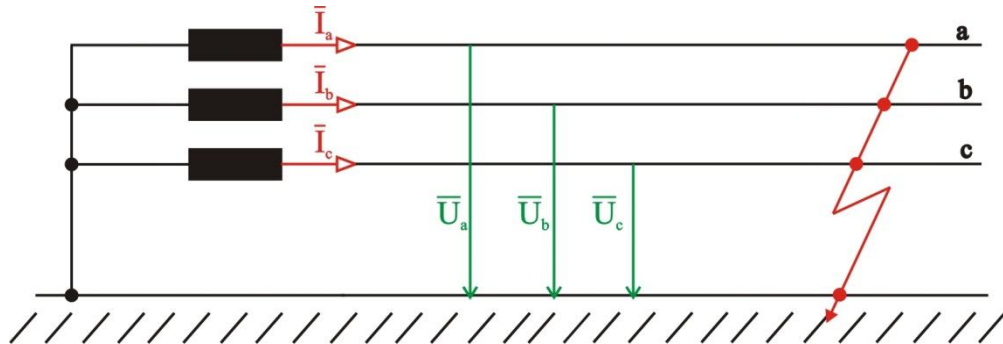
$$u = \frac{U}{U_V}; \quad i = \frac{I}{I_V}; \quad s = \frac{S}{S_V} \quad (7.3)$$

Prepočet skutočnej hodnoty prepočítanej impedancie \bar{Z}_p na pomernú prepočítanú hodnotu impedancie \bar{z}_p sa prevádza pomocou tohto vzťahu

$$\bar{z}_p = \frac{\bar{Z}_p}{Z_V} = \frac{\bar{Z}_n \cdot \left(\frac{U_V}{U_n}\right)^2}{\frac{U_V^2}{S_V}} = \bar{Z}_n \cdot \frac{S_V}{U_n^2} \quad (7.4)$$

Text kapitoly bol vytvorený podľa [2] [10].

7.3 Trojfázový zemný skrat



Obr. 7-1 Trojfázový zemný skrat

Trojfézový zemný skrat je zobrazený na Obr. 7-1 [7 str.90] a je z neho zrejmé, že v mieste skratu platí pre napätia vo fázach a, b, c

$$\bar{U}_a = \bar{U}_b = \bar{U}_c = 0 \quad (7.5)$$

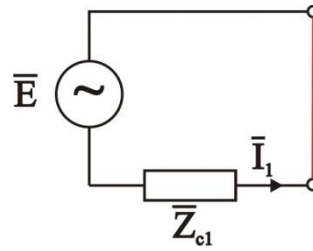
Dosadením rovnice (7.5) do (5.7) získame

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = 0 \\ \bar{U}_b &= \bar{U}_0 + \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 = 0 \\ \bar{U}_c &= \bar{U}_0 + \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 = 0 \end{aligned} \quad (7.6)$$

Sčítaním týchto rovníc zistíme, že $\bar{U}_0 = 0$. Pri tomto poznatku a pri odčítaní druhej rovnice od prvej dostávame

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_1 = \bar{U}_2 = 0 \quad (7.7)$$

Náhradná zložková schéma pre trojfázový skrat je zobrazená na Obr.7-2 [1 časť 3 str.16].



Obr. 7-2 Náhradná zložková schéma pre trojfázový skrat

Dosadením do základných rovníc (5.15) dostaneme vzťahy pre zložkové prúdy

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{c1}}; \quad \bar{I}_2 = 0; \quad \bar{I}_0 = 0 \quad (7.8)$$

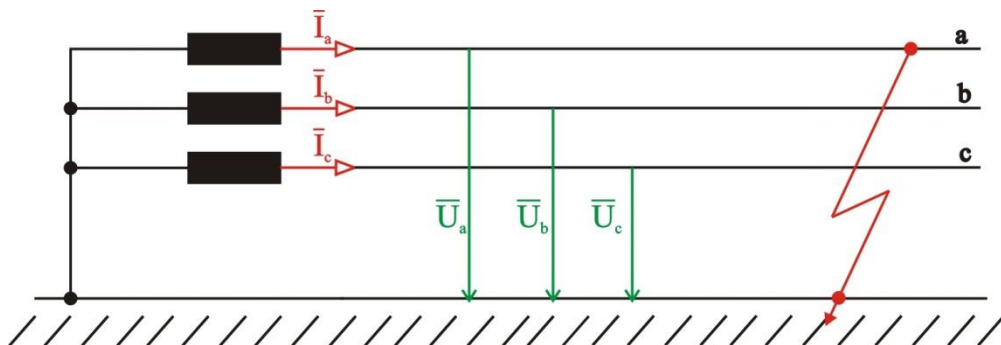
Dosadením do rovnice (5.8) zistíme hľadané skratové prúdy v jednotlivých fázach

$$\bar{I}_a = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{c1}}; \quad \bar{I}_b = \bar{a}^2 \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{c1}}; \quad \bar{I}_c = \bar{a} \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{c1}}; \quad (7.9)$$

Pri trojfázovom skrate sa uplatní iba súsledná zložková sústava.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [7] [10].

7.4 Jednofázový skrat



Obr. 7-3 Jednofázový skrat

Jednofázový skrat je zobrazený na Obr. 7-3 [7 str.91], a je z neho zrejmé, že v mieste skratu platí pre napätie vo fáze *a*

$$\bar{U}_a = 0 \quad (7.10)$$

Pre prúdy nepostihnutými fázami *b, c* platí

$$\bar{I}_b = \bar{I}_c = 0 \quad (7.11)$$

Podľa rovníc (5.7) a (5.8) budú fázory napätí a prúdov v mieste poruchy

$$\begin{aligned} \bar{U}_a &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = 0 \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 = 0 \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_0 + \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 = 0 \end{aligned} \quad (7.12)$$

Odčítaním posledných dvoch rovníc získame

$$(\bar{a} - \bar{a}^2)\bar{I}_1 + (\bar{a}^2 - \bar{a})\bar{I}_2 = 0 \quad (7.13)$$

z čoho vyplýva, že $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$. Ak dosadíme to, že $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$ do (5.8) zistíme $\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2$. Potom základné rovnice (5.15) majú tvar

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{Z}_{c1}\bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ 0 &= \bar{Z}_{c2}\bar{I}_1 + \bar{U}_2 \\ 0 &= \bar{Z}_{c0}\bar{I}_1 + \bar{U}_0 \end{aligned} \quad (7.14)$$

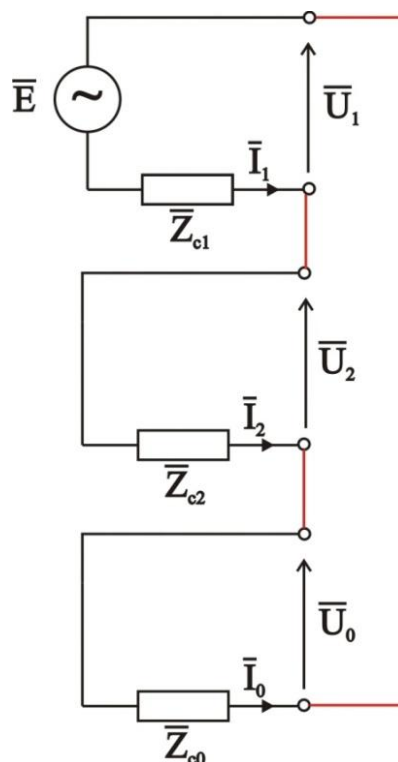
a ich sčítaním a uvažovaním rovnice (7.12) získame

$$\bar{E} = (\bar{Z}_{c1} + \bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c0})\bar{I}_1 \quad (7.15)$$

odkiaľ

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_{c1} + \bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c0}} \quad (7.16)$$

Náhradná zložková schéma pre jednofázový skrat je zobrazená na Obr.7-4 [1 časť 3 str.22].



Obr. 7-4 Náhradná zložková schéma pre jednofázový skrat

Takže skratový prúd vo fáze a bude

$$\bar{I}_a = \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \frac{3\bar{E}}{\bar{Z}_{c1} + \bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c0}} \quad (7.17)$$

Pri jednofázovom skrate sa uplatnia všetky tri zložkové sústavy.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [7] [10].

8 POPIS DISTRIBUČNEJ SÚSTAVY E.ON- VÝCHOD

Distribučná sústava (DS)

E.ON Distribuce, a.s. prevádzkuje distribučné siete na napäťových hladinách:

- veľmi vysokého napätia (vvn)- 110 kV,
- vysokého napätia (vn)- 22 kV,
- nízkeho napätia (nn)- 0,4 kV.

Prevádzka distribučnej siete vvn, vn, a nn

Distribučná sieť E.ON Distribuce, a.s. je prevažne napájaná z prenosovej sústavy (PS) spoločnosti ČEPS, a.s.. Distribučná sieť je ďalej čiastočne napájaná z výrobní E.ON, závodných elektrární a ostatných lokálnych zdrojov.

Nadradené transformačné stanice PS/110 kV

Na zásobovacom území E.ON- východ je napájanie distribučnej siete vvn- 110 kV zaistené z nadradenej sústavy vvn a zvn (400kV resp. 220kV) pomocou nadradených transformácií v rozvodniach: Čebín, Otrokovice, Slavětice, Sokolnice a Mírovka (vyčlenený transformátor 250 MVA na zásobovanie časti územia E.ON- východ).

Distribučná sieť 110 kV

Distribučná sieť v oblasti E.ON- východ je prevádzkovaná v oddelených systémoch (tzv. uzlové oblasti (UO)) prislúchajúcich jednotlivým transformátorom 400/110 kV resp. 220/110 kV s maximálnym možným skruhovaním jednotlivých sieťových celkov. Rozpojovacie miesta sú zvolené tak, že z hľadiska strát sa spôsob prevádzky siete 110 kV blížil paralelnému chodu.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [15].

Úplné zapojenie distribučnej siete 110 kV E.ON- východ je uvedené v elektronickej prílohe.

8.1 Uzlová oblasť Čebín

Rozvodňa (R) Čebín (CNT) s transformáciou 400/110 kV je prepojená s nadradenou PS 400 kV pomocou vedení č. 423 (Čebín- Sokolnice), 434 (Čebín- Slavětice) a 422 (Čebín- Mírovka).

R 110 kV Čebín je vybavená troma prípojnicovými systémami (A, B, C), jednou pomocnou prípojniciou a dvoma kombinovanými priečnymi spínačmi prípojnic. R 110 kV Čebín je napájaná pomocou troch transformátorov 400/110 kV (T401, T402, T403), z ktorých každý pracuje do samostatnej prípojnice. Týmto spôsobom prevádzky každý jeden z transformátorov napája svoju vlastnú uzlovú oblasť. Transformátor T401 ($S_n=350$ MVA) pracuje do prípojnice A, T402 ($S_n=350$ MVA) pracuje do prípojnice B a T403 ($S_n=250$ MVA) pracuje do prípojnice C.

Na prípojnici A sú napojené vedenia 110 kV č. 5533, 5534, 505 a 506. Na prípojnici A pracujú dva distribučné transformátory (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA) a dva distribučné transformátory zásobujúce České dráhy (110/22 kV; oba o výkone $S_n=13,3$ MVA).

Z prípojnice B je vyvedený výkon pomocou vedenia 110 kV č. 5553, 5554, 521 a 522.

Na prípojnici C sú napojené vedenia 110 kV č. 5537, 508, 507, 526, 5597, 524 a 523.

Ďalej v práci nás bude zaujímať oblasť Brna, napájaná z R 110 kV Čebín (CNT-B) z prípojnice B. Súčasný zapojenie DS 110 kV UO rozvodni Čebín je zobrazené na obrázku v *Prílohe A*. Na tomto obrázku sú prípojnice, vedenia a transformátory patriace do UO Čebín napájané z prípojnice B označené žltou farbou.

8.2 Uzlová oblasť Sokolnice

R Sokolnice (SO) s transformáciou 400/220/110 kV je prepojená s nadradenou PS 400 kV pomocou vedení č. 423 (Čebín- Sokolnice), 417 (Otrokovice- Sokolnice), 435 a 436 (Slavětice- Sokolnice) a pomocou cezhraničných vedení smerom na Slovensko č. 497 (Sokolnice- Stupava (SEPS)) a 424 (Sokolnice- Křižovany (SEPS)). Prepojenie na PS 220 kV je pomocou vedení č. 251 a 252 (Sokolnice- Prosenice), 203 (Sokolnice- Opočinec), 207 (Sokolnice- Tábor) a pomocou cezhraničných vedení smerom na Rakúsko č. 243 a 244 (Sokolnice- Bisamber (APG)) a pomocou cezhraničného vedenia smerom na Slovensko č. 280 (Sokolnice- Senica (SEPS)).

R 110 kV SO je vybavená troma prípojnicovými systémami (A, B, C), jednou pomocnou prípojniciou, dvoma kombinovanými priečnymi spínačmi prípojnic a tiež je možné pozdĺžne delenie prípojnic. R 110 kV SO je napájaná pomocou jedného transformátora 400/110 kV (T402; $S_n=350$ MVA) a dvoch transformátorov 220/110 kV (T202, T203; oba o výkone $S_n=250$ MVA). T402 pracuje do prípojnice B, T202 pracuje do prípojnice C a T203 je momentálne odpojený. Priečny spínač spojuje prípojnice A a C.

Na prípojniciu A sú napojené vedenia 110 kV č. 511, 531 a 536.

Z prípojnice B je vyvedený výkon pomocou vedenia 110 kV č. 515, 514, 537, 538 a 512. Na prípojniciu B sú napojené dva distribučné transformátory T101 a T103 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA) a distribučný transformátor T102 (110/22 kV; $S_n=25$ MVA).

Na prípojniciu C sú napojené vedenia 110 kV č. 517, 530, 535.

Ďalej v práci nás bude zaujímať oblasť Brna a Južnej Moravy, napájaná z R 110 kV Sokolnice (SO-B) z prípojnice B. Súčasný zapojenie DS 110 kV UO rozvodni Sokolnice je zobrazené na obrázku v *Prílohe A*. Na tomto obrázku sú prípojnice, vedenia a transformátory patriace do UO Čebín napájané z prípojnice B označené modrou farbou.

8.3 Popis rozvodní 110/vn kV v UO R Čebín a R Sokolnice

8.3.1 Popis rozvodní v UO R Čebín

Nasledujúce rozvodne sú napájané z R Čebín (CNT-B).

- **Adamov (AD)**

R 110 kV AD neobsahuje prípojniciu 110 kV. Je tu pripojený jeden distribučný transformátor T101 (110/22 kV; $S_n=16$ MVA), ktorý je spojený cez vypínač s vedením 110 kV č. 522. Toto vedenie je pripojené do siete 110 kV cez odbočku na vedení č. 522 (miesto napojenia je bod b.č.32), ktoré spojuje R 110 kV Čebín (CNT-B) a Husovice (HUV-A).

- **Brno- Příkop (BNP)**

R 110 kV BNP je zapúzdrená rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené káblové vedenia 110 kV č. 5551 a 5553. Rozvodňa obsahuje dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Brno-Bohunice (BOB)**

R 110 kV BOB je vybavená jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 5554 a 5556. Rozvodňa obsahuje dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Brno- elektráreň Červený Mlýn (CML)**

R 110 kV CML je zapuzdrená rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, vyvádzajúca výkon z elektrárne Červený Mlýn, kde je inštalovaná plynová a parná turbína. Celkový inštalovaný výkon turbín je $S_n=90$ MVA. Plynová turbína TG10 vyvádza výkon na prípojnicu 110 kV pomocou transformátora T10 (121/10,5 kV; $S_n=100$ MVA). Parná turbína TG20 vyvádza výkon na prípojnicu 110 kV pomocou transformátora T20 (121/6,3 kV; $S_n=40$ MVA). Z prípojnic je výkon ďalej rozvádzaný pomocou káblových vedení č. 5055 a 5053. Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic. Červený Mlýn zaisťuje kombinovaný výrobu elektriny a tepla pre Brno. Elektráreň navyše poskytuje podporné služby (PpS) pre elektrizačnú sústavu.

- **Brno- Královopolská (KPO)**

R 110 kV KPO je vybavená jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 5532 a 5531. Rozvodňa obsahuje dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=25$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Brno- Medlánky (MEY)**

R 110 kV MEY je vybavená jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 5553, 5558 a kábel 110 kV č. 5055. Sú tu pripojené dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Brno-Moravany (MOB)**

R 110 kV MOB je zapuzdrená rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 5557 a 5558. Rozvodňa obsahuje jeden distribučný transformátor T101 (110/22 kV; $S_n=40$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

8.3.2 Popis rozvodní v UO R Sokolnice

Nasledujúce rozvodne sú napájané z R Sokolnice (SO-B).

- **Brno – Černovice (BNC)**

R 110 kV BNC je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 5543 a 5545. Rozvodňa obsahuje dva distribučné transformátory T101 (110/22 kV; $S_n=25$ MVA) a T102 (110/22 kV; $S_n=40$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic. Je nutné dodať, že rozvodňa slúži spaľovni SAKO Brno, a.s., kde sa vyrába teplo a tiež elektrickú energiu pre Brno. Je tu inštalovaný generátor o výkone $S_n=25$ MVA.

- **Bučovice (BU)**

R 110 kV BU je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 518 a 519. Rozvodňa obsahuje dve distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=25$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Dukovany- vlastná spotreba (DK)**

R 110 kV DK je rozvodňa s dvojicou jednoduchých prípojnic. Prípojnicu A patrí k vlastnej spotrebe I a II bloku elektrárne Dukovany. Táto prípojnicu je vybavená dvoma distribučnými transformátormi T01 a T02 (110/6 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA) a sú na ňu pripojené vedenia 110 kV č. 5584 (oblasť rozvodne Slavětice) a 5587 (oblasť rozvodne Oslavany). Prípojnicu B patrí k vlastnej spotrebe III a IV bloku elektrárne Dukovany. Táto prípojnicu je vybavená dvoma distribučnými transformátormi T71 a T72 (110/6 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA) a sú na ňu pripojené vedenia 110 kV č. 5586 (oblasť rozvodne Sokolnice) a 5585 (oblasť rozvodne Slavětice). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma (jak pre prípojnicu A tak i pre B), ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic. Je vidieť, že štvorica transformátorov je napájaná z troch rozvodní (Slavětice, Sokolnice a Oslavany), čo je spôsobené tým, že ide o jadrovú elektrárňu, ktorej vlastná spotreba musí byť napájaná aspoň z dvoch nezávislých zdrojov.

- **Modřice u Brna- ČD (MED)**

R 110 kV MED je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 515 a 5549. Rozvodňa obsahuje tri distribučné transformátory T1, T2 a T3 (110/27 kV; všetky o výkone $S_n=13,3$ MVA) a jeden distribučný transformátor T104 (110/27 kV; $S_n=16$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Mokrý- Cementárna (MQ)**

R 110 kV MQ je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 538 a 528. Rozvodňa obsahuje tri distribučné transformátory T101, T102 a T103 (110/6 kV; všetky o výkone $S_n=25$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Slavkov u Brna (SLB)**

R 110 kV SLB je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 537 a 5561. Rozvodňa obsahuje dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=25$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Vyškov (VY)**

R 110 kV VY je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 556 a 519. Rozvodňa obsahuje dve distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Brno- Zbrojovka (ZBB)**

R 110 kV ZBB je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 5541 a 5542. Rozvodňa obsahuje dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=25$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

- **Brno- Zetor (ZET)**

R 110 kV ZET je rozvodňa s jedným prípojnicovým systémom, do ktorého sú pripojené vedenia 110 kV č. 5559 a 5560. Rozvodňa obsahuje dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Usporiadanie rozvodne je prevedené ako H- schéma, ktorá umožňuje pozdĺžne delenie prípojnic.

8.3.3 Popis rozvodní napájaných z UO R Čebín a R Sokolnice

Nasledujúce rozvodne sú napájané jak z R Čebín (CNT-B) tak z R Sokolnice (SO-B).

- **Brno-Teplárna (BNT)**

R 110 kV BNT je zapuzdrená rozvodňa s dvoma pripojnicovými systémami (A, B), priečnym spínačom a možnosťou pozdĺžneho delenia prípojnic. Prípojnicu A patrí do UO R Sokolnice. Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 510 a 5542. Na prípojnicu A sú zapojené štyri distribučné transformátory T101, T102, T103 a T104 (110/22 kV; všetky o výkone $S_n=40$ MVA). Prípojnicu B patrí do UO R Čebín. Do tejto prípojnice je pripojené vedenie 110 kV č. 513 a káblové vedenie č. 5051. Tepláreň vyrába teplo a elektrickú energiu kombinovaným spôsobom a sú tu inštalované generátory o celkovom výkone $S_n=90$ MVA.

- **Brno-Husovice (HUV)**

R 110 kV HUV je vybavená dvoma pripojnicovými systémami (A, B), priečnym spínačom a možnosťou pozdĺžneho delenia prípojnic. Prípojnicu A patrí do UO R Čebín. Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 521, 522, 5532, 5531, 5548 a 539. Na prípojnicu A sú zapojené dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Prípojnicu B patrí do UO R Sokolnice. Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 528, 5547 a 5541.

- **Brno-Komárov (KV)**

R 110 kV KV je vybavená dvoma pripojnicovými systémami (A, B) a priečnym spínačom. Prípojnicu A patrí do UO R Čebín. Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 513, 5544, 5556 a 5557. Prípojnicu B patrí do UO R Sokolnice. Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 5549, 514, 5543 a 510. Na prípojnicu B sú zapojené dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA).

- **Brno-Líšeň (LI)**

R 110 kV LI je vybavená dvoma pripojnicovými systémami (A, B) a priečnym spínačom. Prípojnicu A patrí do UO R Čebín. Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 539 a 5544. Na prípojnicu A sú zapojené dva distribučné transformátory T101 a T102 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Prípojnicu B patrí do UO R Sokolnice. Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 5561, 5545, 5559 a 5560.

- **Brno-Maloměřice, Výtopna (VMA)**

R 110 kV VMA neobsahuje prípojnicu 110 kV. Je tu inštalovaný generátor o výkone $S_n=4,5$ MVA, ktorého výkon je vyvedený pomocou transformátorov T101 a T102 (110/6 kV; oba o výkone $S_n=16$ MVA) do siete 110 kV. T101 je napojený na vedenie č. 5548, patriace do UO R Čebín. T102 je napojený na vedenie č. 5547, patriace do UO R Sokolnice. Vypínače sú inštalované na vedeniach iba na strane v R Husovice. Výtopna vyrába teplo a elektrinu kombinovaným spôsobom.

- **Oslavany (OS)**

R 110 kV OS je vybavená dvoma pripojnicovými systémami (A, B) a priečnym spínačom. Prípojnicu A patrí do UO R Čebín (CNT-A) a sú na ňu pripojené vedenia 110 kV č. 502, 503, 505 a 506. Na prípojnicu A je zapojený jeden distribučný transformátor T101 (110/22 kV; $S_n=25$ MVA) a dva distribučné transformátory T102 a T103 (110/22 kV; oba o výkone $S_n=40$ MVA). Prípojnicu B patrí do UO R Sokolnice (SO-A). Do tejto prípojnice sú pripojené vedenia 110 kV č. 501, 5587, 511, 512 a 5586.

Táto rozvodňa nie je predmetom štúdia a nebude v nej posudzovaný ustálený chod ani skratové pomery, pretože nie je napájaná z transformátorov T402 pracujúcich do prípojnic B, jak v R Čebín tak v R Sokolnice.

Text kapitoly bol vytvorený podľa [15] [16].

9 VÝPOČET PRI SAMOSTATNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE

Súčasná prevádzka UO R Čebín a R Sokolnice je popísaná v kapitole 8 a schéma zapojenia je zobrazená na obrázku v *Prílohe A*. Stručne sa dá povedať, že v R 110 kV Čebín, transformátor T402 ($S_n=350$ MVA) pracuje do prípojnice B a napája rozvodne spadajúce do svojej oblasti. To isté platí v R 110 kV Sokolnice, kde T402 ($S_n=350$ MVA) pracujúci do prípojnice B, napája vlastnú oblasť.

Tento typ oddelenej prevádzky UO R Čebín (CNT-B) a R Sokolnice (SO-B) je z hľadiska spoľahlivosti dodávky elektrickej energie, nie najlepší. Dôvod je ten, že v prípade poruchy na prípojnici B alebo na jednom z transformátorov T402, či už v R 110 kV Sokolnice alebo v R 110 kV Čebín, je jedna alebo druhá UO oblasť bez dodávky elektrickej energie (pochopiteľne podľa toho, kde vznikla porucha), teda aspoň po dobu, pokiaľ operátor na dispečinku nezasiahne.

Ďalej budeme skúmať:

- napät'ové pomery v rozvodniach (uzloch) siete 110 kV,
- zaťaženie transformátorov (400/110 kV a 110/vn kV),
- zaťaženie vedení 110 kV,
- celkovú bilanciu činných výkonov,
- skratové pomery v rozvodniach (uzloch) siete 110 kV.

Samotné vyhodnotenie výpočtov bude prevedené na konci kapitoly.

9.1 Ustálený chod

Výpočet ustáleného chodu skúmanej oblasti siete 110 kV je realizovaný na Dispečinku 110 kV spoločnosti E.ON, pomocou dispečerského riadiaceho systému *SINAUT SPECTRUM 4.4*. Systém umožňuje riadenie prevádzky siete a tiež výpočet štúdií. Tento program pracuje s aktuálnymi dodávkami lokálnych zdrojov, odbermi transformátorov, parametrami vedení a transformátorov. Z tohto dôvodu, žiadne hodnoty nie je nutné ručne do systému zadávať. Je nutné spomenúť dátum výpočtu (platí pre všetky výpočty v tejto práci), ktorý bol dňa **23.3.2013 o 10,00 hod. (zimná prevádzka DS)**. Všetky vypočítané hodnoty program ukladá do dátových súborov typu *txt*, ktoré sú uvedené v elektronickej prílohe práce (platí pre výpočty ustálených chodov aj v ďalších kapitolách).

Výpočtový program používa na výpočet ustáleného chodu Newtonovú iteračnú metódu a vedenia sú modelované pomocou náhradných článkov typu Π .

Po samotnom výpočte budú kontrované nasledujúce hodnoty. Či je napätie v rozvodniach (uzloch) siete v dovolenej tolerancii $\pm 10\%$ od menovitej hodnoty $U_n=110$ kV (napätie sa môže nachádzať v intervale 99 až 121 kV). Či nie sú transformátory (400/110 kV a 110/vn kV) prúdovo preťažené (menovitý prúd transformátorom uvažujeme ako maximálne prúdové zaťaženie transformátora). Kontrola zaťaženia vedení 110 kV vychádza z kontroly prúdového zaťaženia vedenia, kde maximálny prúd vedením je daný jeho prierezom a môže byť znížený (obmedzený) prevodmi meracích transformátorov prúdu (pretože ani samotné meracie transformátory nemôžu byť prúdovo preťažované, preto sa obmedzuje prúd vedením). U vedení sa ďalej kontroluje, či nie prekročená ich prenosová schopnosť.

Napät'ové pomery v rozvodniach

Farebné značenie v *Tab. 9-1* (použitú aj v ostatných tabuľkách tejto kapitoly) zodpovedá, značeniu na obrázku v *Prílohe A*. Žltou farbou sú označené rozvodne patriace do UO R Čebín a modrou rozvodne patriace do UO R Sokolnice.

Použité symboly v *Tab.8-1*:

U je napätie v rozvodni (združená hodnota)

δ je uhol napätia.

Tab. 9-1 Napät'ové pomery v rozvodniach siete 110 kV- samostatná prevádzka

Rozvodňa	U	δ	Rozvodňa	U	δ
Skratka	(kV)	(°)	Skratka	(kV)	(°)
AD	117,4	-1,31	KV-B	119,3	-5,32
BNC	119,2	-5,39	LI-A	117,4	-1,75
BNP	117,9	-1,62	LI-B	119,2	-5,40
BNT-A	119,0	-5,52	MED	119,6	-5,03
BNT-B	117,8	-1,63	MEY	117,9	-1,59
BOB	117,4	-1,91	MOB	117,6	-1,78
BU	118,2	-5,81	MQ	119,0	-5,39
CML	118,0	-1,57	SLB	119,3	-5,11
CNT-B	117,6	-0,83	SO-B	119,8	-4,62
DK-B2	120,0	-4,66	VMA-T101	119,0	-5,48
HUV-A	117,3	-1,60	VMA-T102	117,3	-1,60
HUV-B	119,0	-5,48	VY	117,1	-6,58
KPO	117,3	-1,61	ZBB	119,0	-5,51
KV-A	117,6	-1,75	ZET	119,1	-5,41

Zat'aženie transformátorov**A. Transformátory dodávajúce výkon do oblasti**

- Transformátory 400/110 kV

Použité symboly v *Tab.9-2*:

S_{nT} menovitý zdanlivý výkon transformátora,

I_{nT} menovitý prúd transformátora (strana 110 kV),

P_{dodT} činný výkon dodávaný transformátorom (strana 110 kV),

Q_{dodT} jalový výkon dodávaný transformátorom (strana 110 kV),

ΔP_T straty činného výkonu na transformátore,

I_T vypočítaný prúd tečúci transformátorom (strana 110 kV),

i_{zT} percentuálne prúdové zaťaženie transformátora (strana 110 kV),

ΣP_{dodT} celkový dodávaný činný výkon transformátormi,

$\Sigma \Delta P_T$ celkové straty činného výkonu na transformátoroch.

Tab. 9-2 Transformátory 400/110 kV - samostatná prevádzka

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}	
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)	
SO-B	T402	400/110	350	1837	178,2	23,4	0,064	865,9	47,1	
CNT-B	T402		350	1837	99,3	-18,8	0,027	496,2	27,0	
					ΣP_{dodT}	277,5	$\Sigma \Delta P_T$	0,091		

- Transformátory 110/vn kV

Tab. 9-3 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - samostatná prevádzka

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}	
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)	
BNC	T102	110/22	40	210	7,2	-0,4	0,025	35,1	16,7	
CML	T10	121/10,5	100	525	44,7	17,3	0,138	234,6	44,7	
	T20	121/6,3	40	210	15,5	3,5	0,055	77,7	37,0	
					ΣP_{dodT}	67,4	$\Sigma \Delta P_T$	0,218		

B. Transformátory odoberajúce výkon z oblasti

- Transformátory 110/vn kV

V Tab.9-4 u niektorých transformátorov nie je uvedená hodnota činných strát, je to z dôvodu, že tieto transformátory nepatria spoločnosti E.ON (tzv. „cudzie transformátory“). Veľkosti odberov distribučných transformátorov sa v priebehu ďalších výpočtov nemenili a preto je možné vychádzať z Tab.9-4.

Použité symboly v Tab.9-4:

P_{odbT} činný výkon odoberaný transformátorom (strana 110 kV),

Q_{odbT} jalový výkon odoberaný transformátorom (strana 110 kV),

ΣP_{odbT} celkový odoberaný činný výkon transformátormi.

Tab. 9-4 (1/2) Transformátory 110/vn kV (odber výkonu) - samostatná prevádzka

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{odbT}	Q_{odbT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)
AD	T101	110/22	16	84	-1,4	-0,3	0,025	7,1	8,5
BNC	T101	110/22	25	131	-16,5	-0,4	0,057	80,0	61,1
BNP	T101	110/22	40	210	0	0	0,017	0,1	0
	T102	110/22	40	210	-24,0	-5,0	0,061	120,3	57,3
BNT-A	T101	110/22	40	210	-2,1	0,1	0,020	10,1	4,8
	T102	110/22	40	210	-5,7	0,1	0,022	27,6	13,1
	T103	110/22	40	210	-27,6	-3,9	0,079	135,4	64,5
	T104	110/22	40	210	0	0	0,019	0,1	0,0
BOB	T101	110/22	40	210	-18,0	-1,0	0,079	88,8	42,3
	T102	110/22	40	210	-18,5	0,2	0,088	90,9	43,3
BU	T101	110/22	25	131	-8,1	-2,2	0,030	41,2	31,5
	T102	110/22	25	131	-0,4	0	0,035	1,9	1,5
DK-B2	T72	110/6	40	210	0	0,4	-	1,9	0,9
HUV-A	T101	110/22	40	210	-21,5	-1,7	0,066	105,9	50,4
	T102	110/22	40	210	-11,0	-1,5	0,039	54,8	26,1
KPO	T101	110/22	25	131	-3,6	-0,8	-	17,9	13,7
	T102	110/22	25	131	0	0	0	0	0

Tab. 9-4 (2/2) Transformátory 110/vn kV (odber výkonu) - samostatná prevádzka

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{odbT}	Q_{odbT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)
KV-B	T101	110/22	40	210	-20,4	-3,1	0,093	99,7	47,5
	T102	110/22	40	210	-14,3	-2,4	0,065	70,2	33,4
LI-A	T101	110/22	40	210	0	0	0	0	0
	T102	110/22	40	210	-13,7	-1,6	0,031	67,7	32,2
MED	T1	110/27	13,3	70	-5,7	0,5	-	27,6	39,4
	T2	110/27	13,3	70	1,7	0,2	-	8,5	12,1
	T3	110/27	13,3	70	0	0	0	0	0
MEY	T104	110/27	16	84	-3,1	-0,5	-	15,2	18,1
	T101	110/22	40	210	-24,7	0,1	0,118	120,8	57,5
MOB	T102	110/22	40	210	-9,2	-0,3	0,048	45,1	21,5
	T101	110/22	40	210	-13,4	-2,1	0,035	66,8	31,8
MQ	T101	110/6	25	131	0	0	0	0	0
	T102	110/6	25	131	0	0	0	0	0
	T103	110/6	25	131	-15,1	-2,9	-	74,4	56,8
SLB	T101	110/22	25	131	-11,1	-3,1	0,056	55,6	42,4
	T102	110/22	25	131	0	0	0	0	0
SO-B	T101	110/22	40	210	-2,3	0,1	0,020	10,9	5,2
	T102	110/22	25	131	0	0,3	0,031	1,5	1,1
	T103	110/22	40	210	-19,2	-4,1	0,056	94,6	45,0
VMA-T101	T101	110/6	16	84	0,2	-0,2	0,020	1,6	1,9
VMA-T102	T102	110/6	16	84	0	-0,1	0,019	0,4	0,5
VY	T101	110/22	40	210	-22,6	-6,5	0,060	116,0	55,2
	T102	110/22	40	210	0	0	0	0	0
ZBB	T101	110/22	25	131	-1,1	-1,1	-	7,6	5,8
	T102	110/22	25	131	0	0	0	0	0
ZET	T101	110/22	40	210	-11,3	-2,4	-	55,8	26,6
	T102	110/22	40	210	0	0	0	0	0
					ΣP_{odbT}	-343,7	$\Sigma \Delta P_T$	1,289	

Zat'azenie vedení

V Tab. 9-5 sa vedenie č. 522 nachádza 3-krát preto, lebo sa skladá z troch úsekov. Vedenie č. 522 spojuje R 110 kV Čebín a Husovice. Smerom na R 110 kV Adamov je na vedení č. 522 vytvorená odbočka v mieste s označením (b.č.32). Takže vedenie č. 522 obsahuje celkovo 3 úseky, ktoré je vidieť v Tab. 9-5.

Napätia na začiatku a konci vedenia Tab. 9-5 neuvádza, pretože tieto napätia odpovedajú napätiam v rozvodniach 110 kV uvedených v Tab. 9-1, či už na začiatku alebo konci vedenia.

Tok výkonu na vedení sa dá určiť podľa znamienok a to nasledovne. Napr. vedenie č. 510 z R 110 kV Komárov prípojnice B do R 110 kV Brno –Teplárna prípojnice A. Znamienka mínus u výkonov P_1, Q_1 znamenajú odber výkonu z R 110 kV Komárov a znamienka plus u výkonov P_2, Q_2 znamenajú dodávku činného aj jalového výkonu do R 110 kV Brno- Teplárna.

Použité symboly v Tab.9-5:

P_1, Q_1 činný a jalový výkon na začiatku vedenia,

P_2, Q_2 činný a jalový výkon na konci vedenia,

ΔP_V straty činného výkonu na vedení,

$I_{\max V}$ maximálny prúd vedením,

I_V vypočítaný prúd vedením,

i_{zV} percentuálne prúdové zaťaženie vedenia,

P_V prenosová schopnosť vedenia (v ďalších tabuľkách už nebude uvedená).

Tab. 9-5 Pomery na vedeniach 110 kV- samostatná prevádzka

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1 (MW)	Q_1 (MVar)	P_2 (MW)	Q_2 (MVar)	ΔP_V (MW)	$I_{\max V}$ (A)	I_V (A)	i_{zV} (%)	P_V (MW)
	Od	Do									
510	KV-B	BNT-A	-32,9	-5,2	32,8	5,2	0,048	455	161,3	35,5	80
512	SO-B	OS-B	0	2,3	0	-1,2	0,001	455	11,0	2,4	80
513	KV-A	BNT-B	21,5	10,4	-21,5	-10,3	0,026	455	117,2	25,8	80
514	SO-B	KV-B	-53,9	-10,6	53,8	10,3	0,122	480	265,3	55,3	140
515	SO-B	MED	-32,7	-2,8	32,7	2,9	0,041	455	158,4	34,8	130
518	SO-B	BU	-31,6	-6,1	31,3	6,5	0,295	455	156,1	34,3	80
519	BU	VY	-22,7	-4,3	22,6	5,2	0,148	455	114,3	25,1	80
521	CNT-B	HUV-A	-24,2	2,7	24,1	-2,3	0,098	530	119,4	22,5	95
522(1)	AD	b.č.32	1,4	0,3	-1,4	0,1	0	120	7,1	5,9	20
522(2)	CNT-B	b.č.32	-25,1	2,8	25,0	-2,6	0,061	530	123,8	23,4	95
522(3)	HUV-A	b.č.32	23,5	-2,3	-23,6	2,5	0,039	530	116,6	22,0	95
528	HUV-B	MQ	3,4	-0,5	-3,4	1,1	0,002	455	17,5	3,9	80
537	SO-B	SLB	-19,9	-1,6	19,8	2,1	0,066	455	96,2	21,1	80
538	SO-B	MQ	-18,6	-1,0	18,5	1,8	0,100	455	90,1	19,8	80
539	HUV-A	LI-A	-11,5	8,4	11,5	-8,2	0,014	455	70,4	15,5	80
5051	BNT-B	BNP	21,5	10,4	-21,5	-8,5	0,006	530	116,9	22,1	160
5053	BNP	CML	45,6	13,5	-45,6	-11,7	0,013	720	232,8	32,3	130
5055	MEY	CML	14,6	12,6	-14,6	-9,1	0,009	720	94,6	13,1	130
5531	HUV-A	KPO	-1,8	-0,3	1,8	0,4	0	455	9,0	2,0	80
5532	HUV-A	KPO	-1,8	-0,3	1,8	0,4	0	455	9,0	2,0	80
5541	HUV-B	ZBB	-3,7	0,7	3,7	-0,5	0	530	18,1	3,4	95
5542	BNT-A	ZBB	2,6	-1,5	-2,6	1,6	0	530	14,8	2,8	95
5543	KV-B	BNC	-11,8	-2,9	11,8	3,1	0,004	480	59,3	12,4	120
5544	KV-A	LI-A	-2,2	-9,5	2,1	9,8	0,004	530	49,4	9,3	95
5545	BNC	LI-B	-2,6	-2,3	2,6	2,5	0	680	17,2	2,5	120
5547	HUV-B	VMA-T102	0,2	-0,1	-0,2	0,2	0	180	1,6	0,9	35
5548	HUV-A	VMA-T101	0	0	0	0,1	0	180	0,5	0,3	35
5549	KV-B	MED	25,6	3,3	-25,6	-3,1	0,054	455	124,8	27,4	130
5553	CNT-B	MEY	-27,4	10,0	27,3	-9,5	0,065	820	143,1	17,5	130
5554	CNT-B	BOB	-22,7	3,3	22,6	-2,3	0,082	680	112,6	16,6	120
5556	BOB	KV-A	13,9	3,0	-13,9	-2,7	0,009	680	70,1	10,3	120
5557	MOB	KV-A	5,4	-1,6	-5,4	1,8	0,001	480	27,8	5,8	120
5558	MEY	MOB	-8,1	-2,9	8,1	3,7	0,008	680	43,6	6,4	120
5559	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0	360	27,9	7,8	65
5560	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0	360	27,9	7,8	65
5561	LI-B	SLB	8,7	-0,2	-8,7	1,0	0,019	455	42,4	9,3	80
5586	OS-B	EDU-B2	0	1,2	0	-0,4	0	530	5,7	1,1	95
$\Sigma \Delta P_V$							1,335				

Celková bilancia činných výkonov

Tab. 9-6 Bilancia činných výkonov - samostatná prevádzka

		<i>P</i>	ΔP
		(MW)	(MW)
transformátory	400/110 kV (dodávaný výkon)	+277,5	0,091
	110/vn kV (dodávaný výkon)	+67,4	0,218
	110/vn kV (odoberaný výkon)	-343,7	1,289
vedenia	110 kV		1,335
		$\Sigma \Delta P$	2,933

Kontrola výpočtov:

Odoberaný výkon = Dodávaný výkon - Straty na vedení = (277,5 + 67,4) - 1,335 = 343,57 MW.

Rozdiel 0,13 MW medzi hodnotou odoberaného výkonu uvedeného v Tab. 9-6 a hodnotou spočítanou kontrolou je spôsobený zaokrúhľovaním, prípadne povolenou chybou výpočtového programu.

9.2 Skratové pomery

Výpočet skratových pomerov v skúmanej oblasti siete 110 kV je tiež realizovaný pomocou dispečerského riadiaceho systému *SINAUT SPECTRUM 4.4*. Všetky vypočítané hodnoty program ukladá do dátových súborov typu *txt*, ktoré sú uvedené v elektronickej prílohe práce (platí pre skratové výpočty aj v ďalších kapitolách).

Výpočtový program používa na výpočet skratových prúdov metódu ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu v súlade s normou [11] a počíta s napäťovým súčiniteľom $c=1,1$. Skrat (trojfázový alebo jednofázový) je uvažovaný na hlavnej prípojnici.

Skratové odolnosti jednotlivých rozvodní (prípojnic) sú dané vypínacími schopnosťami výkonových vypínačov inštalovaných v rozvodniach.

Kontrola skratovej odolnosti rozvodne vychádza z toho, že skratová odolnosť rozvodne nemôže byť prekročená ani pri trojfázovom ani jednofázovom skrate.

Použitie symboly v Tab.9-7:

S''_{k3}	počiatočný rázový skratový výkon pri trojfázovom skrate,
I''_{k3}	počiatočný rázový skratový prúd pri trojfázovom skrate,
S''_{k1}	počiatočný rázový skratový výkon pri jednofázovom skrate,
I''_{k1}	počiatočný rázový skratový prúd pri jednofázovom skrate,
S''_{zk3}	percentuálne zaťaženie rozvodne (prípojnice) počiatočným rázovým skratovým výkonom pri trojfázovom skrate,
S''_{zk1}	percentuálne zaťaženie rozvodne (prípojnice) počiatočným rázovým skratovým výkonom pri jednofázovom skrate.

Tab. 9-7 Skratové pomery- samostatná prevádzka

Rozvodňa	Skratová odolnosť	S''_{k3}	I''_{k3}	S''_{k1}	I''_{k1}	s''_{zk3}	s''_{zk1}
Skratka	(MVA)	(MVA)	(kA)	(MVA)	(kA)	(%)	(%)
AD	3500	1108,7	5,819	1583,8	8,31	31,7	45,3
BNC	3500	1815,9	9,531	1918,8	10,08	51,9	54,8
BNP	5000	1797,3	9,433	2079,2	10,92	35,9	41,6
BNT-A	5000	1847,0	9,694	2576,4	13,53	36,9	51,5
BNT-B		1781,5	9,351	2053,0	10,77	35,6	41,1
BOB	3500	1510,4	7,927	1552,1	8,15	43,2	44,3
BU	3500	870,3	4,568	844,7	4,43	24,9	24,1
CML	3500	1820,4	9,555	2104,8	11,06	52,0	60,1
CNT-B	5000	2588,6	13,587	2464,5	12,94	51,8	49,3
DK-B2	3500	552,6	2,901	384,9	2,02	15,8	11,0
HUV-A	3500	1761,4	9,245	1902,5	9,99	50,3	54,4
HUV-B		1508,5	7,918	1601,0	8,41	43,1	45,7
KPO	3500	1648,8	8,654	1709,5	8,98	47,1	48,8
KV-A	3500	1782,0	9,353	1984,2	10,44	50,9	56,7
KV-B		2169,0	11,384	2572,7	13,52	62,0	73,5
LI-A	3500	1664,4	8,736	1752,8	9,21	47,6	50,1
LI-B		1638,5	8,600	1580,6	8,30	46,8	45,2
MED	3500	2057,1	10,797	1988,9	10,46	58,8	56,8
MEY	3500	1815,0	9,526	2085,2	10,97	51,9	59,6
MOB	5000	1610,8	8,455	1694,4	8,90	32,2	33,9
MQ	3500	1305,6	6,852	1080,5	5,67	37,3	30,9
SLB	3500	1494,4	7,844	1255,3	6,59	42,7	35,9
SO-B	5000	2940,4	15,433	2871,4	15,09	58,8	57,4
VMA-T101	3500	1358,8	7,132	1367,4	7,18	38,8	39,1
VMA-T102		1555,2	8,163	1574,6	8,26	44,4	45,0
VY	3500	531,2	2,788	513,6	2,30	15,2	14,7
ZBB	3500	1690,9	8,875	2062,5	10,83	48,3	58,9
ZET	3500	1585,1	8,320	1505,4	7,90	45,3	43,0

9.3 Zhodnotenie výpočtov

Vid'. Tab. 9-1

Napätie vo všetkých rozvodniach je v dovolenej tolerancii. Najvyššie napätie 120 kV (zvýraznené zelenou farbou) je v R 110 kV (DK-B2). Transformátor T72 v R 110 kV (DK-B2) neodoberá žiadny činný výkon a preto ani vedením č. 5586 a 512 netečie žiadny činný výkon. Vidíme Ferrantihov jav, pretože na konci vedenia č. 5586 v R 110 kV (DK-B2) je vyššie napätie ako na jeho začiatku v R 110 kV (SO-B). Vedenie č. 5586 je prepojené s vedením č. 512, preto uvažujeme začiatok vedenia č. 5586 v R (SO-B). Najnižšie napätie 117,1 kV (zvýraznené zelenou farbou) je R 110 kV (VY). Veľkosť fáze napätia sa pohybuje v rozmedzí od $-0,83^\circ$ (CNT-B) po $-6,58^\circ$ (VY).

Vid'. Tab. 9-2 až Tab. 9-4

Transformátor T402 v R 110 kV (SO-B) je zaťažený na 47,1 % a T402 v R 110 kV (CNT-B) je zaťažený na 27,0 %. Tieto dva transformátory dodávajú z PS do UO R Čebín a R Sokolnice výkon 277,5 MW.

Transformátory 110/vn kV v R110 kV (BNC a CML) dodávajú z lokálnych zdrojov celkovo výkon 67,4 MW.

Pre prúdové zaťaženie distribučných transformátorov 110/vn kV odoberajúcich výkon z oblasti vid' *Tab.8-4*. Najviac zaťažený je transformátor T103 v R 110 kV (BNT-A) 64,5 % T101 v R 110 kV (BNC) 61,1% (hodnoty zvýraznené zelenou farbou). Transformátory 110/vn kV odoberajú z oblasti výkon 343,7 MW. (V ďalších kapitolách sa už zaťažením distribučných transformátorov 110/vn kV odoberajúcich výkon z oblasti nebudeme zaoberať- lebo ich zaťaženie a odbery sú nemenné pre všetky výpočty.)

Žiadny z transformátorov 400/110 kV a 110/vn kV nie je preťažený.

Vid' *Tab. 9-5*

Žiadne z vedení nie je preťažené. Najviac zaťažené je vedenie č. 514 (55,3 %) a vedenie č. 510 (35,5 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou).

Vid' *Tab. 9-6*

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV (straty na transformátoroch a vedeniach) činia **2,933 MW**. Do oblasti je celkovo dodávaný činný výkon 344,9 MW. Straty tvoria 0,85 % celkového dodávaného činného výkonu.

Vid' *Tab. 9-7*

Skratová odolnosť ani jednej z rozvodní 110 kV nebola prekročená.

Pri trojfázovom skrate je maximálne zaťaženie počiatočným skratovým výkonom najvyššie v rozvodni KV-B (62 %), SO-B a MED (58,8 %) a CML (52 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou).

Pri jednofázovom skrate je maximálne zaťaženie počiatočným skratovým výkonom najvyššie v rozvodni KV-B (73,5%), CML (60,1 %) a MEY (59,6 %) (hodnoty zvýraznené oranžovou farbou).

10 VÝPOČET PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE

V tejto kapitole budeme skúmať paralelnú prevádzku pri tzv. mostíkovom zapojení transformátora T402 v R 110 kV Čebín a transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice.

Popis mostíkového zapojenia

Schéma s mostíkovým zapojením použitým pre paralelnú prevádzku UO R Čebín a R Sokolnice je zobrazená na obrázku v prílohe B. Pre mostíkové zapojenie transformátora T402 v R 110 kV Čebín pracujúceho do prípojnice B a transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice pracujúceho do prípojnice B sú uskutočnené nasledujúce zmeny oproti samostatnej prevádzke UO R CNT a R SO.

- **Využitie rozvodní s dvojitém systémom prípojnic**

V rozvodniach Brno- Husovice (HUV), Brno- Líšeň (LI), Brno- Teplárna (BNT) a Brno-Komárov (KV) sú **zapnuté priečne spínače prípojnic**. V každej z menovaných rozvodní sa prepojí prípojnicou A s prípojnícou B. Prepojením prípojnic dôjde v podstate k prepojeniu dvoch uzlových oblastí a vytvoreniu jednej spoločnej oblasti. Tieto 4 rozvodne tvoria tzv. rozpadové miesta mostíkového zapojenia.

- **Skruhovanie siete**

U rozvodní s dvojitém systémom prípojnic a to R 110 kV (HUV a KV) sa na obe prípojnice (A a B) striedavo pripojujú vedenia tak, aby počiatkové a koncové vedenie každého okruhu bolo pripojené na iný pripojnicový systém. U R 110 kV (LI a BNT) nie je nutné previesť žiadne zmeny v zapojení vedení. Pre maximálne skruhovanie siete sú prevedené nasledujúce zmeny:

- a) vedenie č. 522 sa v R 110 kV (HUV) premanipuluje na prípojnicu B,
- b) vedenie č. 5532 sa v R 110 kV (HUV) premanipuluje na prípojnicu B,
- c) vedenie č. 5557 sa v R 110 kV (KV) premanipuluje na prípojnicu B,
- d) vedenie č. 514 sa v R 110 kV (KV) premanipuluje na prípojnicu A.

Výhody a nevýhody mostíkového zapojenia

Medzi hlavné výhody mostíkového zapojenia transformátora T402 v (CNT-B) a T402 v (SO-B) patrí zvýšenie spoľahlivosti dodávky elektrickej energie. Prípadná porucha na jednom z transformátorov T402 alebo porucha na príslušnej prípojnici, či už R 110 kV Čebín alebo Sokolnice, neznamená výpadok dodávky elektrickej energie v príslušnej oblasti ako by tomu bolo u samostatnej prevádzke UO. Tým, že sú oblasti prepojené pomocou priečných spínačov v rozvodniach (HUV, LI, BNT a KV) sa zaisťujú dodávka elektrickej energie z nepostihnuteľného transformátora T402. Ďalšie výhody sú zníženie strát na transformátoroch 400/110 kV a zlepšenie napäťových pomerov v oblasti.

Hlavná nevýhoda mostíkového zapojenia (paralelného chodu) transformátorov je zvýšenie skratových prúdov. Nárast skratových prúdov je daný tým, že zapnutím priečných spínačov vo vybraných rozvodniach (HUV, LI, BNT a KV) dochádza ku znižovaniu skratových impedancií. Ďalšou príčinou nárastu skratových prúdov je, že pri paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO sa nachádzajú v danej oblasti dva transformátory T402 (dva zdroje skratového prúdu ak nepočítame lokálne zdroje). Pri samostatnej prevádzke UO R CNT a R SO na každú oblasť pripadá jeden transformátor T402 (jeden zdroj skratového prúdu ak nepočítame lokálne zdroje).

V ďalších kapitolách budeme vyhodnocovať a kontrolovať paralelnú prevádzku a zameriame sa na:

- napät'ové pomery v rozvodniach (uzloch) siete 110 kV,
- zaťaženie transformátorov (400/110 kV a 110/vn kV),
- zaťaženie vedení 110 kV,
- celovú bilanciu činných výkonov,
- skratové pomery v rozvodniach (uzloch) siete 110 kV.

Kontrolu napät'ových pomerov, zaťaženia transformátorov a vedení prevádzame rovnako ako v kapitole 9.1.

Samotné vyhodnotenie výpočtov bude prevedené na konci kapitoly.

10.1 Ustálený chod

Napät'ové pomery v rozvodniach

Tab. 10-1 Napät'ové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka

Rozvodňa	U	δ	Rozvodňa	U	δ
Skratka	(kV)	(°)	Skratka	(kV)	(°)
AD	118,2	-2,97	KV-B	118,4	-3,68
BNC	118,3	-3,72	LI-A	118,2	-3,71
BNP	118,4	-3,59	LI-B	118,2	-3,71
BNT-A	118,4	-3,62	MED	118,7	-3,58
BNT-B	118,4	-3,62	MEY	118,5	-3,49
BOB	118,2	-3,73	MOB	118,3	-3,71
BU	117,4	-4,56	MQ	118,2	-3,65
CML	118,5	-3,52	SLB	118,5	-3,66
CNT-B	118,3	-2,22	SO-B	119,1	-3,35
DK-B2	119,3	-3,39	VMA-T101	118,2	-3,47
HUV-A	118,2	-3,47	VMA-T102	118,2	-3,47
HUV-B	118,2	-3,47	VY	116,3	-5,34
KPO	118,2	-3,47	ZBB	118,3	-3,57
KV-A	118,4	-3,68	ZET	118,2	-3,72

Zaťaženie transformátorov

A. Transformátory dodávajúce výkon do oblasti

- Transformátory 400/110 kV

Tab. 10-2 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}	
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVar)	(MW)	(A)	(%)	
SO-B	T402	400/110	350	1837	122,4	45,4	0,034	633,3	34,5	
CNT-B	T402		350	1837	155,3	-37,4	0,067	779,5	42,4	
					ΣP_{dodT}	277,7	$\Sigma \Delta P_T$	0,101		

- Transformátory 110/vn kV

Tab. 10-3 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka

Rozvodňa Skratka	Typ	Prevod (kV)	S_{nT} (MVA)	I_{nT} (A)	P_{dodT} (MW)	Q_{dodT} (MVAr)	ΔP_T (MW)	I_T (A)	i_{zT} (%)
BNC	T102	110/22	40	210	7,2	0,8	0,025	35,5	16,9
CML	T10	121/10,5	100	525	44,7	13,5	0,133	227,5	43,3
	T20	121/6,3	40	210	15,5	1,7	0,054	76	36,2
ΣP_{dodT}					67,4	$\Sigma \Delta P_T$	0,212		

B. Transformátory odoberajúce výkon z oblasti

- Transformátory 110/vn kV

Pretože odbery v sieti sa počas výpočtu nemenili, nedošlo ani k zmenám v zaťažení resp. k zmenám na stratách distribučných transformátorov 110/vn kV. Aj pri paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO, a tiež pri ďalších výpočtoch zostáva v platnosti Tab.9-4.

Zaťaženie vedení

Tab. 10-4 (1/2) Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP_V	I_{maxV}	I_V	i_{zV}
	Od	Do	(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(A)	(%)
510	KV-B	BNT-A	7,9	-3,6	-7,9	3,8	0,003	455	42,6	9,4
512	SO-B	OS-B	0	2,3	0	-1,2	0,001	455	11,0	2,4
513	KV-A	BNT-B	7,8	-3,7	-7,8	3,8	0,004	455	42,4	9,3
514	SO-B	KV-B	-27,7	-19,2	27,6	19,3	0,047	480	164,3	34,2
515	SO-B	MED	-19,2	-8,7	19,2	9,0	0,017	455	103,0	22,6
518	SO-B	BU	-31,6	-6,1	31,3	6,6	0,299	455	156,0	34,3
519	BU	VY	-22,8	-4,4	22,6	5,2	0,150	455	115,1	25,3
521	CNT-B	HUV-A	-37,5	10,2	37,2	-10,3	0,248	530	189,6	35,8
522(1)	AD	b.č.32	1,4	0,3	-1,4	0,1	0	120	7,1	5,9
522(2)	CNT-B	b.č.32	-38,6	10,3	38,4	-10,4	0,150	530	194,9	36,8
522(3)	HUV-A	b.č.32	36,9	-10,3	-37	10,3	0,101	530	187,6	35,4
528	HUV-B	MQ	-6,2	3,6	6,2	-3,1	0,008	455	35,2	7,7
537	SO-B	SLB	-13,6	-4,9	13,6	5,5	0,036	455	71,5	15,7
538	SO-B	MQ	8,8	6,0	-8,9	-5,0	0,032	455	52,1	11,5
539	HUV-A	LI-A	-21,1	10,0	21,1	-9,9	0,035	455	114,0	25,1
5051	BNT-B	BNP	41,2	5,9	-41,2	-4,1	0,018	530	202,9	38,3
5053	BNP	CML	65,3	9,1	-65,3	-7,3	0,029	720	321,2	44,6
5055	MEY	CML	-5,1	11,6	5,1	-8,0	0,001	720	61,5	8,5
5531	HUV-A	KPO	-1,9	-0,3	1,9	0,4	0	455	9,4	2,1
5532	HUV-A	KPO	-1,7	-0,3	1,7	0,4	0	455	8,4	1,8
5541	HUV-B	ZBB	-11,0	10,0	11,0	-9,8	0,008	530	72,5	13,7
5542	BNT-A	ZBB	9,9	-10,8	-9,9	10,9	0,005	530	72,1	13,6
5543	KV-B	BNC	-7,3	-4,3	7,3	4,5	0,002	480	41,9	8,7
5544	KV-A	LI-A	-3,3	-5,0	3,3	5,3	0,002	530	30,7	5,8
5545	BNC	LI-B	2	-4,9	-2,0	5,1	0,001	680	26,6	3,9
5547	HUV-B	VMA-T102	0,2	1,0	-0,2	-0,9	0	180	5,1	2,8
5548	HUV-A	VMA-T101	0	0	0	0,1	0	180	0,1	0,1

Tab. 10-4 (2/2) Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1 (MW)	Q_1 (MVar)	P_2 (MW)	Q_2 (MVar)	ΔP_V (MW)	$I_{\max V}$ (A)	I_V (A)	i_{zV} (%)
	Od	Do								
5549	KV-B	MED	12,1	9,4	-12,1	-9,2	0,020	455	74,9	16,5
5553	CNT-B	MEY	-47,4	11,2	47,2	-11,4	0,181	820	237,7	29,0
5554	CNT-B	BOB	-31,8	5,7	31,6	-5	0,161	680	157,6	23,2
5556	BOB	KV-A	4,9	5,7	-4,9	-5,4	0,003	680	36,9	5,4
5557	MOB	KV-A	5,2	1,4	-5,2	-1,2	0,001	480	26,2	5,5
5558	MEY	MOB	-8,3	0,1	8,3	0,7	0,007	680	40,5	6,0
5559	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0,001	360	28,1	7,8
5560	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0,001	360	28,1	7,8
5561	LI-B	SLB	2,5	3,3	-2,5	-2,4	0,003	455	20,2	4,4
5586	OS-B	EDU-B2	0	1,2	0	-0,4	0	530	5,7	1,1
							$\Sigma \Delta P_V$	1,575		

Celková bilancia činných výkonov

Tab. 10-5 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka

		P (MW)	ΔP (MW)
transformátory	400/110 kV (dodávaný výkon)	+277,7	0,101
	110/vn kV (dodávaný výkon)	+67,4	0,212
	110/vn kV (odoberaný výkon)	-343,7	1,289
vedenia	110 kV		1,575
		$\Sigma \Delta P$	3,177

Kontrola výpočtov:

Odoberaný výkon = Dodávaný výkon - Straty na vedení = (277,7 + 67,4) - 1,575 = 343,53 MW.

Rozdiel 0,17 MW medzi hodnotou odoberaného výkonu uvedeného v Tab. 10-5 a hodnotou spočítanou kontrolou je spôsobený zaokrúhľovaním, prípadne povolenou chybou výpočtového programu.

10.2 Skratové pomery

Tab. 10-6(1/2) Skratové pomery- paralelná prevádzka

Rozvodňa	Skratová odolnosť	S''_{k3}	I''_{k3}	S''_{k1}	I''_{k1}	s''_{zk3}	s''_{zk1}
Skratka	(MVA)	(MVA)	(kA)	(MVA)	(kA)	(%)	(%)
AD	3500	1401,9	7,358	1978,8	10,40	40,1	56,5
BNC	3500	3069,7	16,112	3207,6	16,85	87,7	91,6
BNP	5000	3514,9	18,449	4643,6	24,41	70,3	92,9
BNT-A	5000	3608,9	18,942	4848,4	25,46	72,2	97,0
BNT-B							
BOB	3500	2418,4	12,693	2296,1	12,06	69,1	65,6
BU	3500	949,2	4,982	896,2	4,68	27,1	25,6
CML	3500	3442,3	18,067	4474,4	23,55	98,4	127,8
CNT-B	5000	3745,6	19,659	3307,9	17,39	74,9	66,2
DK-B2	3500	583,5	3,062	397,0	2,08	16,7	11,3

Tab. 10-6(2/2) Skratové pomery- paralelná prevádzka

Rozvodňa	Skratová odolnosť	S''_{k3}	I''_{k3}	S''_{k1}	I''_{k1}	S''_{zk3}	S''_{zk1}
Skratka	(MVA)	(MVA)	(kA)	(MVA)	(kA)	(%)	(%)
HUV-A	3500	3340,6	17,534	3640,5	19,12	95,4	104,0
HUV-B							
KPO	3500	2955,8	15,514	2991,5	15,70	84,5	85,5
KV-A	3500	3773,7	19,807	4516,2	23,71	107,8	129,0
KV-B							
LI-A	3500	3228,8	16,947	3419,9	17,96	92,3	97,7
LI-B							
MED	3500	2919,3	15,322	2611,1	13,73	83,4	74,6
MEY	3500	3263,5	17,129	4091,8	21,66	93,2	116,9
MOB	5000	2963,2	15,553	3026,4	18,89	59,3	60,5
MQ	3500	1872,6	9,828	1393,1	7,31	53,5	39,8
SLB	3500	1959,0	10,282	1526,0	8,02	56,0	43,6
SO-B	5000	4175,5	21,915	3756,9	19,77	83,5	75,1
VMA-T101	3500	2676,9	14,050	2587,2	13,58	76,5	73,9
VMA-T102							
VY	3500	559,1	2,935	531,5	2,79	16,0	15,2
ZBB	3500	3227,1	16,938	3633,9	19,07	92,2	103,8
ZET	3500	3027,7	15,891	3086,1	16,20	86,5	88,2

10.3 Zhodnotenie výpočtov

Vid'. Tab. 10-1

Napätie vo všetkých rozvodniach je v dovolenej tolerancii. Najvyššie napätie 119,3 kV (zvýraznené zelenou farbou) je v R 110 kV (DK-B2). Najnižšie napätie 116,3 kV (zvýraznené zelenou farbou) je R 110 kV (VY). Veľkosť fáze napätia sa pohybuje v rozmedzí od $-2,22^\circ$ (CNT-B) po $-5,34^\circ$ (VY).

Vid'. Tab. 10-2 a Tab. 10-3

Transformátor T402 v R 110 kV (SO-B) je zaťažený na 34,5 % a T402 v R 110 kV (CNT-B) je zaťažený na 42,24%. Tieto dva transformátory dodávajú z PS do oblasti výkon 277,7 MW.

Transformátory 110/vn kV v R110 kV (BNC a CML) dodávajú z lokálnych zdrojov celkovo výkon 67,4 MW.

Žiadny z transformátorov 400/110 kV a 110/vn kV nie je pret'azovaný.

Vid'. Tab. 10-4

Žiadne z vedení nie je pret'azované. Najviac zaťažené je vedenie č. 5553 (44,6%) a vedenie č. 5051 (38,3%) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou).

Vid'. Tab. 10-5

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV (straty na transformátoroch a vedeniach) činia **3,177 MW**. Do oblasti je celkovo dodávaný činný výkon 345,1 MW. Straty tvoria 0,92 % celkového dodávaného činného výkonu.

Vid'. Tab. 10-6

V Tab. 10-6 sú červenou farbou označené rozvodne a hodnoty zaťaženia skratovým výkonom (v prípade trojfázového alebo jednofázového skratu) prevyšujúce 100 % menovitej hodnoty skratovej odolnosti.

Modrou farbou sú označené rozvodne a hodnoty zaťaženia skratovým výkonom (v prípade trojfázového alebo jednofázového skratu) prevyšujúce 90 % menovitej hodnoty skratovej odolnosti. Je zvolená rezerva 10 % v skratovej odolnosti, ktorá by mala byť dodržaná pre prípad zapojenia nového zdroja do siete a možnému nárastu skratových prúdov, preto sú označené rozvodne prevyšujúce 90 % menovitej hodnoty skratovej odolnosti.

Skratová odolnosť v R 110 kV CML, HUV, KV, MEY a ZBB je prekročená.

V prípade trojfázového skratu je zaťaženie skratovým výkonom v R 110 kV (KV) 107,8 %. V prípade jednofázového skratu je zaťaženie skratovým výkonom v R 110 kV (CML) 127,8 %, v R 110 kV (HUV) 104 %, v R 110 kV (KV) 129,0 % a v R 110 kV (MEY) 116,9 % (hodnoty zvýraznené červenou farbou).

V R 110 kV BNC, BNP, BNT a LI je sú hodnoty zaťaženia skratovým výkonom (v prípade trojfázového alebo jednofázového skratu) prevyšujúce 90 % menovitej hodnoty skratovej odolnosti. V prípade trojfázového skratu je zaťaženie skratovým výkonom v R 110 kV (LI) 92,3 %. V prípade jednofázového skratu je zaťaženie skratovým výkonom v R 110 kV (BNC) 91,6 %, v R 110 kV (BNP) 92,9 %, v R 110 kV (BNT) 97,0 % a v R 110 kV (LI) 97,7 % (hodnoty zvýraznené modrou farbou).

10.4 Mimoriadne stavy pri paralelnej prevádzke

V tejto kapitole preveríme navrhnuté mostíkové zapojenie pri vybraných mimoriadnych stavoch, ktoré sa môžu v sieti 110 kV počas prevádzky vyskytnúť.

Zameriame sa na výpočet ustáleného chodu siete pri výpadkoch vybraných prvkov siete. Tieto výpadky budú predstavovať či už plánované (pre účel revízie, opravy) alebo neplánované (porucha) odstavenie daných zariadení a budeme sledovať a kontrolovať :

- napät'ové pomery v rozvodniach (uzloch) siete 110 kV,
- zaťaženie transformátorov (400/110 kV a 110/vn kV),
- zaťaženie vedení 110 kV,
- celkovú bilanciu činných výkonov,

Kontrolu napät'ových pomerov, zaťaženia transformátorov a vedení prevádzame rovnako ako v kapitole 9.1. Mostíkové zapojenie bude preverené pri týchto mimoriadnych stavoch siete:

- výpadok transformátora T402 v R 110 kV Čebín,
- výpadok transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice,
- výpadok prípojnice (A) v R 110 kV Komárov.

Výpadok transformátora T402 či už v R 110 kV Čebín alebo Sokolnice je najťažší výpadok, ktorý sa v sieti môže vyskytnúť. Je kľúčový a je tiež dôvodom, prečo sa skúma možnosť paralelnej prevádzky UO R CNT a R SO. V prípade výpadku jedného transformátora T402 by mal ten druhý nepostihnutý prevziať zásobovanie celej oblasti (oblasť zapojená už v mostíkovom zapojení) a pritom by nemalo dôjsť k jeho preťaženiu. Pochopiteľne výkon bude do oblasti

dodávaný iba z jednej strany (zo strany R 110 kV CNT alebo SO), preto je nutné kontrolovať vedenia na preťaženie.

V prípade výpadku prípojnice (A) v R 110 kV Komárov nás bude hlavne zaujímať vplyv rozpojenia jedného zo štvorice priečných spínačov použitých pre paralelnú prevádzku UO R CNT a R SO na napät'ové pomery v rozvodniach. Zostávajúce priečne spínače v R 110 kV (HUV, LI a BNT) zostávajú zapnuté.

10.4.1 Ustálený chod pri výpadku transformátora T402 v R 110 kV Čebín

Schéma zapojenia pre mostíkové zapojenie pri výpadku transformátora T402 v R 110 kV Čebín je zobrazená na obrázku v *Prílohe C*. Týmto mimoriadnym stavom simulujeme reakciu ochrán na poruchu na transformátore T402 a následne odpojenie transformátora od prípojnice B v R 110 kV (CNT-B) pomocou výkonového vypínača.

V prípade samostatnej prevádzky UO R CNT a R SO, by UO R CNT zostala bez dodávky elektrickej energie v prípade výpadku transformátora T402 v R 110 kV Čebín. Paralelná prevádzka (mostíkové zapojenie) týchto dvoch oblastí by malo tento problém riešiť a transformátor T402 v R 110 kV Sokolnice by mal dodať chýbajúci výkon a nemalo by dôjsť k výpadku dodávky elektrickej energie prípadne k hlbokému poklesu napätia.

Napät'ové pomery v rozvodniach

Tab. 10-7 Napät'ové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)

Rozvodňa	U	δ	Rozvodňa	U	δ
Skratka	(kV)	(°)	Skratka	(kV)	(°)
AD	118,6	-8,64	KV-B	118,8	-8,34
BNC	118,8	-8,44	LI-A	118,7	-8,47
BNP	118,8	-8,50	LI-B	118,7	-8,47
BNT-A	118,8	-8,49	MED	119,3	-7,70
BNT-B	118,8	-8,49	MEY	118,8	-8,54
BOB	118,7	-8,74	MOB	118,8	-8,43
BU	118,0	-8,15	MQ	118,7	-8,23
CML	118,9	-8,47	SLB	119,0	-7,77
CNT-B	118,7	-8,61	SO-B	119,6	-6,96
DK-B2	119,8	-6,99	VMA-T101	118,6	-8,59
HUV-A	118,6	-8,59	VMA-T102	118,6	-8,59
HUV-B	118,6	-8,59	VY	116,9	-8,92
KPO	118,6	-8,60	ZBB	118,7	-8,53
KV-A	118,8	-8,35	ZET	118,7	-8,48

Zat'azenie transformátorov**A. Transformátory dodávajúce výkon do oblasti**

- Transformátory 400/110 kV

Tab. 10-8 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)
SO-B	T402	400/110	350	1837	278,1	14,4	0,155	1344,4	73,2
CNT-B	T402		350	1837	0	0	0	0	0
					ΣP_{dodT}	278,1	$\Sigma \Delta P_T$	0,155	

- Transformátory 110/vn kV

Tab. 10-9 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)
BNC	T102	110/22	40	210	7,2	0,2	0,025	35,2	16,8
CML	T10	121/10,5	100	525	44,7	10,9	0,13	223,5	42,6
	T20	121/6,3	40	210	15,5	0,6	0,054	75,3	35,9
					ΣP_{dodT}	67,4	$\Sigma \Delta P_T$	0,209	

B. Transformátory odoberajúce výkon z oblasti

- Transformátory 110/vn kV

Vid' Tab.9-4.

Zat'azenie vedení

Tab. 10-10(1/2) Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP_V	I_{maxV}	I_V	i_{zV}
	Od	Do	(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(A)	(%)
510	KV-B	BNT-A	-21,7	3,0	21,6	-2,9	0,022	455	106,2	23,3
512	SO-B	OS-B	0	2,3	0	-1,2	0,001	455	11,0	2,4
513	KV-A	BNT-B	-21,6	2,9	21,6	-2,8	0,021	455	105,9	23,3
514	SO-B	KV-B	-104,8	-9,6	104,4	7,4	0,449	480	508,2	105,9
515	SO-B	MED	-59,5	0,4	59,4	-0,9	0,134	455	287,3	63,1
518	SO-B	BU	-31,6	-6,1	31,3	6,6	0,296	455	156,4	34,4
519	BU	VY	-22,7	-4,3	22,6	5,2	0,149	455	114,5	25,2
521	CNT-B	HUV-A	0,2	-1,1	-0,2	1,8	0	530	8,8	1,7
522(1)	AD	b.č.32	1,4	0,3	-1,4	0,1	0	120	7,0	5,8
522(2)	CNT-B	b.č.32	-0,4	1,0	0,4	1,5	0	530	7,4	1,4
522(3)	HUV-A	b.č.32	-1,0	1,9	1,0	-1,6	0	530	10,3	1,9
528	HUV-B	MQ	13,9	-3,5	-14,0	4,0	0,033	455	70,7	15,5
537	SO-B	SLB	-31,5	0,6	31,3	-0,4	0,164	455	151,9	33,4
538	SO-B	MQ	-29,3	1,5	29,0	-1,1	0,248	455	141,5	31,1
539	HUV-A	LI-A	13,1	-0,1	-13,1	0,3	0,011	455	63,8	14,0
5051	BNT-B	BNP	3,2	13,1	-3,2	-11,2	0,002	530	65,5	12,4
5053	BNP	CML	27,3	16,2	-27,3	-14,3	0,007	720	154,1	21,4
5055	MEY	CML	32,9	0,7	-32,9	2,8	0,022	720	160,4	22,3

Tab. 10-10(2/2) Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1 (MW)	Q_1 (MVar)	P_2 (MW)	Q_2 (MVar)	ΔP_V (MW)	$I_{\max V}$ (A)	I_V (A)	i_{zV} (%)
	Od	Do								
5531	HUV-A	KPO	-1,9	-0,3	1,9	0,4	0	455	9,4	2,1
5532	HUV-A	KPO	-1,7	-0,3	1,7	0,4	0	455	8,4	1,8
5541	HUV-B	ZBB	9,9	3,3	-9,9	-3,1	0,004	530	50,9	9,6
5542	BNT-A	ZBB	-11	-4,1	11	4,2	0,003	530	57,4	10,8
5543	KV-B	BNC	-15,2	-2,8	15,2	3,0	0,006	480	75,4	15,7
5544	KV-A	LI-A	-12,0	-3,1	12,0	3,4	0,006	530	60,6	11,4
5545	BNC	LI-B	-6,0	-2,8	6,0	3,0	0,001	680	32,3	4,8
5547	HUV-B	VMA-T102	0,2	0,4	-0,2	-0,3	0	180	2,4	1,3
5548	HUV-A	VMA-T101	0	0	0	0,1	0	180	0,5	0,3
5549	KV-B	MED	52,1	-0,9	-52,3	0,6	0,225	455	253,1	55,6
5553	CNT-B	MEY	3,1	1,3	-3,1	-0,4	0,001	820	16,0	2,0
5554	CNT-B	BOB	-2,8	0,9	2,8	0,7	0,001	680	14,2	2,1
5556	BOB	KV-A	33,8	0,1	-33,8	0,1	0,052	680	164,2	24,1
5557	MOB	KV-A	17,5	1,1	-17,5	-1,0	0,006	480	85,1	17,7
5558	MEY	MOB	4	-0,2	-4,0	1,0	0,002	680	20,2	3,0
5559	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0,001	360	28,0	7,8
5560	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0,001	360	28,0	7,8
5561	LI-B	SLB	20,1	-2,9	-20,2	3,5	0,094	455	98,9	21,7
5586	OS-B	EDU-B2	0	-0,4	0	1,2	0	530	5,7	1,1
							$\Sigma \Delta P_V$	1,962		

Celková bilancia činných výkonov

Tab. 10-11 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka (výpadok T402 Čebín)

		P (MW)	ΔP (MW)
transformátory	400/110 kV (dodávaný výkon)	+278,1	0,155
	110/vn kV (dodávaný výkon)	+67,4	0,209
	110/vn kV (odoberaný výkon)	-343,7	1,289
vedenia	110 kV		1,962
		$\Sigma \Delta P$	3,615

Kontrola výpočtov:

Odoberaný výkon= Dodávaný výkon- Straty na vedení=(278,1+67,4)-1,962=343,54 MW.

Rozdiel 0,16 MW medzi hodnotou odoberaného výkonu uvedeného v Tab. 10-11 a hodnotou spočítanou kontrolou je spôsobený zaokrúhľovaním, prípadne povolenou chybou výpočtového programu.

10.4.2 Ustálený chod pri výpadku transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice

Schéma zapojenia pre mostíkové zapojenie pri výpadku transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice je zobrazená na obrázku v Prílohe D. Týmto mimoriadnym stavom simulujeme reakciu ochrán na poruchu na transformátore T402 a následne odpojenie transformátora od prípojnice B v R 110 kV (SO-B) pomocou výkonového vypínača.

Napät'ové pomery v rozvodniach

Tab. 10-12 Napät'ové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice)

Rozvodňa	U	δ	Rozvodňa	U	δ
Skratka	(kV)	(°)	Skratka	(kV)	(°)
AD	116,1	-6,74	KV-B	115,6	-8,21
BNC	115,6	-8,22	LI-A	115,5	-8,17
BNP	116,0	-7,96	LI-B	115,5	-8,16
BNT-A	115,9	-8,02	MED	115,3	-8,46
BNT-B	115,9	-8,02	MEY	116,2	-7,77
BOB	115,0	-8,00	MOB	115,6	-8,20
BU	113,5	-9,91	MQ	115,3	-8,23
CML	116,2	-7,86	SLB	115,1	-8,58
CNT-B	116,7	-5,41	SO-B	115,2	-8,63
DK-B2	115,4	-8,67	VMA-T101	115,8	-7,66
HUV-A	115,8	-7,66	VMA-T102	115,8	-7,66
HUV-B	115,8	-7,66	VY	112,3	-10,75
KPO	115,8	-7,66	ZBB	115,8	-7,89
KV-A	115,6	-8,21	ZET	115,5	-8,18

Zat'aženie transformátorov**A. Transformátory dodávajúce výkon do oblasti**

- Transformátory 400/110 kV

Tab. 10-13 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice)

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}	
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)	
SO-B	T402	400/110	350	1837	0	0	0	0	0	
CNT-B	T402		350	1837	280,1	-16	0,213	1388,1	75,6	
					ΣP_{dodT}	280,1	$\Sigma \Delta P_T$	0,213	vyp.	

- Transformátory 110/vn kV

Tab. 10-14 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice)

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}	
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)	
BNC	T102	110/22	40	210	7,2	4,4	0,026	42,3	20,1	
CML	T10	121/10,5	100	525	44,7	30,1	0,163	267,6	51,0	
	T20	121/6,3	40	210	15,5	9,1	0,063	89,4	42,6	
					ΣP_{dodT}	67,4	$\Sigma \Delta P_T$	0,252		

B. Transformátory odoberajúce výkon z oblasti

- Transformátory 110/vn kV

Vid'. Tab.9-4.

Zat'azenie vedení

Tab. 10-15 Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice)

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1 (MW)	Q_1 (MVar)	P_2 (MW)	Q_2 (MVar)	ΔP_V (MW)	$I_{\max V}$ (A)	I_V (A)	i_{zV} (%)
	Od	Do								
510	KV-B	BNT-A	31,5	8,4	-31,6	-8,4	0,050	455	162,9	35,8
512	SO-B	OS-B	0	2,1	0	-1,1	0,001	455	10,8	2,4
513	KV-A	BNT-B	31,3	8,3	-31,4	-8,3	0,049	455	161,9	35,6
514	SO-B	KV-B	30,6	8,1	-30,7	-8	0,044	480	158,9	33,1
515	SO-B	MED	13,1	2,6	-13,1	-2,4	0,007	455	67,0	14,7
518	SO-B	BU	-31,6	-6,6	31,3	6,9	0,322	455	163,1	35,8
519	BU	VY	-22,8	-4,7	22,6	5,4	0,162	455	119,5	26,3
521	CNT-B	HUV-A	-68,5	6,2	67,7	-8,1	0,801	530	340,2	64,2
522(1)	AD	b.č.32	1,4	0,3	-1,4	0,1	0	120	7,2	6,0
522(2)	CNT-B	b.č.32	-69,9	6,2	69,5	-7,4	0,478	530	347,5	65,6
522(3)	HUV-A	b.č.32	67,7	-8,1	-68,1	7,3	0,333	530	340,2	64,2
528	HUV-B	MQ	-23,3	-0,3	23,2	0,6	0,091	455	116,1	25,5
537	SO-B	SLB	1,2	-1,2	-1,2	1,8	0	455	11,1	2,4
538	SO-B	MQ	8,1	-1,4	-8,1	2,3	0,021	455	42,2	9,3
539	HUV-A	LI-A	-48,6	5,0	48,5	-5,2	0,162	455	243,6	53,5
5051	BNT-B	BNP	71,8	27,5	-71,8	-25,8	0,057	530	383,1	72,3
5053	BNP	CML	95,9	30,8	-96,0	-29,2	0,072	720	501,4	69,6
5055	MEY	CML	-35,9	13,3	35,8	-10	0,032	720	190,1	26,4
5531	HUV-A	KPO	-1,9	-0,3	1,9	0,4	0	455	9,6	2,1
5532	HUV-A	KPO	-1,7	-0,3	1,7	0,4	0	455	8,6	1,9
5541	HUV-B	ZBB	-27,7	11,3	27,7	-11,2	0,036	530	149,1	28,1
5542	BNT-A	ZBB	26,6	-12,3	-26,6	12,3	0,020	530	146,1	27,6
5543	KV-B	BNC	-1,3	-1,3	1,3	1,5	0	480	10,1	2,1
5544	KV-A	LI-A	3,2	-3,5	-3,2	3,8	0,001	530	24,8	4,7
5545	BNC	LI-B	8,0	-5,4	-8,0	5,6	0,002	680	48,7	7,2
5547	HUV-B	VMA-T102	0,2	4,3	-0,2	-4,2	0,001	180	21,5	11,9
5548	HUV-A	VMA-T101	0	0	0	0,1	0	180	0,4	0,2
5549	KV-B	MED	-20,2	-1,9	20,2	2,1	0,036	455	101,5	22,3
5553	CNT-B	MEY	-87,4	4,3	86,8	-7,1	0,601	820	432,8	52,8
5554	CNT-B	BOB	-54,3	-0,7	53,8	-0,3	0,470	680	268,8	39,5
5556	BOB	KV-A	-17,3	1,1	17,3	-0,8	0,014	680	86,5	12,7
5557	MOB	KV-A	3,6	-4,5	3,6	4,7	0,001	480	29,4	6,1
5558	MEY	MOB	-17,1	-6,0	17,0	6,7	0,035	680	91,2	13,4
5559	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0	360	28,8	8,0
5560	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0	360	28,8	8,0
5561	LI-B	SLB	-12,4	-0,6	12,3	1,3	0,037	455	62,1	13,6
5586	OS-B	EDU-B2	0	1,1	0	-0,4	0	530	5,7	1,1
							$\Sigma \Delta P_V$	3,936		

Celková bilancia činných výkonov

Tab. 10-16 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka (výpadok T402 Sokolnice)

		<i>P</i>	ΔP
		(MW)	(MW)
transformátory	400/110 kV (dodávaný výkon)	+280,1	0,213
	110/vn kV (dodávaný výkon)	+67,4	0,252
	110/vn kV (odoberaný výkon)	-343,7	1,289
vedenia	110 kV		3,936
		$\Sigma \Delta P$	5,690

Kontrola výpočtov:

Odoberaný výkon = Dodávaný výkon - Straty na vedení = (280,1 + 67,4) - 3,936 = 343,56 MW.

Rozdiel 0,14 MW medzi hodnotou odoberaného výkonu uvedeného v Tab. 10-16 a hodnotou spočítanou kontrolou je spôsobený zaokrúhľovaním, prípadne povolenou chybou výpočtového programu.

10.4.3 Ustálený chod pri výpadku prípojnice (A) v R 110 kV Komárov

Schéma zapojenia pre mostíkové zapojenie pri výpadku prípojnice (A) v R 110 kV Komárov je zobrazená na obrázku v Prílohe E. Týmto mimoriadnym stavom simulujeme reakciu ochrán na poruchu na prípojnici A a následne odpojenie všetkých vedení od prípojnice A (vedenia č. 5556, 514, 5544 a 513) a vypnutie priečneho spínača prípojnic.

Napät'ové pomery v rozvodniach

Tab. 10-17 Napät'ové pomery v rozvodniach siete 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)

Rozvodňa	<i>U</i>	δ	Rozvodňa	<i>U</i>	δ
Skratka	(kV)	(°)	Skratka	(kV)	(°)
AD	118,0	-3,09	KV-B	118,2	-3,86
BNC	118,1	-3,88	LI-A	118,0	-3,84
BNP	118,2	-3,71	LI-B	118,0	-3,84
BNT-A	118,2	-3,75	MED	118,8	-3,62
BNT-B	118,2	-3,75	MEY	118,3	-3,63
BOB	117,4	-4,04	MOB	118,1	-3,88
BU	117,8	-4,44	MQ	118,3	-3,68
CML	118,3	-3,65	SLB	118,6	-3,65
CNT-B	117,7	-2,50	SO-B	119,4	-3,24
DK-B2	119,6	-3,28	VMA-T101	118,0	-3,58
HUV-A	118,0	-3,58	VMA-T102	118,0	-3,58
HUV-B	118,0	-3,58	VY	116,7	-5,22
KPO	118,0	-3,59	ZBB	118,1	-3,69
KV-A (výpadok)	0	0	ZET	118,0	-3,85

Zat'azenie transformátorov**A. Transformátory dodávajúce výkon do oblasti**

- Transformátory 400/110 kV

Tab. 10-18 Transformátory 400/110 kV - paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}	
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)	
SO-B	T402	400/110	350	1837	118,1	38,3	0,031	600,4	32,7	
CNT-B	T402		350	1837	159,8	-33,1	0,07	797,9	43,4	
					ΣP_{dodT}	277,9	$\Sigma \Delta P_T$	0,101		

- Transformátory 110/vn kV

Tab. 10-19 Transformátory 110/vn kV (dodávka výkonu) - paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)

Rozvodňa	Typ	Prevod	S_{nT}	I_{nT}	P_{dodT}	Q_{dodT}	ΔP_T	I_T	i_{zT}	
Skratka	-	(kV)	(MVA)	(A)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(%)	
BNC	T102	110/22	40	210	7,2	1,1	0,025	35,8	17,0	
CML	T10	121/10,5	100	525	44,7	14,9	0,135	229,9	43,8	
	T20	121/6,3	40	210	15,5	2,4	0,054	76,5	36,4	
					ΣP_{dodT}	67,4	$\Sigma \Delta P_T$	0,214		

B. Transformátory odoberajúce výkon z oblasti

- Transformátory 110/vn kV

Vid'. Tab.9-4.

Zat'azenie vedení

Tab. 10-20(1/2) Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1	Q_1	P_2	Q_2	ΔP_V	I_{maxV}	I_V	i_{zV}
	Od	Do	(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)	(MW)	(A)	(A)	(%)
510	KV-B	BNT-A	15,7	-4,9	-15,7	5,0	0,012	455	80,5	17,7
512	SO-B	OS-B	0	2,3	0	-1,2	0,001	455	11,0	2,4
513(vyp.)	KV-A	BNT-B	0	0	0	0,2	0	455	0,8	0,2
514(vyp.)	SO-B	KV-A	0	0,4	0	0	0	480	1,8	0,4
515	SO-B	MED	-33,1	-16,2	33,0	16,2	0,052	455	178,7	39,3
518	SO-B	BU	-31,6	-6,1	31,3	6,6	0,297	455	156,7	34,4
519	BU	VY	-22,7	-4,3	22,6	5,2	0,149	455	114,7	25,2
521	CNT-B	HUV-A	-37,1	10,7	36,8	-10,8	0,246	530	188,8	35,6
522(1)	AD	b.č.32	1,4	0,3	-1,4	0,1	0	120	7,1	5,9
522(2)	CNT-B	b.č.32	-38,2	10,8	38,0	-10,9	0,149	530	194,1	36,6
522(3)	HUV-A	b.č.32	36,5	-10,8	-36,6	10,8	0,100	530	186,7	35,2
528	HUV-B	MQ	-2,0	5,8	2,0	-5,2	0,006	455	29,9	6,6
537	SO-B	SLB	-18,9	-7,8	18,8	8,3	0,070	455	100,0	22,0
538	SO-B	MQ	-13,1	-7,2	13,1	8,1	0,068	455	75,1	16,5
539	HUV-A	LI-A	-23,3	8,7	23,2	-8,6	0,040	455	121,6	26,7
5051	BNT-B	BNP	39,9	7,4	-40	-5,6	0,018	530	198,5	37,5
5053	BNP	CML	64	10,6	-64,1	-8,8	0,025	720	317,0	44,0

Tab. 10-20(2/2) Pomery na vedeniach 110 kV- paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)

Číslo vedenia	Rozvodňa		P_1 (MW)	Q_1 (MVAr)	P_2 (MW)	Q_2 (MVAr)	ΔP_V (MW)	$I_{\max V}$ (A)	I_V (A)	i_{zV} (%)
	Od	Do								
5055	MEY	CML	-3,9	12,0	3,9	-8,4	0,001	720	61,5	8,5
5531	HUV-A	KPO	-1,9	-0,3	1,9	0,4	0	455	9,5	2,1
5532	HUV-A	KPO	-1,7	-0,3	1,7	0,4	0	455	8,4	1,8
5541	HUV-B	ZBB	-12,3	9,4	12,3	-9,3	0,009	530	75,6	14,3
5542	BNT-A	ZBB	11,2	-10,3	-11,2	10,4	0,005	530	74,6	14,1
5543	KV-B	BNC	-3,3	-5,0	3,3	5,2	0,001	480	29,9	6,2
5544(vyp.)	KV-A	LI-A	0	0	0	0,3	0	530	1,6	0,3
5545	BNC	LI-B	6	-5,8	-6,0	6,0	0,001	680	41,4	6,1
5547	HUV-B	VMA-T102	0,2	1,3	-0,2	-1,2	0	180	6,2	3,4
5548	HUV-A	VMA-T101	0	0	0	0,1	0	180	0,5	0,3
5549	KV-B	MED	25,9	16,5	-26,0	-16,4	0,079	455	150,1	33,0
5553	CNT-B	MEY	-47,7	11,6	47,6	-11,8	0,185	820	240,2	29,3
5554	CNT-B	BOB	-36,8	0	36,5	0,4	0,210	680	179,8	26,4
5556(vyp.)	BOB	KV-A	0	0,4	0	0	0	680	1,8	0,3
5557	MOB	KV-B	3,6	1,4	-3,6	-1,2	0,001	480	18,9	3,9
5558	MEY	MOB	-9,8	0	9,8	0,7	0,010	680	48,1	7,1
5559	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0,001	360	28,2	7,8
5560	LI-B	ZET	-5,6	-1,1	5,6	1,2	0,001	360	28,2	7,8
5561	LI-B	SLB	7,7	6,0	-7,7	-5,2	0,026	455	47,7	10,5
5586	OS-B	EDU-B2	0	1,2	0	-0,4	0	530	5,7	1,1
							$\Sigma \Delta P_V$	1,763		

Celková bilancia činných výkonov

Tab. 10-21 Bilancia činných výkonov - paralelná prevádzka (výpadok prípojnice KV-A)

		P (MW)	ΔP (MW)
transformátory	400/110 kV (dodávaný výkon)	+277,9	0,101
	110/vn kV (dodávaný výkon)	+67,4	0,214
	110/vn kV (odoberaný výkon)	-343,7	1,289
vedenia	110 kV		1,763
		$\Sigma \Delta P$	3,367

Kontrola výpočtov:

Odoberaný výkon= Dodávaný výkon- Straty na vedení=(277,9+67,4)-1,763=343,54 MW.

Rozdiel 0,16 MW medzi hodnotou odoberaného výkonu uvedeného v Tab. 10-21 a hodnotou spočítanou kontrolou je spôsobený zaokrúhľovaním, prípadne povolenou chybou výpočtového programu.

10.4.4 Zhodnotenie výpočtov pri mimoriadnych stavoch

- **Výpadok transformátora T402 v R 110 kV Čebín**

Vid'. Tab. 10-7

Napätie vo všetkých rozvodniach je v dovolenej tolerancii. Najvyššie napätie 119,8 kV (zvýraznené zelenou farbou) je v R 110 kV (DK-B2). Najnižšie napätie 116,9 kV (zvýraznené zelenou farbou) je R 110 kV (VY). Veľkosť fáze napätia sa pohybuje v rozmedzí od $-6,96^\circ$ (SO) po $-8,92^\circ$ (VY).

Vid'. Tab. 10-8 a Tab. 10-9

Transformátor T402 v R 110 kV (SO-B) je zaťažený na 73,2 % a T402 v R 110 kV (CNT-B) je zaťažený na 0 % (je odpojený). Transformátor T402 v R 110 kV (SO-B) sám dodáva z PS do oblasti výkon 278,1 MW.

Transformátory 110/vn kV v R110 kV (BNC a CML) dodávajú z lokálnych zdrojov celkovo výkon 67,4 MW.

Žiadny z transformátorov 400/110 kV a 110/vn kV nie je preťažený.

Vid'. Tab. 10-10

V Tab. 10-10 sú červenou farbou označené vedenia a hodnoty prúdového zaťaženia prevyšujúce 100 % maximálneho prúdu vedením.

Vedenie č. 514 je prúdovo preťažené a je zaťažené na 105,9 %. Najviac zaťažené je vedenie č. 515 (63,1 %) a vedenie č. 5549 (55,6 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou).

Vid'. Tab. 10-11

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV (straty na transformátoroch a vedeniach) činia **3,615 MW**. Do oblasti je celkovo dodávaný činný výkon 345,5 MW. Straty tvoria 1,05 % celkového dodávaného činného výkonu.

- **Výpadok transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice**

Vid'. Tab. 10-12

Napätie vo všetkých rozvodniach je v dovolenej tolerancii. Najvyššie napätie 116,7 kV (zvýraznené zelenou farbou) je v R 110 kV (CNT-B). Najnižšie napätie 112,3 kV (zvýraznené zelenou farbou) je R 110 kV (VY). Veľkosť fáze napätia sa pohybuje v rozmedzí od $-5,41^\circ$ (CNT-B) po $-10,75^\circ$ (VY).

Vid'. Tab. 10-13 a Tab. 10-14

Transformátor T402 v R 110 kV (CNT-B) je zaťažený na 75,6 % a T402 v R 110 kV (SO-B) je zaťažený na 0 % (je odpojený). Transformátor T402 v R 110 kV (CNT-B) sám dodáva z PS do oblasti výkon 280,1 MW.

Transformátory 110/vn kV v R110 kV (BNC a CML) dodávajú z lokálnych zdrojov celkovo výkon 67,4 MW.

Žiadny z transformátorov 400/110 kV a 110/vn kV nie je preťažený.

Vid'. Tab. 10-15

Žiadne z vedení nie je pret'ažované. Najviac zaťažené je vedenie č. 5051 (72,3 %), 5053 (69,6 %), 522(2) (65,6 %), 521 (64,2 %) a vedenie č. 522(1) (64,2 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou).

Vid'. Tab. 10-16

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV (straty na transformátoroch a vedeniach) činia **5,690 MW**. Do oblasti je celkovo dodávaný činný výkon 347,5 MW. Straty tvoria 1,64 % celkového dodávaného činného výkonu.

- **Výpadok prípojnice (A) v R 110 kV Komárov**

Vid'. Tab. 10-17

Z dôvodu poruchy nie je na prípojnici (A) v R 110 kV Komárov napätie (zvýraznené červenou farbou). **Napätie vo všetkých ostatných rozvodniach je v dovolenej tolerancii.** Najvyššie napätie 119,6 kV (zvýraznené zelenou farbou) je v R 110 kV (DK-B2). Najnižšie napätie 116,7 kV (zvýraznené zelenou farbou) je R 110 kV (VY). Veľkosť fáze napätia sa pohybuje v rozmedzí od $-2,50^\circ$ (CNT-B) po $-5,22^\circ$ (VY).

Vid'. Tab. 10-18 a Tab. 10-19

Transformátor T402 v R 110 kV (CNT-B) je zaťažený na 43,4 % a T402 v R 110 kV (SO-B) je zaťažený na 32,7 %. Oba transformátory dodávajú z PS do oblasti výkon 277,9 MW.

Transformátory 110/vn kV v R110 kV (BNC a CML) dodávajú z lokálnych zdrojov celkovo výkon 67,4 MW.

Žiadny z transformátorov 400/110 kV a 110/vn kV nie je pret'ažovaný.

Vid'. Tab. 10-20

Žiadne z vedení nie je pret'ažované. Najviac zaťažené je vedenie č. 5053 (44,0 %) a vedenie č. 515 (39,3 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou). Vedenia č. 513, 514, 5544 a 5556 sú v R 110 kV (KV-A) vypnuté (vedenia zvýraznené červenou farbou).

Vid'. Tab. 10-21

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV (straty na transformátoroch a vedeniach) činia **3,367 MW**. Do oblasti je celkovo dodávaný činný výkon 345,3 MW. Straty tvoria 0,98 % celkového dodávaného činného výkonu.

11 POROVNANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

V tejto kapitole budú vyhodnotené a porovnané výsledky výpočtov z kapitol 9 a 10. Ako prvé bude prevedené porovnanie samostatnej a paralelnej prevádzky UO R Čebín a R Sokolnice uskutočnenej pomocou mostíkového zapojenia. Po druhé bude porovnaná paralelná prevádzka UO R Čebín a R Sokolnice s paralelou prevádzkou pri mimoriadnych stavoch. Samotné vyhodnotenie bude vždy prevedené na konci podkapitoly.

11.1 Porovnanie samostatnej a paralelnej prevádzky UO R Čebín a R Sokolnice

Po prvé budeme porovnávať ustálený chod pri paralelnej prevádzke v mostíkovom zapojení oproti samostatnej prevádzke UO R CNT a R SO. Zameriame sa na napätové pomery v rozvodniach 110 kV, zaťaženie transformátorov (400/110 kV a 110/vn kV), zaťaženie vedení a celkové straty v sieti.

V ďalšej časti sa budeme zaoberať skratovými pomermi po zavedení mostíkového zapojenia.

Porovnanie je vždy vzťahnuté voči samostatnej prevádzke UO, či už pôjde o porovnávanie ustálených chodov alebo skratových pomerov.

11.1.1 Ustálený chod

Napätové pomery v rozvodniach

Farebné značenie v *Tab. 11-1* zodpovedá, značeniu na obrázku v *Prílohe A*. Žltou farbou sú označené rozvodne patriace do UO R Čebín a modrou rozvodne patriace do UO R Sokolnice.

Použitie symboly v *Tab.10-1*:

ΔU rozdiel medzi napätím v rozvodniach pri samostatnej a paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO (vzťahnuté k samostatnej prevádzke).

Tab. 11-1(1/2) Napätové pomery v rozvodniach siete 110 kV- pri samostatnej a paralelnej prevádzke

Rozvodňa Skratka	Prevádzka		Porovnanie	
	Samostatná	Paralelná	Samostatná x Paralelná	
	U (kV)		ΔU (kV) (%)	
AD	117,4	118,2	0,8	0,68
BNC	119,2	118,3	-0,9	-0,76
BNP	117,9	118,4	0,5	0,42
BNT-A	119,0	118,4	-0,6	-0,50
BNT-B	117,8	118,4	0,6	0,51
BOB	117,4	118,2	0,8	0,68
BU	118,2	117,4	-0,8	-0,68
CML	118,0	118,5	0,5	0,42
CNT-B	117,6	118,3	0,7	0,60
DK-B2	120,0	119,3	-0,7	-0,58
HUV-A	117,3	118,2	0,9	0,77
HUV-B	119,0	118,2	-0,8	-0,67
KPO	117,3	118,2	0,9	0,77
KV-A	117,6	118,4	0,8	0,68
KV-B	119,3	118,4	-0,9	-0,75

Tab. 11-1(2/2) Napätové pomery v rozvodniach siete 110 kV- pri samostatnej a paralelnej prevádzke

Rozvodňa Skratka	Prevádzka		Porovnanie	
	Samostatná	Paralelná	Samostatná x Paralelná	
	U (kV)		ΔU (kV) (%)	
LI-A	117,4	118,2	0,8	0,68
LI-B	119,2	118,2	-1,0	-0,84
MED	119,6	118,7	-0,9	-0,75
MEY	117,9	118,5	0,6	0,51
MOB	117,6	118,3	0,7	0,60
MQ	119,0	118,2	-0,8	-0,67
SLB	119,3	118,5	-0,8	-0,67
SO-B	119,8	119,1	-0,7	-0,58
VMA-T101	119,0	118,2	-0,8	-0,67
VMA-T102	117,3	118,2	0,9	0,77
VY	117,1	116,3	-0,8	-0,68
ZBB	119,0	118,3	-0,7	-0,59
ZET	119,1	118,2	-0,9	-0,76

Zaťaženie transformátorov

A. Transformátory dodávajúce výkon do oblasti

- Transformátory 400/110 kV

Použitie symboly v Tab.11-2:

Δi_{zT} rozdiel medzi prúdovým zaťažením transformátora pri samostatnej a paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO (vzťahnuté k samostatnej prevádzke).

Tab. 11-2 Prúdové zaťaženie transformátorov 400/110 kV- pri samostatnej a paralelnej prevádzke

Rozvodňa Skratka	Typ	Prevádzka		Porovnanie
		Samostatná	Paralelná	Samostatná x Paralelná
		i_{zT} (%)		Δi_{zT} (%)
SO-B	T402	47,1	34,5	-12,7
CNT-B	T402	27,0	42,4	15,4

- Transformátory 110/vn kV

Tab. 11-3 Prúdové zaťaženie transformátorov 110/vn kV (dodávka výkonu)- pri samostatnej a paralelnej prevádzke

Rozvodňa Skratka	Typ	Prevádzka		Porovnanie
		Samostatná	Paralelná	Samostatná x Paralelná
		i_{zT} (%)		Δi_{zT} (%)
BNC	T102	16,7	16,9	0,2
CML	T10	44,7	43,3	-1,4
	T20	37,0	36,2	-0,8

B. Transformátory odoberajúce výkon z oblasti

- Transformátory 110/vn kV

Veľkosť odberov distribučných transformátorov ako už bolo uvedené v kapitole 9 sa v priebehu výpočtov nemenila (či už išlo o samostatnú prevádzku alebo paralelnú). Z toho dôvodu sa nemenilo ani zaťaženie, ani straty na uvedených transformátoroch.

Zaťaženie vedení

Použité symboly v Tab.11-4:

Δi_{zV} rozdiel medzi prúdovým zaťažením vedenia pri samostatnej a paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO (vzťahnuté k samostatnej prevádzke).

Tab. 11-4 Prúdové zaťaženie vedení 110 kV - pri samostatnej a paralelnej prevádzke

Číslo vedenia	Prevádzka		Porovnanie
	Samostatná	Paralelná	Samostatná x paralelná
	i_{zV} (%)		Δi_{zV} (%)
510	35,5	9,4	-26,1
512	2,4	2,4	0,0
513	25,8	9,3	-16,5
514	55,3	34,2	-21,1
515	34,8	22,6	-12,2
518	34,3	34,3	0,0
519	25,1	25,3	0,2
521	22,5	35,8	13,3
522(1)	5,9	5,9	0,0
522(2)	23,4	36,8	13,4
522(3)	22,0	35,4	13,4
528	3,9	7,7	3,8
537	21,1	15,7	-5,4
538	19,8	11,5	-8,3
539	15,5	25,1	9,6
5051	22,1	38,3	16,2
5053	32,3	44,6	12,3
5055	13,1	8,5	-4,6
5531	2,0	2,1	0,1
5532	2,0	1,8	-0,2
5541	3,4	13,7	10,3
5542	2,8	13,6	10,8
5543	12,4	8,7	-3,7
5544	9,3	5,8	-3,5
5545	2,5	3,9	1,4
5547	0,9	2,8	1,9
5548	0,3	0,1	-0,2
5549	27,4	16,5	-10,9
5553	17,5	29,0	11,5
5554	16,6	23,2	6,6
5556	10,3	5,4	-4,9
5557	5,8	5,5	-0,3
5558	6,4	6,0	-0,4
5559	7,8	7,8	0,0
5560	7,8	7,8	0,0
5561	9,3	4,4	-4,9
5586	1,1	1,1	0,0

Celková straty v sieti 110 kV

Použité symboly v Tab.11-5:

$\Delta_{\Sigma AP}$ rozdiel medzi celkovými stratami v sieti 110 kV pri samostatnej a paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO (vzťahnuté k samostatnej prevádzke).

Tab. 11-5 Celkové straty v sieti 110 kV - pri samostatnej a paralelnej prevádzke

Prevádzka		Porovnanie	
Samostatná	Paralelná	Samostatná x Paralelná	
$\Sigma \Delta P$		$\Delta_{\Sigma AP}$	
(MW)		(MW)	(%)
2,933	3,177	0,244	8,32

11.1.2 Skratové pomery

Tab. 11-6 Skratové pomery - pri samostatnej a paralelnej prevádzke

Rozvodňa	Skratová odolnosť	Prevádzka				Porovnanie	
		Samostatná		Paralelná		Samostatná x Paralelná	
		s''_{zk3}	s''_{zk1}	s''_{zk3}	s''_{zk1}	$\Delta s''_{zk3}$	$\Delta s''_{zk1}$
Skratka	(MVA)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
AD	3500	31,68	45,25	40,05	56,54	8,38	11,29
BNC	3500	51,88	54,82	87,71	91,65	35,82	36,82
BNP	5000	35,95	41,58	70,30	92,87	34,35	51,29
BNT-A	5000	36,94	51,53	72,18	96,97	35,24	45,44
BNT-B		35,63	41,06			36,55	55,91
BOB	3500	43,15	44,35	69,10	65,60	25,94	21,26
BU	3500	24,87	24,13	27,12	25,61	2,25	1,47
CML	3500	52,01	60,14	98,35	127,84	46,34	67,70
CNT-B	5000	51,77	49,29	74,91	66,16	23,14	16,87
DK-B2	3500	15,79	11,00	16,67	11,34	0,88	0,35
HUV-A	3500	50,33	54,36	95,45	104,01	45,12	49,66
HUV-B		43,10	45,74			52,35	58,27
KPO	3500	47,11	48,84	84,45	85,47	37,34	36,63
KV-A	3500	50,91	56,69	107,82	129,03	56,91	72,34
KV-B		61,97	73,51			45,85	55,53
LI-A	3500	47,55	50,08	92,25	97,71	44,70	47,63
LI-B		46,81	45,16			45,44	52,55
MED	3500	58,77	56,83	83,41	74,60	24,63	17,78
MEY	3500	51,86	59,58	93,24	116,91	41,39	57,33
MOB	5000	32,22	33,89	59,26	60,53	27,05	26,64
MQ	3500	37,30	30,87	53,50	39,80	16,20	8,93
SLB	3500	42,70	35,87	55,97	43,60	13,27	7,73
SO-B	5000	58,81	57,43	83,51	75,14	24,70	17,71
VMA-T101	3500	38,82	39,07	76,48	73,92	37,66	34,85
VMA-T102		44,43	44,99	76,47	73,75	32,03	28,76
VY	3500	15,18	14,67	15,97	15,19	0,80	0,51
ZBB	3500	48,31	58,93	92,20	103,83	43,89	44,90
ZET	3500	45,29	43,01	86,51	88,17	41,22	45,16

Použité symboly v *Tab.11-6*:

$\Delta s''_{zk3}$ rozdiel medzi zaťažením rozvodne počiatočným rázovým skratovým výkonom pri trojfázovom skrate pri samostatnej a paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO (vzťahnuté k samostatnej prevádzke).

$\Delta s''_{zk1}$ rozdiel medzi zaťažením rozvodne počiatočným rázovým skratovým výkonom pri trojfázovom skrate pri samostatnej a paralelnej prevádzke UO R CNT a R SO (vzťahnuté k samostatnej prevádzke).

11.1.3 Vyhodnotenie

Vid'. Tab. 11-1

Pri zapojení do mostíka je v R 110 kV Čebín na prípojnici (B) napätie 118,3 kV (zvýraznené zelenou farbou). Ide o nárast napätia o 0,6 % oproti samostatnej prevádzke uzlových oblastí. Táto zmena sa prejaví vo všetkých rozvodniach spadajúcich (pri samostatnej prevádzke) do UO R Čebín, nárastom napätia.

V R 110 kV Sokolnice je na prípojnici (B) napätie 119,1 kV (zvýraznené zelenou farbou), čo je 0,58 % pokles oproti samostatnej prevádzke uzlových oblastí. Opäť sa táto zmena odzrkadlí vo všetkých rozvodniach spadajúcich (pri samostatnej prevádzke) do UO R Sokolnice, poklesom napätia.

Rovnaké napätie na oboch prípojniciach (A a B) u rozvodní s dvojitém systémom prípojnic (HUV, LI, BNT a KV) nám preukazuje, zapnutý stav priečneho spínača prípojnic v daných rozvodniach.

Pri paralelnej prevádzke UO R Čebín a R Sokolnice za použitia mostíkového zapojenia je napätie vo všetkých rozvodniach v dovolenej tolerancii.

Vid'. Tab. 11-2 a Tab. 11-3

Transformátor T402 v R 110 kV (SO-B) je prúdovo zaťažený na 34,5 %, čo je pokles o 12,7 % oproti samostatnej prevádzke. Transformátor T402 v R 110 kV (CNT-B) je prúdovo zaťažený na 42,4 %, čo je zvýšenie o 15,4 % oproti samostatnej prevádzke.

Väčšiu časť činného výkonu do oblasti dodáva Čebínsky transformátor T402 (155,3 MW) a menšiu časť Sokolnický transformátor T402 (122,4 MW), čo je zmena oproti samostatnej prevádzke. Pri samostatnej prevádzke väčšiu časť výkonu z PS dodáva Sokolnický transformátor T402 (178,2 MW) a menšiu časť Čebínsky transformátor T402 (99,3 MW).

Prúdové zaťaženie transformátorov 110/vn kV dodávajúcich výkon z lokálnych zdrojov sa mení nasledovne. V R 110 kV (CML) u transformátorov T10 a T20 dochádza k zníženiu zaťaženia o 1,4 % a o 0,8 %. V R 110 kV (BNC) dochádza u transformátora T102 o 0,2 % zvýšenie prúdového zaťaženia.

Pri paralelnej prevádzke UO R Čebín a R Sokolnice za použitia mostíkového zapojenia žiadny z transformátorov 400/110 kV a 110/vn kV nie je preťažovaný.

Vid'. Tab. 11-4

Vplyvom mostíkové zapojenia siete dochádza k zmenám v zaťažení napájacích transformátorov 400/110 kV a tým pádom sa menia aj toky výkonov na vedeniach.

Najväčší pokles zaťaženia vedenia (oproti samostatnej prevádzke) je zaznamenaný u vedenia č. 510 (o 26,1 %), 514 (o 21,1 %) a 513 (o 16,5 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou). Tým, že zaťaženie T402 (SO-B) klesá o 12,7 % pochopiteľne klesá aj zaťaženie vyššie uvedených vedení, ktoré vyvádzajú výkon z R 110 kV SO (vedenia č. 515 a 514) a ktoré vyvádzajú výkon z R 110 kV KV (vedenie č. 513).

Naopak najväčší nárast zaťaženia vedenia je vidieť u vedenia č. 5051 (o 16,2 %), 522(2) a 522(3) (o 13,4 %), 521 (o 13,3 %) a 5053 (o 12,3 %) (hodnoty zvýraznené oranžovou farbou). Tým, že zaťaženie T402 (CNT-B) sa zvýši o 15,4 % pochopiteľne stúpa zaťaženie vyššie uvedených vedení, ktoré vyvádzajú výkon z R 110 kV CNT (vedenia č. 522 a 521). Tým, že zaťaženie vedenia č. 513 výraznejšie kleslo, sa R 110 kV (BNT-B) napája hlavne cez trasu vedení č. 5051 a 5053, ktoré prenášajú výkon zo smeru R 110 kV (CML).

Žiadne z vedení 110 kV nie je paralelnej prevádzke UO R Čebín a R Sokolnice prúdovo preťažované.

Vid'. Tab. 11-5

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV (straty na transformátoroch a vedeniach) pri mostíkovom zapojení narastú na hodnotu 3,177 MW, čo je 8,32 % nárast oproti samostatnej prevádzke.

Vid'. Tab. 11-6 a Tab. 11-7

Vplyvom mostíkového zapojenia dochádza k výraznému nárastu zaťaženia skratovým výkonom, či už v prípade trojfázového alebo jednofázového skratu, vo všetkých rozvodniach 110 kV. Výrazné nárasty zaťaženia skratovým výkonom sú práve u rozvodní s dvojitém systémom prípojnic, kde sú zapnuté priečne spínače prípojnic.

Čo sa týka trojfázové skratu, najväčší nárast zaťaženia skratovým výkonom je v rozvodniach KV-A (56,91 %) a HUV-B (52,35 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou). U jednofázového skratu je najväčší nárast skratového výkonu u rozvodní KV-A (o 72,34 %) a CML (o 67,70 %) (hodnoty zvýraznené oranžovou farbou).

Z Tab. 10-7 je vidieť, že **pri paralelnej prevádzke UO R Čebín a R Sokolnice je skratová odolnosť v R 110 kV CML, HUV, KV, MEY a ZBB prekročená.**

11.2 Porovnanie paralelnej prevádzky UO R Čebín a R Sokolnice s paralelnou prevádzkou pri mimoriadnych stavoch

Navrhnuté mostíkové zapojenie použité pre paralelnú prevádzku UO R Čebín a R Sokolnice je nutné preveriť v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov. Medzi dva najhoršie stavy, ktoré sa behom prevádzky môžu vyskytnúť, patrí výpadok transformátora T402 v R 110 kV CNT alebo SO. Ďalším riešeným mimoriadnym stavom je výpadok prípojnice (A) v R 110 kV Komárov.

Budeme porovnávať ustálený chod pri paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych stavov oproti paralelnej prevádzke (bezporuchovej) UO R CNT a R SO. Porovnanie je vždy vzťahnuté voči (bezporuchovej) paralelnej prevádzke. Zameriame sa na napäťové pomery v rozvodniach 110 kV, zaťaženie transformátorov (400/110 kV a 110/vn kV), zaťaženie vedení a celkové straty v sieti.

11.2.1 Ustálený chod

Pre zjednodušenie porovnania jednotlivých stavov je v tabuľkách zavedené značenie:

- Stav A- paralelná prevádzka (bezporuchová),
- Stav B- paralelná prevádzka (výpadok transformátora T402 v R 110 kV Čebín),
- Stav C- paralelná prevádzka (výpadok transformátora T402 v R 110 kV Sokolnice),
- Stav D- paralelná prevádzka (výpadok prípojnice (A) v R 110 kV Komárov).

Napät'ové pomery v rozvodniach

Tab. 11-7 Napät'ové pomery v rozvodniach siete 110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov

Rozvodňa	Prevádzka paralelná				Porovnanie					
	Bez poruchy	Výpadok T402- CNT	Výpadok T402- SO	Výpadok prípojnice KV-A						
	A	B	C	D						
Skratka	U (kV)				ΔU					
					(kV)	(%)	(kV)	(%)	(kV)	(%)
AD	118,2	118,6	116,1	118,0	0,4	0,34	-2,1	-1,78	-0,2	-0,17
BNC	118,3	118,8	115,6	118,1	0,5	0,42	-2,7	-2,28	-0,2	-0,17
BNP	118,4	118,8	116,0	118,2	0,4	0,34	-2,4	-2,03	-0,2	-0,17
BNT-A	118,4	118,8	115,9	118,2	0,4	0,34	-2,5	-2,11	-0,2	-0,17
BNT-B	118,4	118,8	115,9	118,2	0,4	0,34	-2,5	-2,11	-0,2	-0,17
BOB	118,2	118,7	115,0	117,4	0,5	0,42	-3,2	-2,71	-0,8	-0,68
BU	117,4	118,0	113,5	117,8	0,6	0,51	-3,9	-3,32	0,4	0,34
CML	118,5	118,9	116,2	118,3	0,4	0,34	-2,3	-1,94	-0,2	-0,17
CNT-B	118,3	118,7	116,7	117,7	0,4	0,34	-1,6	-1,35	-0,6	-0,51
DK-B2	119,3	119,8	115,4	119,6	0,5	0,42	-3,9	-3,27	0,3	0,25
HUV-A	118,2	118,6	115,8	118,0	0,4	0,34	-2,4	-2,03	-0,2	-0,17
HUV-B	118,2	118,6	115,8	118,0	0,4	0,34	-2,4	-2,03	-0,2	-0,17
KPO	118,2	118,6	115,8	118,0	0,4	0,34	-2,4	-2,03	-0,2	-0,17
KV-A	118,4	118,8	115,6	0	0,4	0,34	-2,8	-2,36	-118,4	-100,00
KV-B	118,4	118,8	115,6	118,2	0,4	0,34	-2,8	-2,36	-0,2	-0,17
LI-A	118,2	118,7	115,5	118,0	0,5	0,42	-2,7	-2,28	-0,2	-0,17
LI-B	118,2	118,7	115,5	118,0	0,5	0,42	-2,7	-2,28	-0,2	-0,17
MED	118,7	119,3	115,3	118,8	0,6	0,51	-3,4	-2,86	0,1	0,08
MEY	118,5	118,8	116,2	118,3	0,3	0,25	-2,3	-1,94	-0,2	-0,17
MOB	118,3	118,8	115,6	118,1	0,5	0,42	-2,7	-2,28	-0,2	-0,17
MQ	118,2	118,7	115,3	118,3	0,5	0,42	-2,9	-2,45	0,1	0,08
SLB	118,5	119,0	115,1	118,6	0,5	0,42	-3,4	-2,87	0,1	0,08
SO-B	119,1	119,6	115,2	119,4	0,5	0,42	-3,9	-3,27	0,3	0,25
VMA-T101	118,2	118,6	115,8	118,0	0,4	0,34	-2,4	-2,03	-0,2	-0,17
VMA-T102	118,2	118,6	115,8	118,0	0,4	0,34	-2,4	-2,03	-0,2	-0,17
VY	116,3	116,9	112,3	116,7	0,6	0,52	-4,0	-3,44	0,4	0,34
ZBB	118,3	118,7	115,8	118,1	0,4	0,34	-2,5	-2,11	-0,2	-0,17
ZET	118,2	118,7	115,5	118,0	0,5	0,42	-2,7	-2,28	-0,2	-0,17

Zaťaženie transformátorov**A. Transformátory dodávajúce výkon do oblasti**

- Transformátory 400/110 kV

Tab. 11-8 Prúdové zaťaženie transformátorov 400/110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov

		Prevádzka paralelná				Porovnanie		
		Bez poruchy	Výpadok T402-CNT	Výpadok T402-SO	Výpadok prípojnice KV-A			
		Stav				A x B	A x C	A x D
A	B	C	D					
Rozvodňa	Typ	i_{zT}				Δi_{zT}		
Skratka		(%)				(%)		
SO-B	T402	34,5	73,2	0	32,7	38,7	-34,5	-1,8
CNT-B	T402	42,4	0,0	75,6	43,4	-42,4	33,2	1,0

- Transformátory 110/vn kV

Tab. 11-9 Prúdové zaťaženie transformátorov 110/vn kV (dodávka výkonu)- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov

		Prevádzka paralelná				Porovnanie		
		Bez poruchy	Výpadok T402-CNT	Výpadok T402-SO	Výpadok prípojnice KV-A			
		Stav				A x B	A x C	A x D
A	B	C	D					
Rozvodňa	Typ	i_{zT}				Δi_{zT}		
Skratka		(%)				(%)		
BNC	T102	16,9	16,8	20,1	17,0	-0,1	3,2	0,1
CML	T10	43,3	42,6	51,0	43,8	-0,8	7,6	0,5
	T20	36,2	35,9	42,6	36,4	-0,3	6,4	0,2

B. Transformátory odoberajúce výkon z oblasti

- Transformátory 110/vn kV

Veľkosť odberov distribučných transformátorov ako už bolo uvedené v kapitole 9 sa v priebehu výpočtov nemenila (či už išlo o samostatnú prevádzku alebo paralelnú). Z toho dôvodu sa nemenilo ani zaťaženie, ani straty na uvedených transformátoroch.

Zat'azenie vedení

Tab. 11-10 Prúdové zataženie vedení 110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov

Číslo vedenia	Prevádzka paralelná				Porovnanie		
	Bez poruchy	Výpadok T402- CNT	Výpadok T402- SO	Výpadok prípojnice KV-A			
	Stav						
	A	B	C	D			
i_{zV} (%)				Δi_{zV} (%)			
510	9,4	23,3	35,8	17,7	14,0	26,4	8,3
512	2,4	2,4	2,4	2,4	0,0	0,0	0,0
513	9,3	23,3	35,6	0,2	14,0	26,3	-9,1
514	34,2	105,9	33,1	0,4	71,6	-1,1	-33,9
515	22,6	63,1	14,7	39,3	40,5	-7,9	16,6
518	34,3	34,4	35,8	34,4	0,1	1,6	0,2
519	25,3	25,2	26,3	25,2	-0,1	1,0	-0,1
521	35,8	1,7	64,2	35,6	-34,1	28,4	-0,2
522(1)	5,9	5,8	6,0	5,9	-0,1	0,1	0,0
522(2)	36,8	1,4	65,6	36,6	-35,4	28,8	-0,2
522(3)	35,4	1,9	64,2	35,2	-33,5	28,8	-0,2
528	7,7	15,5	25,5	6,6	7,8	17,8	-1,2
537	15,7	33,4	2,4	22,0	17,7	-13,3	6,3
538	11,5	31,1	9,3	16,5	19,6	-2,2	5,1
539	25,1	14,0	53,5	26,7	-11,0	28,5	1,7
5051	38,3	12,4	72,3	37,5	-25,9	34,0	-0,8
5053	44,6	21,4	69,6	44,0	-23,2	25,0	-0,6
5055	8,5	22,3	26,4	8,5	13,7	17,9	0,0
5531	2,1	2,1	2,1	2,1	0,0	0,0	0,0
5532	1,8	1,8	1,9	1,8	0,0	0,0	0,0
5541	13,7	9,6	28,1	14,3	-4,1	14,5	0,6
5542	13,6	10,8	27,6	14,1	-2,8	14,0	0,5
5543	8,7	15,7	2,1	6,2	7,0	-6,6	-2,5
5544	5,8	11,4	4,7	0,3	5,6	-1,1	-5,5
5545	3,9	4,8	7,2	6,1	0,8	3,3	2,2
5547	2,8	1,3	11,9	3,4	-1,5	9,1	0,6
5548	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
5549	16,5	55,6	22,3	33,0	39,2	5,8	16,5
5553	29,0	2,0	52,8	29,3	-27,0	23,8	0,3
5554	23,2	2,1	39,5	26,4	-21,1	16,4	3,3
5556	5,4	24,1	12,7	0,3	18,7	7,3	-5,2
5557	5,5	17,7	6,1	3,9	12,3	0,7	-1,5
5558	6,0	3,0	13,4	7,1	-3,0	7,5	1,1
5559	7,8	7,8	8,0	7,8	0,0	0,2	0,0
5560	7,8	7,8	8,0	7,8	0,0	0,2	0,0
5561	4,4	21,7	13,6	10,5	17,3	9,2	6,0
5586	1,1	1,1	1,1	1,1	0,0	0,0	0,0

Celkové straty v sieti 110 kV

Tab. 11-11 Celkové straty v sieti 110 kV- pri paralelnej a paralelnej prevádzke v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov

Prevádzka paralelná				Porovnanie					
Bez poruchy	Výpadok T402- CNT	Výpadok T402- SO	Výpadok prípojnice KV-A						
Stav				A x B		A x C		A x D	
A	B	C	D						
$\Sigma\Delta P$				$\Delta_{\Sigma\Delta P}$					
(MW)				(MW)	(%)	(MW)	(%)	(MW)	(%)
3,177	3,615	5,690	3,367	0,438	13,79	2,513	79,10	0,19	5,98

11.2.2 Vyhodnotenie

Vid'. Tab. 11-7

- **Výpadok T402-CNT**

Pri výpadku transformátora T402- CNT dochádza vo všetkých rozvodniach k nárastu napätia oproti hodnotám napätia pri (bezporuchovej) paralelnej prevádzke. Najväčší nárast napätia o 0,52 % je v R 110 kV (VY) a najmenší o 0,25 % nárast v R 110 kV (MEY) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou).

- **Výpadok T402-SO**

V prípade výpadku transformátora T402- SO dochádza vo všetkých rozvodniach k poklesu napätia. Najväčší pokles napätia o 3,44% je v R 110 kV (VY) a najmenší o 1,35 % pokles v R 110 kV (CNT-B) (hodnoty zvýraznené oranžovou farbou).

- **Výpadok prípojnice KV-A**

V prípade výpadku prípojnice (A) v R 110 kV (KV) je pochopiteľne na postihnutej prípojnici nulové napätie a preto z porovnania oproti (bezporuchovej) paralelnej prevádzke ide o 100 % (zvýraznené červenou farbou) pokles napätia. Mimo tohto poklesu je najväčší pokles napätia o 0,68 % (zvýraznené zelenou farbou) je v R 110 kV (BOB). V R 110 kV (BU, DK-B2, MED, MQ, SLB, SO-B a VY) dochádza k nárastu napätia v rozmedzí 0,08 % až 0,34 %. Najväčší nárast napätia o 0,34 % (zvýraznené zelenou farbou) je v R 110 kV (VY).

Pri paralelnej prevádzke UO R Čebín a R Sokolnice v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov je napätie vo všetkých rozvodniach v dovolenej tolerancii.

Vid'. Tab. 11-8 a Tab. 11-9

- **Výpadok T402-CNT**

Pri výpadku transformátora T402- CNT dochádza k nárastu prúdového zaťaženia transformátora T402 v R 110 kV (SO-B) o 38,7 % oproti (bezporuchovej) paralelnej prevádzke.

Prúdové zaťaženie transformátorov 110/vn kV dodávajúcich výkon z lokálnych zdrojov sa mení nasledovne. V R 110 kV (CML) u transformátorov T10 a T20 dochádza k zníženiu zaťaženia o 0,8 % a 0,3 %. V R 110 kV (BNC) dochádza u transformátora T102 o 0,1 % zníženie prúdového zaťaženia.

- **Výpadok T402-SO**

V prípade výpadku transformátora T402- SO dochádza k nárastu prúdového zaťaženia transformátora T402 v R 110 kV (CNT-B) o 33,2 %.

V R 110 kV (CML) u transformátorov T10 a T20 dochádza k zvýšeniu zaťaženia o 7,6 % a 6,4 %. V R 110 kV (BNC) dochádza u transformátora T102 o 3,2 % zvýšenie prúdového zaťaženia.

- **Výpadok prípojnice KV-A**

V prípade výpadku prípojnice (A) v R 110 kV (KV), u transformátora T402 (SO- B) dochádza k poklesu o 1,8 % a u transformátora T402 (SO- B) dochádza k zvýšeniu o 1,0 % prúdového zaťaženia.

V R 110 kV (CML) u transformátorov T10 a T20 dochádza k zvýšeniu zaťaženia o 0,5 % a 0,2 %. V R 110 kV (BNC) dochádza u transformátora T102 o 0,1 % zvýšenie prúdového zaťaženia.

Pri paralelnej prevádzke UO R Čebín a R Sokolnice v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov žiadny z transformátorov 400/110 kV a 110/vn kV nie je preťažovaný.

Vid'. Tab. 11-10

- **Výpadok T402-CNT**

Najväčší nárast zaťaženia vedenia je vidieť u vedenia č. 514 (o 71,6 %) (zvýraznené červenou farbou). Pri výpadku transformátora T402- CNT práve u tohto vedenia dôjde k prúdovému preťaženiu (vedenie č. 514 zaťažené na 105,9 %). Ďalšie výrazné nárasty prúdového zaťaženia sú u vedení č. 515 (o 40,5 %) a 5549 (o 39,2 %) (hodnoty zvýraznené zelenou farbou).

- **Výpadok T402-SO**

Výrazné nárasty prúdového zaťaženia sú u vedení č. 5051 (o 34 %), 522(2) a 522 (3) (o 28,8 %).

- **Výpadok prípojnice KV-A**

Výrazné nárasty prúdového zaťaženia sú u vedení č. 515 (o 16,6 %) a 5549 (o 16,5 %).

Pri paralelnej prevádzke UO R Čebín a R Sokolnice v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov je vedenie č. 514 prúdovo preťažované.

Vid'. Tab. 11-11

- **Výpadok T402-CNT**

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV sú 3,615 MW, čo je nárast o 13,79 % oproti (bezporuchovej) paralelnej prevádzke.

- **Výpadok T402-SO**

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV sú 5,690 MW, čo je nárast o 79,10 % oproti (bezporuchovej) paralelnej prevádzke.

- **Výpadok prípojnice KV-A**

Celkové straty činného výkonu v sieti 110 kV sú 3,367 MW, čo je nárast o 5,98 % oproti (bezporuchovej) paralelnej prevádzke.

12 NÁVRH PREVÁDZKOVÝCH A TECHNICKÝCH OPATRENÍ

Navrhnuté mostíkové zapojenie použité pre paralelnú prevádzku UO R Čebín a R Sokolnice si vyžiada technické opatrenia, ktoré budú uvedené v tejto kapitole. Budú uvedené nevyhnutné opatrenia, ktoré sú potrebné pre bezpečnú prevádzku pri použití mostíkového zapojenia. Ďalej budú uvedené doporučené opatrenia, ktoré berú v úvahu napr. rozšírenie DS, nárast odoberaného výkonu zo siete alebo pripojenie nových zdrojov.

Ustálený chod

Z vyhodnotenia ustáleného chodu, či už v prípade bezporuchovej prevádzky alebo v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov plynú nasledujúce opatrenia:

A. Nevyhnutné opatrenia

- posilnenie vedenia č. 514 o ďalšie vedenie. V prípade výpadku transformátora T402 (CNT-B) je toto vedenie prúdovo zaťažené na 105,9 %, teda je preťažované.

B. Doporučené opatrenia

- žiadne.

Skratové pomery

Z vyhodnotenia skratových pomerov za použitia mostíkového zapojenia plynú nasledujúce opatrenia:

A. Nevyhnutné opatrenia

- zvýšenie skratovej odolnosti v rozvodniach 110 kV:
 - Brno- elektrárna Červený Mlýn (CML),
 - Brno-Husovice (HUV),
 - Brno-Komárov (KV),
 - Brno-Medlánky (MEY),
 - Brno- Zbrojovka (ZBB).

V týchto rozvodniach zaťaženie skratovým výkonom (v prípade trojfázového alebo jednofázového skratu) preyšuje 100 % menovitej hodnoty skratovej odolnosti rozvodni.

B. Doporučené opatrenia

- zvýšenie skratovej odolnosti v rozvodniach 110 kV:
 - Brno - Černovice (BNC),
 - Brno- Příkop (BNP),
 - Brno-Teplárna (BNT),
 - Brno-Líšeň (LI).

V týchto rozvodniach zaťaženie skratovým výkonom (v prípade trojfázového alebo jednofázového skratu) preyšuje 90 % menovitej hodnoty skratovej odolnosti rozvodni.

13 ZÁVER

Hlavným cieľom práce je návrh tzv. mostíkového zapojenia použitého pre paralelnú prevádzku UO R Čebín a R Sokolnice v distribučnej sieti 110 kV spoločnosti E.ON a jeho porovnanie so súčasnou (samostatnou, oddelenou) prevádzkou. Porovnanie týchto dvoch variant zapojenia (samostatná a paralelná prevádzka) vychádza z výsledkov výpočtov ustáleného chodu a skratových pomerov v DS 110 kV. Práca je rozdelená na teoretickú a praktickú časť.

Teoretická časť

Teoretická časť práce je rozdelená na 5 častí (kapitol), ktoré poskytujú teoretické poznatky dôležité pre pochopenie a vyhodnotenie výpočtu ustáleného chodu a skratových pomerov.

Prvá časť sa zaoberá výpočtom ustáleného chodu v sieťach vvn a zvn. Sú tu uvedené zjednodušujúce predpoklady, ktoré je možné pri výpočtoch použiť. V sieťach vvn je nutné pri výpočte pre vedenia uvažovať všetky štyri elektrické parametre (R , L , C , G), v prípade menšej presnosti výpočtov je možné zanedbať parameter zvod (G). Pre výpočty s menšou presnosťou je vhodný výpočet ustáleného chodu ako lineárnej úlohy. Pre výpočty s vyššou požadovanou presnosťou sú vhodné iteračné metódy a to Gauss-Seidlova alebo Newtonova, z ktorých každá má svoje výhody a nevýhody.

Druhá časť popisuje prechodné javy v ES a uvádza delenie prechodných javov podľa času trvania (skraty patria do oblastí stredne rýchlych- elektromagnetických prechodných javov). Ďalej sú uvedené príčiny vzniku skratu, dôsledky skratu, časového priebehu a charakteristické veličiny popisujúce skratový prúd. Medzi najzávažnejšie dôsledky skratu patria jeho tepelné a silové účinky, ktoré sú dôležité hlavne u kontroly dimenzovania elektrických zariadení. Čo sa týka časového priebehu skratu, práve u dimenzovania zariadení je nutné počítať so skratovým prúdom s maximálne vyvinutou jednosmernou zložkou.

Tretia časť sa zaoberá metódami výpočtov skratových prúdov sieťach vvn a zvn v súlade s platnými normami. Sú tu uvedené zjednodušenia použiteľné pri výpočtoch, metóda súmerných zložiek a jej využitie v trojfázových sústavách. Ďalej je uvedená metóda výpočtu pomocou ekvivalentného napäťového zdroja v mieste skratu.

Štvrtá časť poskytuje potrebné informácie a vzťahy pre výpočet skratových impedancií elektrických zariadení. Znalosť skratových impedancií je nevyhnutná podmienka pre výpočet skratových prúdov.

Piata časť pojednáva o postupe pri výpočte skratových prúdov a prepočte skratových impedancií, či už v skutočných hodnotách alebo v pomerných. A nakoniec sú uvedené vzťahy pre výpočet skratových prúdov v prípade troj a jednofázové skratu za použitia metódy súmerných zložiek.

Praktická časť

V súčasnosti sa UO R Čebín a R Sokolnice prevádzkuje samostatne (viď. obrázok v *Prílohe A*). V R 110 kV CNT, transformátor T402 pracuje do prípojnice B a napája rozvodne spadajúce do svojej oblasti, v R 110 kV SO transformátor T402 pracujúci do prípojnice B, napája vlastnú oblasť.

Navrhnuté mostíkové zapojenie (viď. obrázok v *Prílohe B*) použité pre paralelnú prevádzku UO R CNT a R SO alebo inak povedané, pre paralelnú prevádzku transformátorov T402 v R CNT a R SO je realizované pomocou zapnutých priečných spínačov vo vybraných rozvodniach. V rozvodniach vybavených dvojitým systémom prípojnic (HUV, LI, BNT a KV) sú zapnuté priečne spínače prípojnic, ktoré spájajú dve UO (UO R CNT a R SO) do jednej oblasti. Pre

mostíkové zapojenie sú ešte realizované zmeny (viď. kapitola 10) na zapojení vedení v rozvodniach s dvojitým sytémom prípojnic pre maximálne skruhovanie siete.

Pre samostatnú a paralelnú prevádzku UO R CNT a R SO sú prevedené výpočty ustáleného chodu a skratových pomerov. Pre mostíkové zapojenie použité pre paralelnú prevádzku sú prevedené výpočty ustáleného chodu aj v prípade mimoriadnych prevádzkových stavov (výpadok T402 CNT, výpadok T402 SO a výpadok prípojnice KV-A). Z výpočtov a vyhodnotenia jednotlivých variant zapojenia (aj v prípade mimoriadnych stavov) vyplynuli nasledujúce závery pre paralelnú prevádzku UO R Čebín a R Sokolnice.

Pri paralelnej prevádzke je napätie vo všetkých rozvodniach spadajúcich do UO R CNT a R SO v dovolenej tolerancii (99 až 121 kV) a to aj v prípade výpadku jedného transformátora T402, či už v R CNT alebo R SO. Z toho plynie hlavná výhoda paralelnej prevádzky a to je **zvýšená spoľahlivosť v dodávke elektrickej energie**. Táto zvýšená spoľahlivosť je zaručená tým, že v danej oblasti sú pri tomto zapojení dva transformátory 400/110 kV o dostatočne veľkom výkone (oba prepojené na PS), ktoré sa v podstate vzájomne zálohujú. V prípade samostatnej prevádzky UO R CNT a R SO by výpadok transformátora T402 (v R CNT alebo v R SO) znamenal výpadok dodávky elektrickej energie v príslušnej oblasti.

Transformátory 400/110 kV typ T402 (v R CNT alebo v R SO) nie sú pri paralelnej prevádzke preťažované a to platí aj v prípade výpadku jedného alebo druhého transformátora T402. Pri týchto „ťažkých výpadkoch“ jeden transformátor T402 napája celú oblasť a jeho prúdové zaťaženie neprekračuje 76 % (či už v R CNT alebo v R SO). Transformátory 110/vn kV (odoberajúce výkon z oblasti prípadne dodávajúce výkon z lokálnych zdrojov) taktiež nie sú pri paralelnej prevádzke preťažované.

Vedenia 110 kV nie sú pri paralelnej (bezporuchovej) prevádzke preťažované. V prípade výpadku transformátora T402 v R CNT je **vedenie č. 514 prúdovo zaťažené na 105,9 %, teda je preťažené**.

Vplyvom paralelnej prevádzky dôjde k zvýšeniu strát v sieti 110 kV na 3,177 MW, čo je 8,32 % nárast oproti samostatnej prevádzke. Najväčší nárast strát je ne vedeniach 110 kV. V prípade mimoriadnych prevádzkových stavov pri paralelnej prevádzke dochádza k ešte vyššiemu nárastu strát.

Ako je vidieť z výpočtu skratových pomerov, paralelná prevádzka UO R CNT a R SO **výrazne zvyšuje skratové prúdy v danej oblasti. Skratová odolnosť v R 110 kV CML, HUV, KV, MEY a ZBB je prekročená**. V R 110 kV BNC, BNP, BNT a LI je sú hodnoty zaťaženia skratovým výkonom preyšujúce 90 % menovitej hodnoty skratovej odolnosti. Nárast skratových prúdov je daný tým, že zapnutím priečných spínačov vo vybraných rozvodniach dochádza ku znižovaniu skratových impedancií. Ďalšou príčinou nárastu skratových prúdov je, že pri paralelnej prevádzke sa nachádzajú v danej oblasti dva transformátory T402 (dva zdroje skratového prúdu ak nepočítame lokálne zdroje).

Ako je vidieť, paralelná prevádzka UO R Čebín a R Sokolnice má veľmi dobrý vplyv na zvýšenie spoľahlivosti dodávky elektrickej energie, čo je hlavný cieľ tejto prevádzky (mostíkového zapojenia). Avšak k tomuto zapojeniu je nutné používať zapnuté priečne spínače prípojnic, ktoré prepojujú uzlové oblasti a je nutné sieť skruhovať, aby bolo zabezpečené napájanie z dvoch strán. Tento fakt má za následok zhoršenie skratových pomerov. **Bez prevedenia nutných technických opatrení (zvýšenie skratovej odolnosti vybraných rozvodní a tiež posilnenie vybraných vedení) v DS 110 kV (viď. kapitola 12) nie je paralelná prevádzka UO R Čebín a R Sokolnice pri využití navrhnutého mostíkového zapojenia bezpečná**.

POUŽITÁ LITERATURA

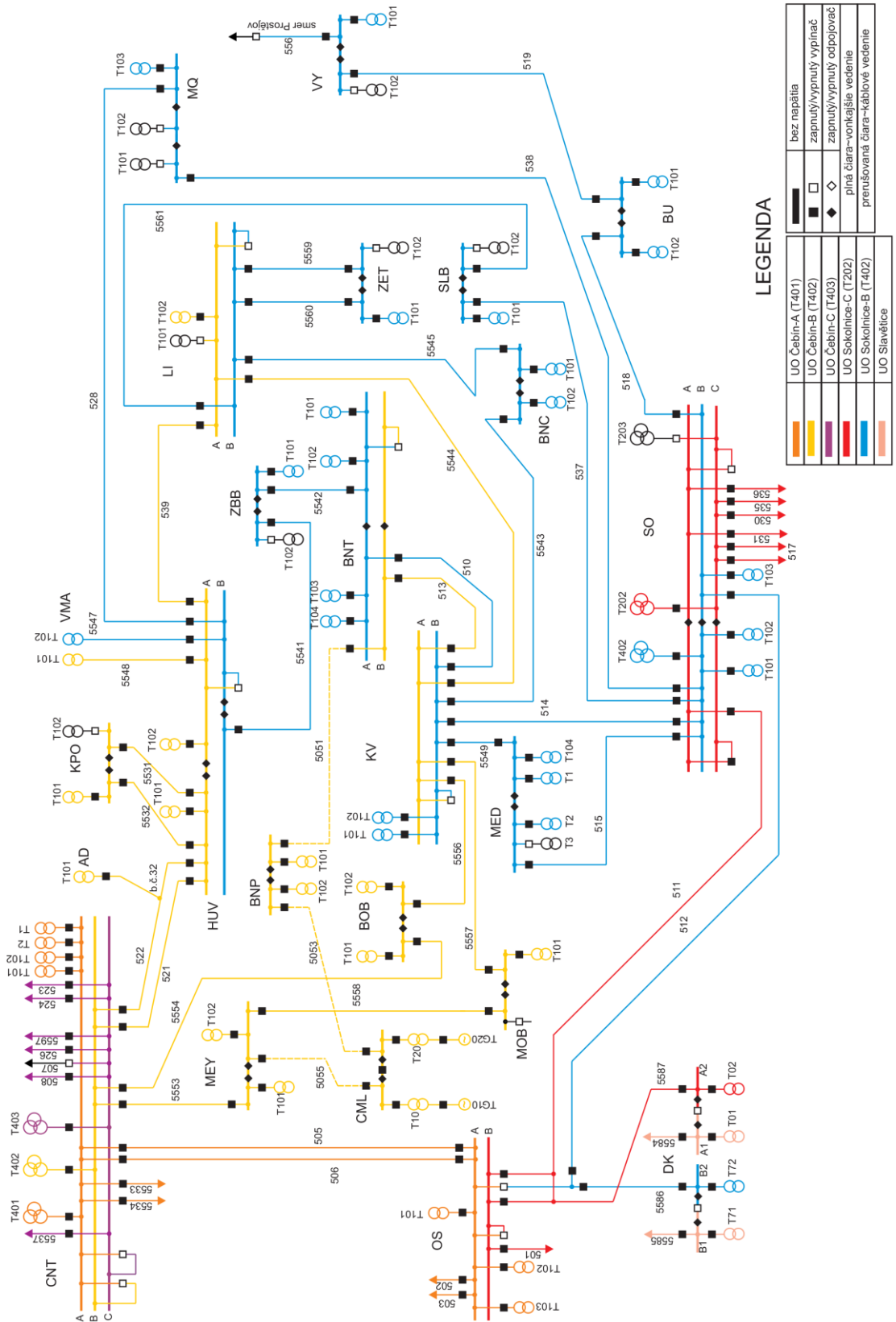
- [1] KOLCUN, Michal, Vladimír CHLADNÝ a Ladislav VARGA. Počítačová analýza elektrizačnej sústavy. Košice: Technická univerzita Košice, 2006. ISBN 80-8073-453-4.
- [2] BLAŽEK Vladimír., SKALA Petr.: Distribuce elektrické energie, elektronický učební text FEKT VUT v Brně, Brno, 2003
- [3] HALUZÍK, Evžen. Řízení provozu elektrizačních soustav. 2. vyd. Praha: SNTL, 1987, 125 s.
- [4] KUČERA, Drahoš. Elektroenergetika I. 1. vyd. Brno: VUT, 1986, 214 s.
- [5] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. Přejídné jevy v elektrizačních soustavách: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987, 310 s.
- [6] HODINKA, Miloslav. Přejídné jevy v elektrizačních soustavách. 2. nezměň.vyd. Brno: VUT, 1985, 239 s.
- [7] Blažek Vladimír., Paar Martin.: Přenosové sítě, elektronický učební text FEKT VUT v Brně, Brno, 2006
- [8] PAUZA, Josef. Zkratky v elektrických rozvodech. 1. vyd. Praha: SNTL, 1970, 246 s.
- [9] SEDLÁČEK, Jiří a Juraj VALSA. Elektrotechnika II. 3. přeprac.vyd. Brno: Vutium, 2004, 143 s. ISBN 80-214-2573-3.
- [10] TOMAN, Petr et al. Provoz distribučních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8
- [11] ČSN EN 60909 – 0: 2002. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – část 0: Výpočet proudů. idt IEC 60909-0:2001 + idt IEC 60909-0:2001/ Cor. 1:2002-02
- [12] IEC TR 60909-1 zavedena v ČSN IEC 909-1:1997 (33 3023) Výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách - část 1: Součinitele pro výpočet zkratových proudů v trojfázových střídavých soustavách podle IEC 909. idt IEC 909-1:1991
- [13] IEC TR3 60909-2:1992 zavedena v ČSN IEC 909-2:1997 (33 3024) Data pro výpočty zkratových proudů v souladu s IEC 909. idt IEC 909-2:1992
- [14] IEC TR 60909-4: 2000 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents.
- [15] E.ON Distribuce, a.s. : Popis distribuční soustavy E.ON, 5/2006, [on-line], [cit. 2013-04-12]. Dostupné z WWW: http://www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/technical_information/EON-popis_ds.pdf
- [16] Teplárny Brno a.s.: Provozy, [on-line], [cit. 2013-04-12]. Dostupné z WWW: <http://www.teplarny.cz/cz/provozy>

PRÍLOHA (CD)

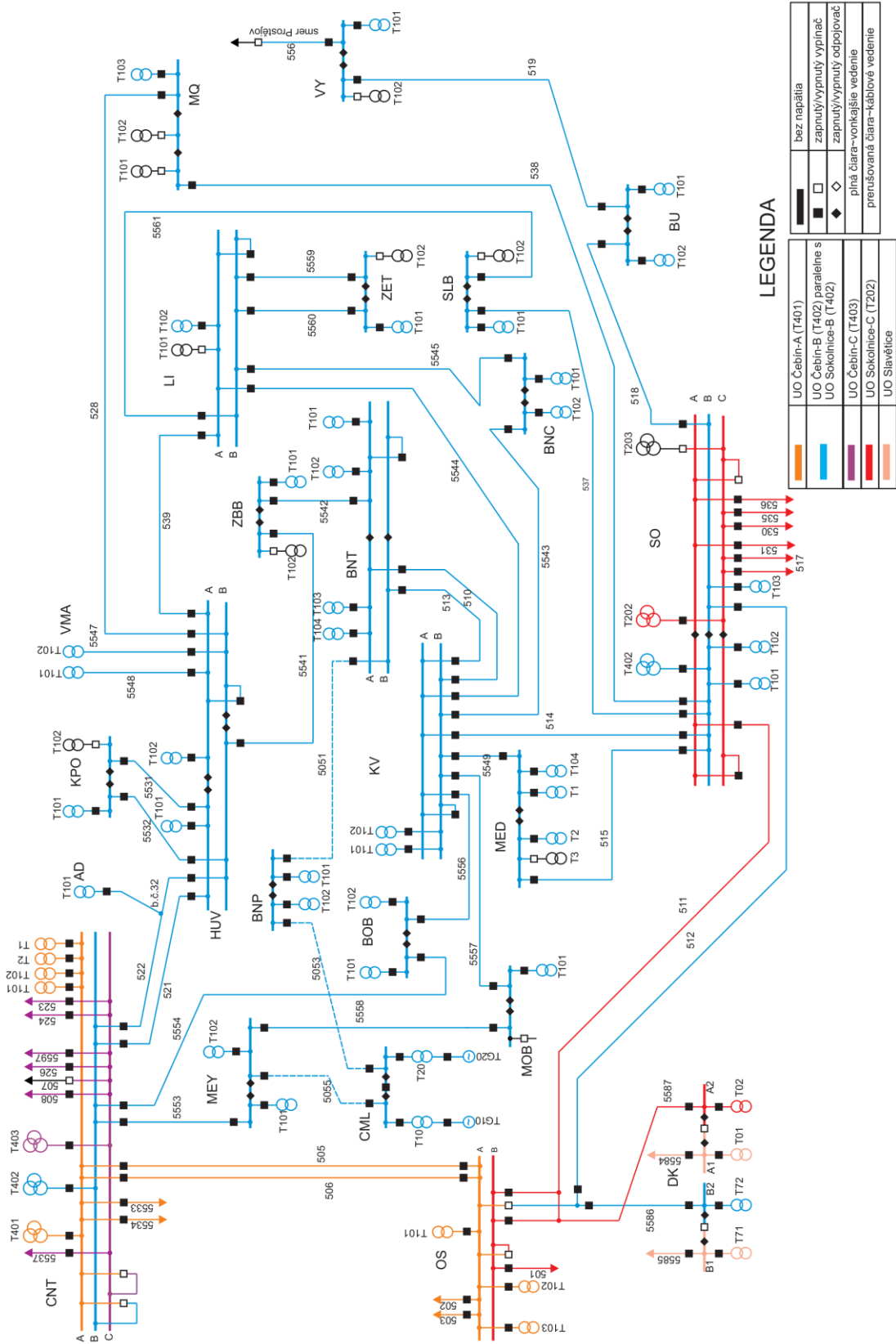
Elektronická príloha je uložená na priloženom CD- nosiči a obsahuje:

- A. Dispečerská mapa DS 110 kV E.ON.
- B. Výsledky výpočtov z dispečerského riadiaceho systému SINAUT SPECTRUM 4.4. pre jednotlivé zapojenia siete 110 kV (ustálený chod, výpočet skratových pomerov pre troj a jednofázový skrat).

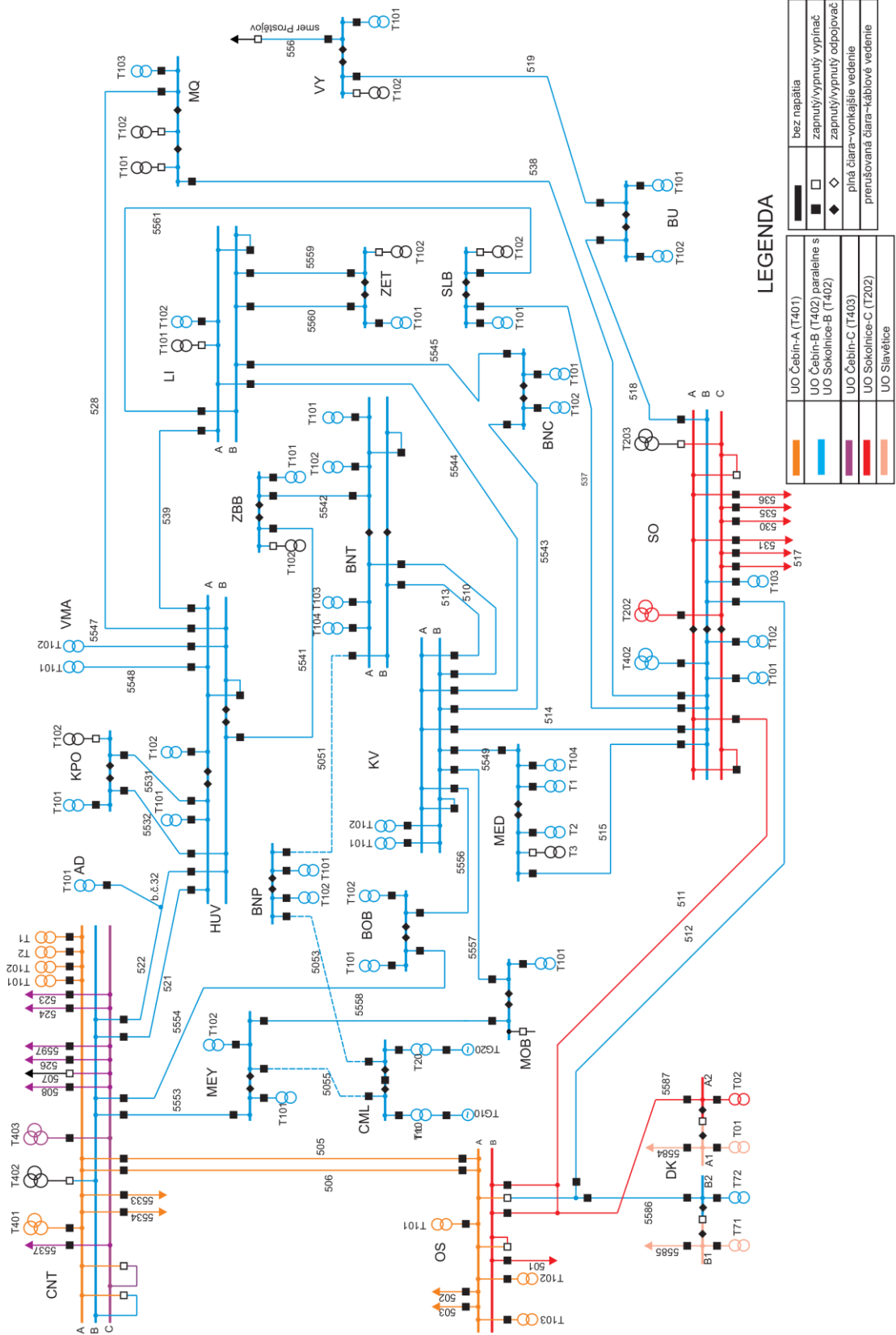
PRÍLOHA A- SCHÉMA ZAPOJENIA PRI SAMOSTATNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE



PRÍLOHA B- SCHÉMA MOSTÍKOVÉHO ZAPOJENIA PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE



PRÍLOHA C- SCHÉMA MOSTÍKOVÉHO ZAPOJENIA PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE (VÝPADOK T402 CNT)



PRÍLOHA D- SCHÉMA MOSTÍKOVÉHO ZAPOJENIA PRI PARALELNEJ PREVÁDZKE UO R ČEBÍN A R SOKOLNICE (VÝPADOK T402 SO)

