

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Martin Reiter



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**ANALÝZA VARIANT PARALELNÍHO PROVOZU OBLASTÍ  
110 KV ČEBÍN A SOKOLNICE**

THE ANALYSIS OF PARALLEL OPERATION VARIANTS OF SUPPLY AREAS 110 KV ČEBÍN AND  
SOKOLNICE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Martin Reiter

**VEDOUČÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

BRNO 2016



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Martin Reiter

**ID:** 144820

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### **Analýza variant paralelního provozu oblastí 110 kV Čebín a Sokolnice**

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie výpočtu ustáleného chodu sítě a výpočtu zkratů.
2. Výpočet chodu sítě a zkratových poměrů v DS při odděleném napájení části Brna z rozvodu Sokolnice a Čebín.
3. Výpočet chodu sítě a zkratových poměrů v DS při paralelním napájení části Brna z rozvodu Sokolnice a Čebín.
4. Kontrola bilance výkonů při standardních a nestandardních provozních stavech.
5. Návrh řešení pro zamezení tranzitu výkonu přes propojené oblasti 110 kV Čebín a Sokolnice.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 20.5.2016

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

**Konzultant 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:

REITER, M. *Analýza variant paralelního provozu oblastí 110 kV Čebín a Sokolnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 90 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D..

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu, panu doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D., za jeho velmi cenné rady při řešení diplomové práce, za jeho čas a trpělivost. Také bych rád poděkoval pracovníkům společnosti E.ON, kteří byli velice nápomocni při řešení problému týkajících se diplomové práce.

Velký dík patří rodičům, kteří mě při studiu podporovali psychicky i finančně.

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.

.....

**ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá analýzou paralelního provozu rozvoden Čebín a Sokolnice. Zkoumány jsou různé varianty zapojení sítě mezi těmito rozvodnami.

V teoretické části je podrobně popsán výpočet ustáleného chodu sítě pomocí iteračních metod. Dále se v teoretické části nachází výpočet zkratů a dimenzování vodičů na účinky zkratových proudů. V poslední kapitole jsou rozebrány možnosti přetěžování vedení a transformátorů.

V praktické části je popsán současný stav situace. Hlavním úkolem praktické části diplomové práce je navrhnout provozuschopné konfigurace sítě pro paralelní provoz a také pro provoz kdy mezi rozvodnami Čebín a Sokolnice není přímé spojení na úrovni 110kV. Tak aby bylo zamezeno přetokům tranzitních výkonů. Jednotlivé konfigurace musí splňovat požadavky na ustálený chod sítě a zkratovou odolnost rozvoden. V rámci praktické části jsou také navržena opatření předcházející a zabráňující přetokům tranzitních výkonů.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Zkrat; ustálený chod; Newtonova iterační metoda; distribuční síť; rozvodna.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis is focused on the analysis of parallel operation of Čebín and Sokolnice substations. Different variants of parallel operation are researched.

A calculation of steady state by the iterative method is described in the theoretical part. The next part briefly mentions a short-circuit and dimensioning of conductors. The possibility of overloading of lines and transformers is discussed in the last chapter of the theoretical part.

The current state of the situation is described in the practical part. Main goal of the practical part of the diploma thesis is to design a configuration capable to parallel operation. Also another configuration of supply of this area is designed. There must be no direct connection between Čebín and Sokolnice substations on 110kV level in this configuration. This configuration should eliminate a transit flow of power. Each configuration has to fulfill the requirements on the steady state and on short-circuit current capability. One of the last chapters is focused on the steps, that should be undertaken to prevent transit flow of power.

**KEY WORDS:** Short-circuit; steady state; Newton's iterative method; distribution network; substation.

## OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	12
1 ÚVOD.....	16
2 CÍLE PRÁCE .....	17
3 ZKRATY .....	18
3.1 PARAMETRY ZKRATOVÉHO PROUDU .....	18
3.1.1 DIMENZOVÁNÍ NA ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU [11].....	18
3.2 ZDROJE ZKRATOVÝCH PROUDŮ [4].....	20
3.3 CHARAKTERISTIKY ZKRATU .....	20
3.3.1 DĚLENÍ ZKRATŮ .....	21
3.4 VÝPOČTY ZKRATOVÝCH PROUDŮ .....	21
3.5 ZKRATOVÝ VÝKON.....	22
4 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ .....	23
4.1 KLASIFIKACE UZLŮ.....	23
4.1.1 BILANČNÍ UZEL .....	23
4.1.2 REGULAČNÍ UZEL .....	23
4.1.3 UZLY TŘÍDY ( $P;Q$ ).....	24
4.2 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ ŘEŠENÝ JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA [6] .....	24
4.3 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU .....	25
4.4 ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHY .....	25
4.5 GAUSS-SEIDLOVA ITERAČNÍ METODA .....	26
4.6 NEWTONOVA ITERAČNÍ METODA [6][7].....	26
5 PŘETĚŽOVÁNÍ PRVKŮ SÍTĚ.....	31
5.1 PŘETĚŽOVÁNÍ TRANSFORMÁTORŮ .....	31
5.1.1 VÝPOČET POMOCÍ ELEKTRICKÉHO MODELU .....	31
5.1.2 URČENÍ MOŽNOSTÍ PŘETĚŽOVÁNÍ TRANSFORMÁTORŮ Z GRAFŮ .....	33
5.2 PŘETĚŽOVÁNÍ VEDENÍ.....	35
5.2.1 AMPACITA.....	35
5.2.2 LIMITY PŘI PROVOZU VEDENÍ.....	35
5.2.3 VLIV POČASÍ NA VEDENÍ .....	36
5.2.4 MONITOROVÁNÍ.....	37
6 SOUČASNÝ STAV SITUACE.....	39
6.1 ZÁKLADNÍ PROBLÉM.....	40
6.2 MOŽNOSTI PŘETĚŽOVÁNÍ.....	40
7 CHARAKTERISTIKY ANALYZOVANÉ OBLASTI.....	41

7.1 POPIS ROZVODEN .....	41
7.2 CHARAKTERISTIKY VEDENÍ .....	42
7.3 ZDROJE A TRANSFORMÁTORY V ANALYZOVANÉ OBLASTI .....	43
7.4 POPIS PROGRAMU RIS .....	44
<b>8 ANALÝZA USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ .....</b>	<b>45</b>
8.1 ODDĚLENÉ NAPÁJENÍ ČÁSTÍ BRNA – STÁVAJÍCÍ ZÁKLADNÍ ZAPOJENÍ DS 110 kV – KONFIGURACE 1 .....	45
8.2 OBLAST BRNA NAPÁJENA PARALELNĚ Z ČEBÍNA A SOKOLNIC (ZAPNUTÉ PSP V KV, BNT, LI A HUV) – KONFIGURACE 2 .....	48
8.3 OBLAST BRNA NAPÁJENA PARALELNĚ Z ČEBÍNA A SOKOLNIC (VYPNUTÉ PSP V BNT A LI, ZAPNUTÉ PSP V KV A HUV) – KONFIGURACE 3 .....	49
8.4 OBLAST BRNA NAPÁJENA Z ČEBÍNA T401 (VYPNUTÉ PSP V BNT A LI, ZAPNUTÉ PSP V KV A HUV, VYPNUTÉ V514, V515, V537 A V538) – KONFIGURACE 4.....	51
8.5 OBLAST BRNA NAPÁJENA ZE SOKOLNIC T402 (VYPNUTÉ PSP V BNT A LI, ZAPNUTÉ PSP V KV A HUV, VYPNUTÉ V521, V522, V5553 A V5554) – KONFIGURACE 5.....	53
8.6 DALŠÍ MOŽNOSTI KONFIGURACE ZAPOJENÍ DS 110 kV PRO NAPÁJENÍ OBLASTI MĚSTA BRNA 55	
<b>9 VYHODNOCENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ .....</b>	<b>56</b>
9.1 POROVNÁNÍ PARALELNÍHO PROVOZU (KONFIGURACE 2 A 3) .....	56
9.2 POROVNÁNÍ ODDĚLENÉHO PROVOZU (KONFIGURACE 1, 4 A 5) .....	59
<b>10 KONTROLA ZKRATOVÝCH ODOLNOSTÍ ROZVODEN .....</b>	<b>61</b>
10.1 KONTROLA ZKRATOVÝCH ODOLNOSTÍ ROZVODEN PŘI KONFIGURACI 1.....	62
10.2 KONTROLA ZKRATOVÝCH ODOLNOSTÍ ROZVODEN PŘI KONFIGURACI 2.....	63
10.3 KONTROLA ZKRATOVÝCH ODOLNOSTÍ ROZVODEN PŘI KONFIGURACI 3.....	64
10.4 KONTROLA ZKRATOVÝCH ODOLNOSTÍ ROZVODEN PŘI KONFIGURACI 4.....	65
10.5 KONTROLA ZKRATOVÝCH ODOLNOSTÍ ROZVODEN PŘI KONFIGURACI 5.....	66
10.6 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKRATOVÉ ODOLNOSTI ROZVODEN .....	67
<b>11 ANALÝZA ZMĚN ÚHLU NAPĚTÍ MEZI ROZVODNAMI SOKOLNICE – ČEBÍN .....</b>	<b>68</b>
11.1 PRŮBĚHY ČINNÝCH A JALOVÝCH VÝKONŮ V ROZVODNÁCH CNT A SO .....	69
11.2 POROVNÁNÍ ÚHLŮ NAPĚTÍ MEZI ROZVODNAMI ČEBÍN – SOKOLNICE .....	70
<b>12 NAVRŽENÁ ROZPADOVÁ AUTOMATIKA.....</b>	<b>73</b>
12.1 FUNKCE ROZPADOVÉ AUTOMATIKY .....	74
12.1.1 PRVNÍ STUPEŇ .....	75
12.1.2 DRUHÝ STUPEŇ .....	75
12.1.3 TŘETÍ STUPEŇ .....	76
12.2 NÁVRH OPATŘENÍ V DS PRO PARALELNÍ PROVOZ .....	77
<b>13 ZÁVĚR.....</b>	<b>78</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>80</b>
<b>PŘÍLOHA A .....</b>	<b>81</b>
<b>PŘÍLOHA B .....</b>	<b>82</b>
<b>OBLAST BRNA NAPÁJENA ZE SOKOLNIC T402 – KONFIGURACE 6 .....</b>	<b>82</b>

---

<b>OBLAST BRNA NAPÁJENÁ ZE SOKOLNIC T402 – KONFIGURACE 7 .....</b>	<b>84</b>
<b>OBLAST BRNA NAPÁJENÁ Z ČEBÍNA T401 – KONFIGURACE 8 .....</b>	<b>85</b>
<b>OBLAST BRNA NAPÁJENÁ Z ČEBÍNA T401 – KONFIGURACE 9 .....</b>	<b>87</b>
<b>PŘÍLOHA C .....</b>	<b>89</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 4.1 Schéma pro ustálený chod sítě upraveno z [6]</i> .....	24
<i>Obr. 5.1 Ekvivalentní schéma transformátoru [9]</i> .....	31
<i>Obr. 5.2 Graf možnosti přetěžování transformátoru ONAN upraveno z [10]</i> .....	34
<i>Obr. 5.3 Graf zatížitelnosti vedení na teplotě okolí (upraveno z [13])</i> .....	36
<i>Obr. 5.4 Graf zatížitelnosti vedení na rychlosti větru (upraveno z [13])</i> .....	37
<i>Obr. 5.5 Graf zatížitelnosti vedení na směru větru (upraveno z [13])</i> .....	37
<i>Obr. 5.6 Přístroj ampacimon [14]</i> .....	38
<i>Obr. 6.1 Schéma analyzované sítě (upraveno E.ON)</i> .....	39
<i>Obr. 6.2 Spojení rozvoden Čebín – Sokolnice na úrovni 400 kV</i> .....	40
<i>Obr. 8.1 Schematické znázornění konfigurace 1</i> .....	45
<i>Obr. 8.2 Schematické znázornění konfigurace 2</i> .....	48
<i>Obr. 8.3 Schematické znázornění konfigurace 3</i> .....	50
<i>Obr. 8.4 Schematické znázornění konfigurace 4</i> .....	52
<i>Obr. 8.5 Schematické znázornění konfigurace 5</i> .....	54
<i>Obr. 9.1 Graf napěťových poměrů v rozvodnách při konfiguracích 2 a 3</i> .....	57
<i>Obr. 9.2 Graf zatížení vedení při konfiguracích 2 a 3</i> .....	58
<i>Obr. 9.3 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguracích 1, 4 a 5</i> .....	59
<i>Obr. 9.4 Graf zatížení vedení při konfiguracích 1, 4 a 5</i> .....	61
<i>Obr. 10.1 Graf procentního zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 1</i> .....	62
<i>Obr. 10.2 Graf procentního zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 2</i> .....	63
<i>Obr. 10.3 Graf procentního zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 3</i> .....	64
<i>Obr. 10.4 Graf procentního zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 4</i> .....	65
<i>Obr. 10.5 Graf procentního zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 5</i> .....	66
<i>Obr. 11.1 Zatížení transformátoru T401 činným a jalovým výkonem v rozvodně CNT</i> .....	69
<i>Obr. 11.2 Zatížení transformátoru T402 činným a jalovým výkonem v rozvodně SO</i> .....	70
<i>Obr. 11.3 Průběh rozdílu úhlu napětí mezi rozvodnami CNT a SO během roku</i> .....	70
<i>Obr. 11.4 Průběh rozdílu úhlu napětí mezi rozvodnami CNT a SO v závislosti na celkovém jalovém výkonu</i> .....	71
<i>Obr. 11.5 Průběh rozdílu úhlu napětí mezi rozvodnami CNT a SO v závislosti na celkovém činném výkonu</i> .....	72
<i>Obr. 12.1 Schéma navržení rozpadové automatiky</i> .....	74
<i>Obr. 0.1 Schéma DS sítě 110 kV základní zapojení – konfigurace 1</i> .....	81



## SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Seznam parametrů zkratů .....	18
Tab. 3-2 Pravděpodobnost vzniku zkratu dle napětových hladin [1] .....	21
Tab. 4-1 Znaménková konvence pro uzly třídy (P;Q) [6] .....	24
Tab. 6-1 Seznam rozvoden.....	39
Tab. 6-2 Možnosti zatížitelnosti transformátorů T401 a T402 .....	40
Tab. 7-1 Parametry vedení.....	42
Tab. 7-2 Parametry zdrojů pracujících do analyzované oblasti .....	43
Tab. 7-3 Blokové transformátory ve výrobnách.....	43
Tab. 7-4 Parametry transformátorů v rozvodnách SO, CNT, BNC a BNT.....	43
Tab. 7-5 Tabulka síťových napáječů ke zkratům .....	43
Tab. 8-1 Rozdíly napětí a jeho úhlu při konfiguraci 1 v rozvodnách (HUV, KV, LI a BNT) mezi přípojnicemi.....	46
Tab. 8-2 Napětové poměry v rozvodnách při konfiguraci 1 .....	46
Tab. 8-3 Tabulka zatížení a přenášených výkonů na vedení při konfiguraci 1 .....	47
Tab. 8-4 Zatížení transformátorů T401 a T402.....	47
Tab. 8-5 Napětové poměry v rozvodnách při konfiguraci 2 .....	48
Tab. 8-6 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 2.....	48
Tab. 8-7 Zatížení a přenášený výkon na vedení při konfiguraci 2 .....	49
Tab. 8-8 Napětové poměry v rozvodnách při konfiguraci 3 .....	50
Tab. 8-9 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 3.....	50
Tab. 8-10 Tabulka zatížení vedení při konfiguraci 3.....	51
Tab. 8-11 Napětové poměry v rozvodnách při konfiguraci 4 .....	52
Tab. 8-12 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 4.....	52
Tab. 8-13 Tabulka zatížení vedení při konfiguraci 4.....	53
Tab. 8-14 Napětové poměry v rozvodnách při konfiguraci 5 .....	54
Tab. 8-15 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 5.....	54
Tab. 8-16 Tabulka zatížení vedení při konfiguraci 5.....	55
Tab. 9-1 Tabulka napětových poměrů v rozvodnách při konfiguracích 2 a 3 .....	56
Tab. 9-2 Tabulka porovnání ztrát na vedení při konfiguracích 2 a 3 .....	57
Tab. 9-3 Tabulka zatížení vedení při konfiguracích 2 a 3.....	58
Tab. 9-4 Tabulka napětových poměrů v rozvodnách pro konfigurace 1, 4 a 5 .....	59
Tab. 9-5 Tabulka porovnání ztrát na vedení při konfiguracích 1, 4 a 5 .....	60
Tab. 9-6 Tabulka zatížení vedení při konfiguracích 1, 4 a 5.....	60

---

<i>Tab. 10-1 Tabulka jmenovitých zkratových odolností rozvoden</i> .....	61
<i>Tab. 10-2 Zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 1</i> .....	62
<i>Tab. 10-3 Zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 2</i> .....	63
<i>Tab. 10-4 Zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 3</i> .....	64
<i>Tab. 10-5 Zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 4</i> .....	65
<i>Tab. 10-6 Zatížení rozvoden zkratovým výkonem při konfiguraci 5</i> .....	66
<i>Tab. 12-1 Tabulka jmenovitých proudů vedení a hodnoty nadproudových ochran</i> .....	73
<i>Tab. 12-2 Tabulka nastavení nadproudových ochran na transformátory T401 a T402</i> .....	73
<i>Tab. 12-3 Tabulka podmínek pro rozpadovou automatiku pro druhý stupeň</i> .....	76
<i>Tab. 12-4 Tabulka podmínek pro rozpadovou automatiku pro třetí stupeň</i> .....	76
<i>Tab. 0-1 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 6</i> .....	82
<i>Tab. 0-2 Tabulka zatížení a přenášených výkonů na vedení pro konfiguraci 6</i> .....	83
<i>Tab. 0-3 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 6</i> .....	83
<i>Tab. 0-4 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 7</i> .....	84
<i>Tab. 0-5 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 7</i> .....	84
<i>Tab. 0-6 Zatížení a přenášené výkony na vedeních při konfiguraci 7</i> .....	85
<i>Tab. 0-7 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 8</i> .....	86
<i>Tab. 0-8 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 8</i> .....	86
<i>Tab. 0-9 Zatížení a přenášený výkon na vedeních při konfiguraci 8</i> .....	87
<i>Tab. 0-10 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 9</i> .....	88
<i>Tab. 0-11 Zatížení a přenášený výkon na vedení při konfiguraci 9</i> .....	88
<i>Tab. 0-12 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 9</i> .....	89

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$I_k''$	počáteční souměrný rázový zkratový proud	A
$i_p$	nárazový zkratový proud	A
$I_b$	souměrný zkratový vypínací proud	A
$I_k$	ustálený zkratový proud	A
$I_{th}$	efektivní oteplovací zkratový proud	A
$i_{d.c}$	stejnoseměrná složka zkratového proudu	A
$T_k, t_k$	dobra trvání zkratu	s
$c_{max}$	napěťový součinitel (maximální)	-
$c_{min}$	napěťový součinitel (minimální)	-
$H$	intenzita magnetického pole	A/m
$a$	vzdálenost od vodiče	m
$B$	magnetická indukce	T
$I$	proud	A
$l$	délka vodiče	m
$\alpha$	úhel mezi vektorem síly a osou vodiče	°
$F$	síla působící na vodič	N
$F_m$	síla působící na vodič při třífázovém zkratu	N
$k$	koeficient respektující uspořádání vodičů	-
$a_m$	účinná vzdálenost mezi vodiči	m
$I_{km}$	nárazový zkratový proud	A
$\mathcal{G}_z$	provozní teplota	°C
$\mathcal{G}_f$	fiktivní teplota	°C
$\mathcal{G}_k$	nejvyšší dovolená teplota při zkratu	°C
$I_{ke}$	ekvivalentní oteplovací proud	A
$c_0$	specifické teplo	J/kg.K
$\rho_{20}$	specifický odpor při 20 °C	$\Omega$
$f$	frekvence	Hz
$vn$	vysoké napětí	kV

$vvn$	velmi vysoké napětí	kV
$R$	elektrický odpor	$\Omega$
$X$	induktivní reaktance	$\Omega$
$S_k''$	nárazový zkratový výkon	MVA
$U_n$	sdužená hodnota napětí	V
$U$	napětí	V
$\delta, \varphi$	úhel napětí	$^\circ$
$P$	činný výkon	W
$Q$	jalový výkon	Var
$\bar{I}$	fázor proudu	A
$\bar{U}_x$	fázor napětí vůči zemi	V
$\bar{y}_{xy}$	admitance mezi uzly	S
$\bar{y}_{x0}$	admitance mezi uzly a zemí	S
$\bar{Y}_{ii}$	diagonální prvek admitanční matice	S
$\bar{Y}_{ij}$	mimodiagonální prvek admitanční matice	S
$\bar{S}_i$	zdánlivý výkon v i-tém uzlu	VA
$P_i$	činný výkon v i-tém uzlu	W
$Q_i$	jalový výkon v i-tém uzlu	Var
*	označení komplexního sdužení čísla	-
$\Delta P_i$	změna činného výkonu	W
$\Delta U_i$	změna napětí	V
$\Delta \delta_i$	změna úhlu napětí	$^\circ$
$\alpha_{ij}$	úhel admitance	$^\circ$
$P_v$	ztráty v transformátoru	W
$R_{th}$	tepelný odpor	$\Omega$
$C_{th}$	tepelná kapacita	F
$\Theta$	změna (rozdíl) teploty	$^\circ\text{C}$
$m_{cu}$	hmotnost vinutí mědi	kg

$C_{cu}$	měrná tepelná kapacita mědi	J/kg.K
$m_{Fe}$	hmotnost transformátorového jádra	kg
$C_{Fe}$	měrná tepelná kapacita železa	J/kg.K
$m_{ol}$	hmotnost transformátorového oleje	kg
$C_{ol}$	měrná tepelná kapacita oleje	J/kg.K
$\vartheta_{ven}$	venkovní teplota	°C
$\vartheta_{ol}$	teplota transformátorového oleje	°C
$P_{chlad}$	chladicí výkon soustavy	W
$\alpha_{tr}$	součinitel přestupu tepla	W/m <sup>2</sup> .K
$O_{tr}$	ochlazovaná plocha	m <sup>2</sup>
$P_0$	ztráty transformátoru naprázdno	W
$P_k$	ztráty transformátoru nakrátko	W
$\vartheta_h$	teplota nejteplejšího místa na transformátoru	°C
$I_n$	jmenovitý proud	A
$S_n$	jmenovitý zdánlivý výkon	VA
$t$	čas	s
$\Delta P_{VED}$	ztráty na vedení	W
$R_{VED}$	odpor vedení	Ω
$I_C$	činná složka proudu	A
$I_J$	jalová složka proudu	A
$R_g$	odpor při teplotě $\vartheta$	Ω
$\alpha$	teplotní součinitel odporu	1/K
$V$	rychlost větru	m/s
$I_s$	intenzita slunečního záření	W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	emisivita povrchu vedení	-
$S$	Stefan-Boltzmanova konstanta	W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup>
$k_t$	poměr AC a DC odporu	-

$R_{dt}$	odpor při DC proudu	$\Omega$
$Q_s$	energie slunečního ohřevu	J
$Q_c$	teplo odvedené konvekcí	J
$Q_r$	teplo odvedené radiací	J
$R_1$	sousledná složka odporu	$\Omega$
$X_1$	sousledná složka induktivní reaktance	$\Omega$
$R_0$	netočivá složka odporu	$\Omega$
$X_0$	netočivá složka induktivní impedance	$\Omega$
$B$	kapacitní susceptance	S
$x_d''$	poměrná rázová reaktance generátoru	%
$e_k$	napětí nakrátko	%
$i_{zat}$	procentní zatížení vedení a transformátorů	%
$P_1$	činný výkon na začátku vedení	W
$P_2$	činný výkon na konci vedení	W
$Q_1$	jalový výkon na začátku vedení	VAr
$Q_2$	jalový výkon na konci vedení	VAr
$\Delta P_{ved}$	ztráty na vedení	W
$S_{kn}''$	jmenovitá zkratová odolnost rozvodny	VA
$S_{k3f}$	nárazový zkratový výkon při 3f zkratu	VA
$S_{k1f}$	nárazový zkratový výkon při 1f zkratu	VA
$S_{k3fP}$	procentní zatížení rozvodny 3f zkratem	%
$S_{k1fP}$	procentní zatížení rozvodny 1f zkratem	%
$S_k$	zkratový výkon	VA; %
Zkratka		
DS	Distribuční síť	
ES	Elektrizační soustava	
PS	Přenosová síť	
PSP	Příčný spínač přípojníc	

# 1 ÚVOD

Elektrizační soustava je systém vzájemně propojených prvků, které umožňují výrobu, přenos a distribuci elektrické energie. Pro přenos elektrické energie jsou vyhrazeny napěťové úrovně 400kV a 220kV. Přenosovou soustavu provozuje společnost ČEPS, a. s. Pro distribuci elektrické energie jsou vyhrazeny napěťové hladiny 110kV a nižší. Distribuci elektrické energie na území České republiky provádí E.ON Distribuce, a. s., ČEZ Distribuce, a. s. a PREdistribuce, a. s.

Díky bouřlivému rozvoji obnovitelných zdrojů elektrické energie, které jsou nepredikovatelné, mnohdy dochází k nadměrnému zatěžování přenosových sítí. Česká republika má z toho pohledu nevýhodnou pozici a plní úlohu tranzitního státu, přes který tečou výkony většinou ze severu (Německo) na jih (Rakousko).

I při těchto stavech musí být elektrizační soustava stabilní a musí splňovat podmínky ustáleného chodu sítě. V případě poruchy musí být dimenzována tak, aby rozvodny, vodiče a všechny prvky zvládly poruchu bez trvalých následků a mohly být opět použity pro přenos elektrické energie.

## 2 CÍLE PRÁCE

Rozvodny Čebín a Sokolnice jsou spojeny přímo přenosovým vedením o napětí 400 kV s označením 423, nepřímo mohou být spojeny také distribuční soustavou 110 kV přes oblast Brna. V případě přetížení, poruchy a následného výpadku vedení 423 potom nahrazuje distribuční soustava částečně funkci soustavy přenosové.

Diplomová práce si klade za cíl navrhnout konfiguraci distribuční soustavy 110 kV v oblasti Brna, včetně paralelního propojení rozvodnů Čebín a Sokolnice přes soustavu 110 kV a stanovit opatření, při kterých bude mezi rozvodnami Čebín a Sokolnice přerušeno přímé propojení na hladině 110 kV, aby případné tranzitní výkony nepřetěžovaly síťové prvky 110 kV v oblasti Brna a nezpůsobily nežádoucí výpadky dodávek elektrické energie. Společnost E.ON do budoucna plánuje paralelní provoz oblasti Brno mezi rozvodnami Čebín a Sokolnice, kvůli zvýšení zajištěnosti dodávky elektrické energie.

Při navržených konfiguracích musí být splněny podmínky ustáleného chodu sítě, žádné prvky nesmí být přetěžovány. Napětí se musí nacházet v mezích stanovených normou. Bude také provedena kontrola na účinky zkratového proudu. Bude provedena analýza změn úhlu napětí, který hraje velkou roli při spínání příčných spínačů přípojnic.

Závěrem práce budou navržena opatření, která pomohou předcházet průchodu tranzitních výkonů. Také bude navržen princip rozpadové automatiky pro zamezení přetoků tranzitních výkonů.



## 3 ZKRATY

Zkratky jsou jednou z nejčastějších a nejtěžších poruch, při kterém místem poruchy i celým obvodem protékají proudy několikanásobně větší, než jsou proudy jmenovité. Z tohoto důvodu je nutné znát jejich charakteristiky. Především je nezbytná znalost dynamických a tepelných účinků, kterými zkratky působí na části rozveden. Tyto účinky mohou vést až ke zničení zařízení [1].

### 3.1 Parametry zkratového proudu

Jako parametry zkratového proudu označujeme možné mezní charakteristiky průběhů zkratových proudů. Parametry nám zjednodušují výpočet, nemusíme tedy znát přesný průběh zkratového proudu. Pro výpočty v praxi plně postačují níže uvedené parametry (mezní hodnoty). Seznam zmíněných parametrů je v tabulce Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Seznam parametrů zkratů

Název	Označení
Počáteční souměrný rázový zkratový proud	$I_k''$
Nárazový zkratový proud	$i_p$
Souměrný zkratový vypínací proud	$I_b$
Ustálený zkratový proud	$I_k$
Efektivní oteplovací zkratový proud	$I_{th}$
Stejnoseměrná složka	$i_{d.c}$
Doba trvání zkratu	$T_k$

V praxi jsou důležité zejména dvě hodnoty zkratů. Je to maximální a minimální hodnota zkratového proudu. Maximální hodnota je uvažována při nejhorším možném (ovšem provozně přípustném) zapojení daného obvodu, uvažují se nejméně příhodné koeficienty (např. napěťový koeficient  $c_{max}$  atd.) a největší možné příspěvky síťových napáječů a strojů pracujících do obvodu. Hodnota maximálního zkratového proudu se používá při výpočtu dynamických účinků [1][4].

Při výpočtu minimálních zkratů se naopak uvažuje zapojení obvodu, při kterém vzniká nejmenší zkratový proud. Uvažují se koeficienty zmenšující výsledný zkratový proud, např. napěťový koeficient  $c_{min}$ . Minimální zkratový proud nachází uplatnění při návrhu a nastavování ochran [1][4].

#### 3.1.1 Dimenzování na účinky zkratového proudu [11]

Proud protékající vodičem způsobuje kolem vodiče magnetické pole. Intenzitu magnetické pole  $H$  můžeme určit ze vztahu (3.1).

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (3.1)$$

kde  $I$  je proud vodičem,  
 $a$  vzdálenost od vodiče.

Následně můžeme určit velikost magnetické indukce  $B$  ve vzdálenosti  $a$  od vodiče dle vzorce (3.2).

$$B = \frac{2 \cdot I}{a} \cdot 10^{-7} \quad (3.2)$$

Protéká-li dvěma vodiči elektrický proud, pak na sebe vodiče působí silou velikosti

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \sin \alpha \quad (3.3)$$

kde  $l$  délka vodičů,  
 $\alpha$  úhel mezi vektorem síly a osou vodiče,  
 $B$  magnetická indukce,  
 $I$  proud protékající vodičem.

Dosadíme-li (3.2) do (3.3) získáme vztah:

$$F = \frac{2 \cdot I}{a} \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot I \quad (3.4)$$

Výše uvedené vztahy platí pro vodiče o nekonečné délce a nekonečně malého průřezu. V praxi musíme uvažovat vodiče reálných rozměrů a trojfázovou soustavu. Při uvažování trojfázového zkratu na vodiče působí síla  $F_m$ .

$$F_m = 2 \cdot k \cdot \frac{I_{km}^2}{a_m} \cdot l \cdot 10^{-7} \quad (3.5)$$

kde:  $l$  délka vodiče mezi podpěrami,  
 $k$  koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudů,  
 $a_m$  účinná vzdálenost vodičů, která respektuje geometrický tvar a velikost průřezu vodiče,  
 $I_{km}$  nárazový zkratový proud.

Blíže se výpočtem účinků zkratových proudů zabývá norma ČSN EN 60865, která podrobně popisuje působení sil na vodiče při průchodu zkratového proudu, určení namáhání podpěr vodičů atd.

Také je nutné ověřit odolnost vodičů na tepelné účinky zkratového proudu. Průřez vodiče musí být dostatečně velký tak, aby průchodem zkratového proudu nedošlo k oteplení vodiče nad povolenou mez. Protože je doba trvání zkratového proudu  $t_k$  velmi krátká, tak se neuvažují

odvody tepla do okolí. Při zkratu dojde ke zvýšení teploty z provozní hodnoty  $\mathcal{G}_z$  na teplotu  $\mathcal{G}_k$ . Při výpočtu norma stanovuje tyto premisy:

- 1) Vliv magnetického pole vlastního vodiče i vodičů blízkých se neuvažuje.
- 2) Odpor je lineárně závislý na teplotě.
- 3) Měrné teplo vodiče je konstantní.
- 4) Neuvažuje se odvod tepla do okolí.

Při výpočtu vycházíme ze základní úvahy, že teplo vyvinuté průchodem zkratového proudu je rovno teple akumulovanému ve vodiči. Minimální hodnotu průřezu vodiče získáme ze vztahu (3.6)

$$S_{\min} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t_k}}{\sqrt{\frac{c_0 \cdot (\mathcal{G}_f + 20)}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\mathcal{G}_f + \mathcal{G}_k}{\mathcal{G}_f + \mathcal{G}_z}}}. \quad (3.6)$$

kde  $I_{ke}$  ekvivalentní oteplovací zkratový proud

$t_k$  doba zkratu

$c_0$  specifické teplo

$\mathcal{G}_f$  fiktivní teplota

$\mathcal{G}_k$  nejvyšší dovolená teplota při zkratu

$\mathcal{G}_z$  provozní teplota

$\rho_{20}$  specifický odpor při 20°C

### 3.2 Zdroje zkratových proudů [4]

Za zdroje zkratových proudů v běžných sítích provozovaných na 50Hz jsou považovány:

- synchronní stroje (generátory)
- asynchronní stroje
- polovodičové systémy
- síťové napáječe

Hlavními přispěvateli do zkratových proudů jsou synchronní stroje a síťové napáječe. V menších sítích se projeví i vliv asynchronních strojů a polovodičových systémů.

### 3.3 Charakteristiky zkratu

Norma ČSN EN 60909 definuje zkrat takto:

*„Zkrat je náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule [2].“*

### 3.3.1 Dělení zkratů

Zkrat lze dělit dle několika kritérií. Zkrat lze dělit dle počtu spojených fází, dle místa zkratu, způsobu spojení atd.

#### 3.3.1.1 Dělení na souměrný a nesouměrný

Zkrat dělíme dle způsobu, jakým zatěžují třífázové zdroje a to na souměrné a nesouměrné:

- souměrné
  - trojfázový
  - trojfázový zemní
- nesouměrné
  - dvoufázový
  - dvoufázový zemní
  - jednofázový.

U venkovních vedení se nejčastěji (asi z 90%) vyskytují zkrat jednofázové. U kabelových vedení se nesouměrné zkrat mohou lehce stát poruchou třífázovou. Což je způsobeno tepelnými účinky procházejícího proudu, který degraduje izolaci tak dlouho, až dojde k roztavení a dokonalému spojení vodičů. Pravděpodobnosti jednotlivých zkratů v různých napěťových hladinách jsou v Tab. 3-2.

Tab. 3-2 Pravděpodobnost vzniku zkratu dle napěťových hladin [1]

Druh zkratu	relativní pravděpodobnost výskytu [%]		
	vn	110 kV	220kV
Trojfázový	5	0,4	0,9
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Jednofázový	65	91	93,1

#### 3.3.1.2 Dělení zkratu na elektricky vzdálený a blízký

**Elektricky blízký zkrat** je takový, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k počátečnímu rázovému proudu dvojnásobně přesáhne nominální proud stroje, nebo pokud jsou příspěvky strojů nezanedbatelné. U toho typu zkratu se vytváří aperiodická složka, která postupně zaniká. Rychlost zániku je závislá na časové konstantě, která je dána poměrem  $R/X$  [4].

Pokud jsou příspěvky asynchronních strojů do 5% a současně je zkrat dostatečně elektricky daleko, tak mluvíme o **zkratu elektricky vzdáleném**. Při tomto typu zkratu se efektivní hodnota zkratového proudu s časem téměř nemění. Je to způsobeno tím, že nevzniká stejnosměrná aperiodická složka, která by postupem času zanikala [4].

### 3.4 Výpočty zkratových proudů

Při výpočtech zkratových poměrů se dá postupovat několika metodami. Ovšem nepoužívanější metodou je metoda ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, která je popsána v normě ČSN EN 60909 [2]. Princip metody je následující.

Do místa poruchy je umístěn ekvivalentní napěťový zdroj (jeho napětí je odvozeno od jmenovitého napětí). Zbývající prvky jsou nahrazeny zkratovými impedancemi a generátory se zkratují. Norma také uvádí výpočty zkratových impedancí prvků sítě a zavádí různé koeficienty zohledňující vnitřní napětí zdrojů a polohy odboček regulovatelných transformátorů.

### 3.5 Zkratový výkon

Zkratový výkon je výkon odpovídající výkonu, který svým průchodem vytvoří počáteční rázový zkratový proud. Je možné ho vypočítat ze vztahu (3.7)

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot I_k'' \cdot U_n \quad (3.7)$$

Rozvodny jsou stavěny právě na určitý zkratový výkon. Především se kontrolují mechanické části rozvodny, provedení přípojníc, závěsů a uchycení silových zařízení. Na úrovni 110kV se používají rozvody se jmenovitou zkratovou odolností 2500MVA, 3500MVA, 5000MVA, 7500MVA pro všechny typy zkratů.

## 4 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ

Ustálený chod sítě je charakterizován neměnností vnitřních stavů, nedochází k žádným přechodným ani poruchovým jevům nebo připínání a odpínání velkých zátěží nebo zdrojů. Vnitřní parametry sítě je tedy možno považovat za konstantní [5][6]. Stav, kdy by byla síť absolutně beze změn, v reálném provozu nenastává, jelikož neustále dochází k připínání a odpínání zátěží nebo zdrojů.

Ustálený chod sítě se počítá proto, aby byly známy výkony činné i jalové, tekoucí po jednotlivých vedeních. Dále je možno z těchto výpočtů určit napětí v uzlech, proudy ve větvích a ztráty. Díky těmto znalostem je možné síť spolehlivě řídit nebo navrhovat rozvoj a také hospodárně rozdělovat výrobu. Znalosti získané při výpočtech ustáleného chodu se uplatňují i při výpočtech poruchových stavů sítě [6].

V praxi se výkony jak vyrobené, tak odebírané zadávají pomocí výkonů jalových a činných. Jelikož je výkon závislý na napětí a napětí je v uzlech neznámé, je nutné k řešení použít některou z iteračních metod. Jakou jsou například Gauss-Seidlova nebo Newtonova iterační metoda. V elektroenergetice se používají obě zmíněné metody. Pro výpočet ustáleného chodu se používají výpočetní programy, protože ruční výpočet je dlouhý, do výpočtu by se vnášela chyba a není vždy zaručena konvergence. Rychlost konvergence je určena konfigurací sítě a schopností zdrojů v bilančních uzlech hradit ztráty výkonu [6][7].

### 4.1 Klasifikace uzlů

Ustálený chod je přesně definovaný pomocí následujících čtyř uzlových veličin:

- absolutní hodnotou napětí  $U$
- úhlem napětí  $\delta$
- činným výkonem  $P$
- jalovým výkonem  $Q$

Uzly dělíme podle toho, které z výše uvedených veličin v daném uzlu známe a které jsme schopni za použití iteračních metod dopočítat [6].

#### 4.1.1 Bilanční uzel

Obvykle se bilanční uzel značí číslem 1. V tomto uzlu je známo napětí  $U$  a jeho úhel  $\delta$ . Dopočítáván je činný a jalový výkon. Úkolem tohoto uzlu je hradit (bilancovat) nerovnosti mezi výkony odebíranými a dodávanými. V tomto uzlu je obvykle instalován zdroj s takovým výkonem, který je schopen hradit rozdíly odběru a dodávky, ztráty svodem a ztráty na nevedení [6][7].

#### 4.1.2 Regulační uzel

V regulačních (kompenzačních) uzlech jsou pevně nastaveny hodnoty činného výkonu a absolutní hodnota napětí. Iteračními metodami se dopočítává dodávaný nebo odebíraný jalový výkon, aby se dosáhlo zadaného napětí [6][7].

### 4.1.3 Uzly třídy (P;Q)

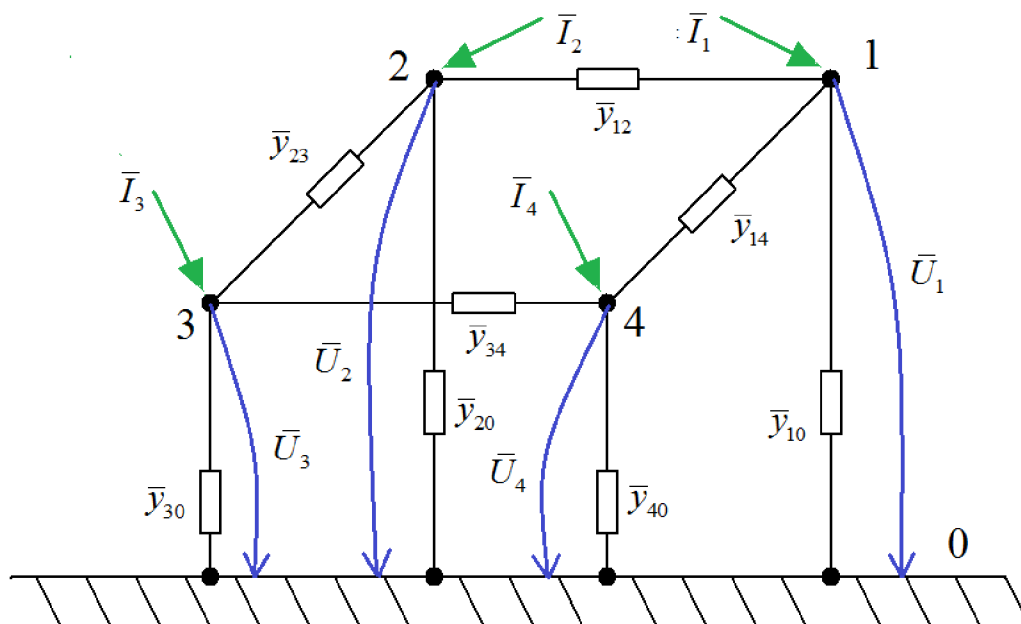
V uzlech třídy P;Q známe výkon dodávaný (uzel se zdroji) a také výkon odebíraný (odběrový uzel). Dopočítávanou neznámou je napětí a příslušný úhel [6][7].

Tab. 4-1 Znaménková konvence pro uzly třídy (P;Q) [6]

Posun proudu	Uzel	Zdroj P>0	Odběr P<0
induktivní $j>0$		Q>0	Q<0
kapacitní $j<0$		Q<0	Q>0

## 4.2 Ustálený chod sítě řešený jako lineární úloha [6]

Při výpočtu ustáleného chodu jako lineární úlohy předpokládáme, že jsou zadány dodávané a odebírané proudy, které tečou do uzlů sítě. Vedení a ostatní prvky sítě jsou zadány pomocí admitancí. Admitance jsou zapojeny mezi příslušnými uzly a mezi uzel a zem (referenční uzel). Jednotlivé prvky nahrazujeme vhodnými dvojbrany. Pokud známe zmíněné admitance a proudy, vytvoříme schéma sítě podobně jako na obrázku Obr. 4.1 [6][7].



Obr. 4.1 Schéma pro ustálený chod sítě upraveno z [6]

Schéma z Obr. 4.1 popíšeme pomocí metody uzlových napětí, výsledkem bude soustava rovnic:

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

V rovnici (4.1) vidíme zadané uzlové proudy, kde pomocí znamének plus a mínus rozlišíme dodávku a odběr.

Hodnoty prvků admitanční matice jsou určeny následovně. Diagonální prvek je tvořen součtem všech admitancí připojených do daného uzlu. Prvek  $\bar{Y}_{11}$  byl vytvořen:

$$\bar{Y}_{11} = \bar{y}_{12} + \bar{y}_{14} + \bar{y}_{10}. \quad (4.2)$$

Mimodiagonální prvky jsou záporně vzaté hodnoty admitance spojující uzly, které odpovídají místu v matici. Předpokládá se, že prvky nejsou induktivně propojeny. Prvek  $\bar{Y}_{23}$  se rovná:

$$\bar{Y}_{23} = \bar{Y}_{32} = -\bar{y}_{23}. \quad (4.3)$$

Matici (4.1) lze také zapsat následujícím způsobem:

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j, \quad (4.4)$$

kde  $n$  je počet uzlů v uvažované síti, kromě uzlu referenčního, který se značí číslem 0. Pokud bychom zanedbali příčné admitance (spojující uzly s referenčním uzlem) soustava rovnic (4.1) by se stala závislou a matice by se stala singulární (tzn. determinant je roven nule). Tato závislost lze odstranit eliminací bilančního uzlu [6][7].

### 4.3 Eliminace bilančního uzlu

Ve schématu vyobrazeném na Obr. 4.1 musí být zvolen jeden uzel, jenž bude schopen nahradit ztráty a svodové proudy přes příčné admitance a vyrovnávat rozdíly mezi dodávkou a odběrem. Tento zvolený uzel budeme dále nazývat uzlem bilančním, nebude v něm známý uzlový proud, ale bude v něm známo napětí. Po formální stránce je běžné označovat bilanční uzel číslem 1 [6][7].

Při uvažování výše uvedených předpokladů můžeme rovnici (4.1) přepsat do následujícího tvaru:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{21} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{31} \cdot \bar{U}_1 \\ \bar{Y}_{41} \cdot \bar{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Stejně tak můžeme upravit rovnici (4.4) na tvar odpovídající zmíněným předpokladům:

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1} \cdot \bar{U}_1 + \sum_{j=2}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (4.6)$$

Soustavu rovnic (4.6) řešíme pomocí eliminační metody, iterační metody nebo jiným matematickým postupem. Proud v bilančním uzlu dopočítáme ze znalosti napětí v jednotlivých uzlech [6][7].

### 4.4 Řešení ustáleného chodu jako nelineární úlohy

Běžně nejsou v uzlech zadány proudy, ale činné a jalové výkony. Pro  $i$ -tý uzel může napsat rovnici



$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \cdot \bar{I}_i^* \quad (4.7)$$

Z rovnice (4.7) si vyjádříme proud

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} \quad (4.8)$$

Rovnici (4.8) můžeme dosadit do vztahu (4.6) a dostáváme výsledný vztah

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad i = 2, 3 \dots n. \quad (4.9)$$

Znaménka u dodávaných a odebíraných činných a jalových výkonů budeme dodržovat dle znaménkové konvence zmíněné v Tab. 4-1. Musíme pamatovat, že se pohybuje v jednofázovém ekvivalentu sítě trojfázové, proto napětí je fázové  $\left(\frac{U_n}{\sqrt{3}}\right)$  a výkon je výkon přenášený jednou fází vedení  $\left(\frac{P}{3}\right)$  [6].

## 4.5 Gauss-Seidlova iterační metoda

Gauss-Seidlova iterační metoda je jednoduchá. Iterační kroky jsou krátké, ale konvergence je pomalá. Další nevýhodou je nutnost volit malé  $\varepsilon$ , kde  $\varepsilon$  je označení přesnosti výpočtu. Je to rozdíl mezi výsledkem v  $i$ -tém kroku a výsledkem v kroku  $i+1$ . Pokud tento rozdíl klesne pod požadovanou hodnotu  $\varepsilon$ , metodu můžeme ukončit. Obecný matematický zápis je

$$\left| x^i - x^{i+1} \right| \leq \varepsilon \quad (4.10)$$

Pokud je  $\varepsilon$  voleno moc velké, vzniká chyba v napětí a tím pádem i v proudech a výkonech, proto se častěji v praxi používá Newtonova iterační metoda [6].

## 4.6 Newtonova iterační metoda [6][7]

Mějme soustavu nelineárních rovnic

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \quad (4.11)$$

Nejdříve musíme provést odhad kořenů v nultém kroku iterace. Odhadnuté kořeny jsou  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ . Odhadnuté kořeny se od skutečných kořenů rovnice liší o rozdíl  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ . Pokud sečteme odhad kořene a rozdíl od skutečné hodnoty můžeme rovnice (4.11) psát ve tvaru

$$\begin{aligned}
f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_1 \\
f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_2 \\
\vdots & \\
f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) &= y_n.
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Pomocí Taylorovy řady můžeme první rovnici z (4.12) rozepsat jako

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \Phi_1 = y_1, \tag{4.13}$$

kde  $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$  je hodnota parciální derivace v bodě  $x_1^{(0)}$  a  $\Phi_1$  nahrazuje členy s vyššími mocninami

a vyšší derivace funkce  $f_1$ . Pokud jsou odhady kořenů dostatečně přesné, tak  $\Phi_1$  se blíží k nule a můžeme je zanedbat.

Bude-li výraz  $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$  nahrazen  $y_1^{(0)}$ , potom lze rovnici (4.13) upravit na tvar

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \Phi_1 = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)} \tag{4.14}$$

Obdobným způsobem lze rozepsat i zbývající rovnice (4.12). Z nově vzniklé soustavy rovnic můžeme určit difference  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ . Nově vzniklá soustava rovnic v maticovém tvaru je

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta y_1^{(0)} \\ \Delta y_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta y_n^{(0)} \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

Zkráceně lze matici (4.15) zapsat

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y] \tag{4.16}$$

Matice  $[J]$  se nazývá Jacobiho matice. Z matice (4.16) můžeme určit difference  $\Delta x$  a tím i nové odhady pro další krok iterace, které budou nabývat hodnot

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i \tag{4.17}$$

Za použití iteračního procesu postupně zpřesňujeme kořeny rovnic, dokud se nedosáhne minimální požadované diference  $\varepsilon$ . Rovnice (4.16) a (4.17) zapsané v iteračním tvaru vypadají následovně

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}], \quad (4.18)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)}. \quad (4.19)$$

Musí být splněn předpoklad, že metoda konverguje, že má jednoznačné řešení a že existují spojitě derivace  $\frac{\partial f_i}{\partial x_i}$ . Tyto předpoklady jsou v praxi většinou splněny.

Použijeme-li uvedený iterační postup na rovnici (4.9) a přepíšeme na tvar odpovídající (4.11) dostáváme

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{U}_j \quad i = 2, 3 \dots n \quad (4.20)$$

Pravou stranu rovnice (4.20) rozdělíme na reálnou a imaginární část. Tedy na část odpovídající činnému výkonu a na část odpovídající jalovému výkonu. Pomocí polárního tvaru můžeme psát  $\bar{U}_i = U_i \angle \delta_i \Rightarrow \bar{U}_i^* = U_i \angle -\delta_i$  a  $\bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij}$ . Polární tvary dosadíme do rovnice (4.20) a dostáváme výsledek

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

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_{ij} \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad i = 2, 3 \dots n \quad (4.21)$$

Neustále platí předpoklady, že známe činné a jalové výkony v uzlech a že známe napětí v bilančním uzlu i s úhlem. Potom můžeme sestavit soustavu rovnic odpovídající (4.22).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \frac{\partial P_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2} & \frac{\partial P_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \frac{\partial P_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Soustava (4.22) se dá zkráceně zapsat za pomoci submatic

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial P}{\partial U} \right] & \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[ \frac{\partial Q}{\partial U} \right] & \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix}. \quad (4.23)$$

Nyní vypočteme prvky Jacobiho matice (4.22) pro jednotlivé submatice.

- Výpočet prvků pro submatici  $\left[ \frac{\partial P}{\partial U} \right]$

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.24)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.25)$$

- Výpočet prvků pro submatici  $\left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]$

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.26)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.27)$$

- Výpočet prvků pro submatici  $\left[ \frac{\partial Q}{\partial U} \right]$

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2 \cdot U_i \cdot Y_{ii} \cdot \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.28)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.29)$$

- Výpočet prvků pro submatici  $\left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right]$

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.30)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (4.31)$$

Newtonova iterační metoda se vyznačuje rychlou konvergencí, která nezáleží na rozlehlosti sítě. V minulosti se přistupovalo k řadě zjednodušení, aby se urychlil výpočet. Při výpočetních výkonech dnešních počítačů tato zjednodušení nejsou nutná. Zjednodušení jsou uvedena a popsána v [6].

## 5 PŘETĚŽOVÁNÍ PRVKŮ SÍTĚ

V této kapitole se zaměříme na dovozené přetěžování. Žádné zařízení není zatěžováno konstantním výkonem. Někdy je dokonce zatěžováno nad svůj jmenovitý výkon (proud). Toto se děje velmi často u distribučních transformátorů a to dokonce cyklicky. Z ekonomického hlediska by nebylo výhodné transformátor dimenzovat na špičkové hodnoty zatížení. Byl by předimenzován a jmenovité hodnoty oteplení by dosahoval jen na krátký časový interval nebo vůbec. Proto je možné některé prvky krátkodobě přetížít. Do jaké míry lze prvek přetížít a na jak dlouhý interval závisí na typu zařízení a především na jeho oteplovací konstantě [8].

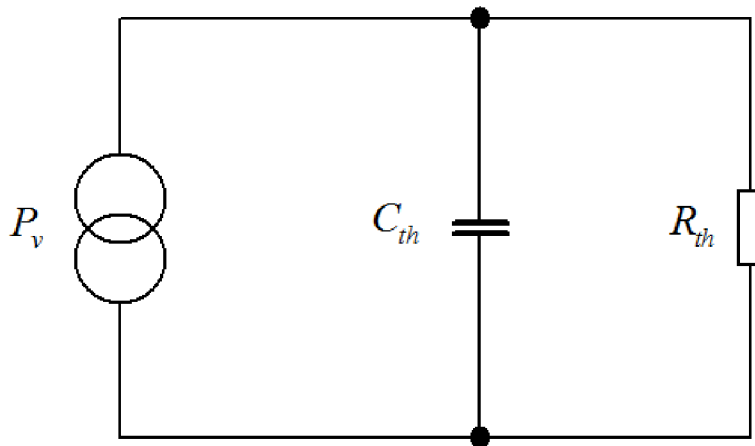
### 5.1 Přetěžování transformátorů

Na otevřeném trhu s elektřinou je nezbytností, aby transformátory mohly být přetěžovány. Toto přetížení však nesmí trvale poškodit transformátor, ani způsobit přerušení dodávky elektrické energie. Transformátory musí zvládnout neustálé změny zatížení, přetoky výkonů způsobené nepredikovatelnými zdroji elektrické energie atd.

Ochrany přetížení detekují, ale není vždy nutné, aby bylo takto zasažené zařízení vypnuto. Procházející nadproud způsobuje ohřívání transformátoru a teplo se akumuluje v celém transformátoru. Je nutné znát možnosti přetěžování transformátorů, aby nebyly zbytečně degradovány části transformátoru. Níže jsou popsány dva způsoby, jak se přetížení (oteplení) transformátorů počítá.

#### 5.1.1 Výpočet pomocí elektrického modelu

Teplotní závislost transformátoru může být modelována pomocí jednofázového schématu, které je na obrázku Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Ekvivalentní schéma transformátoru [9]

Ztráty  $P_v$  jsou ve schématu reprezentovány proudovým zdrojem. Za běžného provozu jsou veškeré ztráty odvedeny do okolního prostředí. V našem schématu jsou tyto ztráty odvedené do okolí reprezentovány tepelným odporem  $R_{th}$ . Tepelná kapacita transformátoru je reprezentována kapacitou  $C_{th}$ . Teplotní spád na paralelním zapojení kapacity  $C_{th}$  a odporu  $R_{th}$  odpovídá  $\Theta$ , což je ohřátí transformátorového oleje. Časový průběh oteplení transformátorového oleje se děje podle vzorce (5.1). Potenciál nulového vodiče v náhradním schématu reprezentuje teplotu okolí transformátoru [9].

$$\Theta(t) = P_v \cdot R_{th} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right); \tau = R_{th} \cdot C_{th} \quad (5.1)$$

Transformátor je tvořen z materiálů s různou hmotností a s rozdílnou měrnou tepelnou kapacitou, proto musí být tepelná kapacita transformátoru sestavena z hmotností a tepelných kapacit jednotlivých dílů. Těmto předpokladům odpovídá vzorec (5.2)

$$C_{th} \approx m_{cu} \cdot c_{cu} + m_{Fe} \cdot c_{Fe} + m_{ol} \cdot c_{ol}, \quad (5.2)$$

kde:

$m_{cu}$  je hmotnost vinutí mědi,

$c_{cu}$  je měrná tepelná kapacita mědi,

$m_{Fe}$  je hmotnost železa (jádra),

$c_{Fe}$  je měrná tepelná kapacita železa,

$m_{ol}$  je hmotnost transformátorového oleje,

$c_{ol}$  je měrná tepelná kapacita.

Chladicí výkon chladícího zařízení je definovaný výrobcem. Odpor  $R_{th}$ , který reprezentuje odpor přestupu tepla, se dá vypočítat ze znalosti:

venkovní teploty:  $\mathcal{G}_{ven}$

teploty oleje:  $\mathcal{G}_{ol}$

ochlazovací (přestupné) plochy nádoby transformátoru:  $O_{tr}$

součinitele přestupu tepla nádoby transformátoru  $\alpha_{tr}$

výkonu chladicí soustavy  $P_{chlad}$ .

Výsledný odpor určíme ze vztahu (5.3).

$$R_{th} = \left[ \frac{P_{chlad}}{\mathcal{G}_{ol} - \mathcal{G}_{ven}} + O_{tr} \cdot \alpha_{tr} \right]^{-1} \quad (5.3)$$

Celkové ztráty v transformátoru můžeme rozdělit na ztráty závislé na zatížení a na ztráty nezávislé na zatížení. Ztráty nezávislé na zatížení jsou ztráty naprázdno  $P_o$ . Jsou definovány jako ztráty v magnetickém obvodu transformátoru a ty se se zatížením téměř nemění. Ztráty závislé jsou ztráty nakrátko  $P_k$ , ty jsou závislé na procházejícím proudu a tato závislost je kvadratická, viz vzorec (5.4).

$$P_v = P_k \left( \frac{I}{I_n} \right)^2 + P_o \quad (5.4)$$

S těmito znalostmi můžeme vypočítat proud, kterým můžeme konstantně přetěžovat transformátor. Tento proud nesmí v pasivně chlazeném transformátoru (OD) způsobit větší ohřátí než  $\mathcal{G}_h = 120^\circ\text{C}$ . Místo, které by nemělo mít teplotu větší než  $\mathcal{G}_h$ , se nazývá „hot-spot [12]“. Je to místo, kde má vinutí transformátoru nejvyšší teplotu. Teplota  $\mathcal{G}_h$  se skládá z teploty okolního vzduchu, z maximálního přírůstku teploty oleje a gradientu teploty vinutí  $\Theta_{vin}$ . Teplotu vzduchu získáme měřením, teplotu oleje z (5.1) a hodnotu gradientu vinutí stanovíme z přenášeného proudu a koeficientů  $h$  a  $y$ .

$$\mathcal{G}_h(t) = \mathcal{G}_{ven} + \left( P_k \cdot \left[ \frac{I}{I_n} \right]^2 + P_o \right) \cdot R_{th} + h \cdot \left[ \frac{I}{I_n} \right]^y \cdot \Theta_{vin} \quad (5.5)$$

Hodnoty koeficientů  $h$  a  $y$  získáme od výrobce nebo z teplotního testu transformátoru. Koeficient  $h$  pro distribuční transformátory nabývá hodnot od 1,1 do 1,3 a koeficient  $y$  má hodnoty od 1,6 do 2.

Ze vzorce (5.5) můžeme určit proud (vzorec (5.6)), kterým může být transformátor bezpečně zatěžován při daných podmínkách.

$$I = I_n \cdot \sqrt{\frac{\mathcal{G}_h - \mathcal{G}_{ven} - P_o \cdot R_{th}}{P_k \cdot R_{th} + h \cdot \Theta_{vin}}} \quad (5.6)$$

Tento způsob výpočtů se používá především u on-line výpočetních programů, které mají za úkol hlídat transformátory před přetížením v reálném čase [9].

### 5.1.2 Určení možností přetěžování transformátorů z grafů

O tomto způsobu určení přetěžování rozsáhle informuje norma IEC 60354 [10], která uvádí grafy pro čtyři typy transformátorů, dělené dle způsobu chlazení:

- ONAN distribuční transformátory
- ON střední a velké přenosové transformátory
- OF střední a velké přenosové transformátory
- OD střední a velké přenosové transformátory.

Transformátor ONAN (Oil natural air natural) je chlazený přirozenou cirkulací oleje a vzduchu. Typy ON, OF a OD jsou chlazeny olejem, liší se pouze způsobem jeho cirkulace. V typu ON proudí olej v transformátoru přirozeně, v OF je nucená cirkulace a v OD je nucená cirkulace řízená [10].

Jsou uvedeny grafy pro různé venkovní teploty. Pokud teplota okolí neodpovídá teplotě na grafu, v úvahu přichází vždy graf s nejbližší vyšší teplotou.



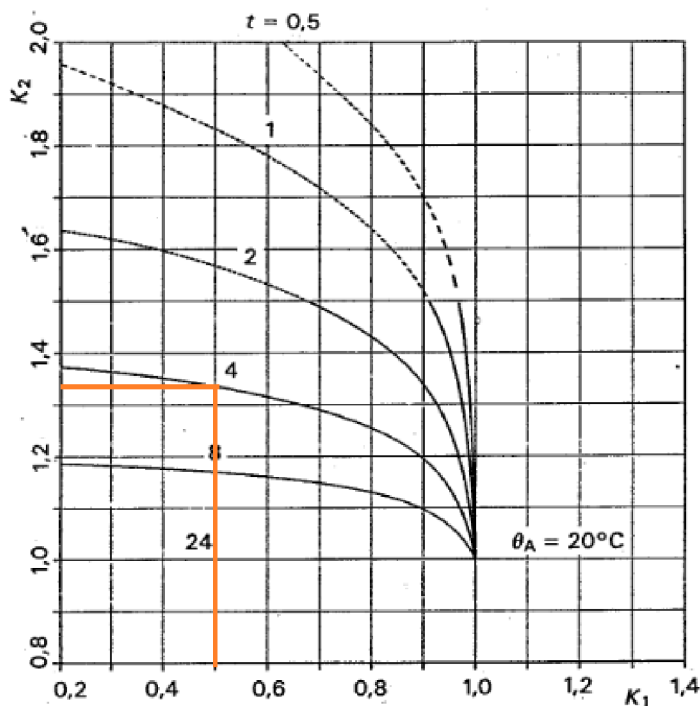
Křivky grafu mohou být použity k určení přípustného přetížení  $K_2$  po požadovanou dobu  $t$  ze známého současného zatížení  $K_1$ .

Příklad: Určeme možnosti přetěžování ONAN distribučního transformátoru o  $S_n = 2MVA$ , který je zatížen  $S_s = 1MVA$ . Jakým výkonem ho můžeme zatěžovat podobu  $t = 4h$  při venkovní teplotě  $\vartheta_A = 20^\circ C$ ?

$$\text{Výpočet: } K_1 = \frac{S_s}{S_n} = \frac{1}{2} = 0,5$$

Nyní známe hodnotu  $K_1$ , která je na ose  $x$ , určíme průsečík této hodnoty s křivkou, která odpovídá  $t = 4h$  a odečteme odpovídající hodnotu na ose  $y$ , kde jsou hodnoty  $K_2$ . Z grafu na Obr. 5.2 odečteme hodnotu  $K_2 = 1,35$  a vypočteme výkon  $S$ , kterým je možno transformátor přetěžovat.

$$S = K_2 \cdot S_n = 1,35 \cdot 2 = 2,7MVA$$



Obr. 5.2 Graf možnosti přetěžování transformátoru ONAN upraveno z [10]

V normě IEC 60354 jsou pro každý ze čtyř typů transformátorů uvedeny grafy pro teploty okolí  $\vartheta_A = -25^\circ C, -20^\circ C, -10^\circ C, 0^\circ C, 10^\circ C, 20^\circ C, 30^\circ C, 40^\circ C$ . Z těchto grafů a ze známého zatížení můžeme velmi rychle získat výkon, kterým můžeme transformátor zatížit po požadované době, nebo ze známých výkonů určit, jak dlouho lze transformátor bezpečně provozovat. Jedná se o metodu velmi rychlou, ale již méně přesnou [10].

## 5.2 Přetěžování vedení

K přetěžování vedení a ke vzniku úzkých míst dochází především při údržbových a neúplných stavech sítě, nebo také vlivem přetoků energie mezi státy. V těchto případech jsou primárně ohrožena vedení zvláště vysokého a velmi vysokého napětí.

### 5.2.1 Ampacita

*„Ampacita vodiče je definována jako dovolené zatížení dané maximálním proudem, který může přenášet vodič, aniž by došlo k narušení jeho funkce.[15]“*

Při sledování možnosti zatěžování vedení se v elektroenergetické praxi od 80. letech 20. st. začíná používat pojem ampacita. Ampacita je složenina dvou anglických slov ampere-capacity. Prvně byl tento jev sledován z ekonomických důvodů, aby se stavěla nejlevnější přenosová vedení s maximálním využitím přenosové kapacity [14][15].

V dnešní době se sledování ampacity vedení stává aktuálním tématem především kvůli rozvoji obnovitelných zdrojů. Je problematické a zdoluhavé postavit nové přenosové linky na napěťových úrovních zvn a vnn, a proto je potřeba maximálně zatížit stávající vedení. Ovšem zatížení nesmí působit bezprostřední nebo progresivní poškození vedení.

Hledají se nejrůznější způsoby, jak ampacitu vedení určit. Existují online a offline metody, matematické modely a jiné způsoby viz kapitola 5.2.4 [14][15].

### 5.2.2 Limity při provozu vedení

Při nadměrném oteplování vodičů dochází ke změně krystalické struktury vodičů a tím i ke změně mechanických vlastností. Zvýšená teplota degraduje izolaci a zvyšují se přechodné odpory na spojích vodičů. Proto byly stanoveny teplotní limity pro provoz vodičů [11].

Za běžných podmínek je teplota vodiče 80°C, při krátkodobých přetíženiích může teplota stoupnout až na 150°C a při zkratech až na 200°C. Možnosti přetížení jsou uvedeny a popsány v normě ČSN EN 50341-3-19.

Ze vztahu (5.7) vidíme, že ztráty  $\Delta P_{VED}$  rostou s kvadrátem proudu, proto je zatěžování vedení nad povolenou mez velmi nebezpečné.

$$\Delta P_{VED} = 3 \cdot R_{VED} \cdot (I_C^2 + I_J^2) \quad (5.7)$$

Tento ztrátový výkon se mění na teplo, které otepluje vodič. Oteplování vodiče způsobuje nárůst odporu vedení dle vzorce (5.8) a tím další zvýšení ztrát [5].

$$R_g = R_{20^\circ C} \cdot [1 + \alpha(t - 20^\circ C)] \quad (5.8)$$

Provozní teplota a celkové zatížení vodiče záleží na materiálu ze, kterého je vodič vyroben, dále na typu provozu, uložení, charakteristice napájené zátěže a prostředí [11].

Zvýšením teploty vedení dochází ke zvětšení průhybu lan. Zvětšení průhybu vedení může způsobit zmenšení vzdálenosti mezi vodiči, vodiči a zemí nebo vodiči a stožáry. Zmenšení vzdálenosti zvětšuje možnost vodivého spojení s ostatními vodiči, zemí nebo nosnou konstrukcí [5].

### 5.2.3 Vliv počasí na vedení

Pokud známe vlivy povětrnostních podmínek na vedení jako je teplota, intenzita slunečního záření a rychlost a směr větru, jsme schopni dopočítat aktuální zatížení vedení. Proud, kterým lze vedení zatížit je možno vypočítat ze vzorce (5.9) [12]

$$I_Z = \frac{\{9,92 \cdot \Theta \cdot (VD)^{0,485} + \pi \cdot \varepsilon \cdot SD [(\Theta + t_a + 273)^4 - (t_a + 273)^4] - \alpha_s \cdot I_s \cdot D\}^{0,5}}{(k_t \cdot R_{dt})^{0,5}} \quad (5.9)$$

kde:

$\Theta$  rozdíl mezi teplotou vodiče a okolí,

$t_a$  teplota okolí,

$V$  rychlost větru,

$I_s$  intenzita slunečního záření,

$D$  průměr vodiče,

$\varepsilon$  koeficient vyzařování povrchu vedení,

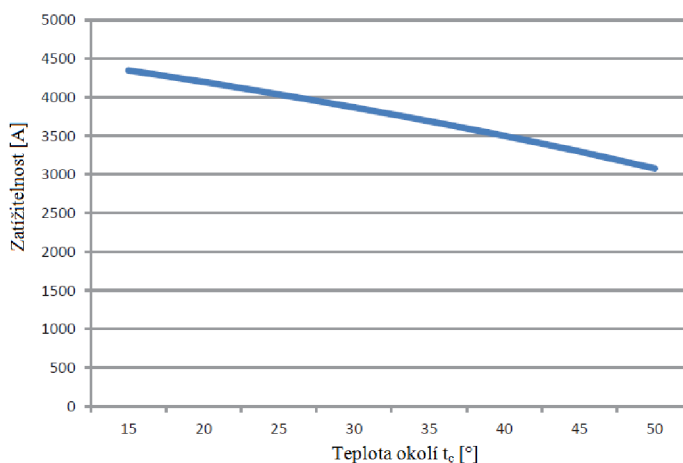
$\alpha_s$  endotermický koeficient,

$S$  Stefan-Boltzmannova konstanta,

$k_t$  poměr AC a DC odporu při teplotě  $t^\circ C$ ,

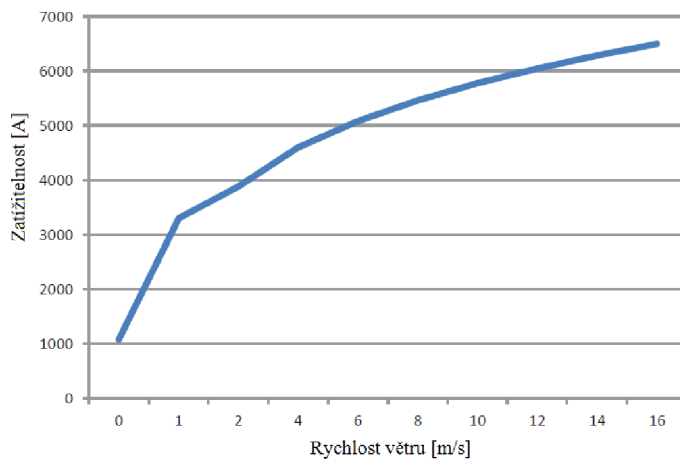
$R_{dt}$  DC odpor při  $t^\circ C$ .

Jak je vidět, vzorec (5.9) zohledňuje velké množství okolních vlivů. Zatížitelnost vedení se mění s podmínkami okolí, jak je patrné z grafů na Obr. 5.3, Obr. 5.4 a Obr. 5.5.



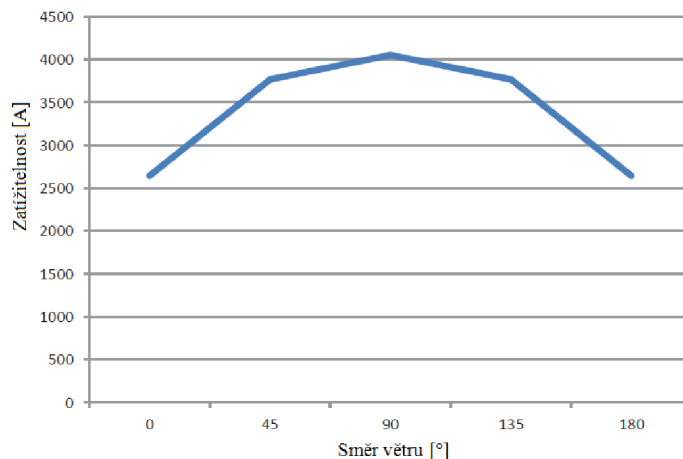
Obr. 5.3 Graf zatížitelnosti vedení na teplotě okolí (upraveno z [13])

V grafu Obr. 5.3 se uvažuje rychlost větru 1m/s s úhlem  $20^\circ$ .



Obr. 5.4 Graf zatížitelnosti vedení na rychlosti větru (upraveno z [13])

V grafu Obr. 5.4 se uvažuje teplota okolí 45°C a úhel větru 20°.



Obr. 5.5 Graf zatížitelnosti vedení na směru větru (upraveno z [13])

V grafu Obr. 5.5 se uvažuje teplota okolí 45°C a rychlost větru 1m/s.

Z grafu Obr. 5.3, Obr. 5.4 a Obr. 5.5 jde vidět, že zatížitelnost vedení kolísá vlivem okolních podmínek a toto poznání by se dalo využít při řízení přenosu elektrické energie. Ovšem byla by nutná znalost podmínek v okolí vedení. To by znamenalo nainstalování měřících přístrojů po celé délce vedení a nainstalování softwaru, který by byl schopen data v reálném čase posuzovat. Tento postup se zatím používá jen pro potřeby výzkumu.

## 5.2.4 Monitorování

Offline metody vycházejí ze znalosti procházejícího proudu  $I$  a z meteorologických podmínek, především ze znalosti teploty. Při této metodě se využívá rovnosti mezi teplem ve vodiči vzniklým a z vodiče odvedeným viz vztah (5.10).

$$q_s + R \cdot I^2 = q_c + q_r \quad (5.10)$$

kde  $q_s$  energie slunečního ohřevu,

$q_c$  teplo odvedené konvekcí,

$q_r$  teplo odvedení radiací,

$R \cdot I^2$  teplo vzniklé průchodem proudu.

Metody založené na tomto principu jsou velmi ovlivněny zvolenými konstantami, které vstupují do výpočtu. Např. energie slunečního ohřevu je určena pomocí geografické polohy, takže ne vždy odpovídá reálné situaci [15].

Jsou zde online metody, které měří meteorologické parametry přímo na vedení, nebo je získávají z meteorologických serverů. Data jsou následně zpracována pomocí matematických modelů.

Nejmodernější jsou metody, které vyhodnocují možnosti zatěžování vedení v reálném čase, čidla jsou přímo umístěna na vedení. Tím je zajištěna maximální přesnost měření a jeho aktuálnost.

Sledování ampacity v reálném čase se zabývají v Belgii, kde vznikl přístroj Ampacimon (ampacity monitoring). Při provozu na vedení působí vnější vlivy, které ovlivňují teplotu vodiče a tím i jeho průhyb a vzdálenost od země. Ampacimon je připevněn přímo na vodič a nepotřebuje žádná data o zatížení, informace o vodiči ani o povětrnostních podmínkách. Ampacimon měří vlastní frekvenci vedení. Při větším průhybu je vlastní frekvence menší a naopak. Již změna průhybu o 1mm je detekována jako změna frekvence o 0,15Hz. Ampacimon je napájen z elektromagnetického pole vytvořeného kolem vodiče. Pro správnou funkci přístroje musí být zadána jen vlastní frekvence vodiče a gravitační zrychlení [16].



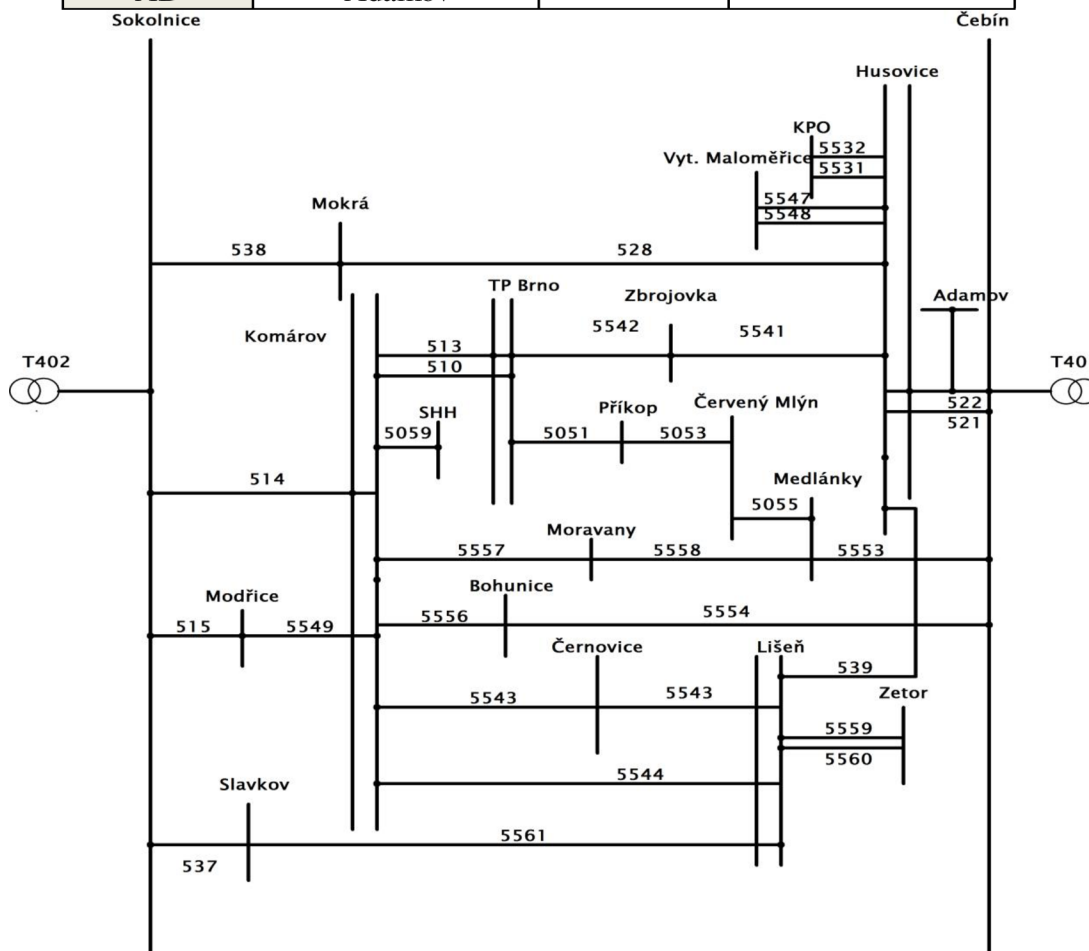
Obr. 5.6 Přístroj ampacimon [14]

## 6 SOUČASNÝ STAV SITUACE

Úkolem diplomové práce je analyzovat paralelní provoz rozveden Čebín a Sokolnice. Obě rozvodny jsou 400 kV na 110 kV. Budeme uvažovat, že v každé pracuje jeden transformátor 400/110 kV o jmenovitém výkonu  $S_n = 350\text{MVA}$ . Analýza se bude týkat rozveden uvedených v tabulce Tab. 6-1. Celkové schéma analyzované sítě je na obrázku Obr. 6.1.

Tab. 6-1 Seznam rozveden

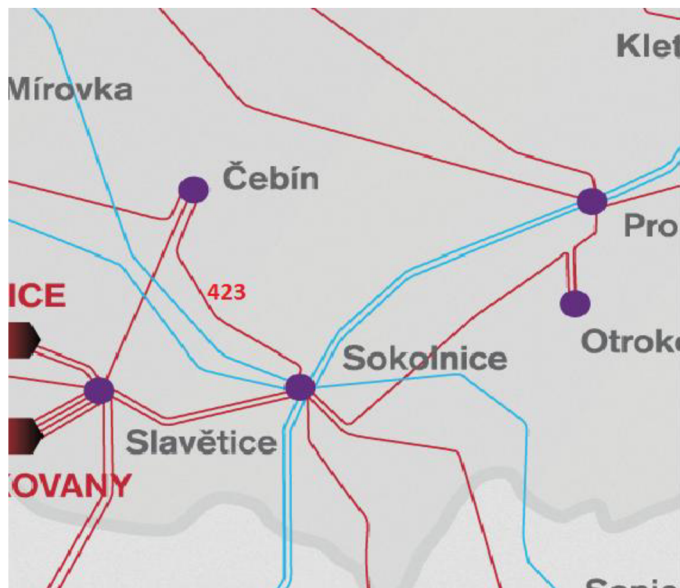
Označení rozvodny	Celý název rozvodny	Označení rozvodny	Celý název rozvodny
CNT	Čebín	SLB	Slavkov
HUV	Husovice	ZET	Zetor
MEY	Medlánky	KV	Komárov
VMA	Výtopna Maloměřice	BOB	Bohunice
ZBB	Zbrojovka	MOB	Moravany
CML	Červený Mlýn	MED	Modřice
BNP	Příkop	BNC	Spalovna SAKO
BNT	Teplárna Brno	SHH	Slévárna H. Heršpice
LI	Líšeň	SO	Sokolnice
MQ	Mokrá	KPO	Královo Pole
AD	Adamov		



Obr. 6.1 Schéma analyzované sítě (upraveno E.ON)

## 6.1 Základní problém

Rozvodny Čebín a Sokolnice jsou spojeny přenosovým vedením 400 kV označeným jako 423, které je vidět na obrázku Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Spojení rozveden Čebín – Sokolnice na úrovni 400 kV

Při paralelním propojení rozveden Čebín a Sokolnice přes síť 110 kV může zejména při výpadku zmíněného vedení 423 vzniknout přetok výkonu z transformátoru v rozvodně Čebín do sítě 110 kV v Brně a zpět do přenosové soustavy v rozvodně Sokolnice. Výkon může též i v opačném směru. Lze konstatovat, že distribuční síť 110 kV v tomto případě částečně nahrazuje funkci přenosové soustavy.

Vzniklý přetok výkonu pak nadměrně zatěžuje napájecí transformátory 400/110 kV a vedení 110 kV propojující rozvodny Sokolnice a Čebín. Nejvíce exponovanými vedeními jsou vedení V514, V515, V537 a V538 v Sokolnicích a V521, V522, V5553 a V5554 v Čebíně.

## 6.2 Možnosti přetěžování

Transformátory 400/110 kV T402 a T401, které jsou umístěny v rozvodnách Sokolnice a Čebín, jsou majetkem společnosti ČEPS, a. s., proto podléhají jejich podmínkám provozu, které jsou uvedeny v Tab. 6-2. Pro přetěžování uvedené v tabulce Tab. 6-2 platí podmínky: max. teplota okolního vzduchu je +40 °C, max. průměrná teplota během 24 h je +35 °C, min. teplota -35 °C a maximální nadmořská výška je 1000 m.

Tab. 6-2 Možnosti zatížitelnosti transformátorů T401 a T402

Přetěžování v %		100%	120%	130%	150%	175%	200%
T401 CNT	[min]	trvale	trvale	60	40	20	10
T402 SO	[min]	trvale	trvale	90	70	20	10

## 7 CHARAKTERISTIKY ANALYZOVANÉ OBLASTI

V této kapitole budou popsány parametry analyzované oblasti. Parametry byly poskytnuty společností E.ON.

### 7.1 Popis rozvoden

V kapitole 7.1 jsou popsány rozvodny, které jsou pro zkoumanou oblast významné a zásadně ovlivňují provoz oblasti. Jedná se o rozvodny, které oblast napájí, nebo o rozvodny s více přípojnici.

#### Sokolnice SO

Jedná se o rozvodnu, která má tři přípojnice označené písmeny A, B a C. Přípojnice jsou dále podélně děleny. Analyzovaná oblast je napájena z přípojnice C, do které pracuje transformátor T402. Na přípojnici C jsou napojena vedení V538, V514, V515 a V537. Dále je na přípojnici C napojeno vedení V518, které vede do rozvodny Bučovice, a vedení V512, které spojuje rozvodnu Sokolnice s rozvodnou Oslavany.

#### Čebín CNT

Podobně jako Sokolnice je také rozvodna Čebín vybavena třemi přípojnici, které jsou podélně děleny s označením A, B a C. Do analyzované oblasti je připojena přípojnice C. Přípojnice C je napájena transformátorem T401. Dále jsou na přípojnici připojeny čtyři vedení V522, V521, V5553 a V5554.

#### Komárov KV

Rozvodna je uvnitř analyzované oblasti. Má dvojpřípojnicový systém. Přípojnice jsou označeny A a B. Rozvodna nemá podélné dělení. Do rozvodny jsou napojena vedení V514, V5549, V513, V510, V5059, V5557, V5556, V5543 a V5544.

#### Husovice HUV

Rozvodna Husovice je pomocí vedení V522 a V521 přímo propojena s rozvodnou Čebín. Rozvodna Husovice má systém dvou přípojníc, které je možno podélně dělit. Přípojnice jsou označeny A a B. Do rozvodny jsou kromě vedení V522 a V521 zapojena následující vedení: V5532, V5531, V5547, V5548, V5541, V528 a V539.

#### Teplárna Brno BNT

Teplárna Brno má opět dvě přípojnice podélně děleny s označením A a B. Do přípojnice B navíc pracují zdroje TG26, TG27 a TG28. Do této rozvodny jsou zapojena vedení V513, V510, V5542 a V5051.

#### Líšeň LI

Do rozvodny Líšeň jsou připojena vedení V5543, V539, V5544, V5561, V5559 a V5560. Jedná se o rozvodnu se systémem dvou přípojníc a možností podélného dělení. Přípojnice opět nesou označení A a B.



## 7.2 Charakteristiky vedení

U vedení jsou v Tab. 7-1 uvedeny sousledné a zpětné impedance. Sousledná složka je označena indexem 1 a netočivá složka impedance označena indexem 0. Při výpočtech budeme uvažovat, že sousledná složka se rovná složce zpětné. Dále je v tabulce uvedena také maximální hodnota proudu, jakou může být vedení zatíženo, v tabulce Tab. 7-1 označeno jako jm. proud.

Tab. 7-1 Parametry vedení

Označení vedení	$R_1$ [ $\Omega$ ]	$X_1$ [ $\Omega$ ]	B [ $\mu S$ ]	$R_0$ [ $\Omega$ ]	$X_0$ [ $\Omega$ ]	jm. proud [A]
V5051	0,129	0,244	157,926	0,255	0,233	1000
V5053	0,096	0,271	163,167	0,253	0,184	800
V5055	0,304	0,477	254,340	0,576	0,379	800
V5059	0,067	0,360	139,199	0,341	0,178	1000
V5553	1,071	6,346	61,811	3,181	17,093	820
V510	0,624	1,604	11,520	1,128	4,248	455
V513	0,624	1,604	11,520	1,128	4,248	455
V514	0,579	3,338	26,522	2,189	9,505	820
V515	0,542	3,128	23,279	1,502	7,857	820
V521	2,312	7,526	52,147	4,549	19,860	530
V522	2,280	7,140	51,541	4,725	20,124	530
V528	1,043	2,681	19,253	1,885	7,099	455
V537	2,220	5,707	40,988	5,294	19,455	455
V538	4,138	10,637	76,392	9,867	36,260	455
V539	0,873	2,243	16,111	1,578	5,941	455
V5531	0,384	0,987	7,091	0,694	2,615	455
V5532	0,384	0,987	7,091	0,694	2,615	455
V5541	1,075	1,739	12,510	1,188	4,681	530
V5542	0,308	0,994	7,352	0,740	2,714	530
V5543	0,357	1,600	14,910	0,840	4,620	680
V5544	0,586	2,629	24,491	1,380	7,589	530
V5545	0,298	1,334	12,425	0,700	3,850	680
V5547	0,299	0,974	6,745	0,588	2,569	530
V5548	0,299	0,974	6,745	0,588	2,569	530
V5549	0,504	2,909	21,646	1,396	7,306	720
V5553	1,071	6,346	61,811	3,181	17,093	820
V5554	1,067	6,321	61,564	3,168	17,024	680
V5556	0,642	2,878	26,813	1,511	8,308	680
V5557	0,275	1,234	11,502	0,648	3,564	680
V5558	1,416	6,347	59,143	3,332	18,326	680
V5559	0,163	0,531	3,677	0,321	1,400	530
V5560	0,163	0,531	3,677	0,321	1,400	530
V5561	3,020	8,080	59,560	6,855	26,260	455

### 7.3 Zdroje a transformátory v analyzované oblasti

Při analýze budou uvažovány zdroje pracující přes blokové transformátory do rozveden BNT (Teplárna Brno), BNC (Černovice, Spalovna komunálního odpadu) a CML (Červený mlýn). Zdroje a jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 7-2.

Tab. 7-2 Parametry zdrojů pracujících do analyzované oblasti

Označení	Umístění	$S_n$	$X_d''$	$U_n$
		[MVA]	[%]	[kV]
TG10	CML	87,5	18	10,5
TG20	CML	30	15	6,3
TG27	BNT	34	17,2	6,3
TG28	BNT	34	17,2	6,3
TG1	BNC	28,4	15,5	6,3

Generátory připojené do rozveden BNC (Černovice) a BNT (Teplárna Brno) nejsou napojeny přímo blokovými transformátory do sítě 110 kV, ale nejprve je provedena transformace ze jmenovitého napětí na svorkách generátoru na napětí 23 kV. Krátkým vedením je výkon dopraven do rozvodny 110 kV, kde je transformace z 22 kV na 110 kV. Transformace je provedena transformátory T101 v BNC a transformátory T102 a T103 v rozvodně BNT, jejich parametry jsou uvedeny v Tab. 7-4. V tabulce jsou také parametry dvou hlavních napájecích transformátorů (400/110 kV) v rozvodnách Sokolnice T402 a T401 v Čebíně.

Tab. 7-3 Blokové transformátory ve výrobnách

Označení	Umístění	$S_n$	$e_k$	P
		[MVA]	[%]	[-]
T23	BNC	26	8	6,3/23
TB27	BNT	40	7,93	6,3/22
TB28	BNT	31,5	7,95	6,3/22
TB10	CML	100	11	10,5/121
TB20	CML	40	11	6,3/121

Tab. 7-4 Parametry transformátorů v rozvodnách SO, CNT, BNC a BNT

Označení	Umístění	$S_n$	$e_k$	P
		[MVA]	[%]	[-]
T402	SO	350	13,5	400/121
T401	CNT	350	13,5	400/121
T101	BNC	40	11	110/23
T102	BNT	40	11	110/23
T103	BNT	40	11	110/23

Příspěvky nadřazených sítí k jednofázovému a trojfázovému zkratu jsou v Tab. 7-5.

Tab. 7-5 Tabulka síťových napájeců ke zkratům

Rozvodna	3-fázový	1-fázový
	$S_K$	$S_K$
	[MVA]	[MVA]
SO	25045	21253
CNT	15949	12546

## 7.4 Popis programu RIS

Analýza je provedena v dispečerském řídicím systému RIS, který se používá k dispečerskému řízení distribuční soustavy společnosti E.ON v reálném čase. Řídicí systém je také možno využít v offline režimu k analyzování sítě s daty změřenými v zadaném časovém řezu. Program pracuje na principu integrálního delta kritéria.

K výpočtům program používá Newtonovu iterační metodu, která byla podrobně popsána v kap. 4.6. V základním nastavení je nastaveno 30 iteračních cyklů. Pokud se pomocí Newtonovy iterační metody nedosáhne výsledku a metoda by z nějakého důvodu nekonvergovala, bude výpočet proveden pomocí Gauss-Seidlovy iterační metody, která byla popsána v kap. 4.5.

Při výpočtu se vychází z naměřených hodnot, které jsou zatíženy jistou chybou měření, ale také chybou, která je dána tím, že měřicí přístroje nejsou časově synchronizovány. Naměřené hodnoty nejsou tedy pořízeny ve stejném čase, což způsobuje další odchylky, a proto je nutné naměřené hodnoty před výpočtem estimovat. Estimované hodnoty jsou pak použity pro výpočet.

## 8 ANALÝZA USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ

Analýza je provedena pro den 20. ledna 2016 a čas 9:00 hod., kdy bylo zaznamenáno špičkové zatížení soustavy. U vedení a napájecích transformátorů 400/110 kV bude kontrolováno jejich zatížení. U rozvoden se bude kontrolovat velikost napětí, zda je v povolených mezích  $\pm 10\%$  ze jmenovitého napětí, což u 110 kV odpovídá 99 kV a 121 kV.

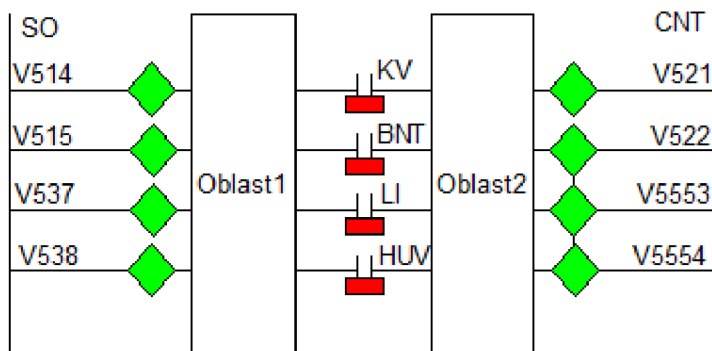
Bylo rozhodnuto, že k přerušování přímého spojení rozvoden Čebín a Sokolnice bude docházet především na vedeních vstupujících do zmíněných rozvoden. Přerušování toků tranzitních výkonů by bylo samozřejmě možné i odpojením transformátorů T401 a T402, ale tyto transformátory mohou být využity k napájení i jiné oblasti než je Brno.

### 8.1 Oddělené napájení částí Brna – stávající základní zapojení DS 110 kV – konfigurace 1

Konfigurace sítě odpovídá obrázku v příloze **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, kdy rozvodny Medlánky, Červený Mlýn Příkop, Teplárna Brno – přípojnice A, Bohunice, Moravany, Kr. Pole, Husovice – přípojnice B, Komárov – přípojnice B, Adamov, Líšeň – přípojnice A a Slévárna Horní Heršpice jsou napájeny z rozvodny Čebín. Z rozvodny Sokolnice jsou napájeny rozvodny Modřice, Spalovna Brno, Slavonice, Zetor, Mokrá, Zbrojovka Brno, Komárov – přípojnice A, Teplárna Brno – přípojnice B, Husovice – přípojnice A, Líšeň – přípojnice B.

Brno je rozděleno na dvě nezávislé oblasti, protože v žádné rozvodně s dvojitým systémem přípojníc nejsou sepnuty příčné spínače přípojníc (PSP). V tabulce Tab. 8-2 jsou uvedeny napěťové poměry v jednotlivých rozvodnách. Pokud je v rozvodně více přípojníc, je uvažováno napětí, které se více blíží mezní hodnotě. Žlutě jsou vyznačeny rozvody, v nichž se napětí blíží k hranici 121 kV, což je maximální hodnota povolená na napěťové hladině 110 kV.

Konfigurace 1 je schematicky znázorněna na Obr. 8.1. Zeleně jsou vyznačeny zapnuté vypínače u vedení a červeně jsou vyznačeny vypnuté příčné spínače přípojníc.



Obr. 8.1 Schematické znázornění konfigurace 1

V tabulce Tab. 8-1 jsou uvedeny rozdíly napětí a úhlu napětí mezi přípojnícemi v rozvodnách HUV, LI, BNT a KV

Rozdíly v napětí a jeho úhlu by měly být co nejmenší, protože při spínání přípojníc s velkými rozdíly napětí a úhlu napětí vznikají vysoké toky vyrovnávacích výkonů - výkonové rázy. Rozdíl jednoho stupně způsobuje v analyzované oblasti 110 kV výkonový ráz přibližně 5 MW. Blíže se úhlům napětí v oblasti Brna věnuje kapitola 11.

Tab. 8-1 Rozdíly napětí a jeho úhlu při konfiguraci 1 v rozvodnách (HUV, KV, LI a BNT) mezi přípojnícemi

Název rozvodny	A		B		Rozdíl	
	U	$\delta$	U	$\delta$	$\Delta U$	$\Delta\delta$
	[kV]	[°]	[kV]	[°]	[kV]	[°]
Husovice	117,56	-21,72	118,83	-18,37	1,27	3,35
Komárov	117,67	-21,64	118,95	-18,50	1,28	3,14
Líšeň	118,88	-18,44	117,42	-21,93	1,46	3,50
Teplárna	119,23	-18,28	117,52	-21,83	1,71	3,55

Tab. 8-2 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 1

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
CNT	119,21	-17,65	SLB	117,59	-21,52
HUV	117,56	-21,72	ZET	117,40	-21,95
MEY	118,92	-18,64	KV	118,95	-18,50
VMA	117,56	-21,71	BOB	118,90	-18,64
ZBB	117,53	-21,79	MOB	118,88	-18,60
CML	119,35	-18,18	MED	118,06	-21,22
BNP	119,28	-18,25	BNC	117,51	-21,82
BNT	117,52	-21,83	SHH	118,94	-18,51
LI	117,42	-21,93	SO	118,31	-20,74
MQ	117,69	-21,51	KPO	118,82	-18,38
AD	118,94	-18,11			

V tabulce Tab. 8-3 jsou vidět zatížení vedení a výkon přenášený jednotlivými vedeními. Indexem 1 je označen výkon na začátku vedení, indexem 2 je označen výkon na konci vedení. Pokud má výkon znaménko mínus, znamená to, že z uzlu vytéká, pokud má plus, vtéká. Jestliže je vedení složeno z různých typů lan, je v tabulkách uvedeno zatížení pro výkonově nejslabší část celého vedení, které je omezující. Např. vedení V5561 spojující rozvodny Slavkov a Líšeň je složeno ze čtyř částí označených V1, V2, V3 a V4. Část V1 má jmenovitý proud 680 A, V2 má jmenovitý proud 550 A a části V3 a V4 mají 450 A.

Z tabulky Tab. 8-2 je patrné, že v žádné rozvodně není překročena horní hranice 121 kV ani dolní hranice 99 kV, i když v rozvodnách Čebín, Červený Mlýn a Příkop se napětí pohybuje kolem 119 kV, což je hodnota blízká hranici. V tabulce Tab. 8-3 můžeme vidět, že žádné vedení při konfiguraci 1 není přetíženo a tabulka Tab. 8-4 ukazuje, že není přetíženo ani žádný z dvojice transformátorů 400/110 kV. Z výše uvedeného výčtu lze konfiguraci 1 označit za provozuschopnou.

Tab. 8-3 Tabulka zatížení a přenášených výkonů na vedení při konfiguraci 1

Označení	Propojené rozvodny	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
V514	SO-KV	40,47	-67,19	-11,15	67,00	10,41
V515	MED-SO	26,21	38,01	2,79	-38,07	-2,79
V5553	CNT-MEY	41,19	-38,26	1,14	38,14	-0,92
V513	KV-BNT	39,01	35,90	6,97	-35,96	-6,95
V5549	MED-KV	23,56	-34,17	-1,88	34,07	1,93
V537	SO-SLB	33,28	-30,60	-1,80	30,45	1,99
V5053	CML-BNP	32,16	-65,83	-7,47	65,80	9,28
V510	KV-BNT	31,50	-29,21	-0,06	29,17	0,12
V522	CNT-HUV	26,30	-24,40	1,27	24,34	-1,03
V521	CNT-HUV	25,18	-23,36	1,36	23,27	-0,91
V5545	LI-BNC	23,72	21,43	3,43	-21,44	-3,31
V5554	CNT-BOB	23,16	-21,48	1,44	21,40	-0,28
V5543	KV-BNC	20,97	-28,56	-5,18	28,54	5,29
V538	SO-MOQ	19,10	-17,61	0,35	17,52	0,43
V5051	BNP-BNT	17,73	-35,97	-5,05	35,96	6,95
V5557	MOB-KV	15,36	21,43	1,83	-21,43	-1,71
V5556	BOB-KV	12,54	11,59	-0,41	-11,60	0,76
V5560	LI-ZET	11,19	-9,99	-2,22	9,99	2,26
V5541	HUV-ZBB	10,58	-9,66	0,81	9,66	-0,65
V5542	ZBB-BNT	10,07	-9,12	1,41	9,11	-1,31
V528	HUV-MQ	9,36	8,51	-0,52	-8,52	1,06
V5561	SLB-LI	12,82	11,55	-1,48	-11,57	2,03
V539	HUV-LI	7,25	-4,90	4,59	4,90	-4,36
V5544	KV-LI	7,07	4,90	-4,02	-4,90	4,36
V5059	SHH-KV	4,23	7,76	3,96	-7,76	-2,00
V5055	CML-MEY	3,89	0,00	3,62	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,42	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5532	HUV-KPO	2,42	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5547	VMA-HUV	1,33	-1,16	0,38	1,16	-0,29
V5558	MEY-MOB	1,28	1,07	-0,60	-1,07	1,43
V5548	HUV-VMA	0,16	0,03	-0,05	-0,03	0,14

V tabulce Tab. 8-4 je uvedeno zatížení transformátorů T401 v Čebíně a T402 v Sokolnicích.

Tab. 8-4 Zatížení transformátorů T401 a T402

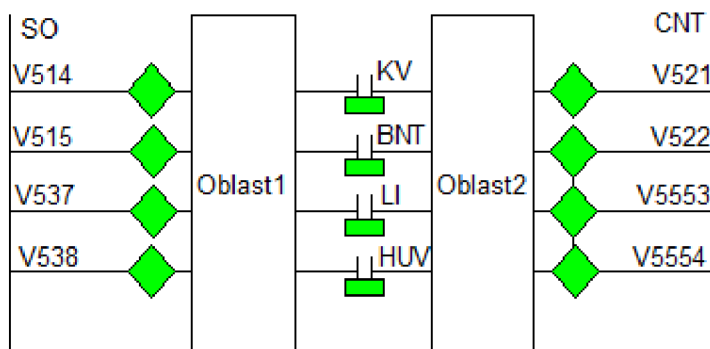
Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
T402	SO	67,47	-235,91	-35,97	235,50	17,62
T401	CNT	31,85	-110,48	11,77	110,33	-15,92



## 8.2 Oblast Brna napájena paralelně z Čebína a Sokolnic (zapnuté PSP v KV, BNT, LI a HUV) – konfigurace 2

Při konfiguraci 2 jsou spojeny příčné spínače přípojnic (PSP) v rozvodnách Husovice, Komárov, Líšeň a Teplárna Brno. V provozu jsou transformátory v Čebíně T401 a v Sokolnicích T402. Žádný prvek není vypnut.

Schematicky je naznačena konfigurace 2 na Obr. 8.2. Všechny vypínače vedení i příčné spínače přípojnic jsou sepnuty, a proto jsou vybarveny zeleně.



Obr. 8.2 Schematické znázornění konfigurace 2

Tab. 8-5 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 2

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
<b>CNT</b>	<b>119,03</b>	<b>-18,72</b>	SLB	118,23	-20,22
HUV	118,45	-19,91	ZET	118,27	-20,18
MEY	118,58	-19,93	KV	118,34	-20,14
VMA	118,46	-19,89	BOB	118,42	-20,10
ZBB	118,45	-20,00	MOB	118,33	-20,17
CML	118,57	-19,97	MED	118,48	-19,99
BNP	118,50	-20,04	BNC	118,31	-20,15
BNT	118,44	-20,07	SHH	118,34	-20,15
LI	118,29	-20,16	SO	118,35	-20,24
MQ	118,39	-20,02	KPO	118,31	-20,15
AD	118,65	-19,44			

Při této konfiguraci napětí neklesá pod 118 kV, viz tabulka Tab. 8-5, také je v tabulce vyznačeno napětí v rozvodně CNT, které se blíží horní hranici 121 kV.

Tab. 8-6 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 2

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]
T402	SO	55,96	-195,27	-32,13	194,95	18,93
T401	CNT	44,48	-155,16	7,16	154,96	-14,88

Z tabulky Tab. 8-6 je patrné, že se výkon rozdělil mezi oba transformátory téměř rovnoměrně. Vyšší zatížení transformátoru T402 v Sokolnicích je způsobeno tím, že nenapájí pouze oblast Brna, ale také rozvodny Bučovice a Oslavany.

Tab. 8-7 Zatížení a přenášený výkon na vedení při konfiguraci 2

Označení	Propojené rozvodny	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
V514	SO-KV	7,30	7,03	-1,11	-7,03	1,47
V515	MED-SO	22,11	-20,33	-1,52	20,32	1,75
V5553	CNT-MEY	51,14	-47,43	-0,64	47,26	0,50
V513	KV-BNT	13,33	12,12	2,77	-12,13	-2,63
V5549	MED-KV	14,02	-12,94	-0,26	12,92	0,53
V537	SO-SLB	2,62	-0,08	-1,84	0,08	2,42
V5053	CML-BNP	32,66	-66,43	-7,43	66,39	9,22
V510	KV-BNT	13,33	12,12	2,77	-12,13	-2,63
V522	CNT-HUV	42,52	-39,37	2,42	39,23	-2,47
V521	CNT-HUV	41,30	-38,24	2,48	38,00	-2,52
V5545	LI-BNC	2,82	2,32	1,17	-2,33	-1,00
V5554	CNT-BOB	32,91	-30,50	-0,26	30,36	1,03
V5543	KV-BNC	2,05	-1,94	-1,90	1,93	2,11
V538	SO-MOQ	5,29	4,54	-0,76	-4,55	1,77
V5051	BNP-BNT	18,88	-38,11	-5,12	38,10	7,00
V5557	MOB-KV	3,47	4,82	0,42	-4,82	-0,26
V5556	BOB-KV	4,85	-3,89	-1,85	3,89	2,22
V5560	LI-ZET	9,95	-8,93	-2,03	8,93	2,08
V5541	HUV-ZBB	14,24	-12,46	4,20	12,45	-4,05
V5542	ZBB-BNT	17,35	-15,55	3,86	15,54	-3,78
V528	HUV-MQ	5,23	-4,73	0,94	4,73	-0,37
V5561	SLB-LI	2,16	-1,89	0,01	1,89	0,61
V539	HUV-LI	28,26	-26,00	2,25	25,95	-2,13
V5544	KV-LI	3,29	-2,35	-1,59	2,35	1,92
V5059	SHH-KV	2,14	2,59	3,53	-2,59	-1,58
V5055	CML-MEY	3,87	0,00	3,58	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	1,66	-1,44	-0,41	1,44	0,51
V5532	HUV-KPO	1,66	-1,44	-0,41	1,44	0,51
V5547	VMA-HUV	2,85	-2,63	0,07	2,63	0,02
V5558	MEY-MOB	7,15	-9,56	-2,06	9,55	2,85
V5548	HUV-VMA	1,63	1,50	0,01	-1,50	0,08

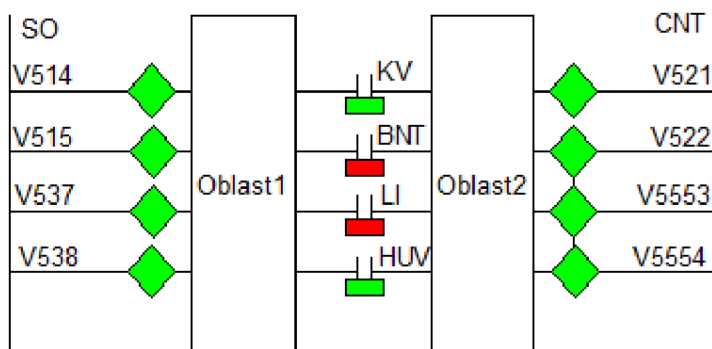
Z tabulek Tab. 8-6 a Tab. 8-7 je zřejmé, že žádný prvek sítě není přetížený. Maximální zatížení transformátoru je 55,96% (T402) a maximální zatížení vedení je 51,14%. Konfigurace 2 je z hlediska ustáleného chodu sítě vhodná pro provoz.

### 8.3 Oblast Brna napájena paralelně z Čebína a Sokolnic (vypnuté PSP v BNT a LI, zapnuté PSP v KV a HUV) – konfigurace 3

Při konfiguraci 3 je analyzovaná oblast Brna napájena paralelně z rozvodů Čebína a Sokolnice. Zapnuty jsou příčné spínače přípojnic v rozvodnách Husovice a Komárov, naopak vypnuty jsou příčné spínače přípojnic v rozvodnách Teplárna Brno a Líšeň. Toto zapojení je výhodné z hlediska omezení zkratových proudů (viz kapitola 10).



Schematicky je naznačena konfigurace 3 na Obr. 8.3. Všechny vypínače vedení jsou zapnuty, a proto jsou zeleně vybarvené. Příčné spínače přípojníc v HUV a KV jsou zapnuty a mají zelenou barvu, zbývající příčné spínače přípojníc jsou vypnuté, proto jsou červené.



Obr. 8.3 Schematické znázornění konfigurace 3

V tabulce Tab. 8-8 jsou uvedeny napěťové poměry při konfiguraci 3. Všechny rozvodny při této konfiguraci splňují limity (99 kV a 121 kV). Nejvyšší hodnoty dosahuje napětí v rozvodně CNT a to 119,37 kV. Opět se napětí ve všech rozvodnách pohybuje nad hodnotou 118 kV.

Tab. 8-8 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 3

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
CNT	119,17	-19,31	SLB	118,14	-21,03
HUV	118,72	-20,08	ZET	118,05	-21,29
MEY	118,65	-20,63	KV	118,35	-20,92
VMA	118,42	-20,62	BOB	118,43	-20,88
ZBB	118,32	-20,84	MOB	118,34	-20,95
CML	118,57	-20,80	MED	118,59	-20,69
BNP	118,56	-20,79	BNC	118,18	-21,13
BNT	118,27	-20,97	SHH	118,34	-20,93
LI	118,07	-21,27	SO	118,76	-20,39
MQ	118,41	-20,67	KPO	118,41	-20,63
AD	118,68	-20,11			

Z tabulky Tab. 8-9 je zřejmé, že výkon se rozdělil mezi oba transformátory pracující do sítě téměř rovnoměrně. Transformátory jsou zatíženy na 54,39 %, respektive 49,26 %. Větší zatížení transformátoru T402 v SO je znovu způsobeno napájením vedení V518 do Bučovic a V512 do Oslavan.

Tab. 8-9 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 3

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]
T402	SO	54,39	-189,55	-34,52	189,26	20,62
T401	CNT	49,26	-172,55	-5,49	172,33	-5,16

V tabulce Tab. 8-10 jsou vypsána zatížení vedení při konfiguraci 3. Nejvíce zatíženým vedením je V5553, které spojuje rozvodny Čebín a Medlánky. Všechna vedení se pohybují v povolených mezích zatížení. Při konfiguraci 3 není přetíženo žádné vedení ani transformátor

a všechna napětí v rozvodnách jsou v mezích, proto je konfigurace 3 vhodná pro provoz z hlediska ustáleného chodu sítě.

Tab. 8-10 Tabulka zatížení vedení při konfiguraci 3

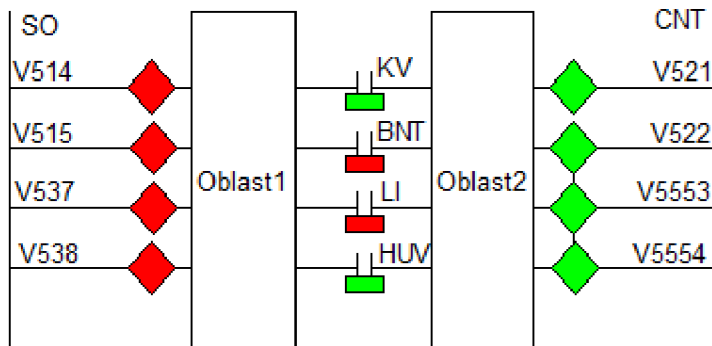
Označení	Propojené rozvodny	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
V514	SO-KV	24,09	-40,20	-7,75	40,13	7,72
V515	MED-SO	16,06	23,59	2,64	-23,61	-2,44
V5553	CNT-MEY	55,61	-51,61	-1,37	51,41	1,05
V513	KV-BNT	21,51	19,13	6,06	-19,14	-5,94
V5549	MED-KV	13,61	-19,73	-1,68	19,70	1,90
V537	SO-SLB	27,73	-25,55	-1,96	25,44	2,26
V5053	CML-BNP	2,65	0,00	-3,58	0,00	5,45
V510	KV-BNT	9,47	-8,53	-2,13	8,52	2,29
V522	CNT-HUV	47,25	-43,88	0,90	43,70	-1,06
V521	CNT-HUV	45,92	-42,64	1,06	42,34	-1,29
V5545	LI-BNC	28,75	26,24	3,42	-26,25	-3,32
V5554	CNT-BOB	37,34	-34,62	-0,93	34,44	1,50
V5543	KV-BNC	24,26	-33,37	-5,25	33,35	5,33
V538	SO-MOQ	7,79	-6,99	-0,74	6,98	1,73
V5051	BNP-BNT	9,76	-19,15	-4,05	19,14	5,94
V5557	MOB-KV	3,97	5,53	-0,09	-5,53	0,25
V5556	BOB-KV	4,97	-3,75	-2,26	3,75	2,64
V5560	LI-ZET	11,02	-9,80	-2,57	9,80	2,62
V5541	HUV-ZBB	32,90	-30,25	2,60	30,22	-2,54
V5542	ZBB-BNT	32,45	-29,72	3,50	29,71	-3,46
V528	HUV-MQ	2,21	-1,90	0,73	1,90	-0,15
V5561	SLB-LI	4,90	-6,57	1,82	6,57	-1,73
V539	HUV-LI	15,15	-13,73	2,62	13,72	-2,41
V5544	KV-LI	15,10	13,71	-2,11	-13,72	2,41
V5059	SHH-KV	3,38	5,73	3,90	-5,73	-1,95
V5055	CML-MEY	3,87	0,00	3,58	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,25	-1,99	-0,47	1,99	0,57
V5532	HUV-KPO	2,25	-1,99	-0,47	1,99	0,57
V5547	VMA-HUV	1,40	-1,18	0,54	1,18	-0,44
V5558	MEY-MOB	9,44	-12,75	-2,55	12,73	3,30
V5548	HUV-VMA	0,46	0,38	-0,09	-0,38	0,19

#### 8.4 Oblast Brna napájena z Čebína T401 (vypnuté PSP v BNT a LI, zapnuté PSP v KV a HUV, vypnuté V514, V515, V537 a V538) – konfigurace 4

Konfigurace 4 vychází z konfigurace 3, kdy je celá oblast napájena z oblasti Čebín. Vypnuta jsou vedení vstupující do rozvodny Sokolnice, tj. V514, V515, V537 a V538.

V tabulce Tab. 8-11 jsou vyobrazena výsledná napětí v rozvodnách při konfiguraci 4. Všechny rozvodny splňují normou dané limity. Nejvyšší napětí je v rozvodně CNT 117,73 kV. Oproti konfiguraci 3 došlo k celkovému poklesu napětí ve všech analyzovaných rozvodnách. V žádné rozvodně se napětí kriticky nepřibližuje k horní mezi 121 kV.

Schematicky je naznačena konfigurace 4 na Obr. 8.4. Vypínače u vedení V514, V515, V537 a V538 jsou vypnuté, proto mají červenou barvu. Naopak vypínače u V521, V522, V5553 a V5554 jsou zapnuté, proto jsou zelené. Příčné spínače přípojníc mají stejné zapojení jako u konfigurace 3.



Obr. 8.4 Schematické znázornění konfigurace 4

Tab. 8-11 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 4

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
CNT	117,73	-21,51	SLB	114,54	-25,71
HUV	116,20	-23,66	ZET	115,23	-25,11
MEY	116,68	-23,43	KV	115,74	-24,41
VMA	116,20	-23,66	BOB	115,45	-24,80
ZBB	115,96	-24,07	MOB	115,83	-24,33
CML	115,97	-24,28	MED	115,69	-24,45
BNP	115,96	-24,27	BNC	115,45	-24,80
BNT	115,93	-24,29	SHH	115,73	-24,41
LI	115,26	-25,09	SO	115,75	-24,41
MQ	116,01	-23,88	KPO	116,19	-23,67
AD	116,77	-22,78			

Tab. 8-12 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 4

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
T402	SO	26,63	-93,06	-12,30	92,89	7,58
T401	CNT	77,47	-271,02	-43,14	270,61	16,81

Zatížení transformátorů při konfiguraci 4 je uvedeno v tabulce Tab. 8-12. Ani jeden z transformátorů 400/110 kV není přetížen. Transformátor T402 v rozvodně Sokolnice je zatížen na 26,63 %, i když nepracuje do analyzované oblasti. Je to způsobeno tím, že na stejné přípojnici, na kterou jsou za běžného provozu napojena vedení V514, V515, V537 a V538, jsou připojena vedení V518 a V512, která napájí rozvodny Bučovice a Oslavany.

V tabulce Tab. 8-13 jsou vypsána zatížení jednotlivých vedení. Mezi nejvíce zatížená vedení patří vedení vycházející z rozvodny Čebín. Jmenovitě se jedná o vedení V5553, které je zatíženo na 81,2 %, vedení V521, které je zatíženo na 75,76 %, vedení V522, které je zatíženo na 77,47 %

a vedení V5554, které je zatíženo na 62,4 %. Při konfiguraci 4 není žádné vedení zatíženo na více jak 82 %, maximální zatížení transformátorů je 77,47 %. Z výše uvedeného je zřejmé, že žádný prvek není přetížen a konfigurace splňuje podmínky pro trvalý provoz.

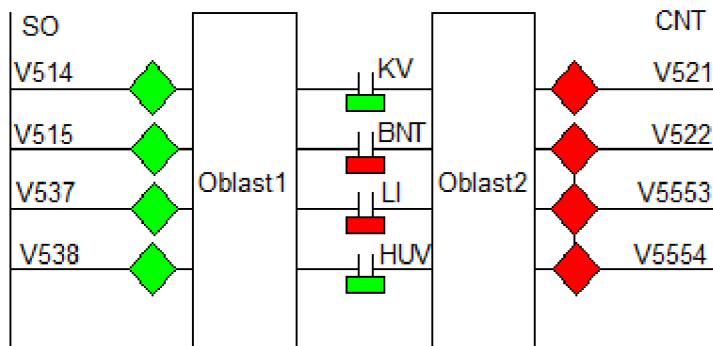
Tab. 8-13 Tabulka zatížení vedení při konfiguraci 4

Označení	Propojené rozvodny	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVA <sub>r</sub> ]	[MW]	[MVA <sub>r</sub> ]
V514	SO-KV	0,37	0,00	0,00	0,00	0,36
V515	MED-SO	0,35	0,00	0,31	0,00	0,00
V5553	CNT-MEY	81,20	-74,02	-7,85	73,59	6,15
V513	KV-BNT	21,90	19,13	5,77	-19,15	-5,67
V5549	MED-KV	4,34	3,86	0,65	-3,86	-0,36
V537	SO-SLB	0,60	0,00	0,00	0,00	0,54
V5053	CML-BNP	2,60	0,00	-3,42	0,00	5,22
V510	KV-BNT	17,37	15,83	-0,39	-15,85	0,51
V522	CNT-HUV	77,47	-70,97	-3,78	70,49	2,62
V521	CNT-HUV	75,76	-69,41	-3,54	68,60	1,63
V5545	LI-BNC	57,93	51,75	5,49	-51,81	-5,60
V5554	CNT-BOB	62,40	-56,64	-7,16	56,13	5,97
V5543	KV-BNC	43,68	-58,99	-7,86	58,90	7,63
V538	SO-MQ	1,10	0,00	0,00	0,00	0,99
V5051	BNP-BNT	9,94	-19,15	-3,85	19,15	5,67
V5557	MOB-KV	12,60	-16,53	-4,56	16,52	4,69
V5556	BOB-KV	29,18	-25,44	-6,68	25,41	6,89
V5560	LI-ZET	11,29	-9,80	-2,57	9,80	2,61
V5541	HUV-ZBB	60,45	-54,75	0,26	54,63	-0,48
V5542	ZBB-BNT	59,93	-54,14	1,43	54,07	-1,55
V528	HUV-MQ	9,84	-8,89	-0,08	8,88	0,60
V5561	SLB-LI	14,24	18,86	3,62	-18,87	-3,55
V539	HUV-LI	38,74	-35,09	-0,05	35,00	0,07
V5544	KV-LI	38,74	34,95	0,15	-35,00	-0,07
V5059	SHH-KV	3,46	5,73	3,91	-5,73	-2,05
V5055	CML-MEY	3,78	0,00	3,42	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,29	-1,99	-0,47	1,99	0,57
V5532	HUV-KPO	2,29	-1,99	-0,47	1,99	0,57
V5547	VMA-HUV	1,43	-1,18	0,54	1,18	-0,45
V5558	MEY-MOB	26,13	-34,92	-7,60	34,79	7,80
V5548	HUV-VMA	0,47	0,38	-0,09	-0,38	0,18

## 8.5 Oblast Brna napájena ze Sokolnic T402 (vypnuté PSP v BNT a LI, zapnuté PSP v KV a HUV, vypnuté V521, V522, V5553 a V5554) – konfigurace 5

Konfigurace 5 je obdoba konfigurace 4. Změna nastala v napájení, zajišťuje ho transformátor T402 pracující v rozvodně Sokolnice. Vypnuta jsou vedení v rozvodně Čebín. Jsou to vedení V521, V522, V5553 a V5554.

Schematicky je naznačena konfigurace 5 na Obr. 8.5. Vypínače u vedení V521, V522, V5553 a V5554 jsou vypnuté, proto mají červenou barvu. Naopak vypínače u V514, V515, V537 a V538 jsou zapnuté, proto jsou zelené. Příčné spínače přípojnic mají stejné zapojení jako u konfigurace 3.



Obr. 8.5 Schematické znázornění konfigurace 5

V tabulce Tab. 8-14 jsou uvedena napětí v rozvodnách při konfiguraci 5. Žádné napětí nepřesáhlo povolenou mez. Nejvyššího napětí bylo dosaženo v rozvodnách Modřice a Sokolnice.

Tabulka Tab. 8-15 zobrazuje zatížení transformátorů. Jelikož transformátor v Sokolnicích zajišťuje napájení pro celou oblast Brna a také pro rozvodny Bučovice a Oslavany, je mírně přetížený. Vlastník zařízení, firma ČEPS, dovoluje trvalý provoz pro transformátory do 120 % jmenovitého zatížení (viz kapitola 6.2).

Tab. 8-14 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 5

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
CNT	116,27	-27,00	SLB	116,94	-25,65
HUV	116,43	-25,94	ZET	116,49	-25,53
MEY	116,25	-25,65	KV	116,74	-25,65
VMA	116,44	-25,94	BOB	116,63	-26,03
ZBB	116,48	-25,93	MOB	116,60	-25,94
CML	116,97	-25,52	MED	117,41	-24,82
BNP	116,96	-25,36	BNC	116,60	-25,53
BNT	116,93	-24,90	SHH	116,73	-25,66
LI	116,51	-25,81	SO	117,78	-23,92
MQ	116,76	-25,08	KPO	116,43	-25,94
AD	116,39	-25,99			

Tab. 8-15 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 5

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVar]	[MW]	[MVar]
T402	SO	104,00	-363,76	-72,75	363,06	26,21
T401	CNT	1,58	0,32	5,06	-0,42	-5,51

Při konfiguraci 5 se musí největší ohled brát na vedení, která vychází z rozvodny Sokolnice a která při tomto zapojení sítě dodávají elektrickou energii pro celé Brno. Vedení V514 je zatíženo na 75,91 %, vedení V515 na 47,92 %, vedení V537 na 45,32 % a vedení V538 na



35,02 %. Opět žádné vedení není přetíženo a z hlediska ustáleného provozu jsou dodrženy povolené meze.

Tab. 8-16 Tabulka zatížení vedení při konfiguraci 5

Označení	Propojené rozvodny	I <sub>zat</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
V514	SO-KV	75,91	-126,65	-16,08	125,97	12,52
V515	MED-SO	47,59	69,61	1,52	-69,80	-2,30
V5553	CNT-MEY	0,92	0,00	0,00	0,00	0,84
V513	KV-BNT	21,74	19,13	5,86	-19,15	-5,75
V5549	MED-KV	44,82	-65,75	-0,55	65,38	-0,09
V537	SO-SLB	45,32	-41,57	-1,20	41,30	1,05
V5053	CML-BNP	2,62	0,00	-3,48	0,00	5,31
V510	KV-BNT	44,78	-41,17	-1,40	41,09	1,36
V522	CNT-HUV	0,45	0,00	0,00	0,00	0,40
V521	CNT-HUV	0,78	0,00	0,00	0,00	0,71
V5545	LI-BNC	12,82	10,50	5,03	-10,50	-4,87
V5554	CNT-BOB	1,61	0,00	0,00	0,00	1,46
V5543	KV-BNC	13,76	-17,60	-6,74	17,59	6,90
V538	SO-MOQ	35,02	-32,12	1,33	31,81	-1,11
V5051	BNP-BNT	9,87	-19,15	-3,91	19,15	5,75
V5557	MOB-KV	41,57	57,08	0,86	-57,15	-1,00
V5556	BOB-KV	33,87	30,68	-2,19	-30,73	2,35
V5560	LI-ZET	11,17	-9,80	-2,57	9,80	2,61
V5541	HUV-ZBB	3,24	2,37	1,75	-2,37	-1,58
V5542	ZBB-BNT	4,21	2,86	2,54	-2,86	-2,44
V528	HUV-MQ	25,37	22,84	-2,36	-22,93	2,70
V5561	SLB-LI	16,44	-22,41	3,12	22,41	-3,06
V539	HUV-LI	16,61	14,82	2,79	-14,83	-2,60
V5544	KV-LI	16,57	-14,84	-2,31	14,83	2,60
V5059	SHH-KV	3,43	5,73	3,91	-5,73	-2,01
V5055	CML-MEY	3,82	0,00	3,48	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,28	-1,99	-0,47	1,99	0,57
V5532	HUV-KPO	2,28	-1,99	-0,47	1,99	0,57
V5547	VMA-HUV	1,42	-1,18	0,54	1,18	-0,45
V5558	MEY-MOB	28,32	38,66	-2,27	-38,82	2,37
V5548	HUV-VMA	0,47	0,38	-0,09	-0,38	0,19

## 8.6 Další možnosti konfigurace zapojení DS 110 kV pro napájení oblasti města Brna

Tyto konfigurace vychází z paralelního provozu rozvoden Čebín a Sokolnice, kdy jsou zapnuty příčné spínače přípojnic v rozvodnách BNT, HUV, KV a LI. Jelikož bylo zjištěno, že konfigurace 2 není z hlediska zkratových odolností rozvoden přípustná, takže rozpadová automatika vyplývající z toho zapojení není možná, jsou konfigurace 6, 7, 8 a 9 analyzovány v Příloha B. Tyto stavy jsou z hlediska ustáleného chodu sítě přípustné, takže je možné k nim po zapůsobení rozpadové automatiky v případě potřeby přejít provozními manipulacemi v DS 110 kV.

Jedná se o:

- konfiguraci 6 – Brno je napájeno pouze ze Sokolnic (vypnut transformátor T401 v rozvodně Čebín),
- konfiguraci 7 – Brno je napájeno pouze ze Sokolnic (vypnuta jsou vedení vstupující do rozvodny Čebín),
- konfiguraci 8 – Brno je napájeno z rozvodny Čebín (vypnut transformátor T402 v rozvodně Sokolnice),
- konfigurace 9 – Brno je napájeno z rozvodny Čebín (vypnuta jsou vedení vstupující do rozvodny Sokolnice).

## 9 VYHODNOCENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ

V kapitole 9 jsou přehledně shrnuty výsledky z kapitoly 8. Jednotlivé konfigurace jsou mezi sebou porovnány na základě napětí v uzlech, zatížení vedení a z hlediska ztrát na vedení.

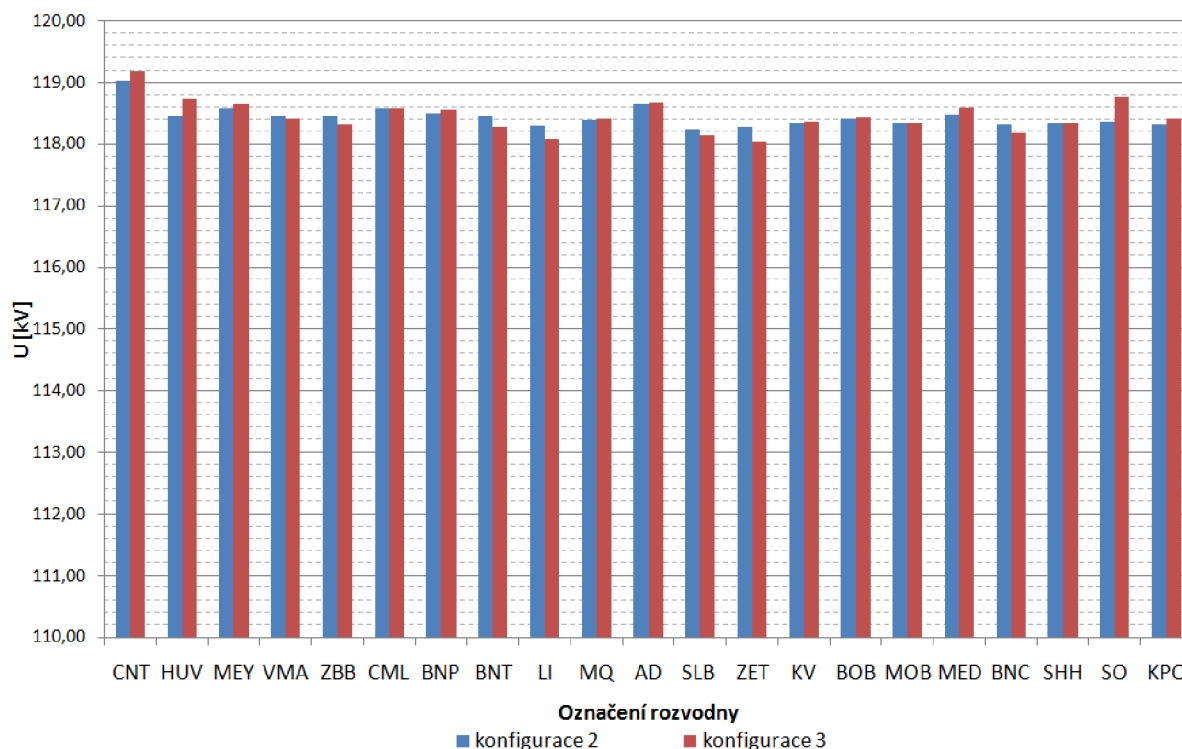
Kvůli přehlednosti byly konfigurace rozděleny na dvě skupiny. V první skupině jsou uvedeny konfigurace, při kterých je oblast Brna napájena současně z Čebína a ze Sokolnic (paralelní provoz). Druhou porovnávanou skupinou jsou konfigurace, při kterých mezi rozvodnami Čebín a Sokolnice není přímé spojení.

### 9.1 Porovnání paralelního provozu (konfigurace 2 a 3)

Při konfiguracích 2 a 3 je analyzovaná oblast napájena paralelně ze dvou rozvodů (CNT a SO). Napěťové poměry jsou porovnány v tabulce Tab. 9-1 a také v grafu na Obr. 9.1.

Tab. 9-1 Tabulka napěťových poměrů v rozvodnách při konfiguracích 2 a 3

Zkratka	kon. 2	kon. 3	Zkratka	kon. 2	kon. 3
	U [kV]	U [kV]		U [kV]	U [kV]
CNT	119,03	119,17	SLB	118,23	118,14
HUV	118,45	118,72	ZET	118,27	118,05
MEY	118,58	118,65	KV	118,34	118,35
VMA	118,46	118,42	BOB	118,42	118,43
ZBB	118,45	118,32	MOB	118,33	118,34
CML	118,57	118,57	MED	118,48	118,59
BNP	118,50	118,56	BNC	118,31	118,18
BNT	118,44	118,27	SHH	118,34	118,34
LI	118,29	118,07	SO	118,35	118,76
MQ	118,39	118,41	KPO	118,31	118,41
AD	118,65	118,68			



Obr. 9.1 Graf napětových poměrů v rozvodnách při konfiguracích 2 a 3

Z grafu na Obr. 9.1 je patrné, že všechny rozvodny splňují podmínky a jsou tedy v rozmezí  $\pm 10\%$  ze jmenovitého napětí 110 kV. Nejnižší napětí bylo v rozvodnách LI 118,07 kV a ZET 118,05 kV při konfiguraci 3. Naopak nejvyšší napětí bylo v rozvodně CNT – při obou konfiguracích přesáhlo 119 kV.

Ztráty na vedení byly vypočteny následovně. Příklad výpočtu je uveden pro vedení V515 z tabulky Tab. 8-10.

$$\Delta P_{vedV515} = \left| P_{1;V515} \right| - \left| P_{2;V515} \right| = |23,59 - 23,61| = 0,02 MW \quad (9.1)$$

Stejným způsobem byly vypočteny ztráty pro všechna vedení, které byly následně sečteny. Výsledné ztráty jsou uvedeny v tabulce Tab. 9-2. Při konfiguraci 2 jsou ztráty nižší, jelikož je výkon rozprostřen na více vedení rovnoměrněji, což je způsobeno tím, že jsou sepnuty příčné spínače přípojnic ve všech čtyřech rozvodnách, kde je to možné. Naopak při konfiguraci 3 jsou sepnuty příčné spínače jen v rozvodnách KV a HUV, což má nepříznivý vliv na velikost ztrát.

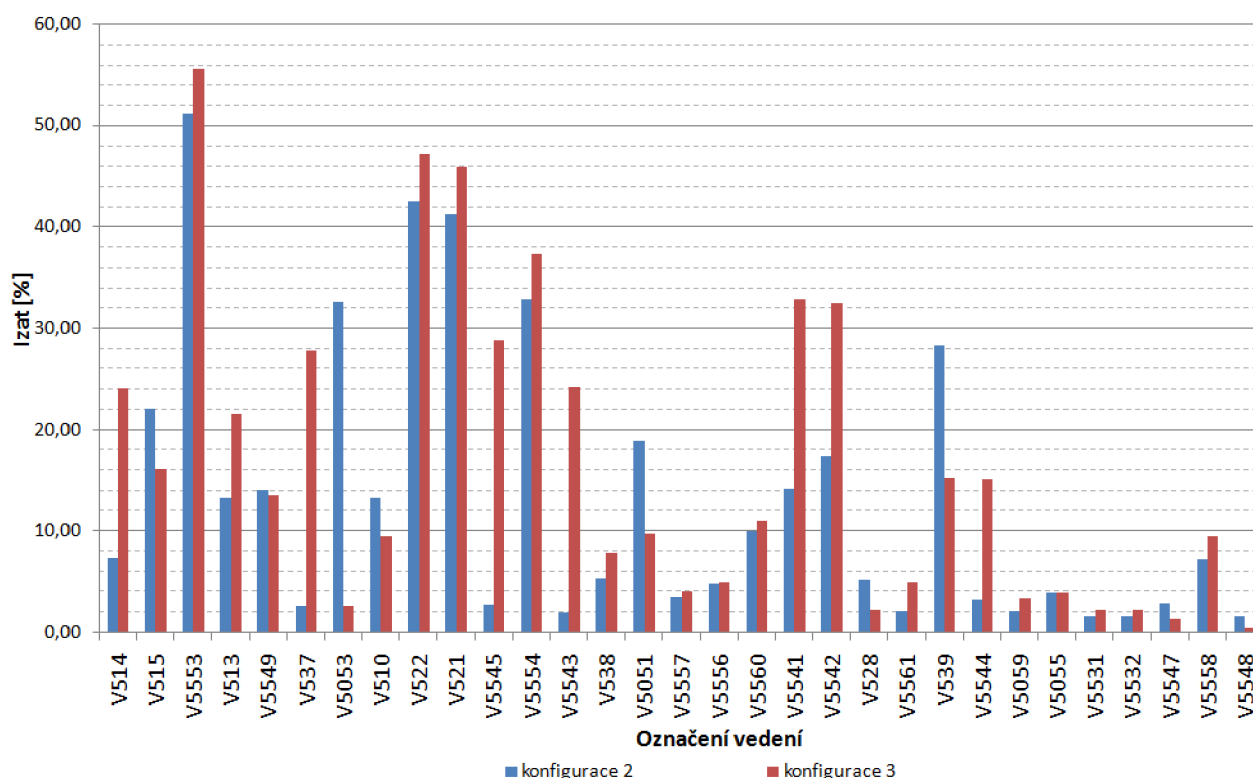
Tab. 9-2 Tabulka porovnání ztrát na vedení při konfiguracích 2 a 3

	kon. 2	kon. 3
	$\Delta P_{ved}$	$\Delta P_{ved}$
	[MW]	[MW]
Ztráty	0,87	1,27



Tab. 9-3 Tabulka zatížení vedení při konfiguracích 2 a 3

Označení	kon. 2	kon.3	Označení	kon. 2	kon. 3
	I <sub>zat</sub> [%]	I <sub>zat</sub> [%]		I <sub>zat</sub> [%]	I <sub>zat</sub> [%]
V514	7,30	24,09	V5556	4,85	4,97
V515	22,11	16,06	V5560	9,95	11,02
V5553	51,14	55,61	V5541	14,24	32,90
V513	13,33	21,51	V5542	17,35	32,45
V5549	14,02	13,61	V528	5,23	2,21
V537	2,62	27,73	V5561	2,16	4,90
V5053	32,66	2,65	V539	28,26	15,15
V510	13,33	9,47	V5544	3,29	15,10
V522	42,52	47,25	V5059	2,14	3,38
V521	41,30	45,92	V5055	3,87	3,87
V5545	2,82	28,75	V5531	1,66	2,25
V5554	32,91	37,34	V5532	1,66	2,25
V5543	2,05	24,26	V5547	2,85	1,40
V538	5,29	7,79	V5558	7,15	9,44
V5051	18,88	9,76	V5548	1,63	0,46
V5557	3,47	3,97			



Obr. 9.2 Graf zatížení vedení při konfiguracích 2 a 3

V tabulce Tab. 9-3 je uvedeno zatížení vedení při konfiguracích 2 a 3. Výsledky jsou přehledně shrnuty v grafu na Obr. 9.2. Je patrné, že nejvíce zatíženým prvkem je vedení V5553 při konfiguraci 3 (55,6 %). Jinak se všechna zatížení vedení pohybují při obou konfiguracích pod 50 %.

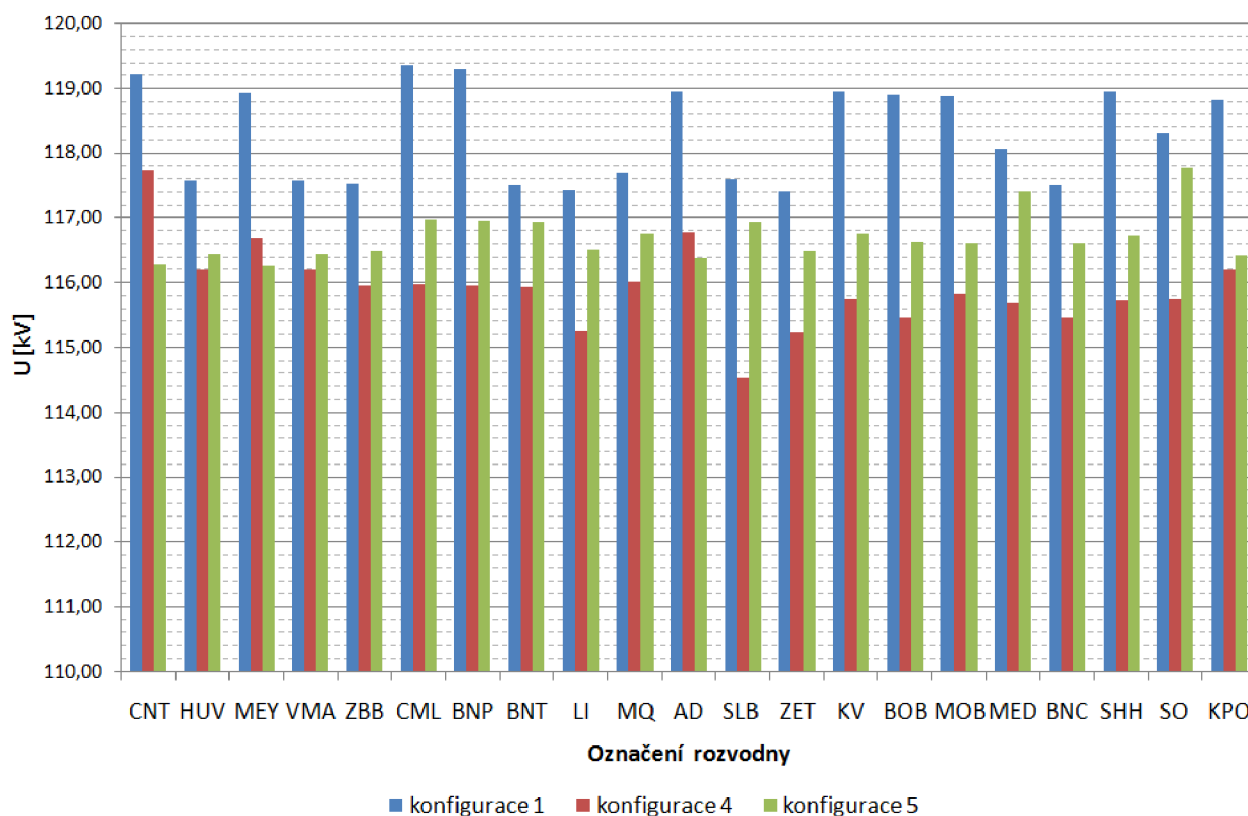
Z tohoto porovnání konfigurací paralelního napájení oblasti Brna vyplývá, že jsou obě vhodné pro trvalý provoz.

## 9.2 Porovnání odděleného provozu (konfigurace 1, 4 a 5)

V kapitole 9.2 jsou porovnány konfigurace, při nichž není přímé spojení mezi rozvodnami Čebín a Sokolnice na úrovni 110 kV. Při konfiguraci 1 jsou v provozu oba transformátory T401 a T402, při konfiguracích 2 a 3 je Brno napájeno vždy jenom z jednoho transformátoru 400/110 kV.

Tab. 9-4 Tabulka napětových poměrů v rozvodnách pro konfigurace 1, 4 a 5

Zkratka	kon. 1	kon. 4	kon. 5	Zkratka	kon. 1	kon. 4	kon. 5
	U [kV]	U [kV]	U [kV]		U [kV]	U [kV]	U [kV]
CNT	119,21	117,73	116,27	SLB	117,59	114,54	116,94
HUV	117,56	116,20	116,43	ZET	117,40	115,23	116,49
MEY	118,92	116,68	116,25	KV	118,95	115,74	116,74
VMA	117,56	116,20	116,44	BOB	118,90	115,45	116,63
ZBB	117,53	115,96	116,48	MOB	118,88	115,83	116,60
CML	119,35	115,97	116,97	MED	118,06	115,69	117,41
BNP	119,28	115,96	116,96	BNC	117,51	115,45	116,60
BNT	117,52	115,93	116,93	SHH	118,94	115,73	116,73
LI	117,42	115,26	116,51	SO	118,31	115,75	117,78
MQ	117,69	116,01	116,76	KPO	118,82	116,19	116,43
AD	118,94	116,77	116,39				



Obr. 9.3 Napětové poměry v rozvodnách při konfiguracích 1, 4 a 5

Při konfiguracích 1, 4 a 5 se napětí pohybovalo poměrně vysoko nad jmenovitou hodnotou 110 kV. Nejvyšší napětí v rozvodnách bylo při konfiguraci 1. Konkrétně se jednalo o rozvodny CNT, CML a BNP. U těchto třech rozvodnů nekleslo napětí při konfiguraci 1 pod 119 kV. Napěťové poměry při jednotlivých konfiguracích jsou zřejmé z tabulky Tab. 9-4 a z Obr. 9.3.

Tab. 9-5 Tabulka porovnání ztrát na vedení při konfiguracích 1, 4 a 5

	kon. 1	kon. 4	kon. 5
	$\Delta P_{\text{ved}}$	$\Delta P_{\text{ved}}$	$\Delta P_{\text{ved}}$
	[MW]	[MW]	[MW]
Ztráty	1,15	2,94	2,33

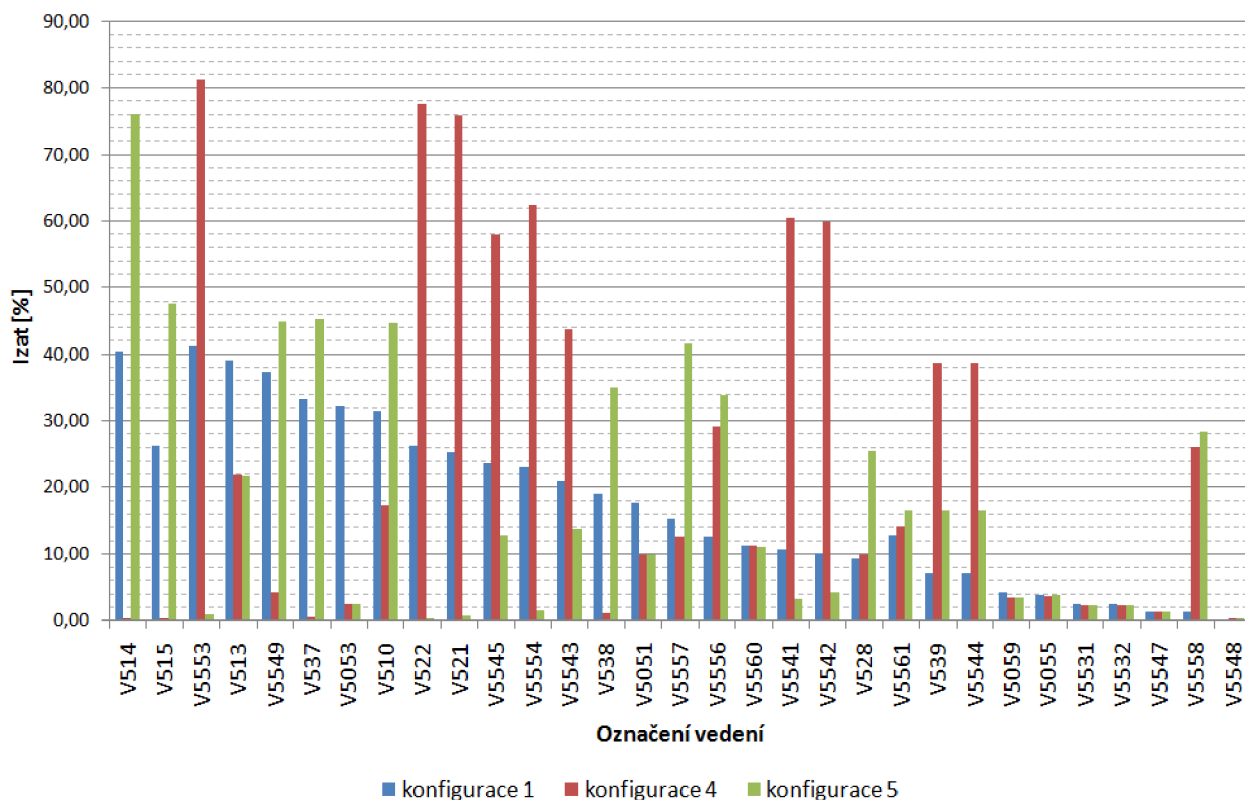
Ztráty na vedení jsou nejnižší při konfiguraci 1, naopak nejvyšší jsou při konfiguraci 4. Při konfiguraci 1 jsou rozepnuté příčné spínače přípojníc v rozvodnách HUV, LI, KV a BNT a také jsou v provozu obě rozvodny, což způsobuje menší zatížení vedení, které rozvodnám Čebín a Sokolnice přináležejí. Naopak při konfiguracích 4 a 5 jsou ztráty podobné a jsou vyšší než při konfiguraci 1. Je to způsobeno tím, že oblast je napájena jen z jednoho transformátoru 400/100 kV a tím se více zatěžují vedení vycházející z těchto rozvodnů. Tím se zvyšují i ztráty na vedeních.

Žádné z vedení není při porovnávaných konfiguracích přetíženo. K nejvyššímu zatížení vedení docházelo při konfiguraci 4. Konkrétně se jedná o vedení V5553, V522 a V521. Zmíněná vedení byla zatížena na více jak 75 %. Dále velmi zatíženým vedením bylo vedení V514 při konfiguraci 5, jeho zatížení dosahovalo 75,91 %.

Žádný prvek při konfiguracích 1, 4 a 5 nebyl přetížen, a proto jsou vhodná pro trvalý provoz. Tato skutečnost je patrná z Obr. 9.4 a Tab. 9-6.

Tab. 9-6 Tabulka zatížení vedení při konfiguracích 1, 4 a 5

Označení	kon.1	kon.4	kon.5	Označení	kon.1	kon.5	kon.6
	Izat	Izat	Izat		Izat	Izat	Izat
	[%]	[%]	[%]		[%]	[%]	[%]
V514	40,47	0,37	75,91	V5556	12,54	29,18	33,87
V515	26,21	0,35	47,59	V5560	11,19	11,29	11,17
V5553	41,19	81,20	0,92	V5541	10,58	60,45	3,24
V513	39,01	21,90	21,74	V5542	10,07	59,93	4,21
V5549	37,21	4,34	44,82	V528	9,36	9,84	25,37
V537	33,28	0,60	45,32	V5561	12,82	14,24	16,44
V5053	32,16	2,60	2,62	V539	7,25	38,74	16,61
V510	31,50	17,37	44,78	V5544	7,07	38,74	16,57
V522	26,30	77,47	0,45	V5059	4,23	3,46	3,43
V521	25,18	75,76	0,78	V5055	3,89	3,78	3,82
V5545	23,72	57,93	12,82	V5531	2,42	2,29	2,28
V5554	23,16	62,40	1,61	V5532	2,42	2,29	2,28
V5543	20,97	43,68	13,76	V5547	1,33	1,43	1,42
V538	19,10	1,10	35,02	V5558	1,28	26,13	28,32
V5051	17,73	9,94	9,87	V5548	0,16	0,47	0,47
V5557	15,36	12,60	41,57				



Obr. 9.4 Graf zatížení vedení při konfiguracích 1, 4 a 5

## 10 KONTROLA ZKRATOVÝCH ODOLNOSTÍ ROZVODEN

V kapitole 9.1 je provedena kontrola rozveden na účinky zkratových proudů při konfiguracích sítě z kapitoly 8, jelikož všechny konfigurace vyhovely podmínkám pro ustálený chod. Kontrola je provedena na zkratovou odolnost rozveden na třífázový a na jednofázový zkratový výkon. V kapitole je vždy uveden odpovídající počáteční souměrný rázový výkon a procentní zatížení dané rozvodny tímto výkonem. V Tab. 10-1 jsou uvedeny jmenovité zkratové odolnosti rozveden. Zkratové proudy byly počítány dle normy ČSN EN 60909. Parametry vedení, generátorů a transformátorů používaných při výpočtech jsou uvedeny v kapitolách 7.2 a 7.3.

Tab. 10-1 Tabulka jmenovitých zkratových odolností rozveden

Zkratka	$S''_{kn}$	Zkratka	$S''_{kn}$
	[MVA]		[MVA]
AD	3500	MED	3500
BNC	3500	MOB	3500
BNT	3500	MQ	3500
BNP	3500	SHH	3500
BOB	3500	SLB	3500
CNT	5000	SO	5000
CML	3500	VMA	3500
HUV	3500	ZBR	3500
KPO	3500	ZET	3500
KV	5000	MEY	3500
LI	3500		

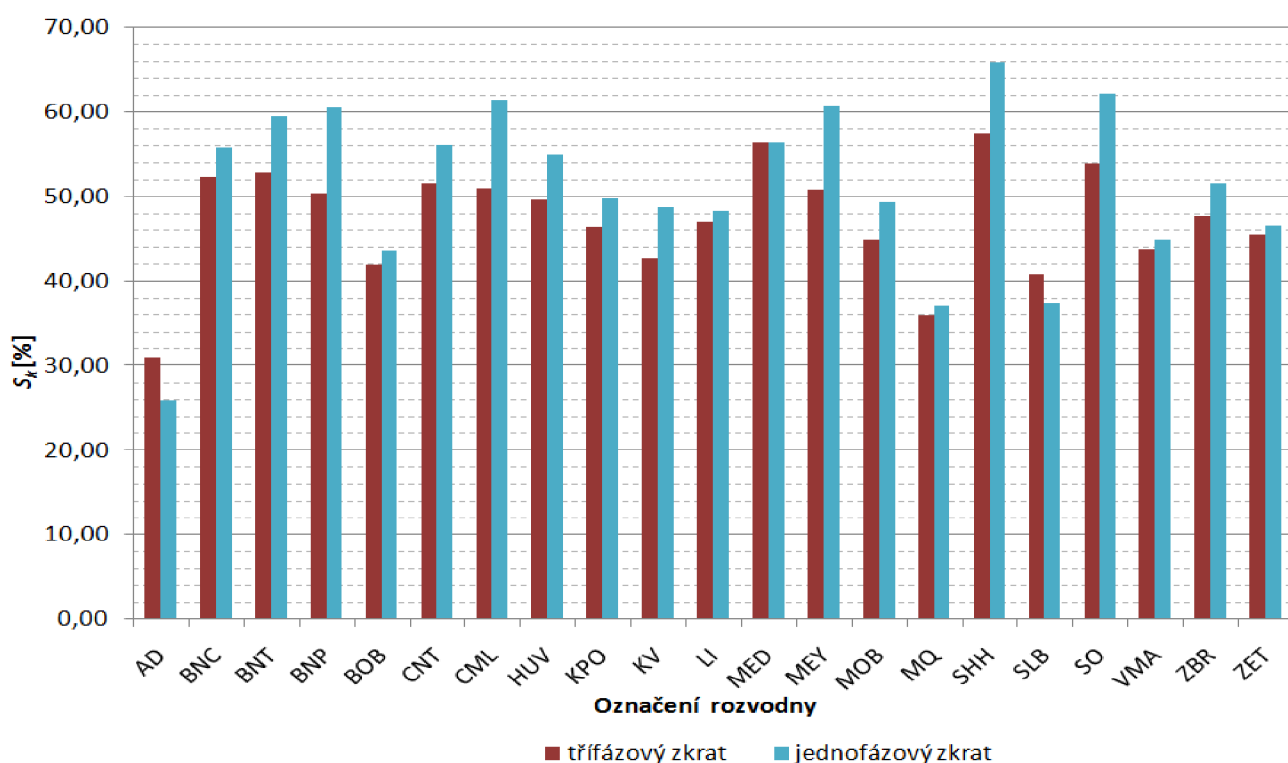
## 10.1 Kontrola zkratových odolností rozveden při konfiguraci 1

Při konfiguraci 1 je analyzovaná oblast napájena z rozveden Čebín a Sokolnice, přičemž Brno je rozděleno na dvě nezávislé oblasti. Příčné spínače přípojníc jsou rozpojeny v rozvodnách Teplárna Brno, Líšeň, Husovice a Komárov. Blíže je konfigurace 1 popsána v kap. 8.1, schéma je v příloze Příloha A.

Rozvodny BNP, CML, MEY, SHH a SO jsou při konfiguraci 1 zatíženy na více jak 60 % své zkratové odolnosti, jsou tedy nejvíce zatěžovanými rozvodnami při této konfiguraci. Všechny rozvodny jsou zkratovým výkonem namáhány na méně jak 100 %, tzn. konfigurace je vhodná k provozu i z hlediska zkratových odolností. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v Tab. 10-2 a přehledně graficky shrnuty v grafu na Obr. 10.1.

Tab. 10-2 Zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 1

Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$
	[MVA]	[MVA]	[%]	[%]		[MVA]	[MVA]	[%]	[%]
AD	1085,3	908,4	31,01	25,95	MED	1976,4	1973,5	56,47	56,39
BNC	1831,5	1953,5	52,33	55,81	MEY	1781,0	2126,4	50,89	60,75
BNT	1850,5	2081,5	52,87	59,47	MOB	1571,0	1727,2	44,89	49,35
BNP	1765,4	2121,9	50,44	60,63	MQ	1256,4	1301,3	35,90	37,18
BOB	1471,1	1529,0	42,03	43,69	SHH	2009,8	2303,9	57,42	65,83
CNT	2576,6	2803,7	51,53	56,07	SLB	1429,6	1308,6	40,85	37,39
CML	1786,1	2150,3	51,03	61,44	SO	2695,1	3107,5	53,90	62,15
HUV	1738,8	1925,8	49,68	55,02	VMA	1531,9	1574,9	43,77	45,00
KPO	1623,7	1744,9	46,39	49,85	ZBR	1673,6	1806,0	47,82	51,60
KV	2137,2	2440,7	42,74	48,81	ZET	1593,1	1628,7	45,52	46,53
LI	1646,9	1692,7	47,05	48,36					



Obr. 10.1 Graf procentního zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 1

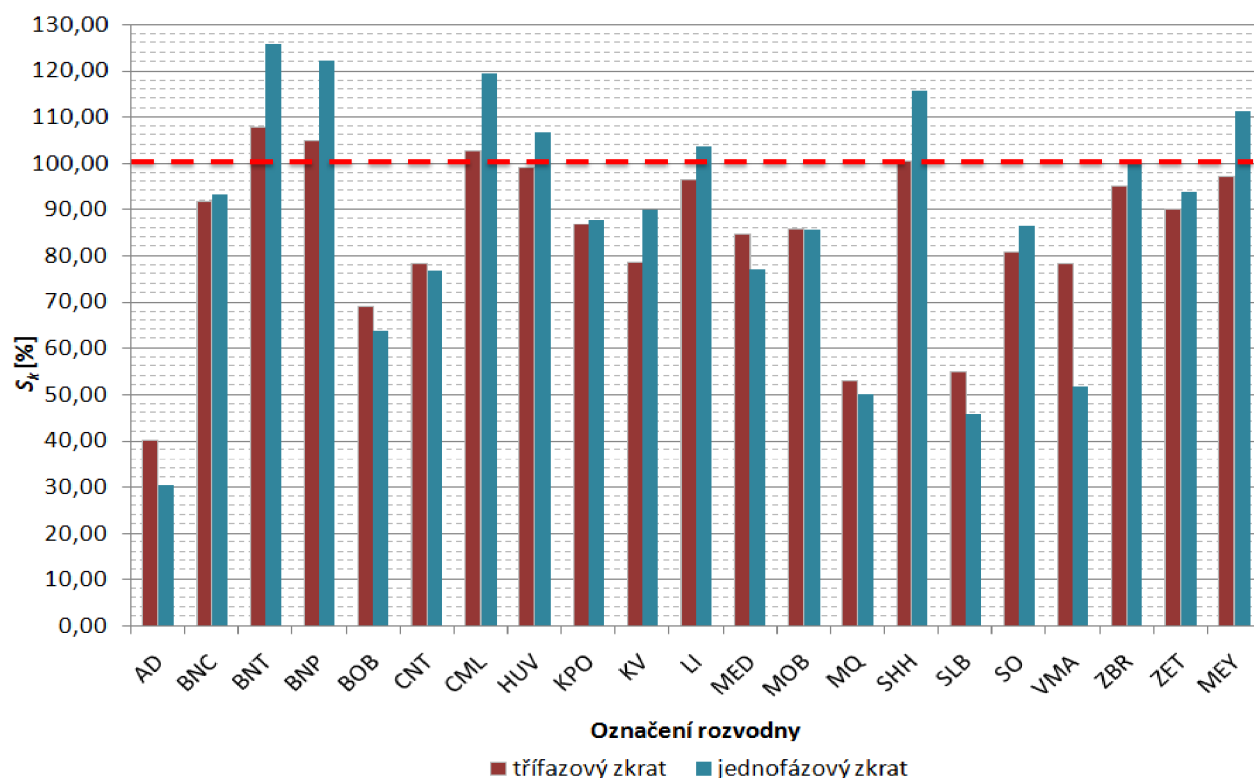
## 10.2 Kontrola zkratových odolností rozveden při konfiguraci 2

Při konfiguraci 2 jsou sepnuty příčné spínače přípojnic v rozvodnách BNT, LI, KV a HUV. Takže je oblast napájena současně z Čebína i ze Sokolnic. Konfigurace 2 vyhověla z hlediska ustáleného chodu, žádné vedení ani transformátor nebyl přetížen.

Při konfiguraci 2 je hned několik rozveden zatíženo nad svoji jmenovitou hodnotu. Na více než 100 % jsou zatíženy rozvodny BNT, BNP, CML, LI, SHH, HUV, ZBR a MEY. Některé rozvodny jsou zatíženy nad 90 % své jmenovité zkratové odolnosti. Jsou to rozvodny BNC, HUV, LI, ZBR, ZET a MEY. Nevyhovující rozvodny jsou v Tab. 10-3 označeny červeným podbarvením. V grafu na Obr. 10.2 je červenou přerušovanou čarou zvýrazněna hodnota zatížení 100 %. Rozvodny, které tuto hodnotu přesáhly, považujeme za nevyhovující.

Tab. 10-3 Zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 2

Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$
	[MVA]	[MVA]	[%]	[%]		[MVA]	[MVA]	[%]	[%]
AD	1404,6	1067,3	40,13	30,49	MED	2964,1	2700,0	84,69	77,14
<b>BNC</b>	3203,4	3258,8	91,53	93,11	MOB	3000,3	2994,7	85,72	85,56
<b>BNT</b>	3772,6	4393,0	107,79	125,51	MQ	1854,0	1748,5	52,97	49,96
<b>BNP</b>	3665,0	4273,7	104,71	122,11	<b>SHH</b>	3512,9	4048,7	100,37	115,68
BOB	2418,0	2231,1	69,09	63,75	SLB	1919,5	1596,2	54,84	45,61
CNT	3920,4	3843,9	78,41	76,88	SO	4042,8	4313,7	80,86	86,27
<b>CML</b>	3587,9	4175,5	102,51	119,30	VMA	2741,0	2584,2	78,31	51,68
<b>HUV</b>	3463,4	3729,1	98,95	106,55	<b>ZBR</b>	3322,4	3510,3	94,93	100,29
KPO	3035,1	3070,9	86,72	87,74	<b>ZET</b>	3148,6	3275,0	89,96	93,57
KV	3921,5	4493,7	78,43	89,87	<b>MEY</b>	3401,1	3895,5	97,17	111,30
<b>LI</b>	3374,5	3620,2	96,41	103,43					



Obr. 10.2 Graf procentního zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 2



### 10.3 Kontrola zkratových odolností rozveden při konfiguraci 3

Při konfiguraci 3 byla oblast napájena paralelně z rozveden Čebín a Sokolnice a byly sepnuty příčné spínače přípojníc v rozvednách Husovice a Komárov. Blíže je stav popsán v kap. 8.3.

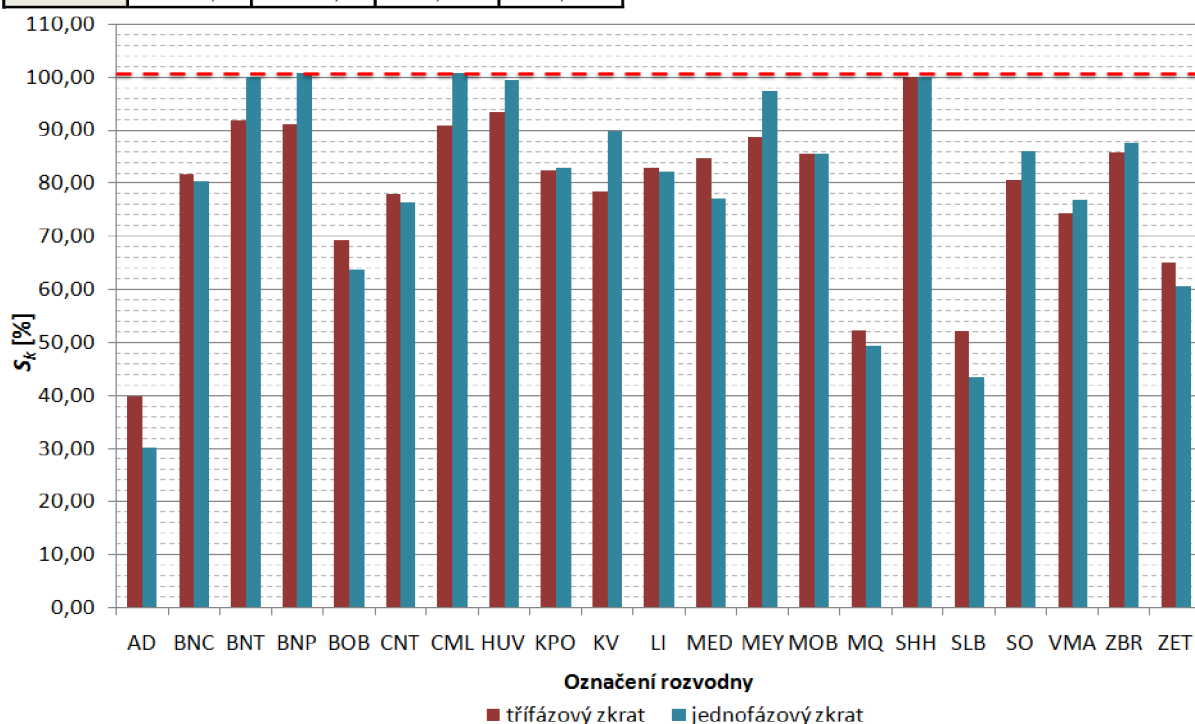
Nejvíce namáhanými rozvednami při kontrole zkratové odolnosti byly rozvodny BNP, BNT, CML, HUV, MEY a SHH. Zmíněné rozvodny byly na hranici své odolnosti. Dokonce rozvodny BNP, BNT, CML a SHH byly při jednofázovém zkratu byly mírně přetíženy, ale jelikož se jedná o přetížení pouze v řádu desetin procenta, lze považovat konfiguraci 3 z hlediska zkratové odolnosti rozveden za vyhovující.

Zatížení rozveden při konfiguraci 3 je vypsané v

Tab. 10-4 a graficky znázorněno na Obr. 10.3. V tabulce jsou vyznačeny žlutým podbarvením hodnoty blízké se limitům rozvodny a červeným podbarvením jsou vyznačeny rozvodny překračující limit.

Tab. 10-4 Zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 3

Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$
	[MVA]	[MVA]	[%]	[%]		[MVA]	[MVA]	[%]	[%]
AD	1389,2	1058,5	39,69	30,24	MED	2961,00	2697,00	84,60	77,06
BNC	2859,3	2811,0	81,69	80,31	<b>MEY</b>	3105,00	3409,00	88,71	<b>97,40</b>
<b>BNT</b>	3211,7	3502,1	<b>91,76</b>	<b>100,06</b>	MOB	2994,00	2989,00	85,54	85,40
<b>BNP</b>	3188,2	3524,7	<b>91,09</b>	<b>100,71</b>	MQ	1831,80	1731,60	52,34	49,47
BOB	2419,9	2230,9	69,14	63,74	<b>SHH</b>	3498,20	3501,20	<b>99,95</b>	<b>100,03</b>
CNT	3894,6	3820,6	77,89	76,41	SLB	1819,70	1520,70	51,99	43,45
<b>CML</b>	3180,2	3526,6	<b>90,86</b>	<b>100,76</b>	SO	4028,20	4300,50	80,56	86,01
<b>HUV</b>	3267,0	3476,0	<b>93,34</b>	<b>99,31</b>	VMA	2598,90	2691,00	74,25	76,89
KPO	2883,0	2901,0	82,37	82,89	ZBR	2997,00	3062,00	85,63	87,49
KV	3920,0	4491,0	78,40	89,82	ZET	2270,80	2117,70	64,88	60,51
LI	2894,8	2871,5	82,71	82,04					



Obr. 10.3 Graf procentního zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 3

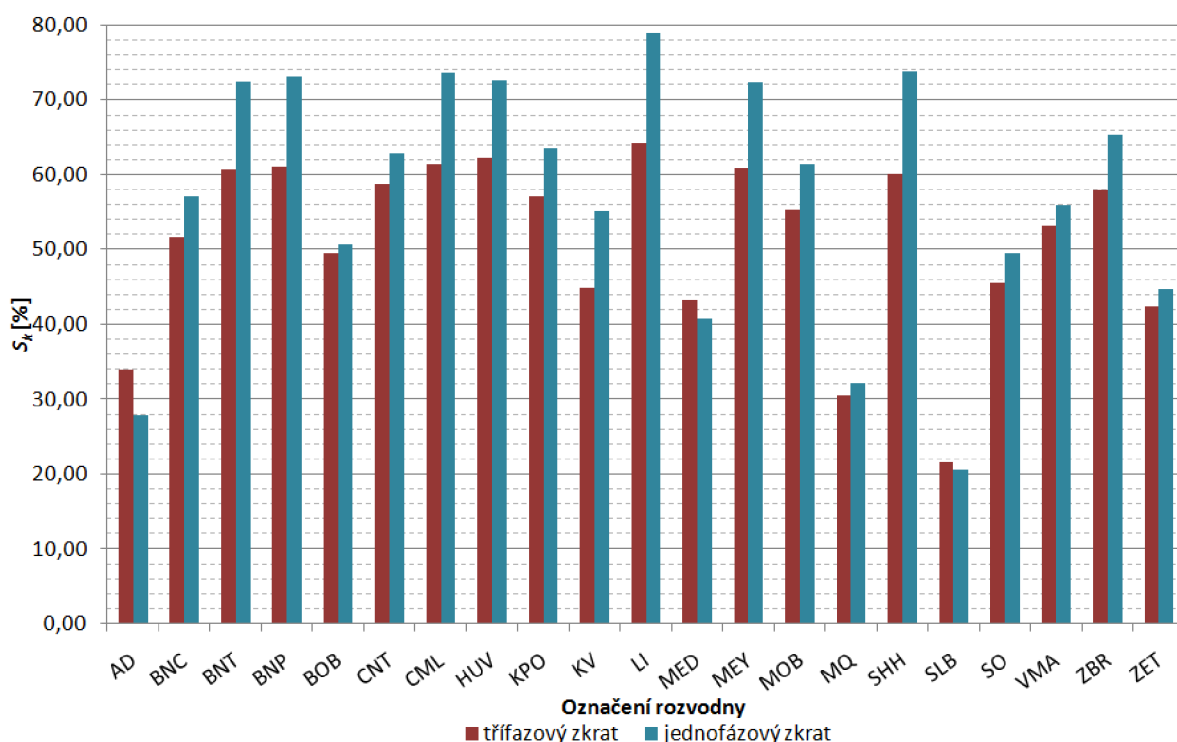
## 10.4 Kontrola zkratových odolností rozveden při konfiguraci 4

Při konfiguraci 4 je celá oblast napájena z rozvodny Čebín. Vypnuta jsou vedení V514, V515, V537 a V538. Blíže je konfigurace popsána v kap. 8.4. Opět jsou nejvíce zatíženy rozvodny BNT, BNP, CML, MEY, LI a SHH. V tabulce Tab. 10-5 jsou vedení zvýrazněna červenou barvou a maximální hodnoty při této konfiguraci jsou zvýrazněny žlutým podbarvením. Maximálním zatížením při zkratech bylo 78,81 % v rozvodně LI. Jinak žádná rozvodna není namáhána zkratovými proudy nad svoji zkratovou odolnost.

Zatížení rozveden zkratovým proudem je vypsáno v tabulce Tab. 10-5 a graficky znázorněno na Obr. 10.4. Všechny rozvodny jsou v normě a konfigurace je z hlediska zkratových odolností rozveden vhodná pro provoz.

Tab. 10-5 Zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 4

Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$
	[MVA]	[MVA]	[%]	[%]		[MVA]	[MVA]	[%]	[%]
AD	1188,9	973,6	33,97	27,82	MED	1514,0	1427,5	43,26	40,79
BNC	1809,3	1999,4	51,69	57,13	MEY	2128,0	2528,1	60,80	72,23
BNT	2124,1	2535,3	60,69	72,44	MOB	1934,0	2148,2	55,26	61,38
BNP	2133,2	2556,8	60,95	73,05	MQ	1066,5	1123,1	30,47	32,09
BOB	1731,6	1774,8	49,47	50,71	SHH	2103,4	2583,5	60,10	73,81
CNT	2938,2	3140,8	58,76	62,82	SLB	756,3	718,7	21,61	20,53
CML	2148,7	2577,8	61,39	73,65	SO	2273,5	2476,8	45,47	49,54
HUV	2173,7	2542,9	62,11	72,65	VMA	1858,2	1956,3	53,09	55,89
KPO	1996,9	2221,9	57,05	63,48	ZBR	2024,8	2288,0	57,85	65,37
KV	2243,3	2757,3	44,87	55,15	ZET	1485,6	1563,8	42,45	44,68
LI	2243,8	2758,2	64,11	78,81					



Obr. 10.4 Graf procentního zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 4



## 10.5 Kontrola zkratových odolností rozveden při konfiguraci 5

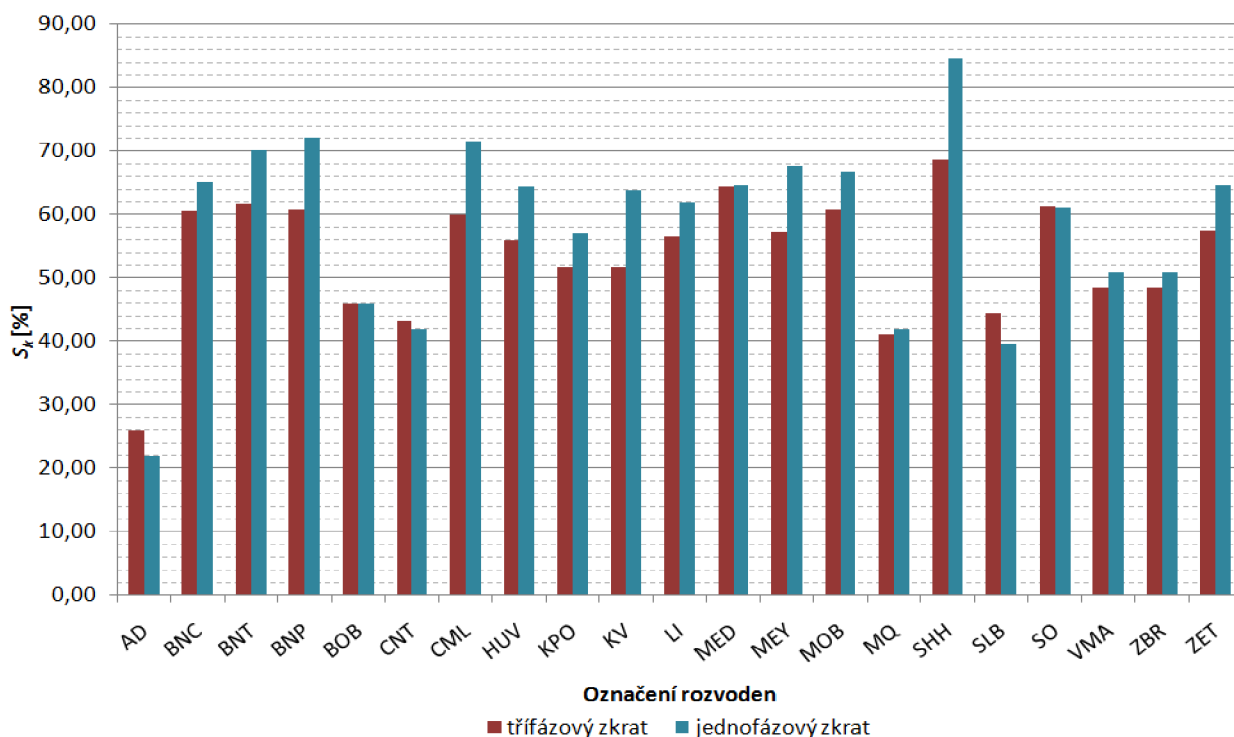
Konfigurace 5 je podobná konfiguraci 4, pouze je oblast napájena ze Sokolnic a vypnutá jsou vedení V522, V521, V5553 a V5554. Popis konfigurace je v kap. 8.5.

Nejvíce zatěžovanými rozvodnami jsou BNT, BNP, CML a SHH při jednofázovém zkratu. Nejvíce procentně zatížena je rozvodna SHH a to na 84,65 %. V rozvodnách blíže k rozvodně Sokolnice můžeme pozorovat mírný nárůst zkratových výkonů.

Jak vyplývá z Tab. 10-6 a z grafu na Obr. 10.5, žádná rozvodna není přetížená a z hlediska zkratové odolnosti je konfigurace vhodná pro provoz.

Tab. 10-6 Zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 5

Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	Zkratka	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$	$S''_{k3f}$	$S''_{k1f}$
	[MVA]	[MVA]	[%]	[%]		[MVA]	[MVA]	[%]	[%]
AD	910,4	767,3	26,01	21,92	MED	2257,6	2261,1	64,50	64,60
BNC	2121,5	2281,4	60,61	65,18	MEY	2005,6	2368,1	57,30	67,66
<b>BNT</b>	2159,5	2454,7	61,70	<b>70,13</b>	MOB	2129,1	2338,5	60,83	66,81
<b>BNP</b>	2128,4	2524,2	60,81	<b>72,12</b>	MQ	1437,5	1468,8	41,07	41,97
BOB	1607,4	1606,6	45,93	45,90	<b>SHH</b>	2401,8	2962,8	68,62	<b>84,65</b>
CNT	2162,8	2091,5	43,26	41,83	SLB	1553,0	1387,7	44,37	39,65
<b>CML</b>	2103,3	2500,8	60,09	<b>71,45</b>	SO	3066,3	3059,7	61,33	61,19
HUV	1956,6	2253,1	55,90	64,37	VMA	1698,0	1782,7	48,51	50,93
KPO	1812,4	2001,6	51,78	57,19	ZBR	1698,3	1782,8	48,52	50,94
KV	2586,2	3194,4	51,72	63,89	ZET	2011,7	2260,1	57,48	64,57
LI	1977,2	2167,0	56,49	61,91					



Obr. 10.5 Graf procentního zatížení rozveden zkratovým výkonem při konfiguraci 5

## 10.6 Zhodnocení výsledků zkratové odolnosti rozveden

Konfigurace 1, 4 a 5 vyhověly z hlediska zkratového namáhání bez problémů. Konfigurace 2 nevyhověla, protože 7 rozveden bylo zatíženo na více jak 100%, což bylo to způsobeno tím, že do oblasti pracovaly oba transformátory T401 a T402 a přispívaly ke zkratovým proudům (výkonům). Při konfiguraci 3 byly rozvodny BNT, BNP, CML a SHH zatíženy nad 100%, ale jen v řádu desetin procent, konfigurace 3 je tedy považována za provozuschopnou.

Nejvíce namáhanými rozvodnami byly BNT, BNP, BNC, ZET, MEY, CML a LI. U těchto rozveden se při paralelním provozu namáhání při zkratu pohybovalo na hraně zkratových odolností rozveden, nebo i za hranou.

Jelikož konfigurace 2 nevyhověla (konfigurace paralelního napájení Brna při sepnutých příčných spínačích přípojnic v rozvodnách HUV, LI, KV a BNT) kontrole na zkratové odolnosti, tak nemůže být provozována, proto jako výchozí zapojení sítě, při kterém je možné, aby mezi rozvodnami tekly tranzitní výkony, bude brána konfigurace 3. Ze zmíněných důvodů bude tedy konfigurace 3 i výchozím stavem pro rozpadovou automatiku v kapitole 12.

## 11 ANALÝZA ZMĚN ÚHLU NAPĚTÍ MEZI ROZVODNAMI SOKOLNICE – ČEBÍN

Kapitola 11 se zabývá analýzou průběhu úhlu napětí v čase a v závislosti na činném a jalovém výkonu. Porovnány jsou rozvodny Sokolnice a Čebín vůči sobě. Úkolem kapitoly je stanovit, kdy jsou úhly největší a kdy je tím pádem největší riziko vzniku vyrovnávacích výkonových rázů při spínání příčných spínačů přípojnic. Tento vyrovnávací výkon způsobuje ohřívání spínacích prvků a zatěžuje vedení, čímž snižuje jeho přenosovou kapacitu.

Při analýze byla použita data z dispečerského řídicího systému RIS a z programu FOTEL. Analyzovaná data jsou z roku 2015 od 1. ledna do 31. prosince. Měření probíhalo nezávisle na konfiguraci vnitřního zapojení analyzované oblasti Brna. Zpracovaná data byla hodinová. Z dispečerského řídicího systému RIS byla získána velikost činných a jalových výkonů přenášených transformátory T401 a T402, zásobujících oblast Brna.

Úhly jsou měřeny na straně 110 kV na přípojnicích v rozvodnách CNT a SO. Měření fázorů napětí probíhá na fázi L1 a měří se fázová hodnota napětí. Program FOTEL měří fázor napětí v přesný časový moment, který je řízený pomocí GPS. V daný moment se na všech místech změní amplituda a fázový posun napětí. Z principu je zřejmé, že jsou kladeny velké nároky na synchronizaci a přesnost času. Systém FOTEL pracuje s přesností na 1  $\mu$ s, čemuž odpovídá přesnost měřeného úhlu  $\pm 0,1^\circ$ .

Dále bylo z dispečerského řídicího systému RIS zjištěno, že které ze tří přípojnic v rozvodnách Čebín a Sokolnice byla analyzovaná oblast napájena. Určení napájecí přípojnice bylo provedeno tak, že bylo zkoumáno, který vypínač u vedení vycházejících z rozvodu Čebín a Sokolnice byl zapnut, a které vypínače byly vypnuty.

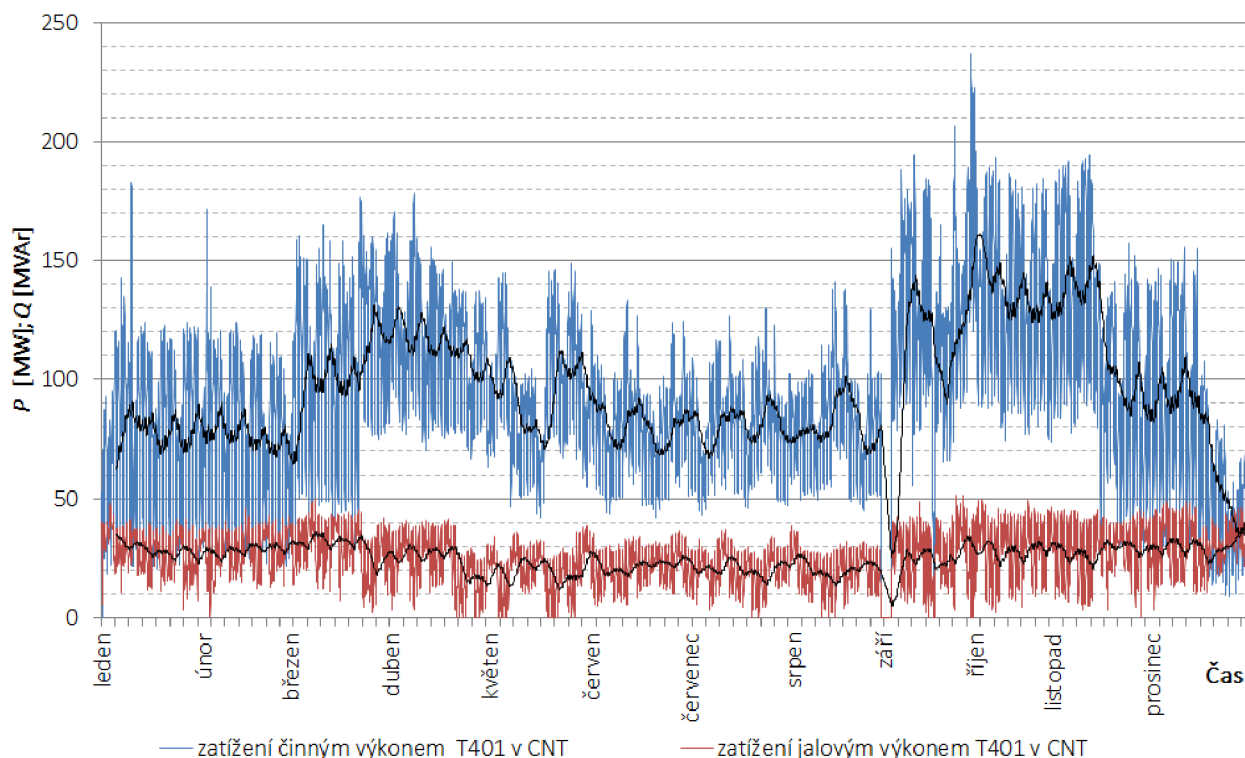
Z programu FOTEL byly získány hodnoty úhlů napětí na jednotlivých přípojnicích v rozvodnách Čebín a Sokolnice. Úhly napětí byly měřeny na přípojnicích a výkony dodávané do sítě byly měřeny na transformátorech T401 a T402 na straně 110 kV.

Fázový posun mezi rozvodnami hraje zásadní roli při jejich spínání. Velikost fázového posunu napětí je ovlivňována konfigurací přenosové a distribuční soustavy, rozložením výroben v síti, jejich výrobou a dále zatížením jednotlivých přenosových a distribučních zařízení. Dle zkušenosti provozovatele sítě jeden stupeň fázového rozdílu při sepnutí odpovídá výkonovému rázu přibližně o velikosti 5 MW. V této kapitole je zkoumáno, ve kterém časovém období jsou úhly napětí největší a jaký vliv na velikost úhlu má velikost přenášeného činného nebo jalového výkonu.

Pro názornost byl do grafů vložen klouzavý průměr (černá křivka), který reprezentuje dlouhodobější trendy ve vývoji změny úhlu. Tím jsou eliminovány extrémy a trend úhlu je v daném grafu lépe pozorovatelný. Tento průměr byl počítán jako průměrná hodnota za předešlé 4 dny (96 hodnot).

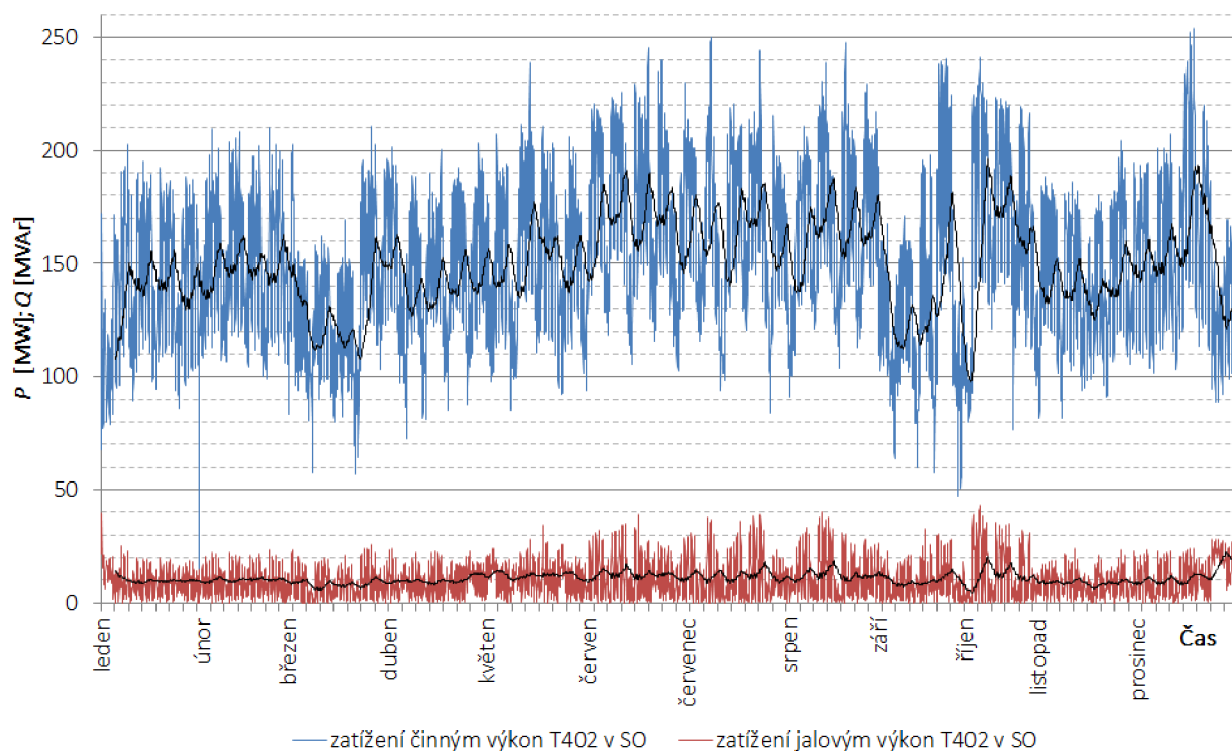
## 11.1 Průběhy činných a jalových výkonů v rozvodnách CNT a SO

Na grafu na Obr. 11.1 vidíme průběhy činného a jalového výkonu během roku 2015, které byly měřeny na transformátoru T401. Mezi výkony je zřejmá jistá analogie – při nárůstu přenosu činného výkonu vzrostl i přenos jalového výkonu. Je zřejmé, že jalový výkon se měnil velmi málo, ale činný výkon se v průběhu roku měnil poměrně výrazně. Průměrný přenášený jalový výkon se pohybuje v rozvodně Čebín kolem 25,5 MVar. Průměrný přenášený činný výkon byl v roce 2015 94,7 MW. Maximální přenos činného výkonu přes transformátor T401 byl v měsících říjen a listopad.



Obr. 11.1 Zatížení transformátoru T401 činným a jalovým výkonem v rozvodně CNT

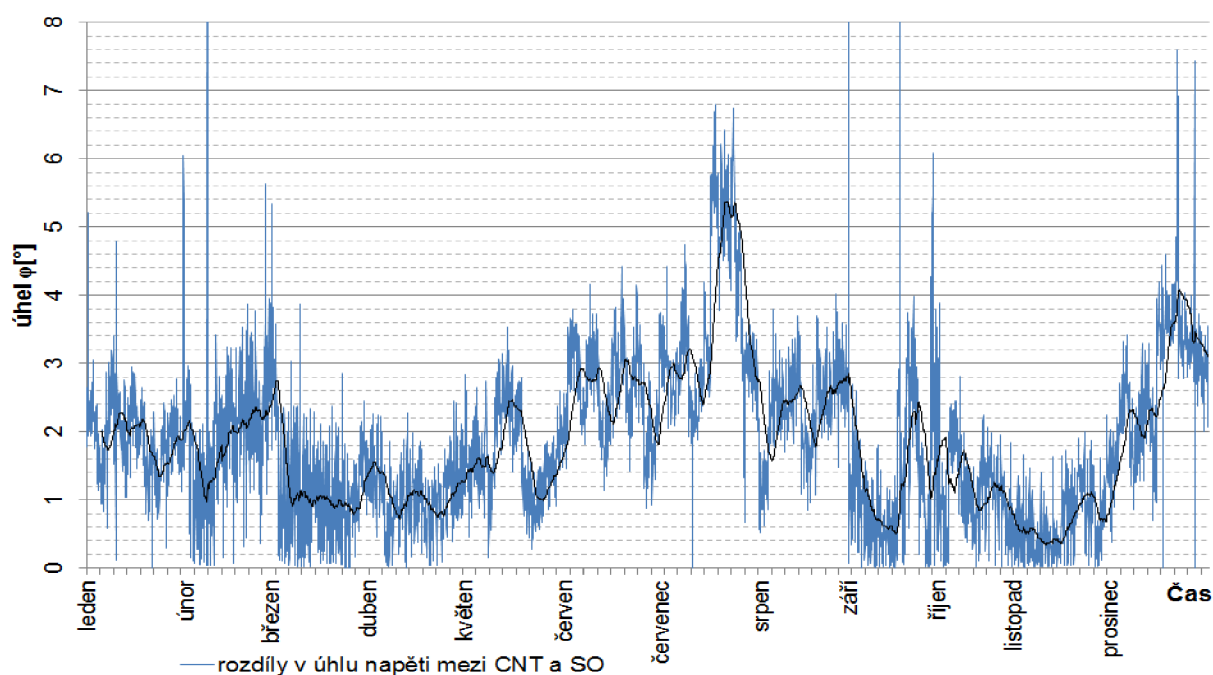
Na grafu na Obr. 11.2 jsou vyobrazeny průběhy činného a jalového výkonu přenášených transformátorem T402 v Sokolnicích během roku 2015. Je patrné, že transformátor T402 je průměrně zatěžován menším jalovým výkonem než transformátor T401 v Čebíně. Průměrně T402 v Sokolnicích přenášel 10,9 MVar a průměrný přenášený činný výkon byl 150 MW. U transformátoru T402 v Sokolnicích nejsou tak patrné sezónní výkyvy dodávaného činného výkonu jako u T401 v Čebíně.



Obr. 11.2 Zatížení transformátoru T402 činným a jalovým výkonem v rozvodně SO

## 11.2 Porovnání úhlů napětí mezi rozvodnami Čebín – Sokolnice

V grafu na Obr. 11.3 je vynesena absolutní rozdíl mezi úhly napětí v rozvodnách v Sokolnicích a Čebíně. Největší rozdíly mezi úhly byly v měsíci červenci a ty přesahují hodnotu  $5^\circ$ . To při sepnutí příčného spínače přípojnic znamená výkonový ráz přibližně 25 MW. Během letních měsíců se celkově úhel napětí pohybuje na hranici  $3^\circ$ . Takže by se mělo při spínání přípojnic dbát zvýšené opatrnosti a pokud možno spínat přípojnice v momentě minimálních rozdílů úhlů.

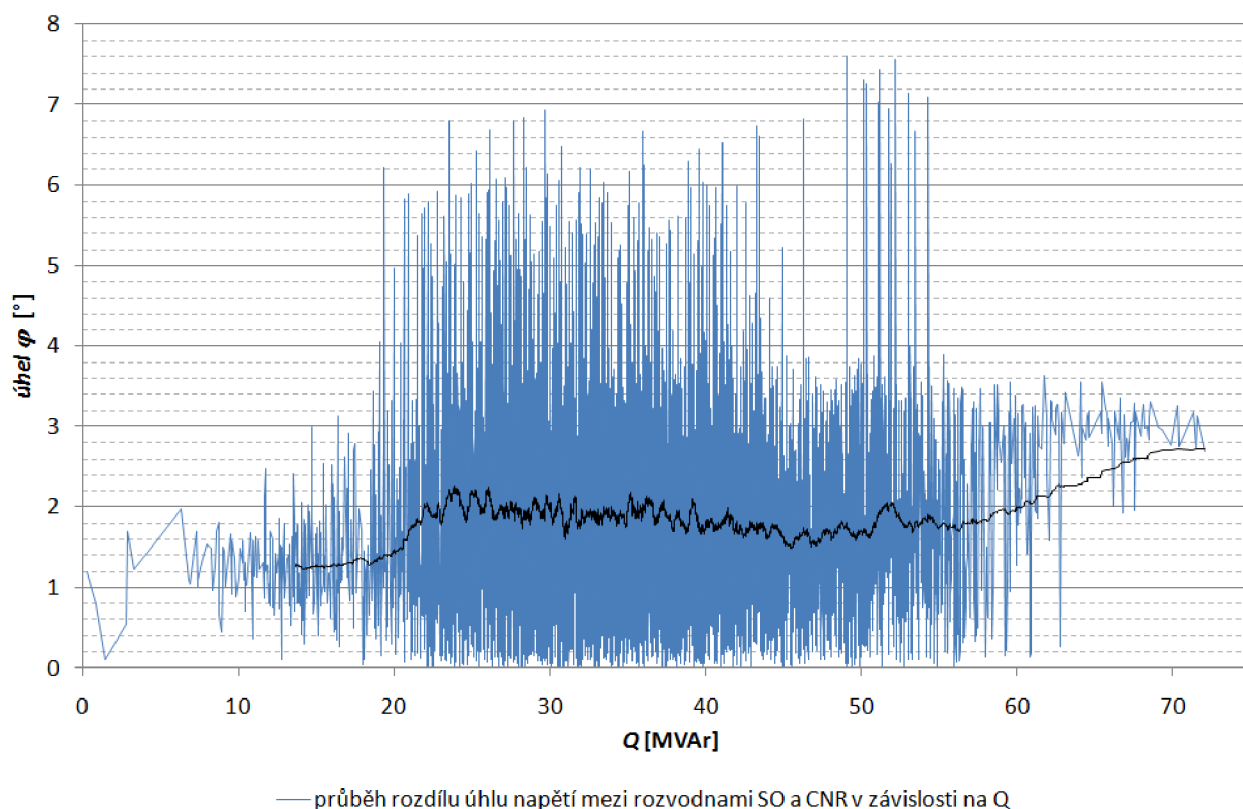


Obr. 11.3 Průběh rozdílu úhlu napětí mezi rozvodnami CNT a SO během roku

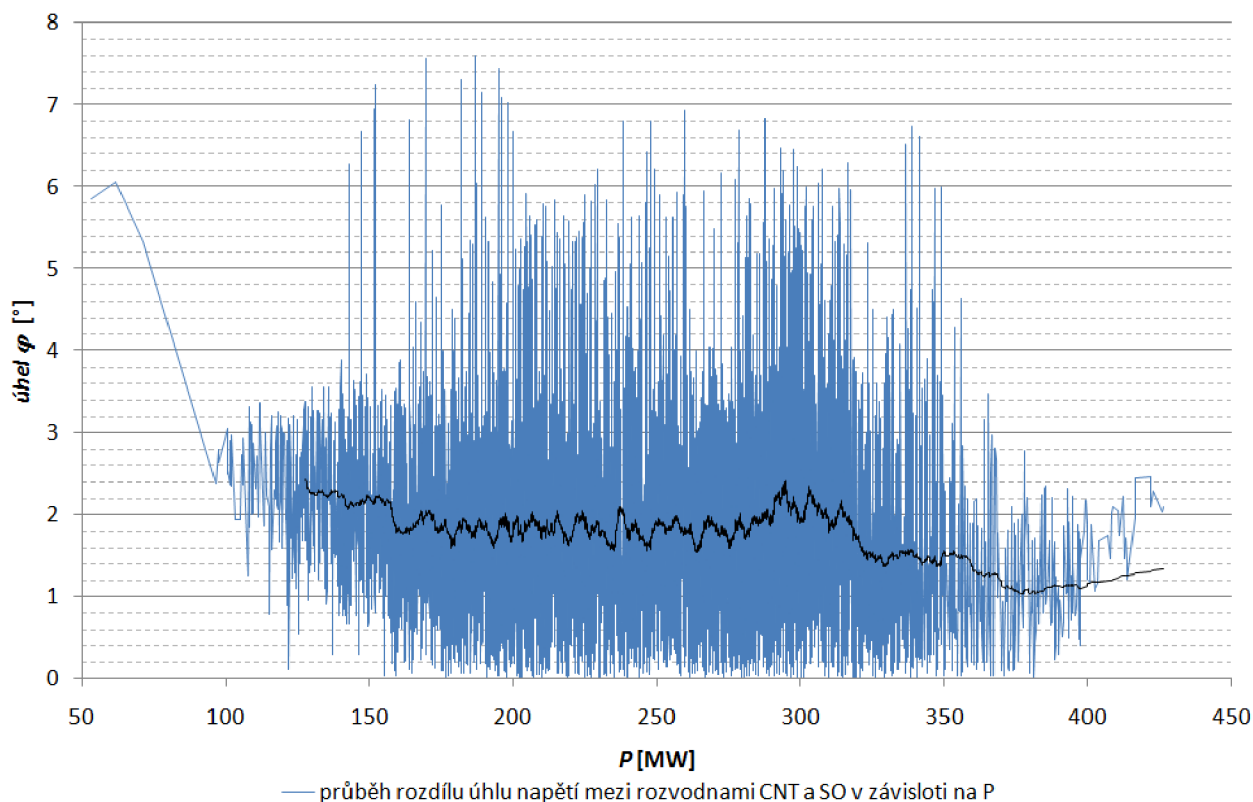
Na grafech na Obr. 11.4 a Obr. 11.5 jsou vyneseny absolutní rozdíly úhlu napětí mezi rozvodnami Sokolnice a Čebín v závislosti na jalovém, respektive na činném výkonu. Jedná se o celkové výkony dodávané do oblasti Brna, tedy o součet výkonů dodávaných transformátorem T401 v Čebíně a výkonů dodávaných transformátorem T402 v Sokolnicích.

Na Obr. 11.4 vidíme závislost rozdílu úhlu na jalovém výkonu. S rostoucím dodávaným jalovým výkonem úhel mírně roste. Většina jalového výkonu je do oblasti Brna dodávána z rozvodny Čebín, kdy zde transformátor T401 přenáší průměrně 25,5 MVar, oproti tomu transformátor T402 v rozvodně Sokolnice přenáší průměrně přibližně dvakrát méně jalového výkonu, a to 10,9 MVar.

Na grafu na Obr. 11.5 je znázorněn průběh rozdílu úhlu na dodávaném činném výkonu. S rostoucím dodávaným činným výkonem se rozdíl úhlu mezi rozvodnami nepatrně zmenšuje. V letních měsících obecně zatížení sítě klesá (patrně především na grafu Obr. 11.1 a Obr. 11.2) a právě v letních měsících je rozdíl mezi úhly napětí mezi rozvodnami největší.



Obr. 11.4 Průběh rozdílu úhlu napětí mezi rozvodnami CNT a SO v závislosti na celkovém jalovém výkonu



Obr. 11.5 Průběh rozdílu úhlu napětí mezi rozvodnami CNT a SO v závislosti na celkovém činném výkonu

Jako nejrizikovější z hlediska spínání příčných spínačů přípojnic byly vyhodnoceny letní měsíce, kdy je rozdíl úhlu napětí mezi rozvodnami nejvyšší. Z průběhu úhlu napětí v závislosti na činném nebo jalovém výkonu nelze vyvodit žádné závěry, poněvadž závislosti nejsou nijak výrazné.

Z hlediska provozovatele DS 110 kV v oblasti Brno, společnosti E.ON, jsou rozdíly úhlu napětí nižší než  $10^\circ$  nekritické a nehrozí při nich velké přetěžování ani působení ochran.



## 12 NAVRŽENÁ ROZPADOVÁ AUTOMATIKA

Navržená rozpadová automatika by měla zabránit přetěžování prvků sítě, především transformátorů T401 a T402 (400/110 kV) a vedení. Zřetel musí být brán především na vedení vycházející přímo z rozveden Čebín a Sokolnice. Jmenovitě se jedná o vedení V514, V515, V537 a V538, která vychází z rozvodny Sokolnice a o vedení V522, V521, V5553 a V5554, která vychází z rozvodny Čebín.

Výchozím stavem pro rozpadovou automatiku bude konfigurace 3, popsána v kap. 8.3, jelikož druhá navržená konfigurace (konfigurace 2) pro paralelní provoz nevyhověla z hlediska zkratových odolností rozveden.

Jako rozpadová místa byla nakonec vybrána pouze vedení V514, V515, V537 a V538 v rozvodně Sokolnice a V521, V522, V5553 a V5554 v rozvodně Čebín. Obdobných konfigurací by bylo možno dosáhnout vypnutím transformátoru T401 nebo T402, ale protože transformátory mohou současně napájet i jiné oblasti, tak budou rozpadovou automatikou vypínány vedení V514, V515, V537 a V538 v Sokolnicích a V521, V522, V5553 a V5554 v Čebíně.

Rozpadovou automatiku je potřebné parametrizovat tak, aby při vzniku nežádoucích přetoků zapůsobila dříve, než vlastní ochrany vedení a transformátorů v dané oblasti. Rozpadová automatika by měla zajistit rozpojení napájecích paralelně provozovaných oblastí při vzniku přetěžování sítě z důvodu přetoků výkonů.

Na vedeních o napěťové úrovni 110 kV používá společnost E.ON jako hlavní ochrany distanční a srovnávací, jako záložní a při přetížení pak ochrany nadproudové.

V tabulkách Tab. 12-1 a Tab. 12-2 jsou uvedeny stávající hodnoty proudu a času, při kterých působí záložní nadproudové ochrany na jednotlivých prvcích sítě. Je zřejmé, že přísnější hodnoty jsou na straně vedení, takže s rozpadovou automatikou je třeba se pohybovat v rozmezí jmenovitého zatížení a působení nadproudových ochran, které jsou instalovány na vedení.

Tab. 12-1 Tabulka jmenovitých proudů vedení a hodnoty nadproudových ochran

Vedení	Jm. zatížení [A]	Nadproudové ochrany	
		Nadproud vyp. [A]	$t_{vyp}$ [s]
Sokolnice			
V514	820	1040	3,7
V515	720	960	3,5
V537	455	900	3,5
V538	455	900	3,5
Čebín			
V521	530	900	3,5
V522	530	900	3,5
V5553	820	1200	3,5
V5554	680	900	3,5

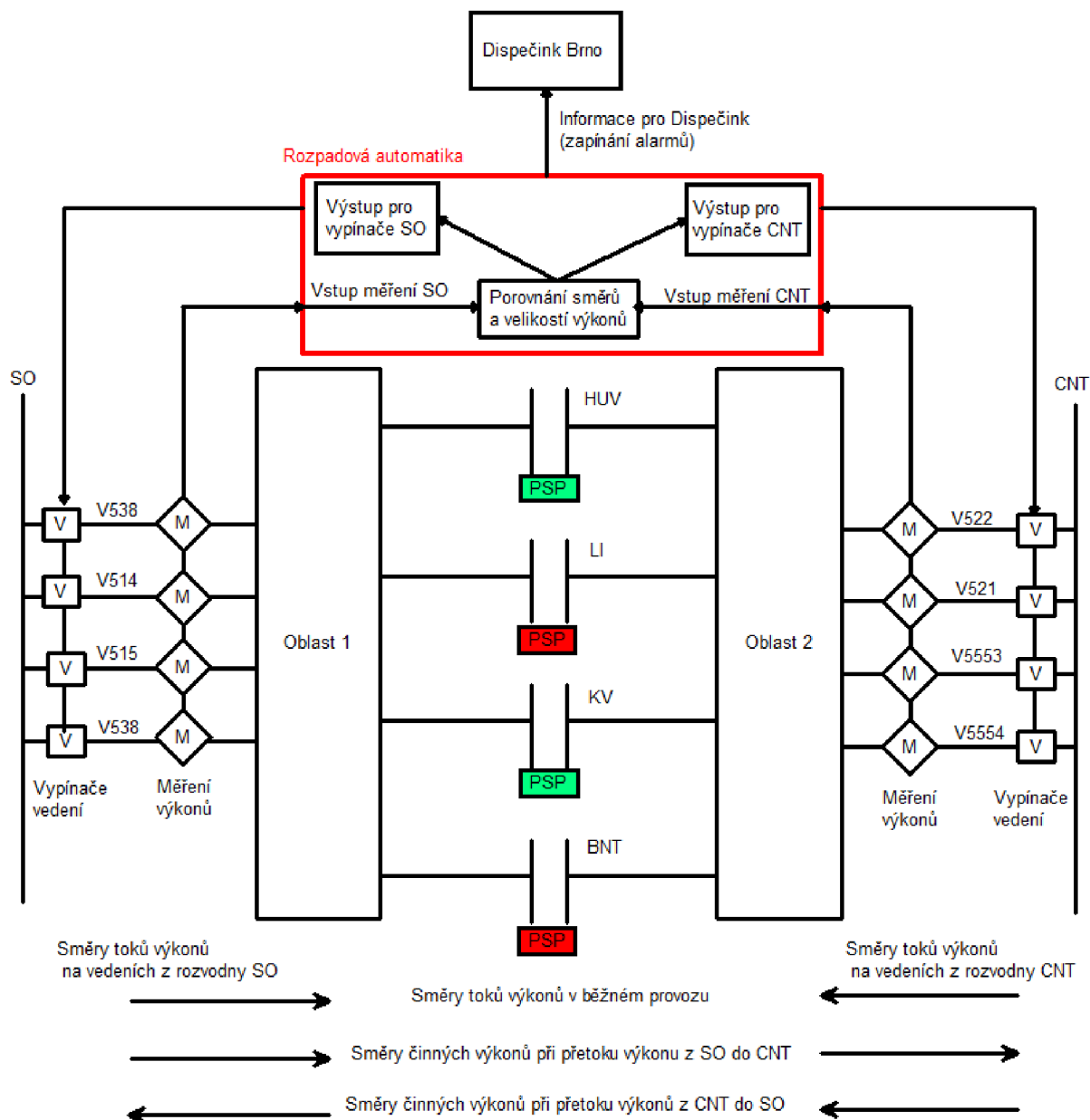
Tab. 12-2 Tabulka nastavení nadproudových ochran na transformátory T401 a T402

Transformátor		Naproud vyp	$t_{vyp}$
		[A]	[s]
T401	CNT	3240	4,7
T402	SO	4200	6



## 12.1 Funkce rozpadové automatiky

Na vedeních V514, V515, V537 a V538 ze Sokolnic a na vedeních V521, V521, V5553 a V5554 z Čebína musí být nainstalovány měřicí přístroje, které budou měřit velikost, ale i směr přenášeného výkonu (proudu). Funkce rozpadové charakteristiky je schematicky znázorněna na Obr. 12.1. **Zelené bloky** s nápisem PSP značí sepnutý příčný spínač přípojnic, **červené bloky** značí vypnutý příčný spínač přípojnic.



Obr. 12.1 Schéma navržení rozpadové automatiky

Při provozu bez poruch činné výkony vtékají do analyzované oblasti, tzn. mají směr, který bude označován jako **z transformátoru**, naopak při tocích tranzitních výkonů poteče činný výkon v jedné z rozveden opačně, ven z analyzované oblasti do přenosové sítě, tento směr bude označován jako **do transformátoru (do přípojnice)**.

Za běžného provozu výkony z obou rozveden směřují do napájené oblasti. To odpovídá směru šipek na Obr. 12.1, popsaném jako „Směry toků výkonů v běžném provozu“. Pokud se některý z výkonů otočí, znamená to, že dochází k přetokům výkonů. Směry výkonů pak

odpovídají směřům výkonů opět znázorněných na Obr. 12.1 popsaných jako „Směry toků výkonů při přetoku výkonů z SO do CNT“ nebo „Směry toků výkonů při přetoku výkonů z CNT do SO“.

Funkce rozpadové automatiky bude mít několik stupňů v závislosti na velikosti přetokového výkonu.

### 12.1.1 První stupeň

Pokud by měřicí přístroje zaznamenaly proud v jedné fázi vedení v rozmezí  $35A > I > 5A$  a činný výkon by tekł směrem do transformátoru T401 nebo T402 (vytěkál by z oblasti), potom by rozpadová automatika vyslala signál na dispečink, že by mohlo docházet k přetoku malých tranzitních výkonů.

Pokud by proud splňoval podmínku  $35A > I > 5A$ , ale jednalo by se o tok jalového výkonu směrem do jednoho z dvojice transformátorů T401 v Čebíně nebo T402 v Sokolnicích, byl by také vyslán signál na dispečink. Dispečer provozu by měl v takovém případě zkontrolovat nastavení regulačních odboček na transformátorech 400/110 kV T401 a T402, protože přetok čistě jalového výkonu může být způsoben rozdílným nastavením regulačních odboček na transformátorech 400/110 kV.

Pokud by vyrovnávací proud vzrostl z důvodu nepříznivé konfigurace v přenosové soustavě, provede dispečer vypnutí příčných spínačů přípojníc HUV, KV a oddělí tím rozvodnu Sokolnice od rozvodny Čebín.

### 12.1.2 Druhý stupeň

Při druhém stupni by již fungovala automatika. Pro odblokování automatiky druhého stupně musí platit  $I > 35A$  a současně musí být v jedné z rozvoden směr činného výkonu na jednom vedení směrem do transformátoru. Novou podmínkou je nadměrné zatěžování jednoho z vedení v Sokolnicích (V514, V515, V537, V538) nebo v Čebíně (V521, V522, V5553, V5554). Podmínky přetěžování a časy vypínání jsou uvedeny v tabulce Tab. 12-3.

#### **Přetok výkonu ze Sokolnic do Čebína**

Je-li v Čebíně na některém z vedení V521, V522, V5553, V5554 zjištěn směr činného výkonu směrem do přípojnice (velikost odpovídajícího proudu je  $I > 35A$ ) a současně v Sokolnicích je některé z vedení přetíženo (V514, V515, V537, V538) automatika vypne vedení v Čebíně, na kterém byl identifikován směr činného výkonu do transformátoru. Pokud se činný výkon se směrem do transformátoru přesune na jiné vedení v rozvodně Čebín, tak také toto bude po splnění podmínek vypnuto. Pokud se činný výkon se směrem do transformátoru bude přelévat z vedení na vedení, budou postupně vypnuta všechna vedení v rozvodně Čebín a oblast Brna bude napájena jen z T402 v Sokolnicích.

Postupné vypínání bylo zvoleno z důvodu postupného zvyšování impedance mezi rozvodnami Sokolnice a Čebín. Díky tomuto zvyšování impedance by mohlo dojít k omezení nežádoucího tranzitního výkonu.

#### **Přetok výkonu z Čebína do Sokolnic**

Postup bude obdobný jako při přetoku výkonu ze Sokolnic do Čebína, ale činný výkon tekoucí směrem do transformátoru bude měřený na vedeních V514, V515, V537 a V538 a přetěžovaná vedení budou V521, V522, V5553 a V5554. Vypínaná vedení by byla tedy V514, V515, V537 a V538. Opět musí platit  $I > 35A$ , současně musí být v jedné z rozvoden směr

činného výkonu na jednom vedení směrem do transformátoru a také musí být splněny podmínky uvedené v Tab. 12-3.

Tab. 12-3 Tabulka podmínek pro rozpadovou automatiku pro druhý stupeň

Podmínka: $I > 35 \text{ A}$ a směr činného výkonu do přípojnice	
Procentní přetěžování vedení	Čas rozpadové automatiky
[%]	[s]
95-105	6
105-115	5
115<	4

### 12.1.3 Třetí stupeň

Třetí stupeň začne působit, pokud proud odpovídající činnému výkonu tekoucí směrem do přípojnice na jakékoliv fázi vývodových vedení u rozvodny Sokolnice nebo Čebín přesáhne hodnotu uvedenou v Tab. 12-4. Za těchto podmínek budou v daném čase vypnuta všechna čtyři vedení u rozvodny, ve které byl naměřen směr činného výkonu směrem do přípojnice s transformátorem. Tím se přeruší vodivé cesty a zamezí se přetoku velkých a náhle vzniklých tranzitních výkonů.

Třetí stupeň rozpadové charakteristiky má za úkol chránit analyzovanou oblast Brna, při náhlé poruše v přenosové síti.

Tab. 12-4 Tabulka podmínek pro rozpadovou automatiku pro třetí stupeň

Velikost I	Čas roz. automatiky
[A]	[s]
200	3
250	2
300	1

Jako opatření proti nadbytečnému působení rozpadové automatiky je navrženo podpěťové blokování (proti působení automatiky při zkratech v DS a PS). Podpěťové blokování by mohlo být voleno  $U_{Blok} < 0,7U_n$  bez časového zpoždění.

Podmínkou pro správnou činnost je kromě funkčnosti samotných zařízení rozpadové automatiky také funkčnost komunikace mezi centrální jednotkou automatiky a rozvodnami CNT a SO.

Navržené hodnoty rozpadové automatiky jsou orientační a byly voleny po konzultaci s pracovníky společnosti E.ON. Pokud by byla rozpadová automatika připravována pro reálný provoz, musely by být její parametry sladěny s ochranami tak, aby byla zachována selektivita. Úkolem diplomové práce bylo zejména navrhnout konfigurace a princip rozpadové automatiky.

## 12.2 Návrh opatření v DS pro paralelní provoz

Prvním navrženým opatřením je zvýšení přenosové kapacity vedení V521 a V522. Tato vedení mají jmenovité hodnoty zatížení shodně 520 A. Při konfiguraci 4 byly zatěžovány nejvíce ze všech a to kolem 80 %. S výhledem do budoucna by se jejich přenosová kapacita mohla zvýšit na 680 A. To by znamenalo nahrazení současného lana AlFe o průřezu 240 mm<sup>2</sup> lanem AlFe o průřezu alespoň 350 mm<sup>2</sup>.

Druhým navrženým opatřením je podrobné sledování ampacity na vedeních. Postačující by bylo zařízení na sledování ampacity nainstalovat na vedení vstupující do rozvodny Sokolnice (V514, V515, V538, V537) a na vedení přímo vstupující do rozvodny Čebín (V522, V521, V5553, V5554). Zmíněné opatření by vedlo k lepšímu využití přenosové kapacity vedení při měnících se povětrnostních podmínkách.

Třetím navrženým opatřením je zvýšení zkratové odolnosti rozvoden BNP, BNC, BNT, LI, SHH, MEY, HU, CML, ZET a ZBB. Všechny rozvodny mají shodně odolnost 3500 MVA. U zmíněných rozvoden by bylo vhodné navýšit zkratovou odolnost na 5000 MVA.

## 13 ZÁVĚR

Hlavním úkolem diplomové práce bylo navrhnout provozuschopné konfigurace sítě 110 kV provozované společností E.ON pro oblast Brna, které by splňovaly podmínky provozu jak z hlediska ustáleného chodu sítě, tak z hlediska zkratových odolností rozveden. Úkolem bylo navrhnout konfigurace pro paralelní napájení oblasti Brna, které je plánováno kvůli zvýšení zajištěnosti dodávky v dané oblasti ze dvou transformátorů, T402 v rozvodně Sokolnice a T401 v rozvodně Čebín. Dále bylo úkolem navrhnout konfigurace sítě tak, aby mezi zmíněnými rozvodnami nebylo vodivé spojení na úrovni 110 kV. Pokud je mezi zmíněnými rozvodnami na úrovni 110 kV vodivé spojení, tak při přetěžování nebo výpadku vedení 423 na napěťové úrovni 400 kV dochází k jevu, kdy síť 110 kV částečně supluje funkci přenosové sítě.

Teoretická část diplomové práce obsahuje teorii potřebnou pro analýzu sítě jak z hlediska výpočtů ustáleného chodu, tak z hlediska zkratových poměrů.

V kapitole 3 je popsán zkrat jako porucha, při níž obvodem protékají násobky jmenovitých proudů. Jsou zde uvedeny také parametry zkratových proudů, které se používají v praxi. V této teoretické kapitole je také nastíněno dimenzování zařízení na účinky zkratových proudů. Popsáno je dělení zkratů a také základní vzorce pro výpočet zkratu. Kapitola vychází z normy ČSN EN 60909.

Kapitola 4 se věnuje popisu výpočtu ustáleného chodu sítě. Uvedeny jsou zjednodušující předpoklady, ke kterým se u výpočtu ustáleného chodu přistupuje. Popsány jsou metody řešení ustáleného chodu jako lineární úlohy i jako nelineární úlohy. Zmíněna je Gauss-Seidlova iterační metoda a podrobně je rozepsána Newtonova iterační metoda.

V kapitole 5 s názvem Přetěžování prvků sítě jsou popsány možnosti přetěžování transformátorů a vedení. Uvedeny jsou příklady výpočtu a monitorování přetížení. U přetěžování vedení je vysvětlen termín ampacita.

Kapitola 6 popisuje současný stav DS v oblasti Brna, blíže definuje napájecí oblast, kterou se při analýze práce zabývá, je zde také uvedeno zjednodušené schéma dané oblasti. Podrobněji je představen problém, který má diplomová práce za úkol řešit.

Na kapitolu 6 navazuje kapitola 7, ve které jsou podrobně popsány rozvodny v oblasti Brna a vyjmenovány vedení v analyzované oblasti a jejich parametry. Popsány jsou také parametry zdrojů a transformátorů v příslušné oblasti.

Analýze ustálených chodů navržených konfigurací sítě se věnuje kapitola 8. Celkem bylo analyzováno 9 možných konfigurací. V hlavní části diplomové práce je popsáno 5 hlavních konfigurací, z nichž dvě jsou analyzovány při paralelním napájení oblasti z transformátorů T401 v Čebíně a T402 v Sokolnicích. Zbylé tři konfigurace se zabývají stavem, kdy mezi rozvodnami Sokolnice a Čebín není přímé vodivé spojení přes DS 110 kV.

V hlavní části diplomové práce jsou analyzovány ty konfigurace, které lze uvažovat pro reálný provoz. V příloze Příloha B jsou uvedeny některé konfigurace DS, ke kterým lze dospět provozními manipulacemi v DS 110 kV po působení rozpadové automatiky.

Všechny analyzované konfigurace vyhověly z hlediska ustáleného chodu sítě. V žádné z rozveden napětí nevybočilo z mezí  $\pm 10\%$  daných normou. Při konfiguraci 5 došlo k přetížení transformátoru T402 v Sokolnicích, ale jen na 104 %, což je povolená hodnota přetížení. Společnost ČEPS dovoluje trvalý provoz transformátorů do přetížení 120 % (viz 6.2). Při

konfiguraci 8 jsou vedení V521 a V522, která vychází z rozvodny Čebín, zatížena na hranici stávající přenosové schopnosti – V521 na 103 % a V522 na 105 %.

V kapitole 9 jsou konfigurace porovnány a vyhodnoceny.

Kapitola 10 se věnuje kontrole zkratových odolností rozveden. Kontrolovány byly konfigurace 1 až 5. V kapitole jsou vypsány jmenovité zkratové odolnosti jednotlivých rozveden. Výpočet byl proveden pro třífázový a jednofázový zkrat. Vypočtené zkratové výkony byly porovnány se jmenovitými zkratovými odolnostmi rozveden. Jedinou nevyhovující konfigurací byla konfigurace 2, při které je oblast napájena z obou transformátorů T401 a T402 a příčné spínače přípojnic jsou zapnuty v rozvodnách HUV, LI, BNT a KV. Tím, že konfigurace 2 nevyhověla na kontrolu zkratových odolností rozveden, nemůže být použita jako výchozí stav pro rozpadovou automatiku a pro základní zapojení analyzovaného paralelního provozu.

Při konfiguraci 2 jsou zkratově nejvíce zatíženými rozvodnami rozvodny BNT, BNP, CML, HUV, LI, SHH, ZBR, ZET a MEY. U zmíněných rozveden by mohlo být provedeno zvýšení zkratových odolností na úroveň 5000 MVA.

Konfigurace, při které je oblast Brna napájena paralelně z obou rozveden Čebín a Sokolnice a vyhověla jak kontrole na ustálený chod, tak kontrole na zkratové odolnosti rozveden je konfigurace 3. Při konfiguraci 3 je oblast napájena z T401 a T402 a příčné spínače přípojnic jsou zapnuty v rozvodnách KV a HUV. Jelikož vyhověla oběma kontrolám, tak je uvažována jako výchozí stav pro rozpadovou automatiku.

V kapitole 11 je provedena analýza změny velikosti úhlu napětí mezi rozvodnami Čebín a Sokolnice. Je pozorována změna úhlu v čase během jednoho roku, dále změna v závislosti na velikosti přenášeného činného a jalového výkonu. Úkolem této kapitoly bylo stanovit, kdy je rozdíl úhlu mezi rozvodnami nejvyšší, jelikož při velkém rozdílu úhlu napětí při spínání příčných spínačů přípojnic vznikají nárazové výkony, které mohou zapříčinit až zapůsobení ochrany. Největší rozdíl napětí byl v letních měsících při nejmenším zatížení sítě činným výkonem.

Poslední kapitola, kap. 12, se zabývá rozpadovou automatikou, která má zabránit přetokům tranzitních výkonů. Je zde navrženo blokové schéma, které má chování rozpadové automatiky přiblížit. Dále jsou popsány tři základní navrhované stupně rozpadové automatiky. Při běžném provozu tečou proudy (činné výkony) vždy směrem z transformátorů do analyzované oblasti. Při přetocích tranzitních výkonů v jedné z rozveden, teče činný výkon směrem do přípojnice s transformátorem 400/110 kV.

V závislosti na velikosti a směru toku činného výkonu, jemu odpovídajícímu proudu a také v závislosti na velikosti přetížení vedení, přes které výkon do oblasti vtéká, má rozpadová automatika navrženy tři stupně. První stupeň je pouze alarm, který dá dispečerovi informaci o vzniku přetoku tranzitního výkonu. Druhý stupeň již pracuje samostatně v závislosti na velikosti zatížení vedení a směru toku činného výkonu a automaticky odděluje paralelně propojené soustavy vypnutím příslušných vedení. Třetí stupeň má v co nejkratším čase zabránit přetokům velkých tranzitních výkonů automatickým vypnutím příslušných vedení s minimálním časovým zpožděním.

V poslední části kapitoly 12 je uveden návrh technických opatření v DS pro zlepšení přenosových schopností analyzované oblasti a pro zvýšení spolehlivosti napájení odběratelů elektrickou energií.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] ČSN EN 60909-0, *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách- Část 0: Výpočet proudů*. obsahuje IEC 60609-0:2002
- [3] KUČERA, Drahoš. *Elektroenergetika I*. 1. vyd. Brno: VUT, 1986.
- [4] Vokál, J. Výpočty zkratů v technické praxi [online]. 2012 [cit. 2015-12-3]. Dostupné z <http://www.powerwiki.cz/wiki/vyuka>
- [5] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. *Distribuce elektrické energie*. První. Brno: Rektorát VUT v Brně, 2002.
- [6] HALUZÍK, Evžen. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1987.
- [7] TOMAN, Petr. *Řízení elektrizačních soustav* [e-Learning VUT]. Brno [cit. 2015-11-09]. Prezentace. VUT FEKT.
- [8] KOLEKTIV AUTORŮ OZE. *Příručka elektrikáře OZE*. První. Letohrad, 2002. Dostupné z [http://www.bqz.sk/download/\\_info/oez\\_prirucka\\_elektrikare\\_web.pdf](http://www.bqz.sk/download/_info/oez_prirucka_elektrikare_web.pdf)
- [9] TENBOHLEN, S., T. STIRL a M. STACH. Assessment of overload capacity of power transformers by on-line monitoring systems. In: *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE* [online]. USA: IEEE, 2001, 1, s. 329-334 [cit. 2016-02-25]. DOI: 10.1109/PESW.2001.917057. ISBN 0-7803-6672-7.
- [10] IEC 60354: *Loading guide for oil-immersed power transformers*. Druhé. Ženeva, 1992.
- [11] ORSÁGOVÁ, J. *Rozvodná zařízení*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [12] HUANG Y., GUO C., WEN Y., WANG Y., ZHANG X. AND ZHANG J. *Overload strategy of transmission and transformation equipment for safety operation. PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE*, National Harbor, MD, 2014, pp. 1-5. DOI: 10.1109/PESGM.2014.6939451
- [13] ALALI D., GRIFFITHS H., CIPCIGAN L. M. AND. HADDAD A. *Assessment of Line Overloading Risk for Transmission Networks. AC and DC Power Transmission, 11th IET International Conference on*, Birmingham, 2015, pp. 1-6. DOI: 10.1049/cp.2015.0040
- [14] HALL J. F. AND DEB A. K. *Prediction of overhead transmission line ampacity by stochastic and deterministic models*. in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 2, pp. 789-800, Apr 1988. DOI: 10.1109/61.4319
- [15] POPELKA, A., Václav BÖHM, Daniel JUŘÍK a Petr MARVAN. *Ampacita vedení a možnost jejího on-line vyhodnocení* [online]. Poděbrady, 2010, 9 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.ais-brno.cz/clanky/Ampacita.pdf?lang=cz>
- [16] CLOET E. AND LILIE J. L. *Uprating Transmission Lines through the use of an innovative real-time monitoring system. Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance (ESMO), 2011 IEEE PES 12th International Conference on*, Providence, RI, 2011, pp. 1-6. DOI: 10.1109/TDCLLM.2011.6042218





## PŘÍLOHA B

### Oblast Brna napájena ze Sokolnic T402 – konfigurace 6

V rozvodně Čebín je vypnut transformátor T401, to znamená, že celé Brno je napájeno pouze z rozvodny Sokolnice transformátorem T402. Dále jsou sepnuty příčné spínače přípojnic v rozvodnách Husovice. Komárov, Líšeň a Teplárna Brno mají sepnuty příčné spínače přípojnic. U této konfigurace se zaměříme především na vedení vycházející z rozvodny Sokolnice, která by mohla být přetížená a také na transformátor T402, který by mohl zatížen nad míru.

V tabulce Tab. 0-1 jsou zobrazeny napěťové poměry v rozvodnách.

Tab. 0-1 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 6

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
CNT	117,43	-25,03	SLB	117,52	-23,83
HUV	117,28	-24,76	ZET	117,30	-24,63
MEY	117,23	-25,38	KV	117,45	-24,45
VMA	117,28	-24,75	BOB	117,33	-24,88
ZBB	117,37	-24,61	MOB	117,34	-24,68
CML	117,56	-24,43	<b>MED</b>	<b>118,01</b>	<b>-23,64</b>
BNP	117,49	-24,50	BNC	117,36	-24,56
BNT	117,44	-24,53	SHH	117,43	-24,46
LI	117,32	-24,61	<b>SO</b>	<b>118,29</b>	<b>-22,76</b>
MQ	117,48	-24,18	KPO	117,27	-24,76
AD	117,29	-24,91			

Tabulka Tab. 0-2 nám ukazuje zatížení vedení při konfiguraci 6. Zaměříme se především na vedení vycházející z rozvodny Sokolnice, v tabulce jsou vyznačena červeným písmem. Jedná se o vedení V514, V538, V515 a V537.

Tab. 0-2 Tabulka zatížení a přenášených výkonů na vedení pro konfiguraci 6

Označení	Propojené rozvodny	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
V514	SO-KV	74,69	-124,49	-9,75	123,84	6,39
V515	MED-SO	46,98	68,13	-1,69	-68,31	0,97
V5553	CNT-MEY	15,09	-13,68	-1,10	13,66	1,86
V513	KV-BNT	12,80	-11,30	3,55	11,30	-3,41
V5549	MED-KV	44,32	-64,29	2,60	63,94	-3,19
V537	SO-SLB	44,10	-40,65	0,88	40,38	-0,99
V5053	CML-BNP	32,63	-65,82	-7,26	65,79	9,02
V510	KV-BNT	12,80	-11,30	3,55	11,30	-3,41
V522	CNT-HUV	8,91	6,56	-4,44	-6,57	4,83
V521	CNT-HUV	9,60	7,22	-4,29	-7,24	4,97
V5545	LI-BNC	10,90	9,90	1,09	-9,91	-0,92
V5554	CNT-BOB	3,95	2,73	-0,88	-2,74	2,36
V5543	KV-BNC	12,48	-17,01	-2,74	17,00	2,91
V538	SO-MOQ	34,27	-31,41	3,38	31,12	-3,12
V5051	BNP-BNT	17,97	-35,97	-4,75	35,96	6,60
V5557	MOB-KV	33,27	45,97	-0,56	-46,02	0,53
V5556	BOB-KV	39,25	35,73	-3,01	-35,79	3,11
V5560	LI-ZET	11,20	-9,99	-2,22	9,99	2,26
V5541	HUV-ZBB	21,55	19,69	0,40	-19,71	-0,28
V5542	ZBB-BNT	22,17	20,25	1,03	-20,26	-0,96
V528	HUV-MQ	24,68	22,04	-4,26	-22,12	4,62
V5561	SLB-LI	24,11	21,41	-4,66	-21,49	5,06
V539	HUV-LI	15,30	13,60	-3,03	-13,61	3,23
V5544	KV-LI	16,91	-15,30	-2,04	15,29	2,33
V5059	SHH-KV	4,29	7,76	3,98	-7,76	-2,06
V5055	CML-MEY	3,84	0,00	3,51	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,45	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5532	HUV-KPO	2,45	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5547	VMA-HUV	1,33	-1,16	0,38	1,16	-0,29
V5558	MEY-MOB	18,74	25,55	-3,33	-25,62	3,84
V5548	HUV-VMA	0,16	0,03	-0,05	-0,03	0,14

Tab. 0-3 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 6

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
T402	SO	99,13	-347,63	-44,23	346,89	6,76
T401	CNT	x	x	x	x	x

Z tabulky Tab. 0-1 vyplývá, že napěťové poměry v rozvodnách při této konfiguraci jsou v limitech daných normou. V tabulce Tab. 0-2 je vidět, že maximálně zatíženým vedením je V514 (na 75 %), což je hodnota přípustná. Z tabulky Tab. 0-3 je zřejmé, že transformátor T402 je schopen zásobit oblast Brna bez toho aniž by došlo k jeho přetížení.

## Oblast Brna napájená ze Sokolnic T402 – konfigurace 7

Konfigurace 7 se liší od konfigurace 6 v tom, že není odpojen transformátor T401 v Čebíně, ale jsou odpojena vedení vstupující do rozvodny Čebín. To jsou vedení V522, V521, V5553 a V5554.

Výsledky jsou uvedeny v tabulkách Tab. 0-4 Tab. 0-5 Tab. 0-6. Z výsledků je jasné, že konfigurace 7 je vhodná pro provoz.

Tab. 0-4 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 7

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
CNT	x	x	SLB	117,06	-23,78
HUV	116,71	-24,60	ZET	116,75	-24,55
MEY	116,41	-25,78	KV	117,55	-23,60
VMA	116,71	-24,60	BOB	116,78	-24,81
ZBB	116,82	-24,51	MOB	116,76	-24,71
CML	117,02	-24,36	MED	117,55	-23,60
BNP	116,94	-24,43	BNC	116,81	-24,49
BNT	116,89	-24,46	SHH	116,90	-24,41
LI	116,77	-24,53	SO	117,90	-22,72
MQ	116,98	-24,07	KPO	116,69	-24,61
AD	116,66	-24,65			

Tab. 0-5 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 7

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
T402	SO	98,44	-344,78	-55,26	344,06	18,05
T401	CNT	x	x	x	x	x

Tab. 0-6 Zatížení a přenášené výkony na vedeních při konfiguraci 7

Označení	Propojené rozvodny	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
V514	SO-KV	74,09	-123,61	-14,97	122,97	11,61
V515	MED-SO	51,11	67,95	1,11	-68,13	-1,84
V5553	CNT-MEY	0,92	0,00	0,00	0,00	0,84
V513	KV-BNT	9,02	-8,10	1,88	8,09	-1,73
V5549	MED-KV	44,21	-64,11	-0,21	63,76	-0,39
V537	SO-SLB	43,72	-40,17	-0,54	39,91	0,45
V5053	CML-BNP	32,78	-65,82	-7,20	65,79	8,94
V510	KV-BNT	9,02	-8,10	1,88	8,09	-1,73
V522	CNT-HUV	0,45	0,00	0,00	0,00	0,41
V521	CNT-HUV	0,78	0,00	0,00	0,00	0,71
V5545	LI-BNC	8,25	7,21	2,11	-7,21	-1,94
V5554	CNT-BOB	1,61	0,00	0,00	0,00	1,47
V5543	KV-BNC	10,78	-14,31	-3,76	14,31	3,93
V538	SO-MOQ	32,81	-30,11	1,64	29,84	-1,32
V5051	BNP-BNT	18,05	-35,97	-4,66	35,96	6,49
V5557	MOB-KV	43,44	59,73	0,92	-59,80	-1,09
V5556	BOB-KV	36,35	33,00	-2,11	-33,05	2,24
V5560	LI-ZET	11,25	-9,99	-2,22	9,99	2,26
V5541	HUV-ZBB	15,16	13,30	3,66	-13,31	-3,52
V5542	ZBB-BNT	15,92	13,85	4,27	-13,85	-4,18
V528	HUV-MQ	23,07	20,77	-2,44	-20,84	2,83
V5561	SLB-LI	23,38	20,94	-3,23	-21,02	3,64
V539	HUV-LI	8,22	7,45	0,58	-7,46	-0,36
V5544	KV-LI	14,04	-12,31	-3,17	12,30	3,47
V5059	SHH-KV	4,31	7,76	3,98	-7,76	-2,08
V5055	CML-MEY	3,82	0,00	3,48	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,46	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5532	HUV-KPO	2,46	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5547	VMA-HUV	1,34	-1,16	0,38	1,16	-0,29
V5558	MEY-MOB	28,69	39,22	-2,29	-39,38	2,37
V5548	HUV-VMA	0,16	0,03	-0,05	-0,03	0,14

## Oblast Brna napájená z Čebína T401 – konfigurace 8

Při této konfiguraci byl vypnut transformátor T402 v rozvodně v Sokolnicích. Analyzovaná oblast je napájena pouze transformátorem T402 v Čebíně. Opět jsou sepnuty příčné spínače přípojnic v rozvodnách Husovice, Komárov, Líšeň a Teplárna Brno.

Tab. 0-7 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 8

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
<b>CNT</b>	116,72	-22,40	SLB	113,52	-26,74
HUV	114,62	-25,36	ZET	114,05	-26,08
MEY	115,36	-24,73	KV	114,08	-26,14
VMA	114,62	-25,36	BOB	114,50	-25,70
ZBB	114,38	-25,75	MOB	114,22	-26,00
CML	114,38	-25,87	MED	113,79	-26,47
BNP	114,31	-25,94	BNC	114,07	-26,06
BNT	114,26	-25,98	SHH	114,07	-26,15
LI	114,07	-26,06	SO	113,67	-26,77
MQ	113,67	-26,77	KPO	114,61	-25,37
AD	115,42	-24,14			

Z tabulky Tab. 0-7 vidíme, že v žádné rozvodně není překročena horní ani dolní hranice pro napětí.

V tabulce Tab. 0-9 jsou červeně vyznačena vedení vycházející z rozvodny Čebín, která nyní energeticky zásobuje celé Brno. Vedení V522 a V521 jsou při této konfiguraci zatížena nad 100 %. Vedení V5553 spojující Čebín a Medlánky je zatíženo na 97,74 %. Je to stav na hranici provozuschopnosti.

Tab. 0-8 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 8

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
T402	SO	x	x	x	x	x
<b>T401</b>	CNT	100,37	-351,11	-62,27	350,52	23,29

Transformátor T401 je zatížený na 100,37 %, v tomto stavu lze transformátor provozovat, jak je uvedeno v Tab. 6-2.

Tab. 0-9 Zatížení a přenášený výkon na vedeních při konfiguraci 8

Označení	Propojené rozvodny	I <sub>zat</sub>	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	Q <sub>2</sub>
		[%]	[MW]	[MVA <sub>r</sub> ]	[MW]	[MVA <sub>r</sub> ]
V514	SO-KV	26,58	44,13	6,21	-44,21	-6,38
V515	MED-SO	13,12	-21,79	-0,34	21,77	0,52
V5553	CNT-MEY	97,74	-88,08	-11,48	87,45	8,63
V513	KV-BNT	27,10	24,19	2,97	-24,21	-2,89
V5549	MED-KV	17,67	25,62	1,24	-25,68	-1,11
V537	SO-SLB	3,47	0,26	-2,54	-0,26	3,06
V5053	CML-BNP	33,51	-65,82	-6,90	65,79	8,55
V510	KV-BNT	27,10	24,19	2,97	-24,21	-2,89
V522	CNT-HUV	105,24	-95,53	-6,04	94,64	3,55
V521	CNT-HUV	103,14	-93,63	-5,82	92,13	1,65
V5545	LI-BNC	10,59	-9,39	0,66	9,39	-0,50
V5554	CNT-BOB	78,53	-70,45	-10,65	69,64	7,88
V5543	KV-BNC	2,54	2,29	-2,33	-2,29	2,52
V538	SO-MOQ	18,12	15,96	-0,86	-16,04	1,60
V5051	BNP-BNT	18,41	-35,96	-4,22	35,95	5,96
V5557	MOB-KV	21,10	-27,63	-6,35	27,61	6,43
V5556	BOB-KV	42,23	-36,64	-8,46	36,57	8,50
V5560	LI-ZET	11,52	-9,99	-2,21	9,99	2,26
V5541	HUV-ZBB	57,62	-51,48	0,15	51,37	-0,34
V5542	ZBB-BNT	57,03	-50,83	1,09	50,77	-1,19
V528	HUV-MQ	28,15	-25,14	0,36	25,04	-0,09
V5561	SLB-LI	21,65	-19,20	-0,65	19,13	1,05
V539	HUV-LI	76,13	-68,01	-0,69	67,69	0,08
V5544	KV-LI	7,21	6,11	-1,62	-6,12	1,92
V5059	SHH-KV	4,42	7,76	4,00	-7,76	-2,19
V5055	CML-MEY	3,73	0,00	3,33	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,51	-2,17	-0,44	2,17	0,53
V5532	HUV-KPO	2,51	-2,17	-0,44	2,17	0,53
V5547	VMA-HUV	1,36	-1,16	0,38	1,16	-0,29
V5558	MEY-MOB	36,38	-48,24	-10,05	47,98	9,67
V5548	HUV-VMA	0,16	0,03	-0,05	-0,03	0,14

Při konfiguraci 8 jsou některé z prvků přetíženy, ale přetížení jsou tak malá, že je možno konfiguraci 8 provozovat.

## Oblast Brna napájená z Čebína T401 – konfigurace 9

Při konfiguraci 9 bude Brno napájeno z Čebína transformátorem T401, ale v tomto případě budou odpojená vedení V515, V514, V537 a V538. Tímto opatřením bude zajištěno, že Brno bude napájeno z jedné rozvodny, ale zároveň v provozu zůstane transformátor T401 a bude schopný dodávat energii do rozvodů Bučovice a Oslavany, které jsou pomocí vedení V512 a V518 propojeny s rozvodnou Sokolnice. Mělo by dojít k odlehčení zátěže vedením V522, V521 V5553 a V5554 a také transformátor T402 by neměl být tak zatížen.

Tab. 0-10 Napěťové poměry v rozvodnách při konfiguraci 9

Zkratka	U	$\delta$	Zkratka	U	$\delta$
	[kV]	[°]		[kV]	[°]
CNT	117,77	-20,67	SLB	115,18	-23,95
HUV	116,30	-22,81	ZET	115,87	-23,36
MEY	116,80	-22,49	KV	115,97	-23,32
VMA	116,30	-22,80	BOB	116,23	-23,10
ZBB	116,16	-23,07	MOB	116,04	-23,27
CML	116,22	-23,11	MED	115,92	-23,37
BNP	116,14	-23,19	BNC	115,90	-23,35
BNT	116,09	-23,22	SHH	115,96	-23,33
LI	115,89	-23,33	SO	119,19	-18,04
MQ	116,11	-23,03	KPO	116,29	-22,82
AD	116,85	-21,94			

Tab. 0-11 Zatížení a přenášený výkon na vedení při konfiguraci 9

Označení	Propojené rozvodny	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
V514	SO-KV	0,37	0,00	0,00	0,00	0,36
V515	MED-SO	0,35	0,00	0,31	0,00	0,00
V5553	CNT-MEY	77,00	-70,27	-6,86	69,88	5,43
V513	KV-BNT	17,75	16,00	2,66	-16,01	-2,54
V5549	MED-KV	4,30	3,84	0,59	-3,84	-0,30
V537	SO-SLB	0,61	0,00	0,00	0,00	0,54
V5053	CML-BNP	33,00	-65,82	-7,11	65,79	8,82
V510	KV-BNT	17,75	16,00	2,66	-16,01	-2,54
V522	CNT-HUV	76,95	-70,56	-2,86	70,09	1,72
V521	CNT-HUV	75,21	-68,96	-2,69	68,17	0,82
V5545	LI-BNC	3,20	-2,19	1,89	2,19	-1,72
V5554	CNT-BOB	58,26	-52,95	-6,23	52,50	5,39
V5543	KV-BNC	4,51	-4,91	-3,52	4,91	3,72
V538	SO-MOQ	1,10	0,00	0,00	0,00	0,99
V5051	BNP-BNT	18,16	-35,97	-4,53	35,95	6,33
V5557	MOB-KV	8,05	-10,21	-3,93	10,21	4,07
V5556	BOB-KV	22,65	-19,50	-6,01	19,48	6,28
V5560	LI-ZET	11,34	-9,99	-2,21	9,99	2,26
V5541	HUV-ZBB	38,63	-34,98	1,63	34,93	-1,62
V5542	ZBB-BNT	38,07	-34,39	2,37	34,36	-2,36
V528	HUV-MQ	9,96	-9,01	0,01	9,00	0,51
V5561	SLB-LI	21,38	-18,94	-3,09	18,87	3,52
V539	HUV-LI	57,83	-52,42	-0,19	52,23	-0,06
V5544	KV-LI	4,17	-1,88	-2,94	1,88	3,26
V5059	SHH-KV	4,35	7,76	3,99	-7,76	-2,12
V5055	CML-MEY	3,79	0,00	3,43	0,00	0,00
V5531	HUV-KPO	2,47	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5532	HUV-KPO	2,47	-2,17	-0,44	2,17	0,54
V5547	VMA-HUV	1,34	-1,16	0,38	1,16	-0,29
V5558	MEY-MOB	22,98	-30,67	-6,89	30,56	7,23
V5548	HUV-VMA	0,16	0,03	-0,05	-0,03	0,14



Tab. 0-12 Zatížení transformátorů T401 a T402 při konfiguraci 9

Označení	Rozvodna	$I_{zat}$	$P_1$	$Q_1$	$P_2$	$Q_2$
		[%]	[MW]	[MVAr]	[MW]	[MVAr]
T402	SO	23,44	-82,19	-5,88	82,02	2,06
T401	CNT	75,91	-265,95	-30,03	265,57	7,93

Tabulka Tab. 0-10 ukazuje, že všechny rozvodny jsou napětově v pořádku. Žádné vedení při této konfiguraci není přetíženo. Transformátory jsou také v pořádku. Z toho vyplývá, že konfigurace 9 je vhodná pro provoz.

## PŘÍLOHA C

Příloha C je přiložené CD obsahující originální a zpracovaná data získaná z dispečerského řídicího systému RIS a z programu na měření úhlů FOTEL.