



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110 KV E.ON NAPÁJENÉ Z ROZVODNY 110 KV OTROKOVICE V ROCE 2012

STABILIZED OPERATION AND SHORT-CIRCUIT CONDITION WITHIN E.ON 110 KV POWER NETWORK SUPPLIED FROM OTROKOVICE 110 KV SWITCHING STATION, DURING THE PERIOD OF 2012

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR KUBA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Petr Kuba

ID: 98506

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice v roce 2012

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Výpočet ustáleného chodu sítí vvn a zvn.
2. Výpočet zkratových poměrů.
3. Výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice pro dvě varianty zapojení transformátorů 400/110 kV v transformovně Otrokovice: můstkový provoz dvou a tři transformátorů.
4. Výpočet zkratových poměrů při jednopólovém a třípólovém zkratu v síti 110 kV pro dvě varianty zapojení transformátorů 400/110 kV v transformovně Otrokovice.
5. Vyhodnocení výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV pro dvě varianty zapojení transformátorů 400/110 kV v transformovně Otrokovice.
6. Návrh provozních a technických opatření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

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

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

KUBA, Petr. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice*. Brno, 2011. 81 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) 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.

.....

Za účinnou odbornou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování této diplomové práce bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

**Ustálený chod a zkratové poměry
v síti 110 kV E.ON napájené
z rozvodny 110 kV Otrokovice v roce
2012**

Bc. Petr Kuba

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

**Stabilized operation and short-circuit
conditions within E.ON 110 kV power
network supplied from Otrokovice
110 kV switching station, during the
period of 2012**

by

Bc. Petr Kuba

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2011

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV E.ON, napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice. Rozvodna Otrokovice zajišťuje transformaci z nadřazené soustavy 400 kV na soustavu 110 kV prostřednictvím tří transformátorů. V rámci zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie a zlepšení ekonomiky provozu se uvažuje o přechodu z můstkového provozu dvou transformátorů na můstkový provoz tří transformátorů. To však s sebou přináší výrazné zhoršení zkratových poměrů v síti 110 kV. Úkolem této práce je vyhodnotit a porovnat obě varianty provozu z hlediska ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV při jednopólovém a třípólovém zkratu a následně provést návrh provozních a technických opatření.

V úvodu je popsána elektrizační soustava a její části. Teoretická část práce rozebírá postupy při řešení ustáleného chodu a zkratových poměrů dlouhých vedení. Praktická část práce se zabývá aplikací poznatků na danou síť.

V závěru jsou shrnuty nejpodstatnější informace a výsledky vyhodnocení obou posuzovaných variant.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Ustálený chod, zkratové poměry, přenosová soustava, jednofázový zkrat; rozvodna; elektrická energie; transformátor.

ABSTRACT

This thesis deals with steady running and short-circuit conditions in the 110 kV network, E. ON, fed from 110 kV Otrokovice. Substation Otrokovice ensures system transformation from 400 kV to 110 kV system through three transformers. In order to increase reliability of power supply and improved economy is considered to bridge the transition from the operation of two transformers in bridge operations of the three transformers. However, this brings with it significant worsening of short-circuit conditions in the 110 kV network. The task of this work is to evaluate and compare the two variants of operation in terms of steady running and short-circuit conditions in the network at 110 kV and then implement operational and technical measures.

The introduction describes the electricity system and its parts.

The theoretical part of the paper discusses ways of dealing with steady running and short circuit conditions of long lines. Practical part will deal with applications of knowledge on the network.

The conclusion summarizes the most relevant information and the results assessed both variants.

KEY WORDS:

Steady operation; short-circuit conditions; the transmission system; line to earth fault; substation; electrical energy; transformer.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	14
SEZNAM SYMBOLŮ.....	16
SEZNAM ZKRATEK.....	19
1 ÚVOD.....	20
2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÝCH METOD ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY.....	21
2.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTÍ VVN A ZVN.....	21
2.1.1 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO LINEÁRNÍ ÚLOHA	22
2.1.2 ELIMINACE BILANČNÍHO UZLU	24
2.1.3 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU JAKO NELINEÁRNÍ ÚLOHA	25
2.1.4 VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU NEWTONOVOU ITERAČNÍ METODOU	27
2.2 VÝPOČET PŘECHODNÝCH JEVŮ V ES	33
2.2.1 ZKRATY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	33
2.2.2 ČASOVÝ PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU	35
2.2.3 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY ZKRATOVÉHO PROUDU	38
2.2.4 ZKRAT V JEDNODUCHÉ SOUSTAVĚ PŘI CHODU NAPRÁZDNO	40
2.2.5 TROJFÁZOVÝ ZKRAT	42
2.2.6 JEDNOFÁZOVÝ ZKRAT.....	43
3 CÍLE PRÁCE	45
4 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO PROVOZU DS.....	46
5 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO PROVOZU DS 110 KV UO OTROKOVICE.....	48
5.1 POPIS DS 110 KV UO OTROKOVICE.....	48
5.2 POPIS ROZVODEN V UO OTROKOVICE	52
6 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU DVOU TRANSFORMÁTORŮ.....	57
6.1 USTÁLENÝ CHOD DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU DVOU TRANSFORMÁTORŮ.....	57
6.1.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU DVOU TRANSFORMÁTORŮ	57
6.1.2 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ A VEDENÍ V DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU DVOU TRANSFORMÁTORŮ	59
6.2 ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU DVOU TRANSFORMÁTORŮ.....	62
7 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	64
7.1 USTÁLENÝ CHOD DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	64
7.1.1 NAPĚŤOVÉ POMĚRY DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	64

7.1.2 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ A VEDENÍ V DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	65
7.2 ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ	68
8 VYHODNOCENÍ USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V DS 110 KV UO OTROKOVICE PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ	70
9 MIMOŘÁDNÉ PROVOZNÍ STAVY V DS 110 KV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	71
9.1 NAPÁJENÍ OKRUHU „S POMOCÍ HODONÍNA“	71
9.2 NAPÁJENÍ OKRUHU „BEZ POMOCI HODONÍNA“.....	75
10 NÁVRH PROVOZNÍCH A TECHNICKÝCH OPATŘENÍ	78
11 ZÁVĚR.....	79
POUŽITÁ LITERATURA	80
PŘÍLOHY	81

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Náhrada prvků sítě podélnými a příčnými admitancemi	23
Obr. 2-2 Diagram napětí a proudu v uzlu se zdrojem	25
Obr. 2-3 Náhrada prvků sítě π článkem	26
Obr. 2-4 Jednoduchý přenos s uvážením pouze podélné reaktance vedení	32
Obr. 2-5 Napěťové poměry při změně činného odběru P v uzlu j při stálém jalovém odběru Q...32	
Obr. 2-6 Napěťové poměry při změně jalového odběru Q v uzlu j při stálém činném odběru P...32	
Obr. 2-7 Druhy zkratu	34
Obr. 2-8 Průběh souměrného zkratového proudu i_{ks}	36
Obr. 2-9 Vznik stejnosměrné složky i_{ka} a průběh souměrného i_{ks} a nesouměrného i_{kns} zkratového proudu.....	38
Obr. 2-10 Grafické zobrazení souměrných složek	41
Obr. 2-11 Trojfázový zemní zkrat.....	43
Obr. 2-12 Jednofázový zkrat	43
Obr. 4-1 Rozdělení území jednotlivých provozovatelů distribučních soustav.....	46
Obr. 5-1 Schéma distribuční soustavy 110 kV E.ON Distribuce, a.s., můstkový provoz 2 transformátorů	49
Obr. 7-1 Schéma distribuční soustavy 110 kV E.ON Distribuce, a.s., můstkový provoz 3 transformátorů	67
Obr. 9-1 Schéma distribuční soustavy 110 kV E.ON Distribuce, a.s., mimořádný provozní stav 72	

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Znaménko činných a jalových výkonů podle posunu proudu a typu uzlu.....	25
Tab. 2-2 Druhy zkratů a četnost jejich výskytu.....	35
Tab. 5-1 Seznam transformoven v UO Otrokovice.....	50
Tab. 5-2 Seznam vedení 110 kV v UO Otrokovice	51
Tab. 5-3 Seznam vedení 110 kV mezi UO Otrokovice, UO Sokolnice a UO Prosenice, pokračování tabulky je na další stránce.....	51
Tab. 5-4 Seznam rozveden označených ve schématech, ale nepatřících do UO Otrokovice	52
Tab. 6-1 Velikost a odchylky napětí distribuční sítě 110 kV a předávacích míst PS/DS	58
Tab. 6-2 Napěťové poměry v jednotlivých uzlech při můstkovém provozu dvou transformátorů	58
Tab. 6-3 Zatížení vedení při můstkovém provozu dvou transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce	59
Tab. 6-4 Zatížení distribučních transformátorů 110kV/ vn při můstkovém provozu dvou transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce	60
Tab. 6-5 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/ 110kV při můstkovém provozu dvou transformátorů	61
Tab. 6-6 Zkratové poměry při můstkovém provozu dvou transformátorů.....	63
Tab. 7-1 Napěťové poměry v jednotlivých uzlech při můstkovém provozu tří transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce.....	64
Tab. 7-2 Zatížení vedení při můstkovém provozu tří transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce	65
Tab. 7-3 Zatížení distribučních transformátorů 110kV/ vn při můstkovém provozu tří transformátorů	66
Tab. 7-4 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/ 110kV při můstkovém provozu dvou transformátorů	68
Tab. 7-5 Zkratové poměry při můstkovém provozu dvou transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce	68
Tab. 9-1 Zatížení vedení při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „s pomocí Hodonína“	73
Tab. 9-2 Zatížení distribučních transformátorů 110kV/ vn při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „s pomocí Hodonína“....	74
Tab. 9-3 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/ 110kV při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „s pomocí Hodonína“....	75
Tab. 9-4 Zatížení vedení při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „bez pomoci Hodonína“	75

Tab. 9-5 Zatížení distribučních transformátorů 110kV/ vn při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „bez pomoci Hodonína“76

Tab. 9-6 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/ 110kV při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „bez pomoci Hodonína“77

SEZNAM SYMBOLŮ

Značka	Veličina	Značka jednotky
$\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_3, \mathbf{I}_4$	Uzlové proudy	A
\mathbf{I}_i	Fázor proudu v i -tém uzlu sítě	A
\mathbf{I}_i^*	Komplexně sdružený proud k proudu \mathbf{I}_i	A
I	Absolutní hodnota proudu	A
I_{calc}	Absolutní hodnota proudu vypočítaná programem SINAUT Spektrum 4.4	A
I_{dyn}	Dynamický proud	A
I_k	Ustálený zkratový proud	A
I'_k	Počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu	A
I''_k	Počáteční rázový zkratový proud	A
$^{(1)}I''_k$	Počáteční rázový zkratový proud při jednofázovém zkratu	A
$^{(3)}I''_k$	Počáteční rázový zkratový proud při trojfázovém zkratu	A
I_{ke}	Ekvivalentní oteplovací proud	A
I_{km}	Nárazový zkratový proud	A
I_n	Jmenovitý proud zařízení	A
I_{th}	Jmenovitý krátkodobý proud	A
I_{vyp}	Jmenovitý vypínací zkratový proud	A
J	Jacobián	-
P	Činný výkon	W
P_{calc}	Činný výkon vypočítaný programem SINAUT Spektrum 4.4	W
P_i	Činný výkon v i -tém uzlu sítě	W
P_j	Činný výkon v j -tém uzlu sítě	W
Q	Jalový výkon	VAr
Q_{calc}	Jalový výkon vypočítaný programem SINAUT Spektrum 4.4	VAr
Q_i	Jalový výkon v i -tém uzlu sítě	VAr

Q_j	Jalový výkon v j -tém uzlu sítě	VAr
S_i	Zdánlivý výkon v i -tém uzlu sítě	VA
S_j	Zdánlivý výkon v j -tém uzlu sítě	VA
S_i^*	Komplexně sdružený zdánlivý výkon k výkonu S_i	VA
S_k''	Počáteční rázový zkratový výkon	MVA
S_n	Jmenovitý zdánlivý výkon	MVA
S_{vyp}	Jmenovitý vypínací zkratový výkon	MVA
U	Absolutní hodnota napětí	V
U_1, U_2, U_3, U_4	Uzlová napětí	V
U_p, U_q	Uzlová napětí	V
U_i	Fázor napětí v i -tém uzlu sítě	V
U_j	Fázor napětí v j -tém uzlu sítě	V
U_i^*	Komplexně sdružený fázor napětí k fázoru napětí U_i	V
Y_{ii}	Diagonální prvek uzlové admitanční matice	S
Y_{ij}	Mimodiagonální prvek uzlové admitanční matice	S
\mathbf{a}	operátor natočení	-
\mathbf{i}_{pq}	Proud tekoucí větví z uzlu p do uzlu q	A
i	Index, značení uzlu sítě	-
i_k	Okamžitá hodnota nesouměrného zkratového proudu	A
i_{ka}	Okamžitá hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu	A
i_{ks}	Okamžitá hodnota střídavého (souměrného) zkratového proudu	A
i_{zt}	Poměrné zatížení transformátoru	%
k	Počet odběrových nebo dodávkových uzlů sítě	-
n	Počet uzlů sítě	-
p	Jmenovitý převod transformátoru	-
s_{zv}	Poměrné zatížení vedení	%
$x_i^{(0)}$	Odhad kořenů v nulté iteraci u Newtonovy metody	-
y	Závisle proměnná	-
\mathbf{y}_{ij}	Větвовá admitance mezi uzly i a j	S

y_{i0}	Větвовá admitance mezi uzlem i a zemí	S
ΔP_{ij}	Ztráty činného výkonu mezi uzly i a j	W
ΔP_t	Ztráty činného výkonu na transformátoru	W
ΔP_v	Ztráty činného výkonu na vedení	W
ΔQ_{ij}	Ztráty jalového výkonu mezi uzly i a j	VAr
Δx_i	Odlíšnost od odhadu kořenů u Newtonovy metody	-
α	Úhel proudu	°
α	Počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku zkratové poruchy	°
δU	Úhel napětí	°
φ	Fázový posun napětí a proudu	°
φ_k	Úhel impedance obvodu zkratového proudu	°
ε	Zvolená přesnost	-
ϕ_1	Členy s vyššími mocninami u Newtonovy metody	-
∂	Parciální derivace	-
τ_d''	Časová konstanta subtranzitní složky zkratového proudu	s
τ_d'	Tranzitní časová konstanta tranzitní složky zkratového proudu	s
τ_s	Časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu	s
$\cos \varphi$	Účinník	-

Pozn. Fázory jsou v textu značeny tučně.

SEZNAM ZKRATEK

Značka	Význam
ČD	České dráhy
DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
HDO	Hromadné dálkové ovládání
LDS	Lokální distribuční soustava
LDSŽ	Lokální distribuční soustava železnic
PS	Přenosová soustava
PPDS	Pravidla provozu distribuční soustavy
PPPS	Pravidla provozu přenosové soustavy
PTP	Přístrojový transformátor proudu
UO	Uzlová oblast
ZSE	Západoslovenská energetika
a.s.	Akciová společnost
s.o.	Státní organizace
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí

1 ÚVOD

Elektrizační soustava je část energetické soustavy, obsahující zařízení pro výrobu, rozvod a spotřebu elektrické energie. Tento systém je charakterizován energetickými ztrátami a nákladovými toky spojenými s realizací a provozem elektrizační soustavy. Doprava se děje prostřednictvím přenosové soustavy (PS), distribučních soustav (DS), popřípadě lokálních distribučních soustav (LDS).

Elektrizační soustava je centrálně a jednotně řízený soubor paralelně pracujících elektráren, elektrických přenosových a rozvodných zařízení a elektrických spotřebičů. Jejím hlavním úkolem je spolehlivá dodávka elektrické energie všem odběratelům v dohodnuté kvalitě, s minimálními náklady, při zaručené bezpečnosti práce.

Přenosová soustava představuje jeden ze základních subsystémů elektrizační soustavy, který propojuje všechny významné subjekty (elektrárny, velké podniky, apod.) v elektrizační soustavě a zajišťuje rozhodující podíl zahraniční spolupráce. Dále zajišťuje přenos elektřiny, provoz, údržbu a rozvoj přenosové soustavy a především dispečerské řízení elektrizační soustavy v reálném čase. Technicky řídí systémové služby, jako je regulace výkonu a kmitočtu, regulace napětí a jalového výkonu a řídí potřebné výkonové rezervy.

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

2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÝCH METOD ŘEŠENÍ DANÉ PROBLEMATIKY

2.1 Výpočet ustáleného chodu sítí vvn a zvn

Jestliže analyzujeme provoz ES, můžeme zjistit, že všechny její prvky (generátory, transformátory, přenosová a rozvodná vedení, spínače, odpojovače atd.) jsou spojeny v jednu komplexní síť, ve které figurují jako větve. V této síti jsou uzlové body (uzly), které tyto větve spojují. Těmito uzly jsou například přípojnice v elektrárnách a rozvodnách a u spotřebitelů. Proto základem matematických modelů pro řešení chodu ES jsou metody řešení elektrických obvodů jak v ustáleném tak i přechodném stavu. Při sestavení základních rovnic ustáleného chodu můžeme použít některou z metod řešení lineárních obvodů jako je metoda uzlových napětí nebo metoda smyčkových proudů. Metoda uzlových napětí se v praxi nejčastěji používá pro jednoduchý algoritmus výpočtu vlastních a vzájemných uzlových admitancí (případně impedancí) a snadné zakódování konfigurace (propojení jednotlivých větví) sítě. Vypočítané hodnoty při ustáleném chodu bývají dále také používány jako výchozí údaje při řešení přechodných dějů (zkratky, statická a dynamická stabilita) a řady optimalizačních úloh jako je hospodárné rozdělování výroby činných a jalových výkonů, optimální regulace napětí, hodnocení spolehlivosti ES aj. Řešení ustáleného chodu se současně doplňuje kontrolou, zda některý přenosový prvek není přetížen. Výpočet se zpravidla provádí pro maximální a minimální zatížení sítě. V praxi jsou odběry a dodávky zadávány činnými a jalovými výkony. To má za následek, že chod sítě nemůžeme popsat soustavou lineárních rovnic. Matematická formulace výpočtu ustáleného chodu sítě vede k soustavě nelineárních rovnic, pro jejichž vyřešení musíme použít některé z iteračních metod. Výpočet iteračními metodami bývá relativně časově dlouhý a dosti často špatně konverguje nebo nekonverguje vůbec. Pro některé výpočty ustáleného chodu, kde není nutná velká přesnost, se úloha linearizuje. Jsou to např. výpočty pro dlouhodobé plánování rozvoje ES nebo výpočty spolehlivosti. Výkony zadané v jednotlivých uzlech se převedou na proudy a to dělením střední hodnotou očekávaného napětí v uzlech sítě anebo napětím jmenovitým.

Ustálený chod je jednoznačně určen znalostí čtyř uzlových veličin:

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

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

Třída (U, δ) - bilanční uzel

Je to uzel, ve kterém je zadáno napětí a jeho úhel. Jako neznámé jsou dopočítávány činný a jalový výkon. Tento uzel má za úkol hradit případnou nerovnováhu v bilanci uzlových výkonů, tak aby platilo součet dodávek = součtu odběrů, a navíc musí hradit ztráty činného a jalového výkonu v síti, které jsou známy až po ukončení výpočtu a určení výsledné výkonové bilance. V bilančním uzlu by měl být tudíž k dispozici zdroj výkonu.

Třída (P, Q) - odběrové a dodávkové uzly

Jsou to uzly se zadaným činným a jalovým výkonem buď dodávaným do uzlu (uzly se zdroji) nebo odebíraným v uzlu (odběrové uzly). Dodávky a odběry rozlišujeme znaménky \pm . Jako neznámé počítáme napětí a jeho úhel.

Třída (U, P) - regulační uzly

Tzv. uzly regulační nebo kompenzační, což jsou uzly se zadaným činným výkonem a absolutní hodnotou napětí. Při výpočtu ustáleného chodu řešíme, jaký jalový výkon musí být v tomto uzlu odebírán nebo dodáván, aby byla dodržena zadaná hodnota napětí. Jako další neznámá je počítán úhel tohoto napětí.

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

- jeden bilanční uzel (U, δ)

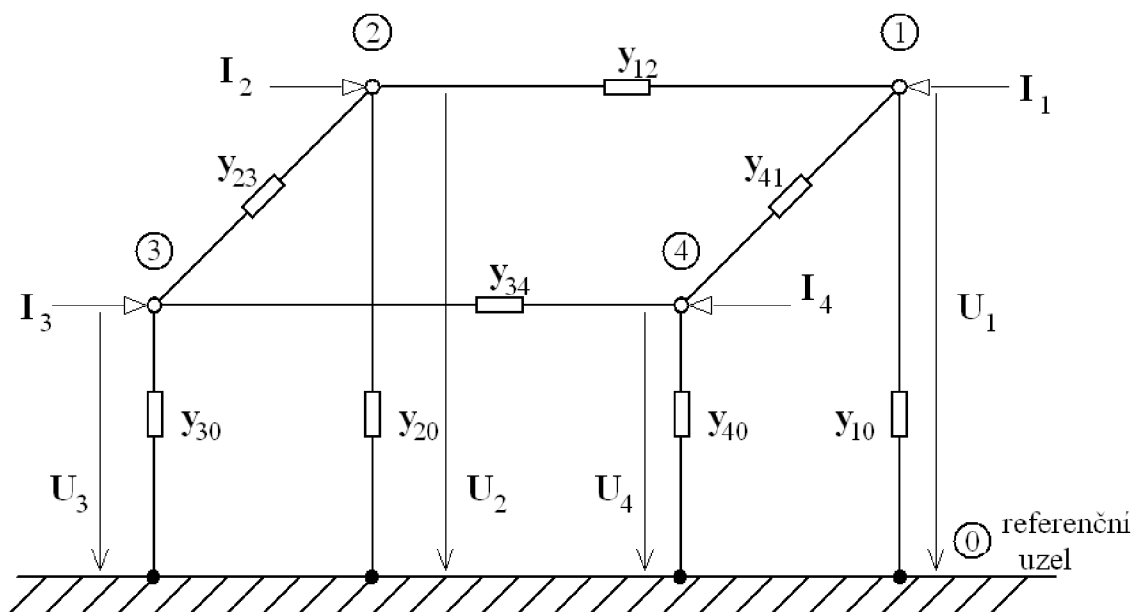
- k uzlů (P, Q)

- $(n - k - 1)$ uzlů (U, P)

neboť pro řešení máme k dispozici $2(n-1)$ rovnic popisujících ustálený chod. Rychlost konvergence zvolené iterační metody závisí na konfiguraci sítě a volbě bilančního uzlu, kde by měl být k dispozici zdroj, který hradí výkonové ztráty v síti a případnou nerovnováhu v bilanci dodávek a odběrů. Dále též závisí na počtu a umístění uzlů třídy (P, Q) a (U, P) . Výpočty ukazují, že bilanční uzel je vhodné volit v „elektrickém středu“ sítě.

2.1.1 Výpočet ustáleného chodu jako lineární úloha

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



Obr. 2-1 Náhrada prvků sítě podélnými a příčnými admitancemi

Síť zobrazenou na obr. 2-1 můžeme matematicky popsat s použitím metody uzlových napětí soustavou rovnic

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

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

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

Předchozí soustava rovnic (2.1) se dá zkráceně zapsat v maticovém tvaru

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

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

i – tý diagonální prvek \mathbf{Y}_{ii} je tvořen součtem admitancí všech větví incidentních s i – tým uzlem

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

Předpokládáme přitom, že větve nemají vzájemné indukční vazby. Takže např. prvek pro síť v obr. 2-1.

$$\mathbf{Y}_{22} = \mathbf{y}_{12} + \mathbf{y}_{23} + \mathbf{y}_{20},$$

$$\mathbf{Y}_{21} = \mathbf{Y}_{12} = -\mathbf{y}_{12}.$$

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

Soustavu rovnic (2.2) můžeme též zapsat ve tvaru

$$\mathbf{I}_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad \text{pro } i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.3)$$

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

Pozn.: Neuvažujeme-li v síti na obr. 2-1 příčné admitance, pak matice $[\mathbf{Y}]$ je singulární a soustava rovnic (2.2) nebo (2.3) je závislá. Závislost se dá odstranit eliminací bilančního uzlu, viz. další kapitola.

2.1.2 Eliminace bilančního uzlu

Text této kapitoly byl vytvořen podle [1]. Soustava rovnic (2.1) sestavená na základě II. Kirchhoffova zákona pro síť na obr. 2-1 je nezávislá tj. matice $[\mathbf{Y}]$ je regulární. Avšak jeden z uzlů sítě musí hradit neznámé proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnávat bilanci mezi dodávkami a odběry. Tento uzel s neznámým uzlovým proudem budeme v dalším nazývat bilančním uzlem. Aby v rovnicích (2.1) až (2.3) byl stejný počet neznámých jako je rovnic, je nutné v bilančním uzlu zadat známé napětí. Pro formální zjednodušení dalšího zápisu přiřadíme bilančnímu uzlu pevné číslo 1. Vzhledem k tomu, že v bilančním uzlu máme zadáno napětí \mathbf{U}_1 , můžeme soustavu rovnic (2.1) přepsat do tvaru

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{21} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{Y}_{31} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{Y}_{41} \mathbf{U}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{22} & \mathbf{Y}_{23} & \mathbf{Y}_{24} \\ \mathbf{Y}_{32} & \mathbf{Y}_{33} & \mathbf{Y}_{34} \\ \mathbf{Y}_{42} & \mathbf{Y}_{43} & \mathbf{Y}_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

a analogicky rovnici (2.3)

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{Y}_{i1} \mathbf{U}_1 + \sum_{j=2}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n. \quad (2.5)$$

Pro vypočítání neznámých napětí $\mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \dots, \mathbf{U}_n$, neznámý proud \mathbf{I}_1 v bilančním uzlu zpravidla dopočítáme při určení proudů v jednotlivých větvích sítě. Vypuštění rovnice pro bilanční uzel ve vztazích (2.4) a (2.5) nazýváme eliminací bilančního uzlu. Soustavu rovnic (2.5) řešíme např. eliminační metodou nebo iteračními metodami či přímou inverzí admitanční uzlové matice řádu $n-1$. Po výpočtu neznámých uzlových napětí určíme rozdělení proudů ve větvích náhradního schématu podle vztahu

$$\mathbf{i}_{pq} = \mathbf{y}_{pq} (\mathbf{U}_p - \mathbf{U}_q), \quad (2.6)$$

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

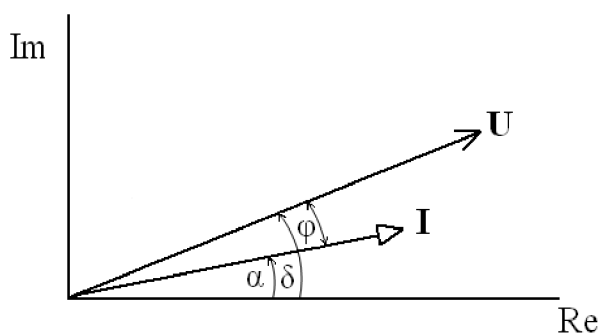
Pozn.: Proud v bilančním uzlu, pokud uvažujeme v síti i příčné admitance, můžeme volit libovolně, avšak vypočtená uzlová napětí by nemusela dávat žádný praktický smysl.

2.1.3 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

Text této kapitoly byl vytvořen podle [1] Jak už bylo řečeno, v praxi bývají odběry a dodávky v uzlech zadávány činnými a jalovými výkony. Takže pro i -tý uzel platí

$$S_i = P_i + jQ_i = U_i I_i^*, \quad (2.7)$$

kde I_i^* je komplexně sdružený proud k proudu I_i . Znaménko u činného a jalového výkonu podle rovnice (2.7) si vysvětlíme na diagramu podle obr. 2-2.



Obr. 2-2 Diagram napětí a proudu v uzlu se zdrojem

Fázorový diagram znázorňuje výrobu činného a jalového výkonu (proudu) s induktivním fázovým posunem. Pak dodávaný zdánlivý výkon do uzlu sítě

$$S = P + jQ = U \cdot I^* = U \angle \delta \cdot I \angle -\alpha = U \cdot I \angle \varphi = S(\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (2.8)$$

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

Tab. 2-1 Znaménko činných a jalových výkonů podle posunu proudu a typu uzlu

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

V případě, že do uzlu zdroj dodává induktivní jalový výkon nebo odběrový uzel odebírá kapacitní jalový výkon, pak znaménka jsou v obou případech stejná. Proto se v praxi pro kompenzaci jalového induktivního výkonu používá termín „výroba jalového výkonu“ (kondenzátory) v místě spotřeby induktivního jalového výkonu.

Vyjádříme-li z rovnice (2.7) proud

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

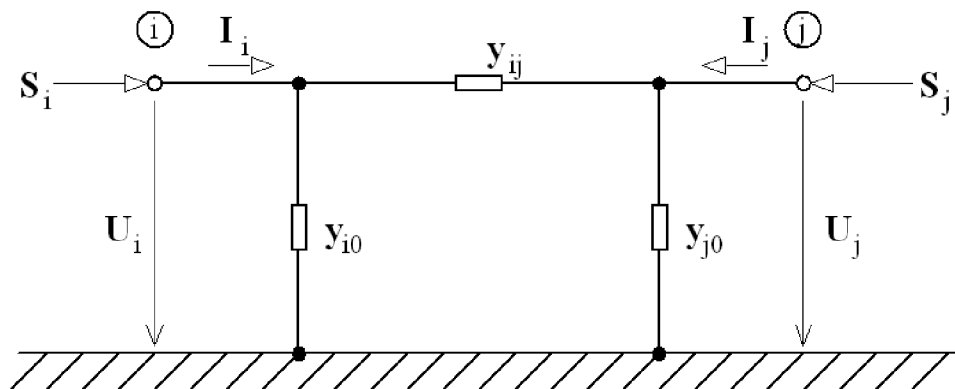
pak po dosazení do vztahu (2.5) dostáváme

$$\mathbf{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\mathbf{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (2.10)$$

Z rovnic (2.5) a (2.9) je zřejmé, že byla provedena eliminace bilančního uzlu a tudíž volba napětí \mathbf{U}_1 . Bilanční uzel v našem případě, kdy jsou zadány uzlové výkony, hradí rozdíl mezi dodávkami a odběry a navíc ztráty činného a jalového výkonu v síti. Pro řešení soustavy rovnic (2.10) se nejčastěji používají dvě iterační metody (Gauss-Seidlova a Newtonova iterační metoda). Protože výpočetní program použitý v praktické části této práce je založen na druhé z těchto metod, budu se v dalším článku zabývat pouze touto metodou. Vzhledem k tomu, že jsou zadány výkony v uzlech sítě (dodávky a odběry), napětí bilančního uzlu a admitance \mathbf{Y}_{ij} , vede výpočet neznámých napětí k řešení soustavy nelineárních (kvadratických) rovnic (2.10). Po výpočtu neznámých (hledaných uzlových napětí) se určí toky výkonů v síti a výkonové ztráty.

Jsou-li jednotlivé prvky sítě nahrazeny články π (obr. 2-3), pak proud tekoucí do uzlu i je určen rovnicí

$$\mathbf{I}_i = (\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j) \cdot \mathbf{y}_{ij} + \mathbf{U}_i \mathbf{y}_{i0}, \quad (2.11)$$



Obr. 2-3 Náhrada prvků sítě π článkem

a výkon

$$\mathbf{S}_i = (P_i + jQ_i) = \mathbf{U}_i \mathbf{I}_i^*. \quad (2.12)$$

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

$$\mathbf{I}_j = (\mathbf{U}_j - \mathbf{U}_i) \cdot \mathbf{y}_{ij} + \mathbf{U}_j \mathbf{y}_{j0}, \quad (2.13)$$

$$\mathbf{S}_j = (P_j + jQ_j) = \mathbf{U}_j \mathbf{I}_j^*. \quad (2.14)$$

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

$$\begin{aligned}\Delta P_{ij} &= P_i + P_j, \\ \Delta Q_{ij} &= Q_i + Q_j.\end{aligned}\quad (2.15)$$

Protože trojfázová síť je v našich úvahách nahrazena jednofázovým ekvivalentem a tudíž všechny rovnice platí pro fázové hodnoty napětí a výkon přenášený jednou fází.

2.1.4 Výpočet ustáleného chodu Newtonovou iterační metodou

Text této kapitoly byl vytvořen podle [1]. Řešená soustava nelineárních rovnic je ve tvaru

$$\begin{aligned}f_1 &= (x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1 \\ f_2 &= (x_1, x_2, \dots, x_n) = y_2 \\ &\vdots \\ f_n &= (x_1, x_2, \dots, x_n) = y_n,\end{aligned}\quad (2.16)$$

Nejdříve je nutné provést odhad kořenů v nulté iteraci $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Odhady kořenů se liší od jejich přesné hodnoty o $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Přesná hodnota kořenů je tedy $x_1 = x_1^{(0)} + \Delta x_1$, $x_2 = x_2^{(0)} + \Delta x_2$, \dots , $x_n = x_n^{(0)} + \Delta x_n$. Původní soustava rovnic (2.16) se dá tedy přepsat do tvaru

$$\begin{aligned}f_1 &= (x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_1 \\ f_2 &= (x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_2 \\ &\vdots \\ f_n &= (x_1^{(0)} + \Delta x_1, x_2^{(0)} + \Delta x_2, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_n,\end{aligned}\quad (2.17)$$

Každou rovnici soustavy (2.17) můžeme rozepsat v Taylorovu řadu funkce více proměnných v bodě $x_i^{(0)}$. Např. první rovnice bude vypadat následovně

$$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n + \phi_1 = y_1, \quad (2.18)$$

kde $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0$ je hodnota parciální derivace v bodě $x_1^{(0)}$ atd. a ϕ_1 zahrnuje členy s vyššími mocninami

$\Delta x_1, \dots, \Delta x_n$ a druhé a vyšší derivace funkce f_1

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

Označí-li se výraz $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) = y_1^{(0)}$, pak rovnici (2.18) můžeme upravit na tvar

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 \Delta x_1 + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 \Delta x_2 + \dots + \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \Delta x_n = y_1 - y_1^{(0)} = \Delta y_1^{(0)}, \quad (2.19)$$

kde $\Delta y_1^{(0)}$ je rozdíl zadané hodnoty pravé strany y_1 a hodnoty $y_1^{(0)}$ určené dosazením odhadu kořenů do rovnice (2.18).

Analogickým postupem se dají upravit i zbývající rovnice soustavy (2.17), čímž obdržíme soustavu lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$. Soustavu můžeme zapsat v maticovém tvaru následovně

$$\begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_0 \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_0 & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \right|_0 & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1^{(0)} \\ y_2^{(0)} \\ \vdots \\ y_n^{(0)} \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

nebo též zkráceně

$$[J] \cdot [\Delta x] = [\Delta y], \quad (2.21)$$

kde matice $[J]$ parciálních derivací je tzv. Jacobián. Ze soustavy rovnic (2.20) či (2.21) vypočítáme vektor hledaných diferencí $[\Delta x]$ a určíme nové, opravené odhady kořenů

$$x_i^{(1)} = x_i^{(0)} + \Delta x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.22)$$

které použijeme pro výpočet v další iteraci. Nutno si uvědomit, že vypočítané hodnoty diferencí Δx_i nejsou zcela přesné, neboť jsme v Taylorově rozvoji uvažovali pouze první derivace.

Iterační proces postupného zpřesňování kořenů soustavy rovnic (2.16) můžeme úpravou rovnic (2.21) a (2.22) do iteračního tvaru

$$[\Delta x^{(k)}] = [J^{(k)}]^{-1} \cdot [\Delta y^{(k)}], \quad (2.23)$$

a potom

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + \Delta x_i^{(k)}, \quad (2.24)$$

kde horní index k označuje k -tou iteraci. Předpokládáme, že existují spojité derivace $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$ pro $i, j = 1, 2, \dots, n$, jednoznačnost řešení soustavy rovnic (2.20) a konvergence iteračního postupu, což v praktických úlohách výpočtu ustáleného chodu sítí obvykle bývá splněno.

Aplikujeme nyní tuto iterační metodu na rovnice (2.10) popisující ustálený chod sítí. Rovnice přepíšeme do tvaru podle (2.16).

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

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

$$\mathbf{U}_i = U_i \angle \delta_i, \quad \mathbf{U}_i^* = U_i \angle -\delta_i, \quad \mathbf{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij}. \quad (2.26)$$

Dosazením polárního tvaru napětí a admitance do (2.25) dostáváme po úpravě a uvážení, že $\cos(-x) = \cos x$ a $\sin(-x) = -\sin x$

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

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

$$i = 2, 3, \dots, n, \quad (2.27)$$

což je soustava $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Předpokládáme opět, že ve všech uzlech jsou předepsány dodávané či odebírané činné a jalové výkony kromě bilančního uzlu 1, kde je zadáno napětí U_1 a jeho úhel δ_1 (obvykle se volí $\delta_1 = 0$). Pro iterační výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ podle schématu (2.20) a s použitím rovnic (2.27) dostaneme soustavu rovnic (2.28)

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \hline \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial U_2}, \frac{\partial P_2}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial P_2}{\partial U_n} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}, \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial U_2}, \frac{\partial P_3}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial P_3}{\partial U_n} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2}, \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_2}, \frac{\partial P_n}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}, \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial U_2}, \frac{\partial Q_2}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial Q_2}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}, \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial U_2}, \frac{\partial Q_3}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial Q_3}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2}, \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_2}, \frac{\partial Q_n}{\partial U_3}, \dots, \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}, \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3}, \dots, \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \vdots \\ \Delta U_n \\ \hline \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Všimněme si, že ΔU_i zde neznamená úbytek napětí, ale diferencí odhadu uzlového napětí od přesné hodnoty kořenů rovnic (2.27). Soustava rovnic (2.28) se dá zkráceně zapsat rozdělením na pole matic jako

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta U] \\ [\Delta \delta] \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Derivováním rovnic (2.27) podle jednotlivých proměnných získáme prvky (parciální derivace) Jacobiánu.

a) Výpočet prvků matice $\frac{\partial P}{\partial U}$

diagonální prvky:
$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i Y_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.30)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$:
$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.31)$$

b) Výpočet prvků matice $\frac{\partial P}{\partial \delta}$

diagonální prvky:
$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.32)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$:
$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.33)$$

c) Výpočet prvků matice $\frac{\partial Q}{\partial U}$

diagonální prvky:
$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i Y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.34)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$:
$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.35)$$

d) Výpočet prvků matice $\frac{\partial Q}{\partial \delta}$

diagonální prvky:
$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.36)$$

mimodiagonální prvky $i \neq j$:
$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad (2.37)$$

Shrnutí postupu výpočtu:

1. V nultém iteračním kroku $k = 0$ odhadneme napětí v uzlech sítě a jejich úhly (obvykle $U_i^{(0)} = U_1, \quad i = 2, 3, \dots, n$).
2. Dosazením napětí do rovnic (2.27) vypočteme difference výkonů

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

$$\Delta Q_i^{(0)} = Q_{i(\text{zadané})} - Q_i(U_1, U_2^{(0)}, \dots, U_n^{(0)}, \delta_1, \delta_2^{(0)}, \dots, \delta_n^{(0)}).$$
3. Dosazením odhadnutých napětí v nultém iteračním kroku do rovnic (2.30) až (2.37) vypočítáme hodnoty prvků Jacobiánu.
4. Vyřešením soustavy lineárních rovnic (2.28) dostáváme difference $\Delta U_i^{(0)}, \Delta \delta_i^{(0)}$ v nulté iteraci.
5. Vypočítáme opravené hodnoty napětí a jejich úhlů na konci prvního iteračního kroku $U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}, \quad \delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)}, \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n$.
6. Nahradíme původní odhady zpřesněnými napětími a jejich úhly a opět v iteračním výpočtu postupujeme analogicky podle bodů 2 až 6. Horní index nabývá tedy postupně hodnot (0), (1), (2), podle jednotlivých iteračních kroků (k). Výpočet ukončíme, až jsou splněny podmínky $|\Delta P_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ a $|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ pro všechna $i = 2, 3, \dots, n$, kde ε je zvolená přesnost rozdílu zadaných výkonů a výkonů vypočítaných dosazením vypočtených napětí a jejich úhlů do rovnic (2.27)

Newtonova metoda velmi rychle konverguje a obvykle potřebný počet iterací závisí při zadané přesnosti ε málo na velikosti řešené sítě. Nevýhodou je poměrně značný nárok na paměť počítače při výpočtu diferencí kořenů. Současně řešení soustavy rovnic (2.28) značně prodlužuje výpočtový čas potřebný na jednu iteraci.

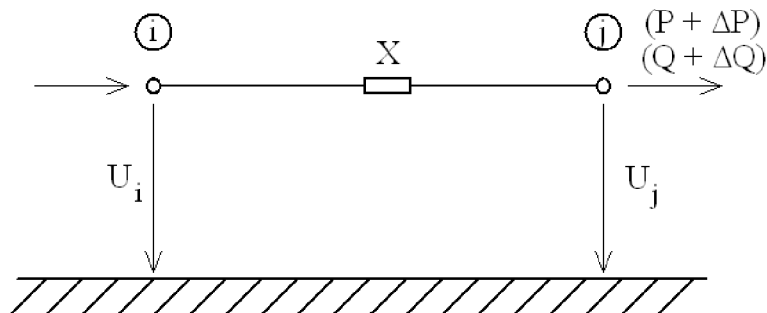
Pro méně přesné výpočty se používá následující zjednodušení. Vychází se z toho, že u sítí s převažující podélnou reaktancí vedení a transformátorů (vedení nn a vn) se činné výkony v uzlech při malých změnách absolutní velikosti napětí mění jen nepatrně. Podobně pro malé změny úhlů uzlových napětí se mění zanedbatelně jalové výkony. Za těchto předpokladů můžeme do rovnice (2.29) dosadit

$$\left[\frac{\partial P}{\partial U} \right] \doteq [0], \quad \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \doteq [0], \quad (2.38)$$

ta pak přejde na zjednodušený tvar (2.39) vedoucí k urychlení výpočtu

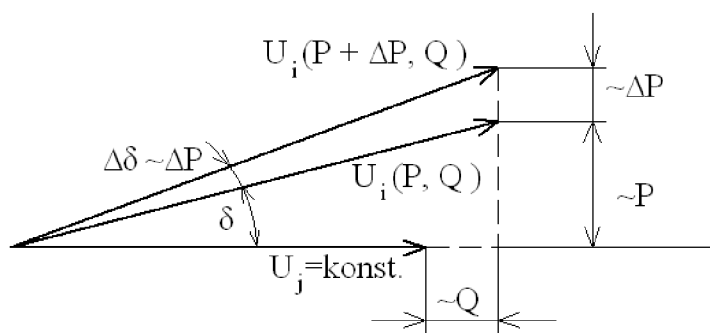
$$[\Delta P] \doteq \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta], \quad [\Delta Q] \doteq \left[\frac{\partial Q}{\partial U} \right] \cdot [\Delta U]. \quad (2.39)$$

Pro názornost si ukážeme vliv změn odebíraného výkonu na změnu velikosti napětí a jeho úhlu na jednoduchém přenosu s uvážením pouze podélné reaktance (obr. 2-4)

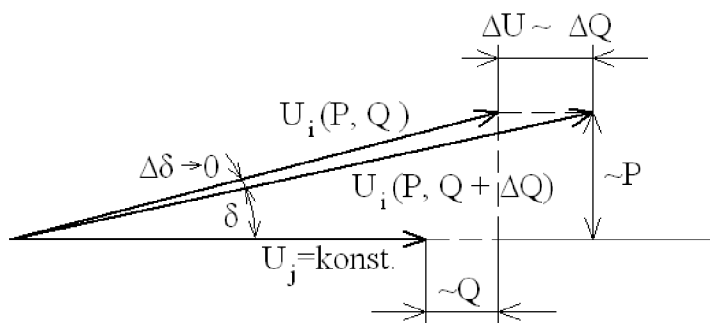


Obr. 2-4 Jednoduchý přenos s uvážením pouze podélné reaktance vedení

Na obr. 2-5 jsou nakresleny napěťové poměry při odběru výkonů v uzlu j o velikosti P, Q a dále při změně činného odběru v uzlu j o ΔP při stálém odebíraném výkonu Q . Je vidět, že je-li U_j udržováno na konstantní hodnotě, pak při změně činného odběru na hodnotu $(P + \Delta P)$ se absolutní hodnota napětí v uzlu i prakticky nezmění, avšak změní se výrazně úhel mezi původním napětím o $\Delta\delta$, což je v souladu s první rovnicí (2.39), tj. $\Delta P \sim \Delta\delta$.

Obr. 2-5 Napěťové poměry při změně činného odběru P v uzlu j při stálém jalovém odběru Q

Na obr. 2-6 jsou naznačeny napěťové poměry při změně jalového výkonu v uzlu j o ΔQ při konstantním činném odběru. Vidíme, že změna jalového výkonu má podstatný vliv na změnu absolutní hodnoty napětí v uzlu i při $U_j = \text{konst.}$ a zanedbatelný vliv na změnu úhlu $\Delta\delta$, což je opět v souladu s druhou rovnicí (2.39), tj. $\Delta Q \sim \Delta U$.

Obr. 2-6 Napěťové poměry při změně jalového odběru Q v uzlu j při stálém činném odběru P

2.2 Výpočet přechodných jevů v ES

Text této kapitoly byl vytvořen podle [2], [3], [4]. Příčinou přechodného stavu jsou abnormální provozní jevy vznikající přímo v hlavním obvodu v důsledku náhlého porušení izolace nebo při ovládnutí soustavy. Důsledkem je přechodný stav soustavy, ve kterém přechodné složky veličin chodu elektrizační soustavy zanikají nejčastěji formou tlumených vlastních oscilací a soustava tak přechází do nového ustáleného stavu. Z hlediska rozdělení přechodných dějů v ES je důležité srovnání doby trvání zániku přechodných složek veličin chodu a jejich periody s periodou proudu s jmenovitým kmitočtem. Přechodné děje potom rozdělujeme na

1. Rychlé přechodné jevy

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

2. Středně rychlé (elektromagnetické)

Perioda přechodných složek je srovnatelná s periodou proudu s jmenovitým kmitočtem. Vliv setrvačných hmot rotačních strojů se rovněž zanedbává. Elektrická část se řeší za pomoci soustředěných parametrů. Doba trvání je řádově desítky sekund. Příčinou těchto přechodných dějů je zkratová porucha.

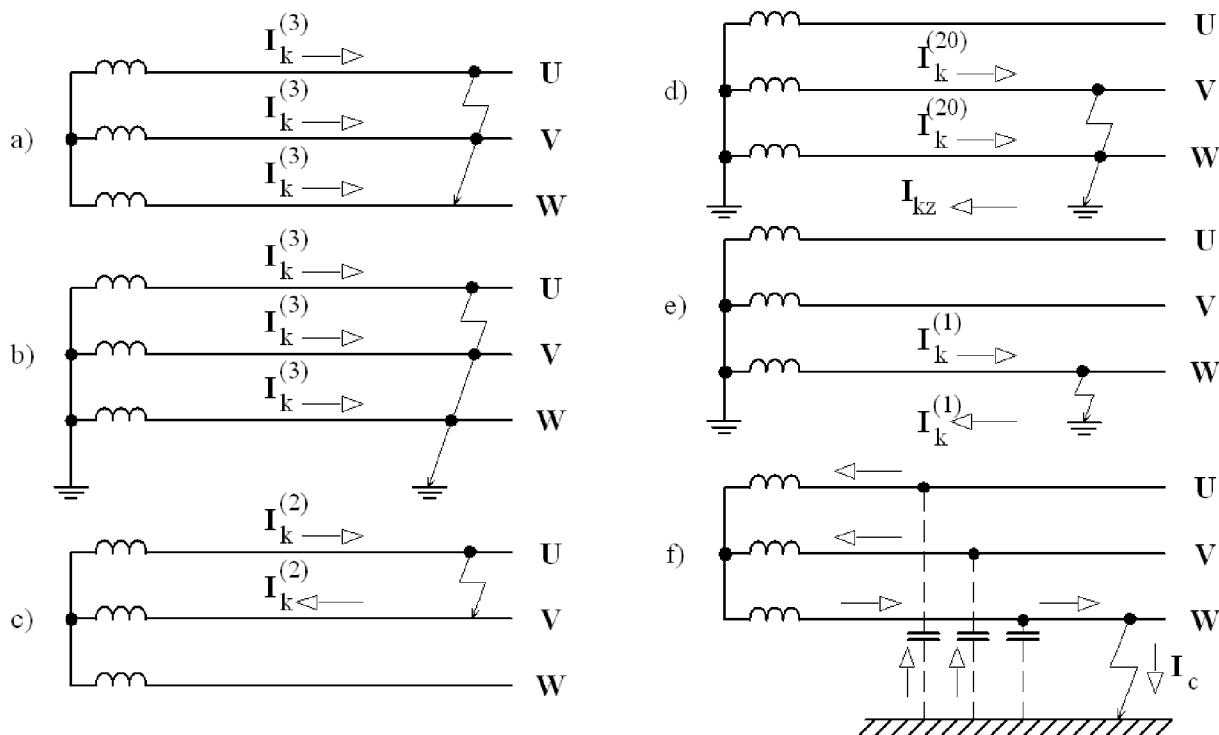
3. Pomalé (elektromechanické)

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

2.2.1 Zkraty v elektrizační soustavě

Text této kapitoly byl vytvořen podle [2], [3], [4]. Zkrat je jednou z nejvážnějších poruch, které je nutno předpokládat v elektrizační soustavě. Zkratem nazýváme chybné vodivé spojení mezi jednotlivými fázemi elektrizační soustavy, popř. mezi některou fází a zemí v soustavě účinně uzemněné. Toto chybné spojení způsobí vzrůst proudu tím, že vyřadí z elektrického obvodu odběratele, které představují hlavní část odporu obvodu. Kdyby spojovací vedení, transformátory a ostatní části elektrického obvodu neměly žádný odpor, pak by zkratovým obvodem protékal podle Ohmova zákona proud nekonečně velký. Ve skutečnosti je však ve zkratovém obvodu vždy zařazen určitý odpor, který se skládá z vnitřních impedancí generátorů a transformátorů, z impedancí vedení (kabelů, přípojníc, venkovních vedení) a z přechodových

odporů jak na spojích tak i v místě zkratu samém, takže zkratový proud dosáhne konečné velikosti. Avšak i za těchto okolností jsou zkratové proudy tak velké, že vážně ohrožují jak elektrické zařízení, tak životy obsluhujícího personálu. K chybnému spojení může dojít v trojfázové soustavě mezi různými vodiči. Mluvíme pak o těchto druzích zkratu:



Obr. 2-7 Druhy zkratu

trojfázový zkrat (obr. 2-7 a) nastane při spojení všech tří fází elektrizační soustavy v jednom místě;

trojfázový zemní zkrat (obr. 2-7 b) nastane při spojení všech tří fází navzájem a jejich současném spojení se zemí;

dvojfázový zkrat (obr. 2-7 c) nastane při spojení kterýchkoli dvou fází trojfázové soustavy v jednom místě;

dvojfázový zemní zkrat (obr. 2-7 d) nastane, jsou-li dvě spojené fáze současně spojeny se zemí;

jednofázový zkrat (obr. 2-7 e) nastane v soustavě s uzemněným nulovým bodem, popř. vyvedeným středním vodičem při spojení jedné z fází se zemí nebo se středním vodičem;

zemní spojení (obr. 2-7 f) nastane v soustavě s izolovaným nulovým bodem při spojení jedné z fází se zemí, nepovažuje se za zkrat;

Jednotlivé druhy zkratu a četnost jejich výskytu jsou v Tab. 2-2. Jsou-li zkratem postiženy všechny tři fáze, mluvíme o zkratu souměrném. Všechny ostatní zkraty se nazývají nesouměrné (dvojfázový zkrat, dvojfázový zemní zkrat, jednofázový zkrat).

Zkrat může nastat dokonalým spojením fází (nebo fáze a země), při kterém je impedance v místě spojení zanedbatelná (**zkrat dokonalý**), nebo nedokonalým spojením, kdy impedance zkratového spojení je značná a ovlivňuje velikost zkratového proudu (**zkrat nedokonalý**, **zkrat obloukový**).

Vzniku zkratu nemůžeme vždy zabránit. Je sice možné účelným uspořádáním elektrického zařízení a jinými vhodnými opatřeními omezit vznik zkratu na nejmenší míru, avšak předem vyloučit všechny příčiny, které způsobují zkrat, není možné. Proto je nutné dimenzovat každé elektrické zařízení tak, aby bylo ve všech svých částech odolné vůči účinkům zkratového proudu.

Tab. 2-2 Druhy zkratů a četnost jejich výskytu

Druh zkratu	Pravděpodobnost výskytu (%)		
	vn	110 kV	220 kV
trojfázový	5	0,6	0,9
dvojfázový	10	4,8	0,6
dvojfázový zemní	20	3,8	5,4
jednofázový	*	91	93,1

* V sítích vn, které se zpravidla provozují s izolovaným nebo nepřímým uzemněným uzlem se porucha nazývá zemní spojení a kvalitativně se liší od zkratu.

2.2.2 Časový průběh zkratového proudu

Text této kapitoly byl vytvořen podle [2], [3], [4]. Při zkratu dochází k přechodu z normálního stavu na stav poruchový, tj. přechod z normálního proudu na proud zkratový. Tento přechod se neděje skokem v jediném okamžiku, ale doba trvání závisí na velikostech energií, které jsou nashromážděny v indukčnostech a kapacitách obvodů: $W_L = \frac{1}{2}Li^2$ a $W_C = \frac{1}{2}Cu^2$.

Každá změna proudu je spojena se změnou energie v magnetickém poli, každá změna napětí je spojena se změnou energie v elektrickém poli. U průběhu zkratového proudu sledujeme jeho počátek, přechodnou část a ustálený zkratový chod, kdy došlo k utlumení přechodných dějů. Za zjednodušujících předpokladů (stále buzení synchronních zdrojů, prvky elektrizační soustavy nahrazeny pouze podélnou impedancí induktivního charakteru) je tedy okamžitá hodnota zkratového proudu neharmonickou funkcí času se třemi přechodnými složkami, které exponenciálně zanikají

$$i_k = \sqrt{2} \left\{ \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + I_k \right] \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right\} = i_{ks} + i_{ka}, \quad (2.40)$$

kde

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

$$u_0 = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha) \Big|_{t=0} = \sqrt{2}U \sin \alpha, \quad (2.41)$$

φ_k je úhel impedance obvodu zkratového proudu,

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

I_k' je počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu,

I_k je efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu,

τ_d'' je subtranzitní časová konstanta subtranzitní složky zkratového proudu,

τ_d' je tranzitní časová konstanta tranzitní složky zkratového proudu,

τ_s je časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu,

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

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

i_k je okamžitá hodnota nesouměrného zkratového proudu

Velikost zkreslení střídavého zkratového proudu stejnosměrnou složkou je závislá na okamžité hodnotě napětí při vzniku zkratové poruchy, tj. na úhlu α .

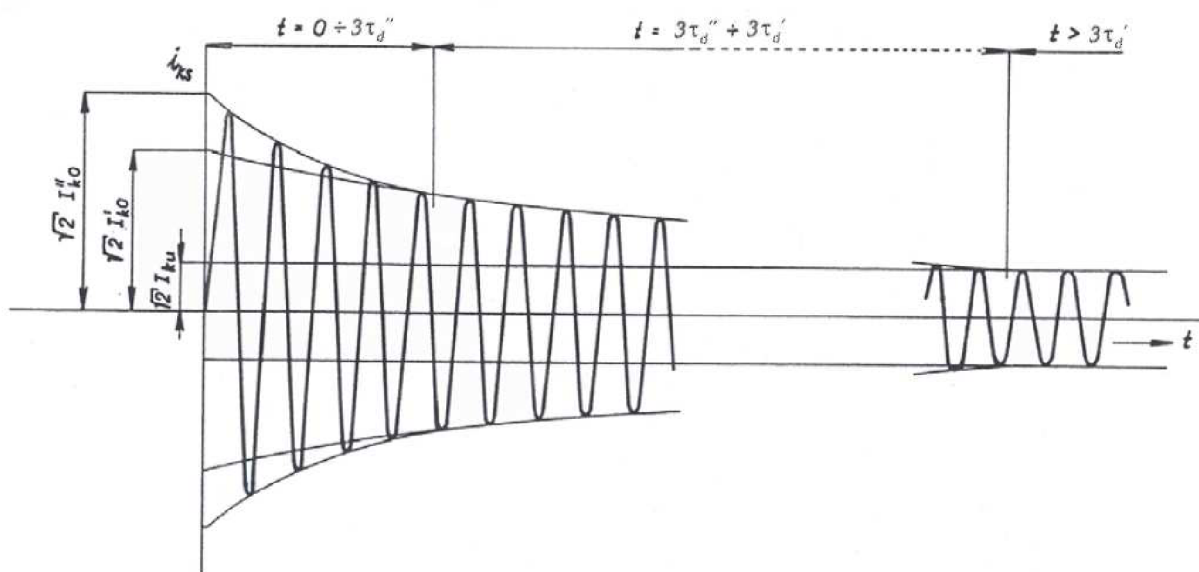
Stejnoseměrná složka nevznikne a zkratový proud bude souměrný pouze v té fázi třífázové soustavy, ve které platí

$$\alpha = \varphi_k. \quad (2.42)$$

Potom se bude časový průběh okamžité hodnoty zkratového proudu řídit vztahem

$$i_k = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d'}} + I_k \right] \sin(\omega t), \quad (2.43)$$

a tento průběh nazýváme souměrným (symetrickým) zkratovým proudem (obr. 2-8).



Obr. 2-8 Průběh souměrného zkratového proudu i_{ks}

Symetrický zkratový proud má tyto složky:

- rázová složka zkratového proudu, má sinusový průběh o kmitočtu soustavy, exponenciálně klesající s časovou konstantou τ_d''
- přechodná složka zkratového proudu, má sinusový průběh o kmitočtu soustavy, exponenciálně klesající s časovou konstantou τ_d''
- ustálená složka zkratového proudu, má sinusový průběh stálé amplitudy o kmitočtu soustavy

Počáteční hodnota zkratového proudu je v tomto případě nulová (za předpokladu chodu naprázdno) a kdyby nedošlo k přerušení proudu jistícím zařízením, tak by se zkratový proud ustálil na harmonickém průběhu s amplitudou $\sqrt{2}I_{ku}$.

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

$$\alpha = \varphi_k - \frac{\pi}{2}, \quad (2.44)$$

potom napětí na začátku poruchy nabude hodnoty

$$u_0 = \sqrt{2}U \sin\left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.45)$$

a časový průběh okamžité hodnoty zkratového proudu se s uvážením, že platí $\sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -1$ a $\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -\cos(\omega t)$, bude řídit vztahem

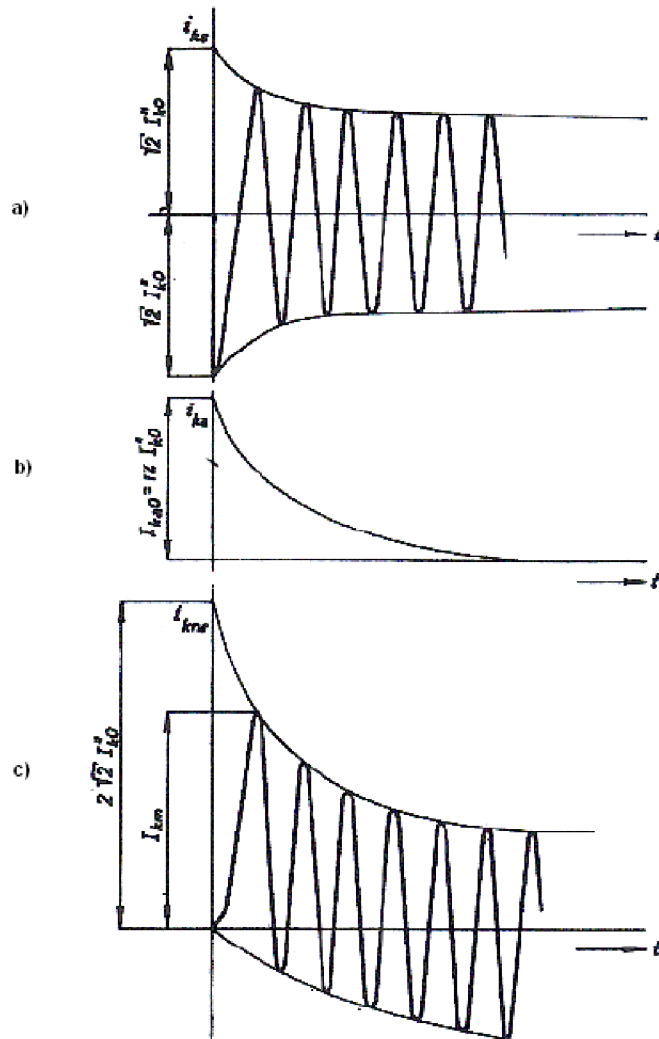
$$i_k = \sqrt{2} \left\{ I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d''}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + I_k \right] \cos(\omega t) \right\}. \quad (2.46)$$

Zkratový proud, zpožděný za napětím o $\frac{\pi}{2}$ pak začíná ze své maximální hodnoty. Protože fyzikálně není možná skoková změna proudu, vytvoří se další složka zkratového proudu i_{ka} a výsledný zkratový proud je potom nesouměrný a je složen z následujících částí (obr. 2-9):

i_{ka} - stejnosměrná složka exponenciálně zanikající s časovou konstantou τ_s (obr. 2-9 b)

i_{ks} - souměrný zkratový proud (obr. 2-8 a obr. 2-9 a)

Neboli efektivní hodnota součtu všech čtyř složek zkratového proudu (rázové, přechodné, ustálené a stejnosměrné) je výsledný zkratový proud a označuje se jako nesouměrný zkratový proud i_{kns} (obr. 2-9 c), kde I_{km} je tzv. nárazový zkratový proud, který definuje vrcholovou hodnotu první půlperiody zkratového proudu při největší možné stejnosměrné složce. Amplituda zkratového proudu v tomto případě dosáhne téměř dvojnásobek amplitudy střídavého zkratového proudu. Silové namáhání zařízení je proto třeba uvažovat pro tento okamžik vzniku poruchy. Totéž platí pro tepelné účinky.



Obr. 2-9 Vznik stejnosměrné složky i_{ka} a průběh souměrného i_{ks} a nesouměrného i_{kns} zkratového proudu

2.2.3 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Text této kapitoly byl vytvořen podle [2], [3], [4]. Pro dimenzování elektrických zařízení a nastavení ochran není zapotřebí znát celý časový průběh zkratového proudu, ale jen tzv. charakteristické hodnoty zkratového proudu:

- počáteční rázový zkratový proud I_k''
- nárazový zkratový proud I_{km}
- vypínací zkratový proud I_{vyp} a jeho stejnosměrnou složku I_{avyp}
- ekvivalentní oteplovací proud I_{ke}
- ustálený zkratový proud I_k

- dobu trvání zkratu t_k

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

$$I_k'' = k_1 \frac{cU_{vz}}{\sqrt{3}|Z_k|}, \quad (2.47)$$

kde k_1 je součinitel pro různé druhy zkratů uvedený v normě, pro trojfázový zkrat $k_1 = 1$

U_{vz} je sdružené vztažené napětí (obvykle napětí zkratu), na toto napětí je přepočten zkratový obvod

Z_k je celková výpočtová impedance, její určení je pro různé druhy zkratů uvedeno v normě, odpovídá náhradní impedanci zkratového obvodu

c je napěťový součinitel zahrnující odhad vnitřního napětí zdrojů za jejich subtranzitní reaktancí v okamžiku vzniku zkratu, nabývá hodnoty 1 pro zkrat z chodu zdrojů naprázdno a 1,1 z chodu při zatížení

Nárazový zkratový proud I_{km} je největší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává při prvním maximu v čase $t = 0,01s$ po vzniku zkratu

$$I_{km} = i_k(0,01) = \sqrt{2} \left[I_k'' e^{-\frac{0,01}{\tau_s}} + (I_k'' - I_k') e^{-\frac{0,01}{\tau_d'}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{0,01}{\tau_d}} + I_k \right]. \quad (2.48)$$

Nárazový zkratový proud se používá pro kontrolu silových účinků zkratového proudu, neboť silové účinky jsou největší právě v okamžiku, kdy dosáhne zkratový proud své první amplitudy. Pro praktické výpočty se nárazový zkratový proud určuje z počátečního rázového zkratového proudu podle vztahu

$$I_{km} = K\sqrt{2}I_k'', \quad (2.49)$$

kde K je součinitel nárazového zkratového proudu udaný normou

Symetrický vypínací zkratový proud I_{vyp} je definován jako efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vypnutí zkratu t_k

$$I_{vyp} = (I_k'' - I_k') e^{-\frac{t_k}{\tau_d'}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t_k}{\tau_d}} + I_k. \quad (2.50)$$

Symetrický vypínací zkratový proud se využívá společně se stejnosměrnou složkou vypínacího zkratového proudu při kontrole vhodnosti volby vypínačů a jisticích zařízení. Podle normy je možné pro zkraty elektricky vzdálené od synchronního stroje uvažovat souměrný vypínací zkratový proud rovný počátečnímu rázovému zkratovému proudu

$$I_{vyp} = I_k''. \quad (2.51)$$

Stejnoseměrná složka vypínacího zkratového proudu I_{avyp} je střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu v čase vypnutí zkratu t_k

$$I_{avyp} = \sqrt{2} I_k'' e^{-\frac{t_k}{\tau_s}}. \quad (2.52)$$

Ze souměrného vypínacího zkratového proudu I_{vyp} a jeho stejnosměrné složky I_{avyp} lze stanovit celkový **nesymetrický vypínací zkratový proud** $I_{vyp,ns}$

$$I_{vyp,ns} = \sqrt{(I_{vyp})^2 + (I_{avyp})^2}. \quad (2.53)$$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} je efektivní hodnota fiktivního proudu harmonického průběhu, který za danou dobu trvání zkratu t_k vyvine při průchodu rezistencí R stejné množství tepla Q jako časově proměnný zkratový proud s největší možnou stejnosměrnou složkou

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt}. \quad (2.54)$$

Ekvivalentní oteplovací proud se používá při kontrole tepelných účinků zkratového proudu. Při praktických výpočtech se stanoví z počátečního rázového zkratového proudu I_k'' pomocí koeficientu k_e , který je tabelován v normě pro různá místa zkratu a různé doby trvání.

Ustálený zkratový proud I_k je efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, který protéká obvodem po odeznění přechodných dějů.

2.2.4 Zkrat v jednoduché soustavě při chodu naprázdno

Text této kapitoly byl vytvořen podle [2], [3], [4]. Pro řešení konkrétních zkratových poruch je nejprve důležité říci něco o metodě souměrných složek. V roce 1918 Charles LeGeyt Fortescue ukázal, že obecný systém složený z n nesouměrných fázorů lze vyjádřit jako součet n systému složených ze souměrných fázorů, tzv. „fortescue“ neboli souměrných složek. Konkrétně tedy nejpoužívanější trojfázovou soustavu reprezentovanou fázory \mathbf{U}_A , \mathbf{U}_B , \mathbf{U}_C lze v případě nesymetrie rozložit na tři trojfázové soustavy a to:

- soustavu souslednou (synchronní)

$$\mathbf{U}_{A(1)} \quad \mathbf{U}_{B(1)} = \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_{A(1)} \quad \mathbf{U}_{C(1)} = \mathbf{a} \mathbf{U}_{A(1)} \quad (2.55)$$

- soustavu zpětnou (inverzní)

$$\mathbf{U}_{A(2)} \quad \mathbf{U}_{B(2)} = \mathbf{a} \mathbf{U}_{A(2)} \quad \mathbf{U}_{C(2)} = \mathbf{a}^2 \mathbf{U}_{A(2)} \quad (2.56)$$

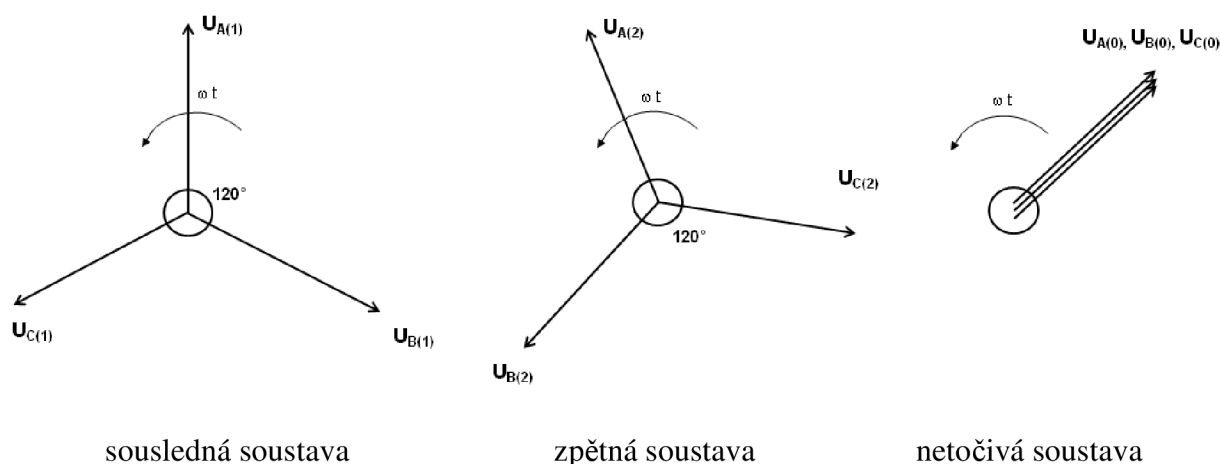
- soustavu netočivou

$$\mathbf{U}_{A(0)} = \mathbf{U}_{B(0)} = \mathbf{U}_{C(0)} \quad (2.57)$$

Obdobné rovnice bychom obdrželi i v případě nesymetrických proudů, protože nesymetrické proudy jsou způsobeny nesymetrickými napětími. Použitý symbol \mathbf{a} je tzv. operátor natočení, pomocí něhož se vyjadřuje fázový posun mezi jednotlivými napětími a pro který platí:

$$\mathbf{a} = 1 \angle \frac{2\pi}{3} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \mathbf{a}^2 = 1 \angle \frac{4\pi}{3} = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (2.58)$$

Jednotlivé soustavy jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 2-10 Grafické zobrazení souměrných složek

Sousedná soustava se skládá ze tří fázorů stejné velikosti vzájemně posunutých o 120° . Má též sled fází jako daná nesouměrná soustava. Zpětná soustava se také skládá ze tří fázorů stejné velikosti vzájemně posunutých o 120° . Má však opačný sled fází než daná nesouměrná soustava. U elektrických strojů odpovídá sousledná soustava kladnému směru točivého magnetického pole a zpětná soustava zápornému směru točivého magnetického pole. Netočivá soustava se skládá ze tří fázorů stejné velikosti a stejné fáze. Trojici trojfázových soustav nazýváme soustavou souměrných složek. Pokud platí tvrzení o rozkladu nesymetrické trojfázové soustavy do souměrných složek, musí platit i opačné tvrzení. Ze soustavy souměrných složek lze jednoznačně součtem fázorů odpovídajících si fází vytvořit trojfázovou soustavu, která je v obecném případě nesouměrná.

Uvažujme nyní jednoduchou symetrickou trojfázovou soustavu s alternátorem jako zdrojem napětí sousledné složkové soustavy. Obvod zahrnuje impedance složenou z impedance alternátoru a impedance vnější části obvodu. Vyjádříme fázory napětí a proudů odpovídajících si fází v soustavě souměrných složek:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_B &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_1 + \mathbf{a}\mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_C &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}\mathbf{U}_1 + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_2 \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_A &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 \\
 \mathbf{I}_B &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_1 + \mathbf{a}\mathbf{I}_2 \\
 \mathbf{I}_C &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a}\mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_2
 \end{aligned}
 \tag{2.60}$$

Souměrné složky vnitřního napětí alternátoru označme $\mathbf{U}_{i1}, \mathbf{U}_{i2}, \mathbf{U}_{i0}$, souměrné složky napětí v místě zkratu $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{U}_0$, složkové proudy $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_0$, a složkové impedance $\mathbf{Z}_{c1}, \mathbf{Z}_{c2}, \mathbf{Z}_{c0}$. Pak platí:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_{i1} &= \mathbf{Z}_{c1}\mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\
 \mathbf{U}_{i2} &= \mathbf{Z}_{c2}\mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2 \\
 \mathbf{U}_{i0} &= \mathbf{Z}_{c0}\mathbf{I}_0 + \mathbf{U}_0
 \end{aligned}
 \tag{2.61}$$

Protože alternátor je vždy zdrojem jen sousledné složky napětí, platí:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_{i1} &= \mathbf{U}_i = c\mathbf{U}_f \\
 \mathbf{U}_{i2} &= 0 \\
 \mathbf{U}_{i0} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.62}$$

kde \mathbf{U}_f je fázor napětí na svorkách alternátoru a napěťový součinitel $c = 1$. Dostaneme základní rovnice složkových soustav:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_i &= \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_{c1}\mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\
 0 &= \mathbf{Z}_{c2}\mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2 \\
 0 &= \mathbf{Z}_{c0}\mathbf{I}_0 + \mathbf{U}_0
 \end{aligned}
 \tag{2.63}$$

Z rovnic (2.63) lze vyvodit závěry:

- 1) Zdrojem napětí sousledné složkové soustavy je alternátor
- 2) Původcem proudu zpětné a netočivé soustavy je napěťová nesymetrie v místě poruchy. V místě poruchy potřebujeme určit 6 veličin ($\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_0, \mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \mathbf{U}_0$), proto je třeba doplnit uvedené tři základní rovnice dalšími třemi rovnicemi podle uvažovaného typu zkratu. Dle zadání práce a očekávání největších velikostí zkratových proudů nás zajímá především jednofázový a trojfázový zkrat, proto se v dalším budu zabývat pouze těmito dvěma typy zkratů.

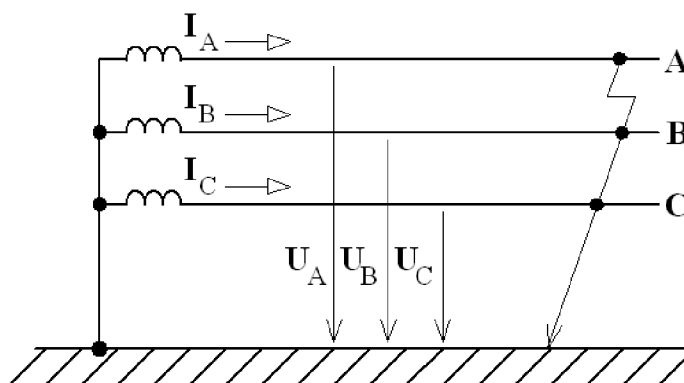
2.2.5 Trojfázový zkrat

Text této kapitoly byl vytvořen podle [2], [3], [4]. Trojfázový zkrat je znázorněn na obr. 2-11. Tento typ zkratu poskytuje v místě poruchy tři rovnice:

$$\mathbf{U}_A = \mathbf{U}_B = \mathbf{U}_C = 0.
 \tag{2.64}$$

Dosazením do rovnice (2.59) dostaneme

$$\begin{aligned}
 0 &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 \\
 0 &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_1 + \mathbf{a}\mathbf{U}_2 \\
 0 &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{a}\mathbf{U}_1 + \mathbf{a}^2\mathbf{U}_2
 \end{aligned}
 \tag{2.65}$$



Obr. 2-11 Trojfázový zemní zkrat

Součtem rovnic (2.65) zjistíme $U_0 = 0$. Uvážení této hodnoty při odečtení druhé rovnice od první dostáváme

$$U_0 = U_1 = U_2 = 0. \quad (2.66)$$

Dosazením do základních rovnic (2.63) dostaneme:

$$I_1 = \frac{U_i}{Z_{cl}}; \quad I_2 = 0; \quad I_0 = 0 \quad (2.67)$$

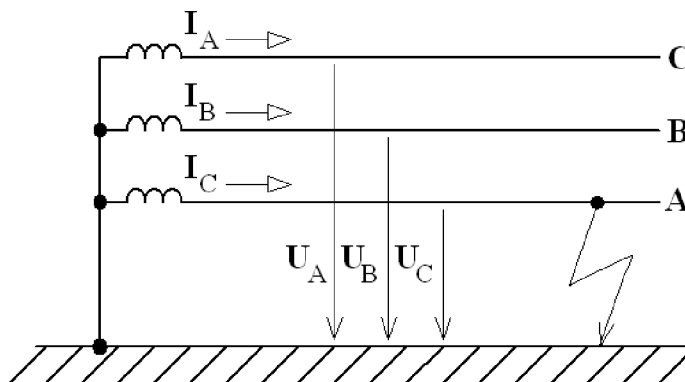
Dosazením do rovnice (2.60) a respektování chodu naprázdno zjistíme hledané zkratové proudy v jednotlivých fázích:

$$I_A = \frac{U_f}{Z_{cl}}; \quad I_B = a^2 \frac{U_f}{Z_{cl}}; \quad I_C = a \frac{U_f}{Z_{cl}}; \quad (2.68)$$

2.2.6 Jednofázový zkrat

Text této kapitoly byl vytvořen podle [2], [3], [4]. Jednofázový zkrat je znázorněn na obr. 2-12. Tento typ zkratu poskytuje v místě poruchy následující tři rovnice:

$$U_A = 0, \quad I_B = I_C = 0. \quad (2.69)$$



Obr. 2-12 Jednofázový zkrat

Podle rovnice (2.59) a (2.60) budou fázory napětí a proudů v místě poruchy:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_A &= \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_1 + \mathbf{U}_2 = 0 \\ \mathbf{I}_B &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_1 + \mathbf{a} \mathbf{I}_2 = 0 \\ \mathbf{I}_C &= \mathbf{I}_0 + \mathbf{a} \mathbf{I}_1 + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_2 = 0 \end{aligned} \quad (2.70)$$

Z posledních dvou rovnic jejich vzájemným odečtením bude:

$$(\mathbf{a} - \mathbf{a}^2) \mathbf{I}_1 + (\mathbf{a}^2 - \mathbf{a}) \mathbf{I}_2 = 0, \quad (2.71)$$

Z čehož vyplývá $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$. Dosadíme-li toto do rovnice (2.60), zjistíme $\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2$. Základní rovnice pak mají tvar

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_i &= \mathbf{Z}_{c1} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_1 \\ 0 &= \mathbf{Z}_{c2} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_2 \\ 0 &= \mathbf{Z}_{c0} \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_0 \end{aligned} \quad (2.72)$$

Jeich sečtením a respektováním (2.70) je

$$\mathbf{U}_i = (\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}) \mathbf{I}_1, \quad (2.73)$$

odkud

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \frac{\mathbf{U}_i}{\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}}. \quad (2.74)$$

Hledaný zkratový proud v postižené fázi A bude

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_1 + \mathbf{I}_2 = \frac{3\mathbf{U}_f}{\mathbf{Z}_{c1} + \mathbf{Z}_{c2} + \mathbf{Z}_{c0}}. \quad (2.75)$$

3 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je seznámit se podrobně s řešenou sítí 110 kV, napájenou z rozvodny 110 kV Otrokovice, provést rozbor ustáleného chodu a zkratových poměrů pro dvě varianty zapojení transformátorů, navrhnout provozní a technická opatření a práci celkově vyhodnotit.

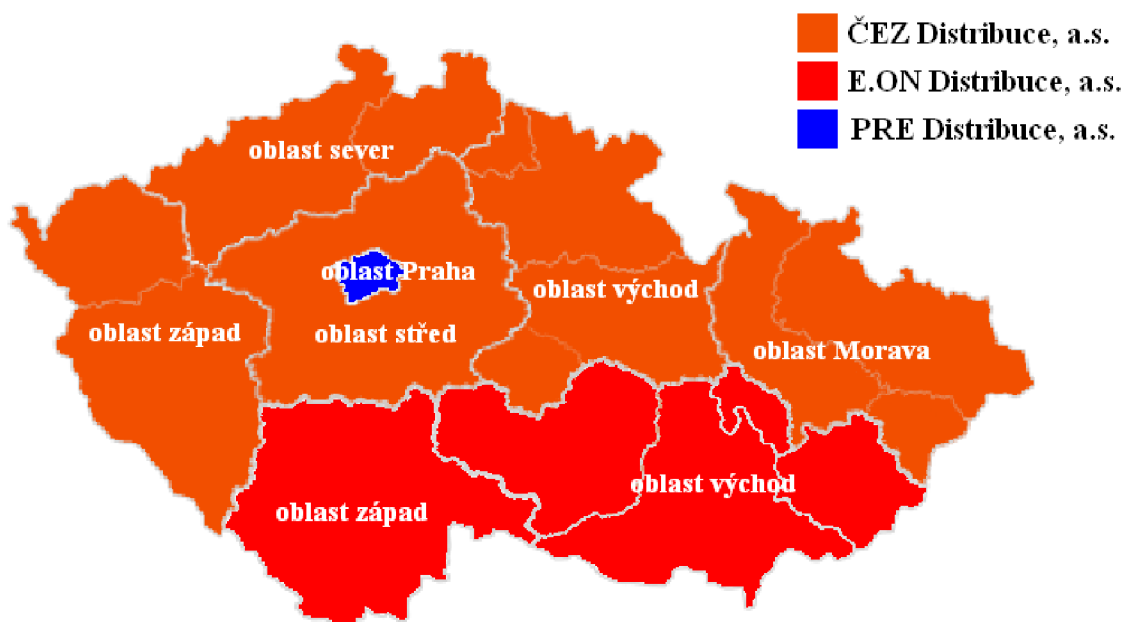
4 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO PROVOZU DS

Distribuční soustava (DS) slouží k zajištění distribuce elektrické energie z přenosové soustavy (nebo ze zdrojů zapojených do ní) k jednotlivým koncovým uživatelům. Současně je do této sítě vyveden výkon řady elektráren o výkonech řádově desítek MW. Součástí distribuční soustavy jsou i její řídicí, ochranné, zabezpečovací a informační systémy.

V podmínkách elektrizační soustavy ČR se jedná o rozvody a zařízení vvn o sdruženém napětí 110 kV (s výjimkou vybraných vedení a zařízení 110 kV, jež jsou součástí přenosové soustavy), které tvoří základní pilíř distribuční soustavy, zajišťující tranzit elektřiny z uzlových transformoven zvn/vvn a vvn/vvn do transformoven 110/vn. Síť velmi vysokého napětí je provozována jako okružní a spolu s vedeními zvn a vvn přenosové soustavy se vyznačuje vysokou spolehlivostí a velice nízkou četností poruch.

Dále se jedná o rozvody a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV (nn), 3 kV (vn), 6 kV (vn), 10 kV (vn), 22 kV (vn) a 35 kV (vn). Síť vysokého napětí je v České republice provozována v převážné míře s napětím 22 kV, resp. 35 kV používaných ve Východních Čechách a částečně v Severních Čechách. Z minulosti jsou v provozu sítě s napětím 3 kV, 6 kV a 10 kV. Tyto sítě ale nejsou dále rozvíjeny a jsou v rámci unifikace nahrazovány napětíovou hladinou 22 kV, resp. 35 kV. V drtivé většině je síť vysokého napětí provozována jako paprsková.

Mezi provozovatele distribučních soustav na území České republiky patří společnosti ČEZ Distribuce, a. s., provozující distribuční soustavu na území bývalého Západočeského, Severočeského, Středočeského, Východočeského a Severomoravského kraje. Dále je to společnost E.ON Distribuce, a. s. provozující distribuční soustavu na území bývalého Jihočeského a Jihomoravského kraje. Poslední významnou společností je PRE Distribuce, a. s., provozující distribuční soustavu na území hlavního města Prahy a města Roztoky u Prahy. Rozdělení území jednotlivých provozovatelů distribučních soustav i s názvy jejich dílčích oblastí je vidět na obr. 4-1.



Obr. 4-1 Rozdělení území jednotlivých provozovatelů distribučních soustav

Společnost E.ON Distribuce, a.s. provozuje distribuční soustavu na napěťové hladině velmi vysokého napětí (110 kV), vysokého napětí (22 kV) a nízkého napětí (0,4 kV). Distribuční soustava je převážně napájena z přenosové soustavy společnosti ČEPS, a.s. prostřednictvím nadřazených transformací 400/ 220/ 110 kV. Dále je (částečně) napájena z výroben E.ON Distribuce, a.s., závodních elektráren a ostatních lokálních zdrojů. V oblasti východ je napájení distribuční soustavy 110 kV zajištěno z nadřazené soustavy vvn (400 kV resp. 220 kV) prostřednictvím transformoven Čebín (400/ 110 kV), Otrokovice (400/ 110 kV), Slavětice (400/ 110 kV), Sokolnice (400/ 220/ 110 kV), a Mírovka (400/110 kV), kde je vyčleněný jeden transformátor 250 MVA pro zásobování části oblasti východ. Distribuční soustava 110kV oblasti východ je provozována v oddělených oblastech náležících jednotlivým transformátorům 400/110 kV (220/110 kV) a nazývajících se zpravidla podle uzlových transformoven. Provozuje se s maximálně možným zkruhováním jednotlivých síťových celků. Rozpojovací místa jsou volena tak, že z hlediska ztrát se způsob provozu distribuční sítě 110 kV blíží paralelnímu chodu. [5]

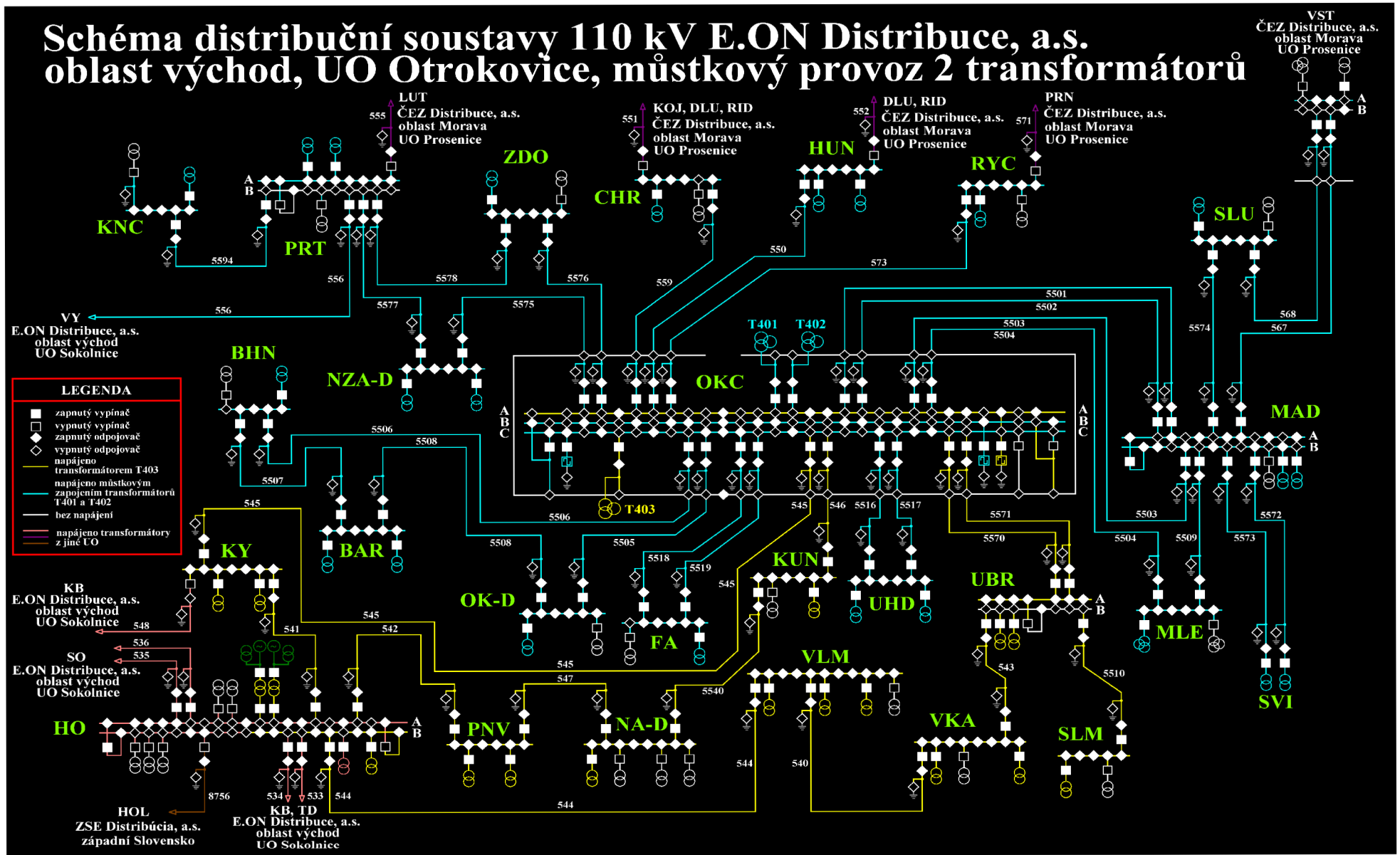
V dalším se budeme zabývat pouze naší řešenou oblastí, a tou je oblast uzlové transformovny 400/110 kV Otrokovice, tedy uzlová oblast (UO) Otrokovice.

5 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO PROVOZU DS 110 kV UO OTROKOVICE

5.1 Popis DS 110 kV UO Otrokovice

UO Otrokovice čítá dvacet pět rozvoden, propojených vzájemně třiceti šesti vedeními 110 kV. Seznam rozvoden v UO Otrokovice, včetně uzlové transformovny 400/110 kV Otrokovice je v Tab. 5-1. Seznam vedení 110 kV v UO Otrokovice je v Tab. 5-2. Převážná část rozvoden patří do nadřazené distribuční soustavy provozovatele E.ON Distribuce, a.s. Zbylá část slouží jako předávací místa mezi nadřazenou distribuční soustavou E.ON Distribuce, a.s. a lokálními distribučními soustavami (LDS), provozovanými jinou společností a řídicí toky elektrické energie ve spolupráci s nadřazenou distribuční soustavou E.ON Distribuce, a.s. Typicky se jedná o lokální distribuční soustavy v rámci železnic, průmyslových zón, obchodních center a bytových komplexů. Transformovny NA-D, NZA-D, OK-D jsou předávacími místy mezi sítěmi lokálních distribučních soustav železnic (LDSŽ) a nadřazenou distribuční soustavou E.ON Distribuce, a.s.

Kromě rozvoden Slavičín a Konice, kde se používá paprskové uspořádání rozvodu je v celé oblasti uspořádání rozvodu okružní, nebo umožňující spojení do okružního rozvodu přes sousední UO. Současnému provozu DS 110 kV UO Otrokovice, tedy můstkovému provozu transformátorů T401 a T402 a samostatnému provozu transformátoru T403 odpovídá konfigurace na Obr. 5-1. S UO Otrokovice sousedí UO Prosenice (Čez Distribuce, a.s.) a UO Sokolnice (E.ON Distribuce, a.s.). Propojení s UO Prosenice je provedeno šesti vedeními 110 kV (551, 552, 555, 571, 567, 568) a s UO Sokolnice dvěma vedeními 110 kV (548 a 556). Za normálních okolností se vedení mezi UO provozují ve stavu naprázdno (z jedné strany odpojeny). Slouží pouze jako případná vzájemná výpomoc při nedostatku elektrické energie nebo při poruše. Seznam vedení 110 kV mezi UO Otrokovice, UO Sokolnice a UO Prosenice je v Tab. 5-3. Pozn. V této tabulce jsou zahrnuty i vedení 110 kV UO Sokolnice (533, 534, 535 a 536) a přeshraniční vedení 110 kV (8756) mezi UO Sokolnice a UO Senice (ZSE Distribúcia, a.s., západní Slovensko), neboť tyto vedení vycházejí z rozvodny Hodonín, která spadá jak do UO Otrokovice, tak do UO Sokolnice (jeden přípojnicový systém využívá zpravidla UO Otrokovice a druhý využívá UO Sokolnice). Seznam rozvoden, které nepatří do UO Otrokovice, ale jejichž název je použit ve schématech je uveden v Tab. 5-4. S nadřazenou přenosovou soustavou 400 kV je transformovna Otrokovice spojena vedením 417 (Otrokovice - Sokolnice) a vedením 418 (Otrokovice - Prosenice).



Obr. 5-1 Schéma distribuční soustavy 110 kV E.ON Distribuce, a.s., můstkový provoz 2 transformátorů

Tab. 5-1 Seznam transformoven v UO Otrokovice

Transformovna	Dispečerská zkratka	Provozovatel vn strany	Zkratová odolnost vypínačů [MVA]
Otrokovice, Barum	BAR	LDS	5000
Otrokovice - Bahňák	BHN	E.ON Dsitribuce, a.s.	5000
Napajedla, Fatra	FA	LDS	3500
Hodonín	HO	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Hulín	HUN	E.ON Distribuce, a.s.	3500
Chropyně, Technoplast	CHR	Energetika Chropyně, a.s. (LDS)	3500
Konice	KNC	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Kunovice	KUN	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Kyjov	KY	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Mladcová	MAD	E.ON Dsitribuce, a.s.	5000
Malenovice, ZPS	MLE	E.ON Dsitribuce, a.s.	5000
Nedakonice, ČD	NA-D	Správa železniční dopravní cesty, s.o. (LDSŽ)	3500
Nezamyslice, ČD	NZA-D	Správa železniční dopravní cesty, s.o. (LDSŽ)	3500
Otrokovice	OKC	E.ON Dsitribuce, a.s.	5000
Otrokovice, ČD	OK-D	Správa železniční dopravní cesty, s.o. (LDSŽ)	5000
Pánov	PNV	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Prostějov	PRT	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Rychlov	RYC	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Slavičín	SLM	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Slušovice	SLU	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Zlín, Svit	SVI	LDS	3500
Uherský Brod	UBR	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Uherské Hradiště	UHD	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Velká nad Veličkou	VKA	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Veselí na Moravě	VLM	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500
Zdounky	ZDO	E.ON Dsitribuce, a.s.	3500

Pozn. Pokud je provozovatel vn strany znám, je uveden, pokud není znám, je uvedeno, že se jedná o LDS. Nás zajímá především provozovatel vvn strany, kterým je u všech rozvodů E.ON Dsitribuce, a.s. Provozovatel vn strany je zde uveden, protože u transformátorů těchto provozovatelů nebudou v dalších kapitolách známy některé parametry. U těchto transformátorů jsou známy pouze jmenovité výkony a jmenovitý převod.

Tab. 5-2 Seznam vedení 110 kV v UO Otrokovice

Vedení	Počáteční uzel	Koncový uzel	Typ vedení	Přenosová schopnost [MW]	Proudová zatížitelnost I_{lim} [A]
540	VKA	VLM	185 AIFe 6	80	450
541	HO	KY	185 AIFe 6	70	450
542	HO	PNV	185 AIFe 6	80	450
543	UBR	VKA	185 AIFe 6	80	450
544	HO	VLM	185 AIFe 6	80	450
545	OKC	KY	185 AIFe 6	80	450
546	OKC	KUN	185 AIFe 6	80	450
547	NA-D	PNV	185 AIFe 6	80	450
550	OKC	HUN	185 AIFe 6	70	450
559	OKC	CHR	185 AIFe 6	80	450
573	OKC	RYC	185 AIFe 6	85	450
5501	OKC	MAD	185 AIFe 6	70	450
5502	OKC	MAD	185 AIFe 6	70	450
5503	OKC	MAD	185 AIFe 6	70	450
5504	OKC	MLE	240 AIFe 6	95	450
5505	OKC	OK-D	185 AIFe 6	80	450
5506	OKC	BHN	185 AIFe 6	80	450
5507	BAR	BHN	185 AIFe 6	80	450
5508	BAR	OK-D	185 AIFe 6	80	450
5509	MAD	MLE	185 AIFe 6	70	450
5510	SLM	UBR	185 AIFe 6	50	350
5516	OKC	UHD	185 AIFe 6	70	420
5517	OKC	UHD	185 AIFe 6	70	420
5518	OKC	FA	240 AIFe 6	90	450
5519	OKC	FA	240 AIFe 6	90	450
5540	KUN	NA-D	185 AIFe 6	80	450
5570	OKC	UBR	185 AIFe 6	80	450
5571	OKC	UBR	185 AIFe 6	80	450
5572	MAD	SVI	185 AIFe 6	40	450
5573	MAD	SVI	185 AIFe 6	25	450
5574	MAD	SLU	185 AIFe 6	70	450
5575	OKC	NZA-D	240 AIFe 6	95	450
5576	OKC	ZDO	240 AIFe 6	95	450
5577	NZA-D	PRT	240 AIFe 6	95	450
5578	PRT	ZDO	240 AIFe 6	95	450
5594	KNC	PRT	185 AIFe 6	40	450

Tab. 5-3 Seznam vedení 110 kV mezi UO Otrokovice, UO Sokolnice a UO Prosenice, pokračování tabulky je na další stránce

Vedení	Počáteční uzel	UO počátečního uzlu	Koncový uzel	UO koncového uzlu	Typ vedení	Přenosová schopnost [MW]	Proudová zatížitelnost I_{lim} [A]
533	HO	SO	TD	SO	185 AIFe 6	80	450
534	HO	SO	KB	SO	185 AIFe 6	80	450
535	HO	SO	SO	SO	185 AIFe 6	80	450
536	HO	SO	SO	SO	185 AIFe 6	80	450
548	KY	OKC	KB	SO	240 AIFe 6	95	450
551	CHR	OKC	KOJ, DLU, RID	PRN	185 AIFe 6	80	450
552	HUN	OKC	DLU, RID	PRN	185 AIFe 6	70	450

555	PRT	OKC	LUT	PRN	185 AIFe 6	80	450
556	PRT	OKC	VY	SO	185 AIFe 6	80	450
567	MAD	OKC	VST	PRN	185 AIFe 6	65	450
568	SLU	OKC	VST	PRN	185 AIFe 6	65	450
571	RYC	OKC	PRN	PRN	240 AIFe 6	85	450
8756	HO	SO	HOL	SEN	185 AIFe 6	80	450

Tab. 5-4 Seznam rozveden označených ve schématech, ale nepatřících do UO Otrokovice

Rozvodna	Dispečerská zkratka	Provozovatel vn strany	Uzlová oblast
Dluhonice	DLU	ČEZ Dsitribuce, a,s,	Prosenice
Holíč	HOL	ZSE Distribúcia, a,s,	Senica
Benzina Klobouky	KB	E,ON Dsitribuce, a,s,	Sokolnice
Kojetín	KOJ	ČEZ Dsitribuce, a,s,	Prosenice
Luťín	LUT	ČEZ Dsitribuce, a,s,	Prosenice
Prosenice	PRN	ČEZ Dsitribuce, a,s,	Prosenice
Říkovice	RID	ČEZ Dsitribuce, a,s,	Prosenice
Sokolnice	SO	E,ON Dsitribuce, a,s,	Sokolnice
Tvrdonice	TD	E,ON Dsitribuce, a,s,	Sokolnice
Vsetín	VST	ČEZ Dsitribuce, a,s,	Prosenice
Vyškov	VY	E,ON Dsitribuce, a,s,	Sokolnice

V dalším článku jsou detailněji popsány jednotlivé rozvodny UO Otrokovice.

5.2 Popis rozveden v UO Otrokovice

Pozn. U některých turbogenerátorů v UO Otrokovice není z důvodu různých provozovatelů vn strany známo detailnější vyvedení výkonu, jsou proto uvedeny jen jejich jmenovité výkony.

Otrokovice, Barum (BAR)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Toto řešení se používá v transformovnách, kde se vystačí s malým počtem odboček (nejvýše šest). Zde je použito tzv. H schéma, používané v transformovnách, kde se vystačí se dvěma přívody a dvěma transformátory. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení, které funguje jako rozpadové místo při poruše (dvě sekce, porucha na jedné sekci vyřadí z provozu pouze danou sekci). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/6 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení přilehlého průmyslového areálu výrobce pneumatik Barum Continental, s.r.o. Je zde vyveden výkon dvou turbogenerátorů, každý o jmenovitém výkonu 32 MVA (Teplárna Otrokovice a.s.).

Otrokovice – Bahňák (BHN)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Napajedla, Fatra (FA)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/6 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Transformovna slouží k napájení přílehlého průmyslového areálu zpracovatele plastů, společnosti Fatra, a.s.

Hodonín (HO)

Jedná se o transformovnu s dvojitým systémem přípojníc, spojeným dvěma příčnými spínači přípojníc. U obou přípojníc je využito také podélného dělení, čímž vznikají celkem čtyři sekce přípojníc. Za normálního provozu je sepnut jeden příčný spínač a jedno podélné dělení. V tom případě se provozují zvlášť tři spojené sekce (využívá UO Sokolnice) a zvlášť jedna sekce, kterou využívá UO Otrokovice. Instalovány jsou zde tři distribuční transformátory 110/22 kV (T6, T7, T13), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA a dva distribuční transformátory 110/6 kV (T12 (16 MVA) a T5 (12,5 MVA)). Transformovna slouží převážně k napájení distribuční soustavy 22 kV. Do soustavy 110 kV je přes blokové transformátory 110/10,5 kV (T8, T10, oba 63 MVA) vyveden výkon dvou turbogenerátorů, každý o jmenovitém výkonu 63 MVA. Ty podle potřeby vypomáhají s napájením UO Otrokovice a UO Sokolnice. Odbočky k transformátorům T9 a T11 slouží k napájení vlastní spotřeby. Vedením 8756 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Senica.

Hulín (HUN)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV. Vedením 552 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Prosenice.

Chropyně, Technoplast (CHR)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/6 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 16 MVA. Transformovna sloužila do požáru v dubnu roku 2011 k napájení přílehlého průmyslového areálu zpracovatele plastů, společnosti Fatra, a.s. Vedením 551 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Prosenice.

Konice (KNC)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Kunovice (KUN)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV, jeden o jmenovitém výkonu 25 MVA (T102),

druhý o jmenovitém výkonu 40 MVA (T101). Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Kyjov (KY)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma v rozšířeném provedení. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV, každý o jmenovitém výkonu 40 MVA (T101, T102). Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV. Vedením 548 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Sokolnice. Je zde vyveden výkon tří turbogenerátorů, každý o jmenovitém výkonu 10 MVA (Teplárna Kyjov, a.s.). V režimu rychle startující 15-ti minutové zálohy (bloky, které jsou do 15 minut od příkazu dispečera schopny poskytnout sjednanou regulační zálohu pro vykrývání špičkových spotřeb elektrické energie) je elektrická energie předávána v rámci podpůrných služeb společnosti ČEPS.

Mladcová (MAD)

Jedná se o transformovnu s dvojitým systémem přípojnic, spojeným příčným spínačem přípojnic, který je za normálního provozu sepnut. Příčný spínač přípojnic umožňuje přepojování odboček z jednoho systému přípojnic na druhý bez přerušení dodávky elektrické energie a je nezbytnou součástí dvojitého systému přípojnic. V případě poruchy jedné z přípojnic funguje příčný spínač přípojnic i jako rozpadové místo, čímž oddělí nepoškozenou přípojnic od poruchy a v oblasti tak nedojde ani ke krátkodobému přerušení dodávky elektrické energie. Instalovány jsou zde tři distribuční transformátory 110/22 kV, dva o jmenovitém výkonu 40 MVA (T102, T103) a jeden o jmenovitém výkonu 25 MVA (T101). Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Malenovice, ZPS (MLE)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22/6 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Transformovna slouží k napájení průmyslového areálu místní slévárny (ZPS-SLÉVÁRNA, a.s.) a k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Nedakonice, ČD (NA-D)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma v rozšířeném provedení. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 10 MVA a dva transformátory 110/27 kV (T1, T2), každý o jmenovitém výkonu 12,5 MVA. Transformovna slouží k napájení trakční soustavy.

Nezamyslice, ČD (NZA-D)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory. Jeden o jmenovitém výkonu 10 MVA (110/22 kV, T101) a druhý o jmenovitém výkonu 12,5 MVA (110/27 kV, T111). Transformovna slouží k napájení trakční soustavy.

Otrokovice (OKC)

Jedná se o uzlovou transformovnu 400/110 kV. S nadřazenou přenosovou soustavou 400 kV je spojena vedením 417 (Otrokovice - Sokolnice) a vedením 418 (Otrokovice - Prosenice). Je zde použito trojitého systému přípojnic s pomocnou přípojnicí. U hlavních přípojnic je využito jak podélného, tak příčného dělení, čímž vzniká celkem šest sekcí přípojnic. Za normálního provozu je sepnut jeden příčný spínač a všechny podélné dělení. V tom případě se provozují zvlášť dvě spojené sekce (přípojnice A), které napájí transformátor T403, a zvlášť čtyři spojené sekce (přípojnice B a C spojené příčným spínačem přípojnic), které napájí můstkové zapojení transformátorů T401 a T402. Jmenovitý výkon všech tří uzlových transformátorů 400/110 kV je 350 MVA. Transformovna slouží k napájení UO Otrokovice. Jsou zde umístěny tři vysílače HDO.

Otrokovice, ČD (OK-D)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 10 MVA. Transformovna slouží k napájení trakční soustavy.

Pánov (PNV)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Prostějov (PRT)

Jedná se o transformovnu s dvojitým systémem přípojnic, spojeným příčným spínačem přípojnic, který je za normálního provozu rozpojen (v provozu je zpravidla jeden systém přípojnic, druhý je využíván jako záložní). Instalovány jsou zde tři distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102, T103), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV. Vedením 555 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Prosenice. Vedením 556 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Sokolnice.

Rychlov (RYC)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV. Vedením 571 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Prosenice.

Slavičín (SLM)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Slušovice (SLU)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány

jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV. Vedením 567 a 568 transformovna spojuje UO Otrokovice a UO Prosenice.

Zlín, Svit (SVI)

Jedná se o transformovnu, kde každý transformátor má samostatný přívod z transformovny Mladcová. Instalovány jsou zde dva transformátory 110/6 kV (T114, T115), jeden o jmenovitém výkonu 25 MVA a druhý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Dříve transformovna sloužila k napájení areálu obuvnického podniku Svit. Je zde vyveden výkon dvou turbogenerátorů (42 MVA a 32 MVA, Teplárna Zlín), v případě potřeby je možno pro výrobu elektřiny využít také další turbogenerátory (4 x 8 MVA, rovněž Teplárna Zlín).

Uherský Brod (UBR)

Jedná se o transformovnu s dvojitým systémem přípojnic, spojeným příčným spínačem přípojnic, který je za normálního provozu rozpojen (v provozu je zpravidla jeden systém přípojnic, druhý je využíván jako záložní). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Uherské Hradiště (UHD)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 40 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Velká nad Veličkou (VKA)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma v rozšířeném provedení. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (tři sekce). Instalovány jsou zde tři distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102, T103), každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Transformovna slouží zčásti k napájení distribuční soustavy 22 kV (vyčleněn T103) a zčásti (vyčleněny transformátory T101 a T102) k napájení průmyslového areálu místní kordárny (výroba technických tkanin).

Veselí na Moravě (VLM)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma v rozšířeném provedení. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (tři sekce). Instalovány jsou zde čtyři distribuční transformátory. Dva distribuční transformátory 110/6 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 16 MVA jsou vyčleněny k napájení průmyslového areálu místních železáren. Dva distribuční transformátory 110/ 22 kV o jmenovitých výkonech 25 MVA (T103) a 40 MVA (T104) slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

Zdounky (ZDO)

Jedná se o transformovnu bez přípojnicového systému. Použito je zde tzv. H schéma. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie je využito podélného dělení (dvě sekce). Instalovány jsou zde dva distribuční transformátory 110/22 kV (T101, T102), každý o jmenovitém výkonu 25 MVA. Transformovna slouží k napájení distribuční soustavy 22 kV.

6 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 kV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU DVOU TRANSFORMÁTORŮ

6.1 Ustálený chod DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu dvou transformátorů

Ustálený chod sítě byl vypočítán dispečerským programem SINAUT Spektrum 4.4, určeným primárně pro řízení provozu distribuční soustavy 110 kV. Tento program umožňuje také převzít aktuální konfiguraci (včetně parametrů prvků sítě) a dále s ní pracovat a provádět jednotlivé studie bez ovlivnění reálného chodu sítě. Výpočet se provádí na základě Newtonovy iterační metody popsané v článku 2.1.4. Námí řešená konfigurace sítě je ze dne 1. 3. 2012 (12:20:07), odpovídá Obr. 6-1. Výstup výsledků z programu SINAUT Spektrum 4.4 lze nalézt v příloze práce.

U ustáleného chodu DS 110 kV UO Otrokovice se zaměříme na zhodnocení:

- napěťových poměrů v jednotlivých uzlech
- zatížení vedení 110 kV a transformátorů 110 kV/ vn
- zatížení transformátorů 400/ 110 kV
- ztrát na vedeních 110 kV a transformátorech 110 kV/ vn
- ztrát na transformátorech 400/ 110 kV

6.1.1 Napěťové poměry DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu dvou transformátorů

Transformátory 400/110 kV v transformovně Otrokovice jsou předávacím místem mezi přenosovou soustavou a distribuční soustavou. Napětí 110 kV je v tomto pilotním uzlu UO Otrokovice drženo přenosovou soustavou. Samozřejmostí pro všechny transformovny 400/110 kV (220/110 kV) je regulace napětí, která udržuje zadané napětí v pilotním uzlu. Omezujícími podmínkami jsou především maximální hodnoty napětí v uzlech soustavy, aktuální hodnoty rezervy regulačního jalového výkonu a toky jalového výkonu přes transformátory PS/110 kV. Účelem regulace napětí je minimalizace přenosových ztrát v regulované soustavě. Vzhledem k tomu, že tedy záleží i na konfiguraci sítě, udávají se každý měsíc maximální udržovaná napětí v transformovnách s transformací 400/110 kV (220/110 kV). Budeme uvažovat tolerance dle PPDS, podle nichž pro hladinu napětí 110 kV a předávací místa PS/DS platí za normálních provozních podmínek následující tabulka velikostí a odchylek napájecího napětí:

Tab. 6-1 Velikost a odchyly napětí distribuční sítě 110 kV a předávacích míst PS/DS

Sít'	Dovolený rozsah
110 kV	110 ± 10 %
220 kV	220 ± 10 %
400 kV	400 ± 5 %

U transformoven 110 kV/ vn tedy budeme sledovat povolenou toleranci ±10% od jmenovité hodnoty napětí 110 kV (tj. 99 kV až 121 kV), u transformovny Otrokovice taktéž povolenou toleranci ±10% od jmenovité hodnoty napětí 110 kV. Přehled napěťových poměrů v jednotlivých uzlech UO Otrokovice je v Tab. 6-2.

Tab. 6-2 Napěťové poměry v jednotlivých uzlech při můstkovém provozu dvou transformátorů

Rozvodna (uzel)	Spodní limit napětí v uzlu	Napětí v uzlu	Úhel napětí v uzlu	Horní limit napětí v uzlu
	U_- [kV]	U [kV]	δ [°]	U_+ [kV]
Otrokovice, Barum (BAR)	99	119,8	-2,93	121
Otrokovice - Bahňák (BHN)	99	119,8	-2,92	121
Napajedla, Fatra (FA)	99	119,9	-2,88	121
Hodonín (HO) - přípojnice B	99	118,6	-2,12	121
Hulín (HUN)	99	119,4	-3,04	121
Chropyně, Technoplast (CHR)	99	119,8	-3,04	121
Konice (KNC)	99	117,2	-5,51	121
Kunovice (KUN)	99	118,4	-2,75	121
Kyjov (KY)	99	117,9	-2,62	121
Mladcová (MAD) - přípojnice A	99	119,7	-3,01	121
Mladcová (MAD) - přípojnice B	99	119,7	-3,01	121
Malenovice, ZPS (MLE)	99	119,8	-2,90	121
Nedakonice, ČD (NA-D)	99	118,4	-2,71	121
Nezamyslice, ČD (NZA-D)	99	118,5	-4,40	121
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	99	119,1	-2,35	121
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	99	119,9	-2,85	121
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	99	119,9	-2,85	121
Otrokovice, ČD (OK-D)	99	119,8	-2,91	121
Pánov (PNV)	99	118,3	-2,41	121
Prostějov (PRT)	99	117,6	-5,22	121
Rychlov (RYC)	99	119,4	-3,36	121
Slavičín (SLM)	99	115,9	-3,91	121
Slušovice (SLU)	99	119,1	-3,34	121
Zlín, Svit (SVI) - A	99	119,7	-3,02	121
Zlín, Svit (SVI) - B	99	119,7	-3,00	121
Uherský Brod (UBR)	99	117,6	-3,25	121
Uherské Hradiště (UHD)	99	119,0	-3,38	121
Velká nad Veličkou (VKA)	99	117,6	-3,20	121
Veselí na Moravě (VLM)	99	117,8	-2,94	121
Zdounky (ZDO)	99	118,9	-3,80	121

Z Tab. 6-2 je patrné, že napětí se ve všech uzlech pohybuje v dovolené toleranci 99 kV až 121 kV. Udržováno je při svém horním limitu, což je výhodné z hlediska minimalizace ztrát.

6.1.2 Zatížení transformátorů a vedení v DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu dvou transformátorů

Nejprve se zaměříme na vedení. Budou nás zajímat parametry na začátku vedení ($P_1, Q_1, U_1, \delta U_1, I_1$, pozn.: za začátek vedení považujeme stranu, kde je činný výkon odebíráný z uzlu), parametry na konci vedení ($P_2, Q_2, U_2, \delta U_2, I_2$), ztráty na vedení ΔP_v a zatížení jednotlivých vedení s_{zv} . Z hlediska zatížení vedení jsme omezeni přenosovou schopností vedení, která je stanovena z konstrukčních parametrů vedení a vychází především z maximální proudové zatížitelnosti vedení, uvedené v Tab. 5-2. U některých vedení je však přenosová schopnost snížena přenosovou schopností nejslabšího síťového prvku. Pro vyjádření procentuálního zatížení vedení bude proto lepší, když budeme u vedení vycházet z přenosové schopnosti, než z maximální proudové zatížitelnosti. Symbol s_{zv} v Tab. 6-3 tedy značí procentuální poměr činného výkonu na začátku vedení (jeho absolutní hodnota) a přenosové schopnosti vedení.

Tab. 6-3 Zatížení vedení při můstkovém provozu dvou transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce

Vedení	Začátek vedení					Konec vedení					Ztráty a zatížení	
	P_1	Q_1	U_1	δU_1	I_1	P_2	Q_2	U_2	δU_2	I_2	ΔP_v	s_{zv}
	[MW]	[MVar]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[MVar]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[%]
540	-13,0	0,4	117,8	-2,94	63,6	12,9	0	117,6	-3,20	63,6	-0,022	16,3
541	-14,2	-2,4	118,6	-2,12	70,3	14,2	4,2	117,9	-2,62	71,1	-0,054	20,3
542	-20,4	-2,0	118,6	-2,12	99,9	20,4	2,3	118,3	-2,41	100,0	-0,041	25,5
543	-1,1	1,6	117,6	-3,20	9,5	1,1	-0,9	117,6	-3,25	6,8	-0,001	1,4
544	-21,8	-1,4	118,6	-2,12	106,6	21,7	2,0	117,8	-2,94	106,9	-0,125	27,3
545	-5,3	-4,4	119,1	-2,35	33,2	5,2	6,2	117,9	-2,62	39,7	-0,027	6,6
546	-9,3	-3,4	119,1	-2,35	48,0	9,2	4,6	118,4	-2,75	50,3	-0,029	11,6
547	-4,3	3,0	118,3	-2,41	25,7	4,3	-1,7	118,4	-2,71	22,5	-0,009	5,4
550	-9,7	-4,3	119,9	-2,85	51,2	9,7	4,8	119,4	-3,04	52,5	-0,022	13,9
559	-4,7	0,9	119,9	-2,85	22,8	4,7	0,2	119,8	-3,04	22,4	-0,006	5,9
573	-13,6	-1,0	119,9	-2,85	65,4	13,5	2,1	119,4	-3,36	66,1	-0,042	16,0
5501	-14,4	-1,2	119,9	-2,85	69,6	14,4	1,5	119,7	-3,01	69,8	-0,020	20,6
5502	-14,4	-1,2	119,9	-2,85	69,6	14,4	1,5	119,7	-3,01	69,8	-0,020	20,6
5503	-14,9	-1,8	119,9	-2,85	72,1	14,8	2,0	119,7	-3,01	72,2	-0,019	21,3
5504	-20,2	-2,5	119,9	-2,85	98,1	20,2	2,6	119,8	-2,90	98,1	-0,006	21,3
5505	-13,2	-1,8	119,9	-2,85	64,1	13,2	1,9	119,8	-2,91	64,2	-0,005	16,5
5506	-19,9	-3,6	119,9	-2,85	97,3	19,9	3,7	119,8	-2,92	97,4	-0,011	24,9
5507	-2,2	0,1	119,8	-2,92	10,4	2,2	0	119,8	-2,93	10,4	0	2,8
5508	-12,1	-2,7	119,8	-2,91	59,9	12,1	2,7	119,8	-2,93	59,9	-0,001	15,1
5509	-12,1	-1,7	119,8	-2,90	58,8	12,1	1,9	119,7	-3,01	59,0	-0,011	17,3

5510	-20,9	-7,0	117,6	-3,25	108,1	20,7	7,6	115,9	-3,91	109,6	-0,219	41,8
5516	-18,0	-3,7	119,9	-2,85	88,5	17,9	4,3	119,0	-3,38	89,4	-0,091	25,7
5517	-18,0	-3,7	119,9	-2,85	88,5	17,9	4,3	119,0	-3,38	89,4	-0,091	25,7
5518	-2,7	0,6	119,9	-2,85	13,2	2,7	-0,3	119,9	-2,88	13,0	-0,001	3,0
5519	-2,7	0,6	119,9	-2,85	13,2	2,7	-0,3	119,9	-2,88	13,0	-0,001	3,0
5540	-3,5	1,0	118,4	-2,71	17,6	3,5	-0,8	118,4	-2,75	17,3	-0,001	4,4
5570	-24,0	-8,0	119,1	-2,35	122,8	23,9	8,6	117,6	-3,25	124,5	-0,166	30,0
5571	-24,0	-8,0	119,1	-2,35	122,8	23,9	8,6	117,6	-3,25	124,5	-0,166	30,0
5572	-6,7	-1,9	119,7	-3,00	33,6	6,7	1,9	119,7	-3,01	33,7	0,001	16,8
5573	-1,4	2,2	119,7	-3,01	12,4	1,4	-2,1	119,7	-3,02	12,2	-0,001	5,6
5574	-16,1	-4,0	119,7	-3,01	80,0	16,0	4,5	119,1	-3,34	80,7	-0,050	23,0
5575	-24,1	-2,3	119,9	-2,85	116,4	23,9	3,2	118,5	-4,40	117,3	-0,209	25,4
5576	-27,8	-3,7	119,9	-2,85	135,2	27,7	4,1	118,9	-3,80	135,8	-0,151	29,3
5577	-22,2	-3,5	118,5	-4,40	109,5	22,1	4,1	117,6	-5,22	110,2	-0,106	23,4
5578	-23,4	-2,5	118,9	-3,80	114,1	23,2	3,4	117,6	-5,22	115,0	-0,187	24,6
5594	-7,0	-1,1	117,6	-5,22	34,9	7,0	2,1	117,2	-5,51	36,0	-0,016	17,5

Z Tab. 6-3 je patrné, že žádné vedení není přetěžováno, naopak je zde poměrně velká rezerva z důvodu možného nárůstu zatížení a možného výpadku některého z vedení (splnění kritéria N-1).

V další tabulce (Tab. 6-4) je přehled všech transformátorů 110 kV/ vn, jejich jmenovitý zdánlivý výkon S_n , jmenovitý převod p , jmenovitý proud I_n strany 110 kV, odebíraný činný výkon P_{calc} ze strany 110 kV, odebíraný jalový výkon Q_{calc} ze strany 110 kV, odebíraný proud I_{calc} ze strany 110 kV, ztráty činného výkonu na daném transformátoru ΔP_t a procentuální zatížení i_{zt} vzhledem ke jmenovitému proudu I_n (oproti zatížení vedení zde nenastává výkonové omezení, proto lze procentuální zatížení vztahovat ke jmenovitému proudu).

Tab. 6-4 Zatížení distribučních transformátorů 110kV/ vn při můstkovém provozu dvou transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce

Transformovna	Transformátor	S_n	p	I_n	P_{calc}	Q_{calc}	I_{calc}	ΔP_t	i_{zt}
		[MVA]	[-]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[A]	[MW]	[%]
Otrokovice, Barum (BAR)	T101	40	110/6 kV	210	-12,7	0,5	61,3	-	29,2
	T102	40	110/6 kV	210	-1,6	-3,3	17,5	-	8,3
Otrokovice - Bahňák (BHN)	T101	40	110/22 kV	210	-17,7	-3,8	87,3	-0,079	41,6
	T102	25	110/6 kV	131	-5,4	0,5	25,9	-	19,8
Hodonín (HO) - přípojnice B	T8	63	110/10,5 kV	331	28,4	6,1	141,3	-0,086	42,7
	T10	63	110/10,5 kV	331	33,8	5,6	166,8	-0,097	50,4
Hulín (HUN)	T12	16	110/6 kV	84	-5,7	-5,9	39,9	-	47,5
	T101	40	110/22 kV	210	-8,0	-2,8	41,1	-0,046	19,6
Chropyně, Technoplast (CHR)	T102	40	110/22 kV	210	-1,7	-2,0	12,7	-0,032	6,0
	T101	16	110/6 kV	84	-4,7	-0,2	22,4	-	26,7
Konice (KNC)	T102	25	110/22 kV	131	-7,0	-2,1	36,0	-0,022	27,5
Kunovice (KUN)	T102	25	110/22 kV	131	-12,7	-3,8	64,7	-0,051	49,4
Kyjov (KY)	T101	40	110/22 kV	210	-12,3	-6,4	67,6	-0,064	32,2
	T102	40	110/22 kV	210	-7,1	-3,0	38,0	-0,024	18,1
Mladcová (MAD) - přípojnice A	T103	40	110/22 kV	210	-20,6	-3,8	100,9	-0,149	48,0
Mladcová (MAD) - přípojnice B	T102	40	110/22 kV	210	-20,0	-3,1	97,8	-0,09	46,6
Malenovice, ZPS (MLE)	T101	25	110/22/6 kV	131	-8,1	-0,9	39,3	-	30,0
Nedakonice, ČD (NA-D)	T101	10	110/22 kV	52	-0,8	0,6	5,1	-	9,8

Nezamyslice, ČD (NZA-D)	T101	10	110/22 kV	52	-0,8	0,2	3,9	-	7,5
	T111	12,5	110/27 kV	52	-0,9	0,1	4,3	-	8,3
Otrokovice, ČD (OK-D)	T101	10	110/22 kV	52	-1,1	0,8	6,2	-	11,9
	Pánov (PNV)	T101	40	110/22 kV	226	0	-0,2	1,0	-0,038
Prostějov (PRT) - přípojnice A	T102	40	110/22 kV	210	-16	-5,1	82,1	-0,077	39,1
	T101	40	110/22 kV	210	-19,7	-3,9	98,5	-0,089	46,9
Rychlov (RYC)	T103	40	110/22 kV	210	-18,6	-3,9	93,0	-0,043	44,3
Slavičín (SLM)	T101	25	110/22 kV	131	-13,5	-2,1	66,1	-0,082	50,5
Slušovice (SLU)	T101	40	110/22 kV	210	-20,7	-7,6	109,6	-0,05	52,2
Zlín, Svit (SVI) - A	T101	40	110/22 kV	210	-20,4	-6,6	103,9	-0,097	49,5
Zlín, Svit (SVI) - B	T114	25	110/6 kV	131	-1,4	2,1	12,2	-0,038	9,3
Uherský Brod (UBR) - přípojnice A	T115	40	110/6 kV	210	6,7	1,9	33,6	-0,032	16,0
	T101	40	110/22 kV	210	-12,5	-3,6	63,9	-0,061	30,4
Uherské Hradiště (UHD)	T102	40	110/22 kV	210	-15,4	-5,6	80,5	-0,044	38,3
	T101	40	110/22 kV	210	-17,0	-3,5	84,1	-0,082	40,0
Velká nad Veličkou (VKA)	T102	40	110/22 kV	210	-18,9	-5,1	94,7	-0,045	45,1
	T102	25	110/22 kV	131	-6,8	-0,6	33,6	-	25,6
Veselí na Moravě (VLM)	T103	25	110/22 kV	131	-5,1	-1,1	25,4	-0,029	19,4
	T102	16	110/6 kV	84	-1,7	-0,2	8,2	-	9,8
Zdounky (ZDO)	T103	25	110/22 kV	131	-7,1	-2,0	35,9	-0,048	27,4
	T104	40	110/22 kV	210	0	-0,2	1,0	-0,036	0,5
	T102	25	110/22 kV	131	-4,3	-1,6	22,3	-0,023	17,0

Z Tab. 6-4 je patrné, že žádný z distribučních transformátorů není přetěžován, i zde je poměrně velká rezerva z důvodu možného nárůstu zatížení (ať už budoucího nárůstu nebo nárůstu v rámci proměnlivosti denního zatížení).

V tabulce (Tab. 6-5) je přehled uzlových transformátorů 400/ 110kV. Symboly použité v této tabulce odpovídají symbolům v Tab. 6-4, pouze u činného výkonu P_{calc} a jalového výkonu Q_{calc} se z hlediska strany 110 kV bude jednat o dodávané výkony.

Tab. 6-5 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/ 110kV při můstkovém provozu dvou transformátorů

Přípojnice	Transformátor	S_n	p	I_n	P_{calc}	Q_{calc}	I_{calc}	ΔP_t	i_{zt}
		[MVA]	[-]	[A]	[MW]	[MVAr]	[A]	[MW]	[%]
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	T403	350	400/110 kV	1837	62,6	23,9	324,8	-0,008	17,7
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	T402	350	400/110 kV	1837	111,5	6,2	538,1	-0,022	29,3
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	T401	350	400/110 kV	1837	106,6	22,5	524,7	-0,019	28,6

Z Tab. 6-5 je patrné, že žádný z uzlových transformátorů není přetěžován. Rovněž v tomto případě je velká rezerva z důvodu možného nárůstu zatížení nebo možného výpadku některého z transformátorů. Součtem výkonů lze z Tab. 6-4 a Tab. 6-5 zjistit tyto údaje:

- celkový dodávaný činný výkon do soustavy 110 kV je 349,6 MW
- celkový odebraný činný výkon ze soustavy 110 kV je 348,0 MW

Ztráty na vedeních 110kV činí tedy 1,6 MW.

6.2 Zkratové poměry v DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu dvou transformátorů

Zkratové poměry byly vypočítány rovněž pomocí dispečerského programu SINAUT Spektrum 4.4. Řešená konfigurace odpovídá Obr. 6-1. Zkraty jsou počítány v nejnepříznivějších místech, tedy přímo na přípojnicích. Zhodnocení výsledků je v Tab. 6-6. K vyhodnocení bylo využito literatury [6] a [7].

Dimenzování vybavení jednotlivých rozveden musí být takové, aby působením zkratových proudů, které se v daném místě mohou vyskytnout, nebylo překročené dynamické ani tepelné namáhání. Odolnost přístrojových vybavení vvn se volí z normalizované řady zkratových odolností.

Při kontrole dynamického namáhání přístrojů se vychází z hodnot 3 – fázového zkratu, konkrétně z počátečního rázového zkratového proudu při tomto zkratu $^{(3)}I_k''$. Podle (2.49) se vypočte nárazový zkratový proud I_{km} (K má v soustavě vvn bez asynchronních motorů hodnotu 1,6), který se následně porovná se jmenovitým dynamickým proudem I_{dyn} (udávaným normalizovanou řadou):

$$I_{km} \leq I_{dyn} \quad (6.1)$$

Pokud podmínice (6.1) přístroje vyhoví, vyhoví také dynamickému namáhání zkratovým proudem. Hodnoty I_{dyn} nejsou ve výsledcích dispečerského programu SINAUT Spektrum 4.4 udávány, proto je zde uveden pouze postup při kontrole dynamického namáhání.

Při kontrole tepelného namáhání se vychází v soustavě s účinně uzemněným uzlem (což je soustava 110kV) z hodnot 3 – fázového nebo 1 – fázového zkratu. Konkrétně z počátečního rázového zkratového proudu (vyšší z hodnot $^{(3)}I_k''$ a $^{(1)}I_k''$). Podle (2.54) nebo textu uvedeného pod (2.54) se vypočte ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} , který se následně porovná se jmenovitým krátkodobým proudem I_{th} (udávaným normalizovanou řadou). Pokud je I_{ke} menší nebo roven I_{th} (po přepočtení na stejnou dobu trvání zkratu), nedojde k překročení tepelného namáhání zkratovým proudem. Hodnoty I_{th} nejsou ve výsledcích dispečerského programu SINAUT Spektrum 4.4 udávány, proto je zde uveden pouze postup při kontrole tepelného namáhání.

V našem případě se zaměříme na kontrolu vypínací schopnosti vypínačů (neboli zkratové odolnosti vypínačů). Vypínací schopnost se kontroluje při nejkratší možné době zkratu. Porovnává se jmenovitý vypínací zkratový výkon S_{vyp} (popř. jmenovitý vypínací zkratový proud I_{vyp}) s počátečním rázovým zkratovým výkonem S_k'' (popř. počátečním rázovým zkratovým proudem I_k''). Vypínače vyhoví v případě splnění podmínky:

$$S_k''(I_k'') \leq S_{vyp}(I_{vyp}) \quad (6.2)$$

Tab. 6-6 Zkratové poměry při mŕstkovém provozu dvou transformátorŕ

Rozvodna	3 - fázový zkrat			1 - fázový zkrat			
	S_{vyp}	$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(3)}S_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(1)}S_k''$
	[MVA]	[MVA]	[kA]	[%]	[MVA]	[kA]	[%]
Otrokovice, Barum (BAR)	5000	3261,9	17,121	65,24	2816,9	14,78	56,34
Otrokovice - Bahňák (BHN)	5000	3447,2	18,093	68,94	3062,1	16,07	61,24
Napajedla, Fatra (FA)	3500	2876,4	15,097	82,18	2364,6	12,41	67,56
Hodonín (HO) - přípojnice B	3500	1407,5	7,387	40,21	1508,4	7,92	43,10
Hulín (HUN)	3500	1363,9	7,159	38,97	1266,7	6,65	36,19
Chropyně, Technoplast (CHR)	3500	958,0	5,028	27,37	627,9	3,30	17,94
Konice (KNC)	3500	479,0	2,514	13,69	458,3	2,41	13,09
Kunovice (KUN)	3500	1053,9	5,531	30,11	875,5	4,59	25,01
Kyjov (KY)	3500	1043,4	5,477	29,81	1049,3	5,51	29,98
Mladcová (MAD) - přípojnice A	5000	3458,5	18,153	69,17	3267,5	17,15	65,35
Mladcová (MAD) - přípojnice B	5000	3458,5	18,153	69,17	3267,5	17,15	65,35
Malenovice, ZPS (MLE)	5000	3599,4	18,892	71,99	3217,3	16,89	64,35
Nedakonice, ČD (NA-D)	3500	989,8	5,195	28,28	817,1	4,29	23,35
Nezamyslice, ČD (NZA-D)	3500	902,8	4,738	25,79	759,7	3,99	21,71
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	5000	2894,9	15,194	57,90	1952,9	10,25	39,06
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	5000	4285,2	22,492	85,70	4053,2	21,27	81,06
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	5000	4285,2	22,492	85,70	4053,2	21,27	81,06
Otrokovice, ČD (OK-D)	5000	3362,5	17,649	67,25	2919,9	15,33	58,40
Pánov (PNV)	3500	1149,1	6,031	32,83	1201,7	6,31	34,33
Prostějov (PRT) - přípojnice A	3500	817,7	4,292	23,36	860,7	4,52	24,59
Rychlov (RYC)	3500	1001,0	5,254	28,60	772,1	4,05	22,06
Slavičín (SLM)	3500	668,5	3,509	19,10	614,7	3,23	17,56
Slušovice (SLU)	3500	1526,8	8,013	43,62	1302,7	6,84	37,22
Zlín, Svít (SVI) - A	3500	3145,6	16,510	89,87	2877,1	15,10	82,20
Zlín, Svít (SVI) - B	3500	3146,2	16,513	89,89	2892,0	15,18	82,63
Uherský Brod (UBR) - přípojnice A	3500	1529,7	8,029	43,71	1443,5	7,58	41,24
Uherské Hradiště (UHD)	3500	1774,7	9,315	50,71	2474,4	12,99	70,70
Velká nad Veličkou (VKA)	3500	1113,8	5,846	31,82	1018,6	5,35	29,10
Veselí na Moravě (VLM)	3500	1070,6	5,619	30,59	1049,4	5,51	29,98
Zdounky (ZDO)	3500	1236,1	6,488	35,32	1067,9	5,60	30,51

Z Tab. 6-6 je vidět, že všechny vypínače v rozvodnách vyhovují z hlediska zkratové odolnosti.

7 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V DS 110 kV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ

Sledované parametry i použité symboly jsou stejné jako kapitole 6. Proto jsou v této kapitole uvedeny pouze jednotlivé tabulky a zhodnocení. Řešená konfigurace sítě je ze dne 1. 3. 2012 (13:43:49) a odpovídá Obr. 7-1. Změny oproti předchozí konfiguraci jsou zde vyznačeny. Došlo k propojení přípojníc A a C pomocí příčného spínače přípojníc a přepojení vedení 545 a 5571 na zbylé přípojnice. Oblast je potom napájena můstkovým zapojením všech tří transformátorů (T401, T402 i T403). Porovnáním konfigurací popsaných v kapitole 6 a kapitole 7 se zabývá 8. kapitola.

7.1 Ustálený chod DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu tří transformátorů

7.1.1 Napětové poměry DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu tří transformátorů

Tab. 7-1 Napětové poměry v jednotlivých uzlech při můstkovém provozu tří transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce

Rozvodna (uzel)	Spodní limit napětí v uzlu	Napětí v uzlu	Úhel napětí v uzlu	Horní limit napětí v uzlu
	U_- [kV]	U [kV]	δ [°]	U_+ [kV]
Otrokovice, Barum (BAR)	99	119,5	-2,76	121
Otrokovice - Bahňák (BHN)	99	119,5	-2,75	121
Napajedla, Fatra (FA)	99	119,6	-2,71	121
Hodonín (HO) - přípojnice B	99	118,8	-2,40	121
Hulín (HUN)	99	119,1	-2,87	121
Chropyně, Technoplast (CHR)	99	119,4	-2,88	121
Konice (KNC)	99	116,9	-5,36	121
Kunovice (KUN)	99	118,8	-3,06	121
Kyjov (KY)	99	118,3	-2,91	121
Mladcová (MAD) - přípojnice A	99	119,4	-2,85	121
Mladcová (MAD) - přípojnice B	99	119,4	-2,85	121
Malenovice, ZPS (MLE)	99	119,5	-2,74	121
Nedakonice, ČD (NA-D)	99	118,7	-3,01	121
Nezamyslice, ČD (NZA-D)	99	118,1	-4,24	121
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	99	119,6	-2,68	121
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	99	119,6	-2,68	121
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	99	119,6	-2,68	121
Otrokovice, ČD (OK-D)	99	119,5	-2,74	121
Pánov (PNV)	99	118,6	-2,70	121
Prostějov (PRT)	99	117,3	-5,07	121
Rychlov (RYC)	99	119,1	-3,19	121
Slavičín (SLM)	99	116,4	-4,22	121
Slušovice (SLU)	99	118,8	-3,17	121

7 Ustálený chod a zkratové poměry v DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu tří 65 transformátorů

Zlín, Svit (SVI) - A	99	119,4	-2,85	121
Zlín, Svit (SVI) - B	99	119,4	-2,84	121
Uherský Brod (UBR)	99	118,1	-3,56	121
Uherské Hradiště (UHD)	99	118,7	-3,21	121
Velká nad Veličkou (VKA)	99	118,0	-3,50	121
Veselí na Moravě (VLM)	99	118,1	-3,24	121
Zdounky (ZDO)	99	118,6	-3,64	121

Z Tab. 7-1 je patrné, že napětí se ve všech uzlech pohybuje v dovolené toleranci 99 kV až 121 kV. Udržováno je při svém horním limitu, což je výhodné z hlediska minimalizace ztrát.

7.1.2 Zatížení transformátorů a vedení v DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu tří transformátorů

Tab. 7-2 Zatížení vedení při můstkovém provozu tří transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce

Vedení	Začátek vedení					Konec vedení					Ztráty a zatížení	
	P_1	Q_1	U_1	δU_1	I_1	P_2	Q_2	U_2	δU_2	I_2	ΔP_v	S_{ZV}
	[MW]	[MVA _r]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[%]
540	-12,9	1,4	118,1	-3,24	63,7	12,9	-1,0	118,0	-3,50	63,4	-0,022	16,1
541	-14,2	-1,4	118,8	-2,40	69,5	14,2	2,2	118,3	-2,91	70,1	-0,053	20,3
542	-20,4	-1,2	118,8	-2,40	99,4	20,4	1,4	118,6	-2,70	99,5	-0,040	25,5
543	-1,0	2,6	118,0	-3,50	13,9	1,0	-1,9	118,1	-3,56	10,7	-0,001	1,3
544	-21,8	-0,3	118,8	-2,40	106,0	21,7	1,0	118,1	-3,24	106,2	-0,124	27,3
545	-5,2	-5,4	119,6	-2,68	36,2	5,2	7,2	118,3	-2,91	43,3	-0,032	6,5
546	-9,3	-4,3	119,6	-2,68	49,3	9,2	5,4	118,8	-3,06	52,0	-0,031	11,6
547	-4,3	3,9	118,6	-2,70	28,3	4,3	-2,5	118,7	-3,01	24,3	-0,011	5,4
550	-9,7	-4,3	119,6	-2,68	51,3	9,7	4,8	119,1	-2,87	52,6	-0,022	13,9
559	-4,7	0,8	119,6	-2,68	22,9	4,7	0,2	119,4	-2,88	22,5	-0,006	5,9
573	-13,6	-1,0	119,6	-2,68	65,6	13,5	2,1	119,1	-3,19	66,3	-0,043	16,0
5501	-14,4	-1,2	119,6	-2,68	69,8	14,4	1,5	119,4	-2,85	70,0	-0,020	20,6
5502	-14,4	-1,2	119,6	-2,68	69,8	14,4	1,5	119,4	-2,85	70,0	-0,020	20,6
5503	-14,9	-1,8	119,6	-2,68	72,3	14,8	2,0	119,4	-2,85	72,4	-0,019	21,3
5504	-20,2	-2,5	119,6	-2,68	98,4	20,2	2,6	119,5	-2,74	98,4	-0,006	21,3
5505	-13,2	-1,8	119,6	-2,68	64,3	13,2	1,9	119,5	-2,74	64,4	-0,006	16,5
5506	-19,9	-3,6	119,6	-2,68	97,6	19,9	3,7	119,5	-2,75	97,7	-0,011	24,9
5507	-2,2	0,1	119,5	-2,75	10,4	2,2	0	119,5	-2,76	10,4	0	2,8
5508	-12,1	-2,7	119,5	-2,74	60,0	12,1	2,7	119,5	-2,76	60,1	-0,003	15,1
5509	-12,1	-1,7	119,5	-2,74	59,0	12,1	1,9	119,4	-2,85	59,2	-0,011	17,3
5510	-20,9	-7,0	118,1	-3,56	107,7	20,7	7,5	116,4	-4,22	109,2	-0,217	41,8
5516	-18,0	-3,7	119,6	-2,68	88,8	17,9	4,3	118,7	-3,21	89,6	-0,091	25,7
5517	-18,0	-3,7	119,6	-2,68	88,8	17,9	4,3	118,7	-3,21	89,6	-0,091	25,7
5518	-2,7	0,6	119,6	-2,68	13,2	2,7	-0,3	119,6	-2,71	13,0	-0,001	3,0
5519	-2,7	0,6	119,6	-2,68	13,2	2,7	-0,3	119,6	-2,71	13,0	-0,001	3,0
5540	-3,5	1,9	118,7	-3,01	19,2	3,5	-1,6	118,8	-3,06	18,6	-0,001	4,4
5570	-24,0	-8,5	119,6	-2,68	123,2	23,9	9,1	118,1	-3,56	124,9	-0,167	30,0
5571	-24,0	-8,5	119,6	-2,68	123,2	23,9	9,1	118,1	-3,56	124,9	-0,167	30,0
5572	-6,7	-1,9	119,4	-2,84	33,7	6,7	1,9	119,4	-2,85	33,8	0	16,8
5573	-1,4	2,2	119,4	-2,85	12,4	1,4	-2,1	119,4	-2,85	12,3	0	5,6
5574	-16,1	-4,0	119,4	-2,85	80,3	16,0	4,5	118,8	-3,17	81,0	-0,050	23,0
5575	-24,1	-2,3	119,6	-2,68	116,7	23,9	3,2	118,1	-4,24	117,6	-0,210	25,4
5576	-27,8	-3,8	119,6	-2,68	135,6	27,7	4,1	118,6	-3,64	136,2	-0,152	29,3

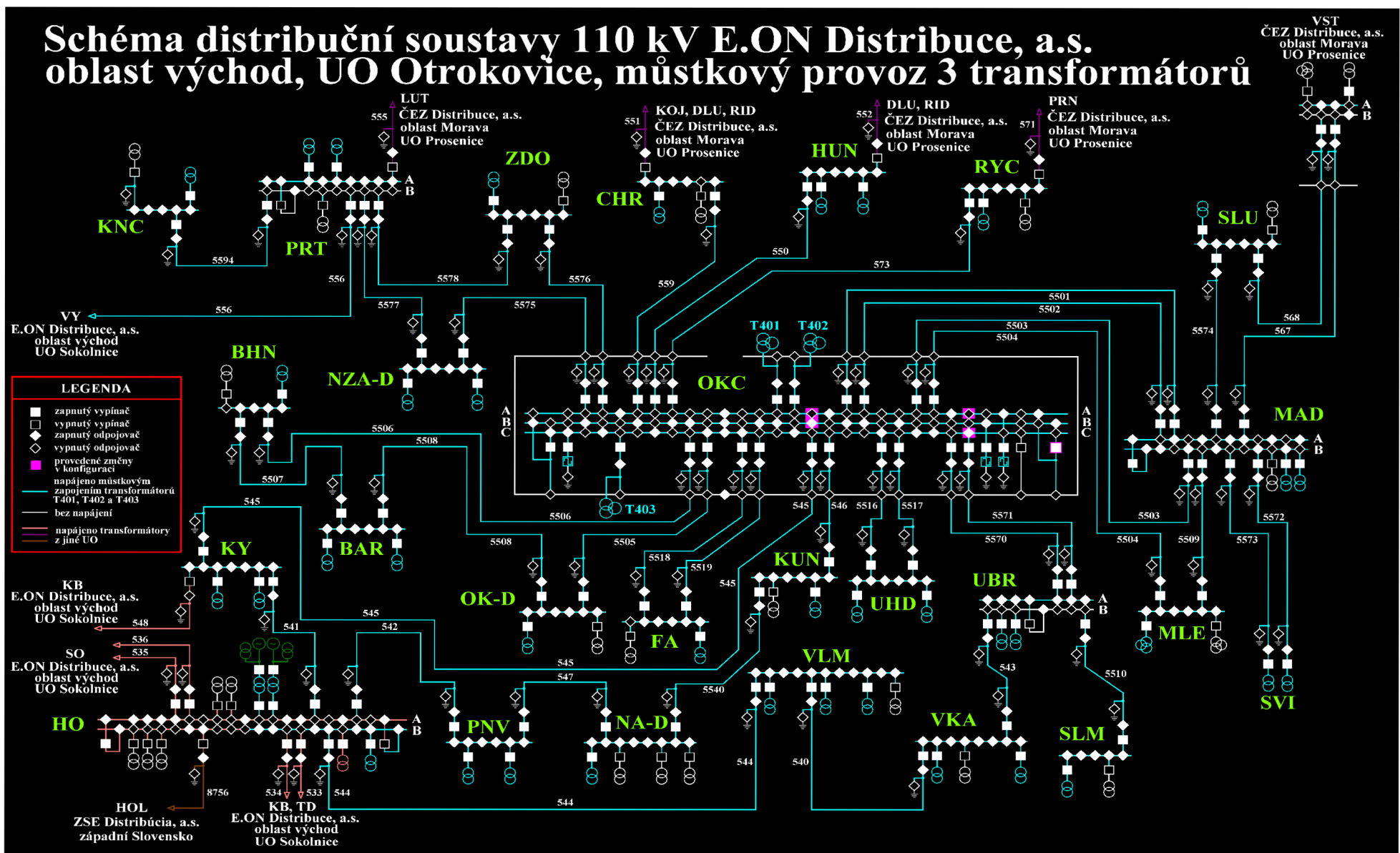
7 Ustálený chod a zkratové poměry v DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu tří 66 transformátorů

5577	-22,2	-3,5	118,1	-4,24	109,8	22,1	4,1	117,3	-5,07	110,6	-0,106	23,4
5578	-23,4	-2,6	118,6	-3,64	114,4	23,2	3,4	117,3	-5,07	115,3	-0,188	24,6
5594	-7,0	-1,1	117,3	-5,07	35,0	7,0	2,1	116,9	-5,36	36,1	-0,016	17,5

Z Tab. 7-2 je patrné, že žádné vedení není přetěžováno, naopak je zde poměrně velká rezerva z důvodu možného nárůstu zatížení a možného výpadku některého z vedení (splnění kritéria N-1).

Tab. 7-3 Zatížení distribučních transformátorů 110kV/ vn při můstkovém provozu tří transformátorů

Transformovna	Transformátor	S_n	p	I_n	P_{calc}	Q_{calc}	I_{calc}	ΔP_t	i_{zt}
		[MVA]	[-]	[A]	[MW]	[MVar]	[A]	[MW]	[%]
Otrokovice, Barum (BAR)	T101	40	110/6 kV	210	-12,7	0,5	61,5	-	29,3
	T102	40	110/6 kV	210	-1,6	-3,3	17,6	-	8,4
Otrokovice - Bahňák (BHN) Napajedla, Fatra (FA)	T101	40	110/22 kV	210	-17,7	-3,8	87,6	-0,079	41,7
	T102	25	110/6 kV	131	-5,4	0,5	26,0	-	19,8
Hodonín (HO) - přípojnice B	T8	63	110/10,5 kV	331	28,4	4,7	139,7	-0,086	42,2
	T10	63	110/10,5 kV	331	33,8	4,1	165,5	-0,097	50,0
	T12	16	110/6 kV	84	-5,7	-5,9	39,9	-	47,5
Hulín (HUN)	T101	40	110/22 kV	210	-8,0	-2,8	41,2	-0,046	19,6
	T102	40	110/22 kV	210	-1,7	-2,0	12,7	-0,031	6,0
Chropyně, Technoplast (CHR) Konice (KNC)	T101	16	110/6 kV	84	-4,7	-0,2	22,5	-	26,8
	T102	25	110/22 kV	131	-7,0	-2,1	36,1	-0,022	27,6
Kunovice (KUN)	T102	25	110/22 kV	131	-12,7	-3,8	64,5	-0,051	49,2
	T101	40	110/22 kV	210	-12,3	-6,4	67,4	-0,064	32,1
Kyjov (KY)	T102	40	110/22 kV	210	-7,1	-3,0	37,9	-0,024	18,0
	T103	40	110/22 kV	210	-20,6	-3,8	101,2	-0,150	48,2
Mladcová (MAD) - přípojnice B	T102	40	110/22 kV	210	-20,0	-3,1	98,0	-0,090	46,7
Malenovice, ZPS (MLE)	T101	25	110/22/6 kV	131	-8,1	-0,9	39,4	-	30,1
Nedakonice, ČD (NA-D)	T101	10	110/22 kV	52	-0,8	0,6	5,1	-	9,8
Nezamyslice, ČD (NZA-D)	T101	10	110/22 kV	52	-0,8	0,2	3,9	-	7,5
	T111	12,5	110/27 kV	52	-0,9	0,1	4,3	-	8,3
Otrokovice, ČD (OK-D)	T101	10	110/22 kV	52	-1,1	0,8	6,3	-	12,1
Pánov (PNV)	T101	40	110/22 kV	226	0	-0,2	1,0	-0,039	0,4
	T102	40	110/22 kV	210	-16,0	-5,1	81,9	-0,077	39,0
Prostějov (PRT) - přípojnice A	T101	40	110/22 kV	210	-19,7	-3,9	98,8	-0,089	47,0
	T103	40	110/22 kV	210	-18,6	-3,9	93,3	-0,043	44,4
Rychlov (RYC)	T101	25	110/22 kV	131	-13,5	-2,1	66,3	-0,083	50,6
Slavičín (SLM)	T101	40	110/22 kV	210	-20,7	-7,5	109,2	-0,05	52,0
Slušovice (SLU)	T101	40	110/22 kV	210	-20,4	-6,6	104,2	-0,097	49,6
Zlín, Svít (SVI) - A	T114	25	110/6 kV	131	-1,4	2,1	12,3	-0,038	9,4
Zlín, Svít (SVI) - B	T115	40	110/6 kV	210	6,7	1,9	33,7	-0,032	16,0
Uherský Brod (UBR) - přípojnice A	T101	40	110/22 kV	210	-12,5	-3,6	63,6	-0,061	30,3
	T102	40	110/22 kV	210	-15,4	-5,6	80,2	-0,044	38,2
Uherské Hradiště (UHD)	T101	40	110/22 kV	210	-17,0	-3,5	84,3	-0,082	40,1
	T102	40	110/22 kV	210	-18,9	-5,1	95,0	-0,045	45,2
Velká nad Veličkou (VKA)	T102	25	110/22 kV	131	-6,8	-0,6	33,5	-	25,6
	T103	25	110/22 kV	131	-5,1	-1,1	25,3	-0,029	19,3
Veselí na Moravě (VLM)	T102	16	110/6 kV	84	-1,7	-0,2	8,2	-	9,8
	T103	25	110/22 kV	131	-7,1	-2,0	35,8	-0,049	27,3
	T104	40	110/22 kV	210	0	-0,2	1,0	-0,036	0,5
Zdounky (ZDO)	T102	25	110/22 kV	131	-4,3	-1,6	22,3	-0,023	17,0



Obr. 7-1 Schéma distribuční soustavy 110 kV E.ON Distribuce, a.s., můstkový provoz 3 transformátorů

7 Ustálený chod a zkratové poměry v DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu tří 68 transformátorů

Z Tab. 7-3 je patrné, že žádný z distribučních transformátorů není přetěžován, i zde je poměrně velká rezerva z důvodu možného nárůstu zatížení (ať už budoucího nárůstu nebo nárůstu v rámci proměnlivosti denního zatížení). Pozn. Tato tabulka je zde uvedena jen pro kontrolu, protože u obou variant zapojení (můstkový provoz dvou transformátorů a můstkový provoz tří transformátorů) byly odběry distribučních transformátorů 110kV/ vn stejné.

Tab. 7-4 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/ 110kV při můstkovém provozu tří transformátorů

Přípojnice	Transformátor	S_n	p	I_n	P_{calc}	Q_{calc}	I_{calc}	ΔP_t	i_{zt}
		[MVA]	[-]	[A]	[MW]	[MVAr]	[A]	[MW]	[%]
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	T403	350	400/110 kV	1837	77,8	12,9	380,6	-0,011	20,7
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	T402	350	400/110 kV	1837	103,6	13,5	504,4	-0,019	27,5
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	T401	350	400/110 kV	1837	99,4	29,1	500,3	-0,017	27,2

Z Tab. 7-4 je patrné, že žádný z uzlových transformátorů není přetěžován. Rovněž v tomto případě je velká rezerva z důvodu možného nárůstu zatížení nebo možného výpadku některého z transformátorů. Součtem výkonů lze z Tab. 7-3 a Tab. 7-4 zjistit tyto údaje:

- celkový dodávaný činný výkon do soustavy 110 kV je 349,7 MW
- celkový odebíraný činný výkon ze soustavy 110 kV je 348,0 MW

Ztráty na vedeních 110kV činí tedy 1,7 MW.

7.2 Zkratové poměry v DS 110 kV UO Otrokovice při můstkovém provozu tří transformátorů

Tab. 7-5 Zkratové poměry při můstkovém provozu tří transformátorů, pokračování tabulky je na další stránce

Rozvodna	S_{vyp}	3 - fázový zkrat			1 - fázový zkrat		
		$^{(3)}S_k''$	$^{(3)}I_k''$	$^{(3)}s_k''$	$^{(1)}S_k''$	$^{(1)}I_k''$	$^{(1)}s_k''$
		[MVA]	[kA]	[%]	[MVA]	[kA]	[%]
Otrokovice, Barum (BAR)	5000	3958,0	20,774	79,2	3294,4	17,29	65,9
Otrokovice - Bahňák (BHN)	5000	4235,9	22,233	84,7	3630,4	19,05	72,6
Napajedla, Fatra (FA)	3500	3404,5	17,869	97,3	2696,9	14,15	77,1
Hodonín (HO) - přípojnice B2	3500	1581,3	8,300	45,2	1647,7	8,65	47,1
Hulín (HUN)	3500	1468,0	7,705	41,9	1336,6	7,02	38,2
Chropyně, Technoplast (CHR)	3500	1008,4	5,293	28,8	648,7	3,40	18,5
Konice (KNC)	3500	491,3	2,579	14,0	466,1	2,45	13,3

Kunovice (KUN)	3500	1216,6	6,386	34,8	1001,2	5,26	28,6
Kyjov (KY)	3500	1166,5	6,123	33,3	1147,5	6,02	32,8
Mladcová (MAD) - přípojnice A	5000	4239,7	22,253	84,8	3870,5	20,31	77,4
Mladcová (MAD) - přípojnice B	5000	4239,7	22,253	84,8	3870,5	20,31	77,4
Malenovice, ZPS (MLE)	5000	4467,9	23,450	89,4	3852,1	20,22	77,0
Nedakonice, ČD (NA-D)	3500	1121,9	5,888	32,1	909,7	4,77	26,0
Nezamyslice, ČD (NZA-D)	3500	948,1	4,976	27,1	784,2	4,12	22,4
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	5000	5587,0	29,324	111,7	5147,7	27,02	103,0
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	5000	5587,0	29,324	111,7	5147,7	27,02	103,0
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	5000	5587,0	29,324	111,7	5147,7	27,02	103,0
Otrokovice, ČD (OK-D)	5000	4108,1	21,562	82,2	3438,8	18,05	68,8
Pánov (PNV)	3500	1274,0	6,687	36,4	1298,9	6,82	37,1
Prostějov (PRT) - přípojnice A	3500	854,7	4,486	24,4	889,6	4,67	25,4
Rychlov (RYC)	3500	1056,8	5,547	30,2	799,4	4,20	22,8
Slavičín (SLM)	3500	734,8	3,857	21,0	660,8	3,47	18,9
Slušovice (SLU)	3500	1657,0	8,697	47,3	1379,2	7,24	39,4
Zlín, Svit (SVI) - A	3500	3775,0	19,814	107,9	3329,1	17,47	95,1
Zlín, Svit (SVI) - B	3500	3775,7	19,817	107,9	3347,1	17,57	95,6
Uherský Brod (UBR) - přípojnice A	3500	1963,7	10,307	56,1	1849,4	9,71	52,8
Uherské Hradiště (UHD)	3500	1956,1	10,267	55,9	2710,3	14,23	77,4
Velká nad Veličkou (VKA)	3500	1282,9	6,733	36,7	1128,2	5,92	32,2
Veselí na Moravě (VLM)	3500	1203,6	6,317	34,4	1139,9	5,98	32,6
Zdounky (ZDO)	3500	1323,1	6,944	37,8	1118,6	5,87	32,0

Z Tab. 7-5 je vidět, že vypínače v rozvodnách Otrokovice a Zlín, Svit nevyhovují z hlediska zkratové odolnosti (překročení zkratové odolnosti je označeno červeně). U rozvodny Napajedla, Fatra došlo k překročení 95% zkratové odolnosti (překročení 95% zkratové odolnosti je označeno žlutě). K překročení 95% zkratové odolnosti došlo i v případě 1 – fázového zkratu v rozvodně Zlín, Svit, avšak z hlediska posouzení zkratové odolnosti rozhoduje horší z obou spočítaných zkratů.

8 VYHODNOCENÍ USTÁLENÉHO CHODU A ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V DS 110 kV UO OTROKOVICE PRO OBĚ VARIANTY ZAPOJENÍ

Z porovnání napěťových poměrů obou variant zapojení (Tab. 6-2 a Tab. 7-1) je vidět, že přechodem na můstkový provoz tří transformátorů se napěťové poměry již příliš nezměnily. U některých rozvoden došlo k nárůstu, u některých k poklesu napětí. Stejně tak u úhlu napětí.

Z porovnání zatížení vedení 110 kV u obou variant zapojení (Tab. 6-3 a Tab. 7-2) je vidět, že přechodem na můstkový provoz tří transformátorů se ani zatížení jednotlivých vedení příliš nezměnilo.

Porovnání zatížení distribučních transformátorů 110kV/ vn není nutné, protože zatížení těchto transformátorů bylo v obou případech stejné.

Z porovnání zatížení uzlových transformátorů 400/ 110kV u obou variant zapojení (Tab. 6-5 a Tab. 7-4) je vidět, že přechodem na můstkový provoz tří transformátorů došlo k výrazně lepšímu rozložení zatížení mezi jednotlivé transformátory.

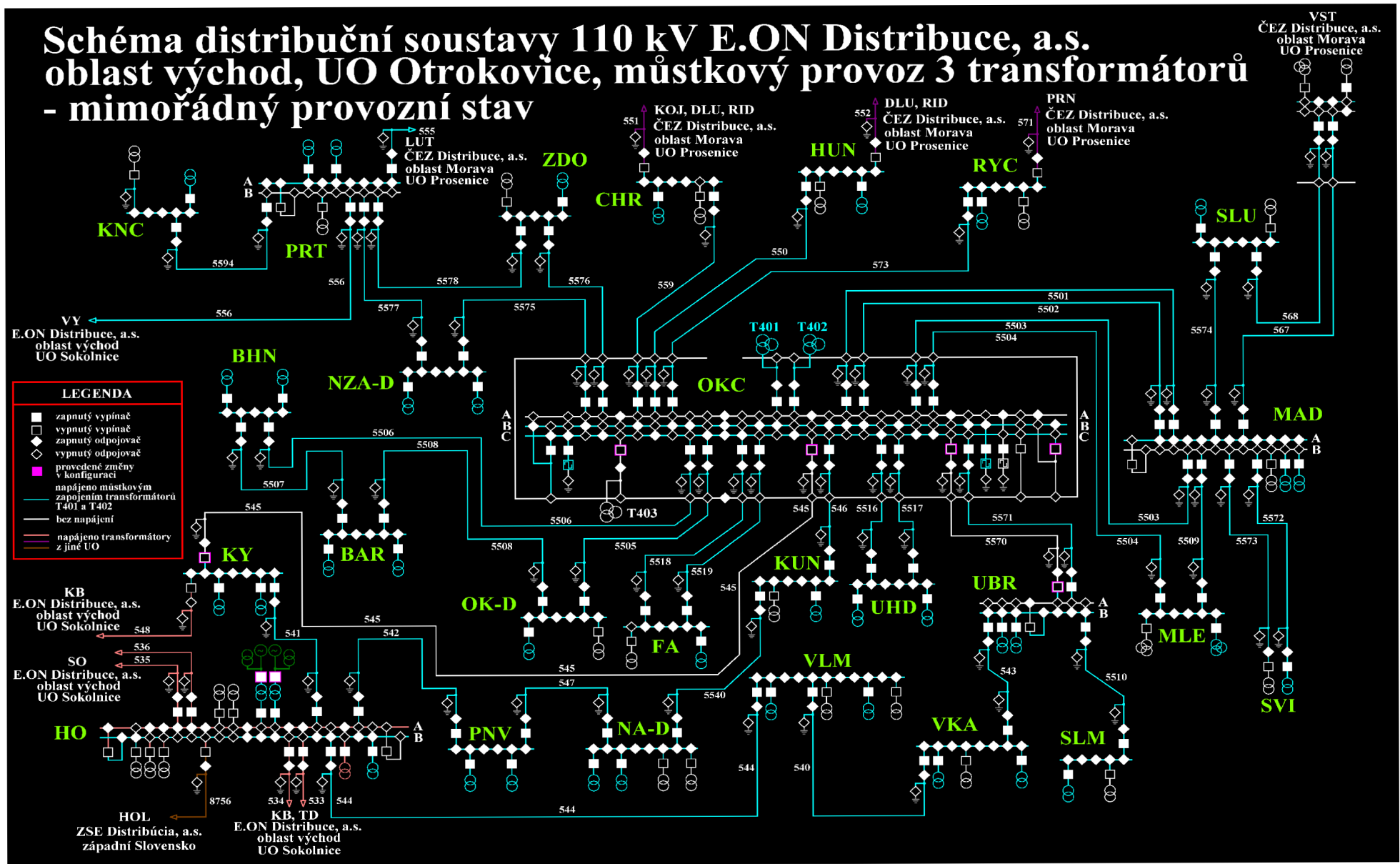
Z porovnání zkratových poměrů u obou variant zapojení (Tab. 6-6 a Tab. 7-5) je vidět, že přechodem na můstkový provoz tří transformátorů došlo k výraznému zhoršení zkratových poměrů, které by u dvou rozvoden znamenalo překročení zkratové odolnosti vypínačů.

9 MIMOŘÁDNÉ PROVOZNÍ STAVY V DS 110 kV UO OTROKOVICE PŘI MŮSTKOVÉM PROVOZU TŘÍ TRANSFORMÁTORŮ

Jedním z nejhorších případů, který by za současného provozu (můstkový provoz dvou transformátorů) mohl v rozvodně Otrokovice nastat (kromě tedy výpadku všech transformátorů) je zkrat na přípojnici A, ze které je napájen okruh zahrnující rozvodny KUN, KY, HO, PNV, NA-D, VLM, VKA, SLM a UBR. Do přípojnice A pracuje samostatně transformátor T403 a okruh se neprovozuje v můstkovém zapojení. Po zapůsobení ochranných prvků by byl celý tento okruh bez napájení. Naším úkolem je zjistit, jakým způsobem by se v případě takové poruchy změnilo napájení okruhu po přechodu na můstkový provoz tří transformátorů. Taková konfigurace by potom odpovídala Obr. 9-1. Schéma vychází z můstkového provozu tří transformátorů, důležité změny jsou zde vyznačeny. V tomto případě by při zkratu na přípojnici A došlo k zapůsobení vypínače transformátoru T403, vypnutí příčného spínače přípojnic, spojujícího přípojnice A a B a odpojení vedení napájených z přípojnice A (545 a 5570) z obou stran. Zatížení celého okruhu převezmou transformátory T401 a T402 a okruh se bude v rozvodně Otrokovice uzavírat pouze přes dvě vedení, a to 546 a 5571. Zkoumáno bude, zdali se okruh dá takto dočasně provozovat, aniž by došlo k přetížení některého síťového prvku. Vzhledem k tomu, že s napájením okruhu pomáhají dva turbogenerátory, každý o jmenovitém výkonu 63 MVA (Hodonín) a my se snažíme najít co nejnejpříznivější provozní stav, bude zkoumán jednak případ napájení okruhu „s pomocí Hodonína“ a jednak pokud by došlo navíc i k odpojení hodonínských turbogenerátorů. Řešená konfigurace sítě je ze dne 25.04.2012 (09:51:55 s pomocí Hodonína, 09:30:13 „bez pomoci Hodonína“). Oproti konfiguracím ze dne 1. 3. 2012 došlo k některým změnám (prostrídání provozu distribučních transformátorů 110kV/ vn, využívání pouze jednoho systému přípojnic v rozvodně Mladcová aj.). Pro nás je však důležité, že při konfiguraci ze dne 25.4.2012 ve zkoumaném okruhu vzrostlo zatížení o 8,3 MW, což je z hlediska zkoumání nejnejpříznivějšího vztahu výhodné.

9.1 Napájení okruhu „s pomocí Hodonína“

Sledované parametry i použité symboly jsou stejné jako kapitole 6 a 7. Zajímat nás budou především rozvodny a vedení ve výše popsáném okruhu. V tabulkách 9-1 a 9-2 jsou však uvedeny všechny výsledky.



Obr. 9-1 Schéma distribuční soustavy 110 kV E.ON Distribuce, a.s., mimořádný provozní stav

Tab. 9-1 Zatížení vedení při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „s pomocí Hodonína“

Vedení	Začátek vedení					Konec vedení					Ztráty a zatížení	
	P_1	Q_1	U_1	δU_1	I_1	P_2	Q_2	U_2	δU_2	I_2	ΔP_v	S_{zv}
	[MW]	[MVA _r]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[%]
540	-10,3	-5,9	117,4	-5,71	58,4	10,3	6,4	117,0	-5,87	59,6	-0,019	12,9
541	-27,9	-6,1	118,7	-4,94	139,1	27,7	6,5	117,4	-5,91	140,2	-0,211	39,9
542	-8,6	-4,0	118,7	-4,94	46,4	8,6	4,4	118,5	-5,05	47,2	-0,009	10,8
543	-0,8	5,7	116,7	-5,78	28,7	0,8	-5,0	117,0	-5,87	25,3	-0,006	1,0
544	-22,5	-7,0	118,7	-4,94	114,5	22,3	7,6	117,4	-5,71	116,0	-0,146	28,1
545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
546	-16,4	1,7	119,0	-3,69	79,9	16,3	-0,7	118,6	-4,52	79,5	-0,076	20,5
547	-6,9	2,3	118,6	-4,62	35,4	6,9	-1,0	118,5	-5,05	33,9	-0,019	8,6
550	-21,1	-4,7	119,0	-3,69	104,7	21,0	5,1	118,3	-4,16	105,4	-0,091	30,1
559	-4,8	0,7	119,0	-3,69	23,5	4,8	0,3	118,9	-3,89	23,3	-0,006	6,0
573	-12,0	-0,6	119,0	-3,69	58,5	12,0	1,8	118,6	-4,15	59,1	-0,034	14,1
5501	-14,0	-0,8	119,0	-3,69	67,9	14,0	1,1	118,8	-3,85	68,0	-0,019	20,0
5502	-14,0	-0,8	119,0	-3,69	67,9	14,0	1,1	118,8	-3,85	68,0	-0,019	20,0
5503	-14,4	-1,3	119,0	-3,69	70,3	14,4	1,6	118,8	-3,85	70,4	-0,018	20,6
5504	-19,0	-1,7	119,0	-3,69	92,7	19,0	1,8	119,0	-3,74	92,7	-0,006	20,0
5505	-9,7	-1,2	119,0	-3,69	47,5	9,7	1,3	119,0	-3,73	47,6	-0,003	12,1
5506	-18,2	-2,9	119,0	-3,69	89,6	18,2	2,9	118,9	-3,76	89,7	-0,009	22,8
5507	-1,8	-0,4	118,9	-3,75	9,1	1,8	0,5	118,9	-3,76	9,2	0	2,3
5508	-8,4	-1,8	119,0	-3,73	41,9	8,4	1,9	118,9	-3,75	41,9	-0,001	10,5
5509	-11,9	-1,3	119,0	-3,74	58,2	11,9	1,5	118,8	-3,85	58,4	-0,011	17,0
5510	-20,8	-6,5	116,7	-5,78	107,8	20,6	7,1	115,0	-6,46	109,1	-0,217	41,6
5516	-20,3	-4,3	119,0	-3,69	100,8	20,2	4,9	118,0	-4,29	101,7	-0,118	29,0
5517	-20,3	-4,3	119,0	-3,69	100,8	20,2	4,9	118,0	-4,29	101,7	-0,118	29,0
5518	-2,5	0,6	119,0	-3,69	12,4	2,5	-0,3	119,0	-3,72	12,2	0	2,8
5519	-2,5	0,6	119,0	-3,69	12,4	2,5	-0,3	119,0	-3,72	12,2	0	2,8
5540	-7,8	2,7	118,6	-4,52	40,2	7,8	-2,5	118,6	-4,62	39,8	-0,005	9,8
5570	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5571	-52,1	-8,9	119,0	-3,69	256,5	51,4	7,9	116,7	-5,78	257,3	-0,715	65,1
5572	-1,3	3,0	118,8	-3,85	16,1	1,3	-3,0	118,8	-3,86	15,9	0,001	3,3
5573	0	0	118,8	-3,85	0	0	0	118,8	-3,85	0,2	-0,001	0
5574	-14,4	-3,5	118,8	-3,85	71,9	14,4	4,0	118,3	-4,15	72,6	-0,040	20,6
5575	-29,1	-3,4	119,0	-3,69	142,0	28,8	4,0	117,2	-5,59	143,0	-0,311	30,6
5576	-34,8	-4,7	119,0	-3,69	170,2	34,5	4,8	117,9	-4,90	170,8	-0,240	36,6
5577	-26,8	-4,2	117,2	-5,59	133,6	26,6	4,6	116,2	-6,61	134,3	-0,157	28,2
5578	-27,6	-3,6	117,9	-4,90	136,2	27,3	4,2	116,2	-6,61	137,2	-0,267	29,1
5594	-3,6	-2,0	116,2	-6,61	20,2	3,5	3,0	115,9	-6,72	23,1	-0,006	9,0

Z Tab. 9-1 je patrné, že žádné vedení není přetěžováno. Zmiňovaná vedení 546 a 5571 jsou zvýrazněny žlutě. Rovněž napětí se pohybuje v dovolené toleranci 99 kV až 121 kV.

Tab. 9-2 Zatížení distribučních transformátorů 110kV/vn při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „s pomocí Hodonína“

Transformovna	Transformátor	S_n	p	I_n	P_{calc}	Q_{calc}	I_{calc}	ΔP_t	i_{zt}
		[MVA]	[-]	[A]	[MW]	[MVAr]	[A]	[MW]	[%]
Otrokovice, Barum (BAR)	T101	40	110/6 kV	210	-0,3	1,7	8,2	-	3,9
	T102	40	110/6 kV	210	-6,3	-3,1	34,1	-	16,2
Otrokovice - Bahňák (BHN)	T101	40	110/22 kV	210	-9,2	-1,7	45,4	-0,079	21,6
	T102	40	110/22 kV	210	-10,9	-1,7	53,5	-0,029	25,5
Napajedla, Fatra (FA)	T102	25	110/6 kV	131	-5,0	0,5	24,4	-	18,6
Hodonín (HO) - přípojnice B	T8	63	110/10,5 kV	331	32,8	11,6	169,3	-0,099	51,1
	T10	63	110/10,5 kV	331	31,5	12,1	164,0	-0,096	49,5
	T12	16	110/6 kV	84	-5,2	-6,5	40,6	-	48,3
Hulín (HUN)	T101	40	110/22 kV	210	-21,0	-5,1	105,4	-0,098	50,2
Chropyně, Technoplast (CHR)	T101	16	110/6 kV	84	-4,8	-0,3	23,3	-	27,7
Konice (KNC)	T102	25	110/22 kV	131	-3,5	-3,0	23,1	-0,017	17,6
Kunovice (KUN)	T102	25	110/22 kV	131	-8,5	-2,0	42,6	-0,031	32,5
Kyjov (KY)	T101	40	110/22 kV	210	-18,2	-6,0	94,5	-0,089	45,0
	T102	40	110/22 kV	210	-9,5	-2,4	48,2	-0,027	23,0
Mladcová (MAD) - přípojnice A	T102	40	110/22 kV	210	-15,9	-1,6	77,8	-0,070	37,0
	T103	40	110/22 kV	210	-18,7	-3,3	92,2	-0,130	43,9
Malenovice, ZPS (MLE)	T102	25	110/22/6 kV	131	-7,1	-0,5	-0,5	-	0,4
Nedakonice, ČD (NA-D)	T1	12,5	110/27 kV	52	-0,4	-23,5	114,5	-	220,2
	T101	10	110/22 kV	52	-0,4	23,7	115,4	-	221,9
Nezamyslice, ČD (NZA-D)	T101	10	110/22 kV	52	-1,4	0,3	7,0	-	13,5
	T111	12,5	110/27 kV	52	-0,6	-0,1	2,9	-	5,6
Otrokovice, ČD (OK-D)	T101	10	110/22 kV	52	-1,3	0,6	6,9	-	13,3
Pánov (PNV)	T101	40	110/22 kV	226	-15,5	-3,2	77,1	-0,072	34,1
	T102	40	110/22 kV	210	0	-0,2	1,0	-0,037	0,5
Prostějov (PRT) - přípojnice A	T101	40	110/22 kV	210	-12,7	-3,5	65,6	-0,059	31,2
	T103	40	110/22 kV	210	-28,3	-5,1	143,0	-0,074	68,1
Rychlov (RYC)	T101	25	110/22 kV	131	-12,0	-1,8	59,1	-0,072	45,1
Slavičín (SLM)	T101	40	110/22 kV	210	-20,6	-7,1	109,1	-0,1	52,0
Slušovice (SLU)	T101	40	110/22 kV	210	-18,2	-5,9	93,6	-0,085	44,6
Zlín, Svit (SVI) - B	T115	40	110/6 kV	210	-1,3	3,0	15,9	-0,029	7,6
Uherský Brod (UBR) - přípojnice A	T101	40	110/22 kV	210	-17,1	-5,5	89,1	-0,083	42,4
	T102	40	110/22 kV	210	-12,6	-2,6	63,9	-0,036	30,4
Uherské Hradiště (UHD)	T101	40	110/22 kV	210	-20,4	-4,5	102,2	-0,099	48,7
	T102	40	110/22 kV	210	-20,0	-5,2	101,2	-0,048	48,2
Velká nad Veličkou (VKA)	T102	25	110/22 kV	131	-6,4	-0,3	31,5	-	24,0
	T103	25	110/22 kV	131	-4,7	-1,0	23,9	-0,027	18,2
Veselí na Moravě (VLM)	T102	16	110/6 kV	84	-1,5	0,1	7,4	-	8,8
	T104	40	110/22 kV	210	-10,6	-1,8	52,6	-0,051	25,0
Zdounky (ZDO)	T101	25	110/22 kV	131	-7,0	-1,2	34,7	-0,027	26,5

Z Tab. 9-2 je patrné, že přes distribuční transformátory T1 a T101 (označeno červeně) se budou uzavírat toky jalového výkonu, které způsobí proudové přetížení těchto transformátorů.

Transformátory by byly působením ochran odpojeny. Žlutě jsou označeny blokové transformátory, přes které je vyveden výkon hodonínských turbogenerátorů do soustavy 110 kV.

Tab. 9-3 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/ 110kV při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „s pomocí Hodonína“

Přípojnice	Transformátor	S_n	p	I_n	P_{calc}	Q_{calc}	I_{calc}	ΔP_t	i_{zt}
		[MVA]	[-]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[A]	[MW]	[%]
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	T403	350	400/110 kV	1837	-	-	-	-	-
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	T402	350	400/110 kV	1837	157,2	10,4	764,1	-0,045	41,6
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	T401	350	400/110 kV	1837	148,2	25,6	729,5	-0,037	39,7

Z Tab. 9-3 je patrné, že žádný z uzlových transformátorů není přetěžován.

9.2 Napájení okruhu „bez pomoci Hodonína“

Sledované parametry i použité symboly jsou stejné jako kapitole 6 a 7. Zajímat nás budou především rozvodny a vedení v popsaném okruhu. V tabulkách 9-4 a 9-5 jsou však uvedeny všechny výsledky.

Tab. 9-4 Zatížení vedení při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „bez pomoci Hodonína“

Vedení	Začátek vedení					Konec vedení					Ztráty a zatížení	
	P_1	Q_1	U_1	δU_1	I_1	P_2	Q_2	U_2	δU_2	I_2	ΔP_v	S_{zv}
	[MW]	[MVA _r]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[kV]	[°]	[A]	[MW]	[%]
540	-22,6	-6,5	112,1	-9,39	120,9	22,5	6,7	111,5	-9,83	121,5	-0,081	28,3
541	-28,0	-6,8	110,7	-	150,1	27,7	7,0	109,2	-11,31	151,2	-0,246	40,0
542	-23,0	-8,0	111,2	-9,85	126,3	22,9	8,1	110,7	-10,20	126,9	-0,065	28,8
543	-33,9	-7,8	113,5	-8,39	177,2	33,7	7,8	112,1	-9,39	177,9	-0,263	42,4
544	-10,4	-5,1	111,5	-9,83	60,0	10,4	5,8	110,7	-10,20	62,1	-0,041	13,0
545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
546	-49,5	-15,2	118,3	-4,97	252,6	48,7	14,0	115,1	-7,26	254,2	-0,769	61,9
547	-39,2	-12,0	114,5	-7,71	206,7	38,5	11,4	111,2	-9,85	208,5	-0,682	49,0
550	-21,1	-4,7	118,3	-4,97	105,4	21,0	5,1	117,6	-5,45	106,1	-0,092	30,1
559	-4,8	0,7	118,3	-4,97	23,7	4,8	0,3	118,2	-5,17	23,5	-0,007	6,0
573	-12,0	-0,6	118,3	-4,97	58,9	12,0	1,8	117,9	-5,44	59,5	-0,034	14,1

Malenovice, ZPS (MLE)	T102	25	110/22/6 kV	131	-7,1	-0,5	34,7	-	26,5
Nedakonice, ČD (NA-D)	T1	12,5	110/27 kV	52	-0,4	-23,5	118,7	-	228,3
	T101	10	110/22 kV	52	-0,4	23,7	119,6	-	230,0
Nezamyslice, ČD (NZA-D)	T101	10	110/22 kV	52	-1,4	0,3	7,1	-	13,7
	T111	12,5	110/27 kV	52	-0,6	-0,1	2,9	-	5,6
Otrokovice, ČD (OK-D)	T101	10	110/22 kV	52	-1,3	0,6	6,9	-	13,3
	T101	40	110/22 kV	226	-15,5	-3,3	82,2	-0,073	36,4
Pánov (PNV)	T102	40	110/22 kV	210	0	-0,2	0,9	-0,032	0,4
	T101	40	110/22 kV	210	-12,7	-3,5	65,6	-0,059	31,2
Prostějov (PRT) - přípojnice A	T103	40	110/22 kV	210	-28,3	-5,1	143,0	-0,074	68,1
	T101	25	110/22 kV	131	-12,0	-1,8	59,5	-0,072	45,4
Rychlov (RYC)	T101	40	110/22 kV	210	-20,6	-7,2	112,5	-0,050	53,6
Slavičín (SLM)	T101	40	110/22 kV	210	-18,2	-5,9	94,1	-0,085	44,8
Slušovice (SLU)	T101	40	110/22 kV	210	-18,2	-5,9	94,1	-0,085	44,8
Zlín, Svit (SVI) - B	T115	40	110/6 kV	210	-1,3	4,9	25,0	-0,030	11,9
Uherský Brod (UBR) - přípojnice A	T101	40	110/22 kV	210	-17,1	-5,5	91,7	-0,083	43,7
	T102	40	110/22 kV	210	-12,6	-2,6	65,7	-0,036	31,3
Uherské Hradiště (UHD)	T101	40	110/22 kV	210	-20,0	-5,2	101,8	-0,048	48,5
	T102	40	110/22 kV	210	-20,4	-4,6	102,9	-0,099	49,0
Velká nad Veličkou (VKA)	T102	25	110/22 kV	131	-6,4	-0,3	32,8	-	25,0
	T103	25	110/22 kV	131	-4,7	-1,0	24,9	-0,026	19,0
Veselí na Moravě (VLM)	T102	16	110/6 kV	84	-1,5	0,1	7,8	-	9,3
	T104	40	110/22 kV	210	-10,6	-1,8	55,4	-0,050	26,4
Zdounky (ZDO)	T101	25	110/22 kV	131	-7,0	-1,2	34,8	-0,027	26,6

Z Tab. 9-5 je patrné, že i v tomto případě se přes distribuční transformátory T1 a T101 (označeno červeně) budou uzavírat toky jalového výkonu, které způsobí proudové přetížení těchto transformátorů. Tyto transformátory by byly působením ochrany odpojeny. Žlutě jsou označeny blokové transformátory hodonínských turbogenerátorů, které jsou v tomto případě odpojeny.

Tab. 9-6 Zatížení uzlových transformátorů 400kV/110kV při můstkovém provozu tří transformátorů a mimořádném provozním stavu, napájení okruhu „bez pomoci Hodonína“

Přípojnice	Transformátor	S_n	p	I_n	P_{calc}	Q_{calc}	I_{calc}	ΔP	i_{zj}
		[MVA]	[-]	[A]	[MW]	[MVA _r]	[A]	[MW]	[%]
Otrokovice (OKC) - přípojnice A	T403	350	400/110 kV	1837	-	-	-	-	-
Otrokovice (OKC) - přípojnice B	T402	350	400/110 kV	1837	192,7	24,2	947,7	-0,069	51,6
Otrokovice (OKC) - přípojnice C	T401	350	400/110 kV	1837	180,3	38,2	899,4	-0,056	49,0

Z Tab. 9-6 je patrné, že žádný z uzlových transformátorů T401 a T402 není přetěžován, ani při výpadku uzlového transformátoru T403 a bez pomoci Hodonína.

10 NÁVRH PROVOZNÍCH A TECHNICKÝCH OPATŘENÍ

Z hlediska ustáleného chodu je v současné době na všech vedeních i transformátorech v UO Otrokovice dostatečná rezerva i s ohledem na budoucí rozšíření a všechny prvky sítě vyhovují provozu a spolehlivosti dodávky. V tomto případě není zapotřebí dalších provozních a technických opatření. Z hlediska spolehlivosti dodávky elektrické energie při poruchách a mimořádných stavech by mohlo dojít ke zlepšení u rozveden Slavičín a Konice, kde se používá paprskové uspořádání rozvodu a v případě poruchy vedení 5591 nebo 5510 budou tyto rozvodny bez napájení. U obou těchto rozveden je však v plánu propojení se sousední uzlovou oblastí a v případě poruchy tak může být napájení zajištěno z těchto oblastí. Ke zlepšení spolehlivosti dodávky elektrické energie může dojít zejména u okruhu popsaného v kapitole 9. To by umožnil přechod stávajícího provozu můstkového zapojení dvou transformátorů na můstkové zapojení všech tří transformátorů v transformovně Otrokovice. To však s sebou nese výrazné zhoršení zkratových poměrů, které pro transformovny Otrokovice a Zlín, Svit znamená překročení zkratové odolnosti vypínačů. Byla by tedy nutná výměna všech výkonových vypínačů za vypínače s vyšší zkratovou odolností, jež jsou 5000MVA (Zlín, Svit) a 7500 MVA (Otrokovice).

11 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV E.ON, napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice. Ta zajišťuje transformaci z nadřazené soustavy 400 kV na soustavu 110 kV prostřednictvím tří transformátorů. V rámci zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie a zlepšení ekonomiky provozu se uvažuje o přechodu z můstkového provozu dvou transformátorů na můstkový provoz tří transformátorů. To však s sebou přináší výrazné zhoršení zkratových poměrů v síti 110 kV. Úkolem této práce bylo vyhodnotit a porovnat obě varianty provozu z hlediska ustáleného chodu a zkratových poměrů v síti 110 kV při jednopólovém a třípólovém zkratu a následně provést návrh provozních a technických opatření.

V úvodu je popsána elektrizační soustava a její části. Teoretická část práce rozebírá postupy při řešení ustáleného chodu a zkratových poměrů dlouhých vedení. Další část seznamuje se současnou charakteristikou provozu DS 110 kV. Následně je popsána detailněji námi řešená oblast, kterou je UO Otrokovice. UO Otrokovice čítá dvacet pět rozvodů. Kromě dvou rozvodů, kde se používá paprskové uspořádání rozvodu je v celé oblasti uspořádání rozvodu okružní. Velkou výhodou je možnost napájení jednoho okruhu ze dvou stran, čímž se zvyšuje spolehlivost dodávky elektrické energie. Při poruše v některé části okruhu se poškozená část odpojí a zbytek se do provedení opravy provozuje jako dva paprskové rozvody.

U ustáleného chodu sítě jsme provedli zhodnocení napěťových poměrů, zatížení vedení a jednotlivých transformátorů pro obě varianty zapojení. Zhodnocením se zabývá kapitola 8. V obou případech nedošlo k žádnému překročení limitních hodnot. Bylo zjištěno, že je zde poměrně velká rezerva z důvodu možného nárůstu zatížení a možného výpadku některého z vedení nebo transformátorů. U můstkového provozu tří transformátorů došlo k výrazně lepšímu rozložení zatížení mezi jednotlivé transformátory 400/110 kV.

Zkratové poměry jsou výrazně horší při můstkovém zapojení všech tří transformátorů. U dvou rozvodů by došlo k překročení zkratové odolnosti vypínačů. Pro přechod na můstkový provoz tří transformátorů by byla tedy nutná výměna za vypínače s vyšší zkratovou odolností, což by bylo ekonomicky velmi nákladné, ale jak pojednává kapitola 9, u okruhu, který je v současné době napájen samostatným transformátorem, by došlo k podstatnému zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie. Za současného provozu by při výpadku tohoto transformátoru byl celý okruh bez dodávky elektrické energie. Při můstkovém provozu všech transformátorů by byl okruh napájen (vyjma dvou transformátorů 110kV/ vn , u kterých by došlo k proudovému přetížení a odpojení) i v případě, že by došlo k výpadku jednoho z transformátorů např. vlivem zkratu na přípojnicí a současně navíc i výpadku dvou turbogenerátorů, které pomáhají s napájením okruhu. Jejich dodávaný výkon se v závislosti na zatížení pohybuje kolem 60MW.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALUZÍK, Evžen. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. první. Vysoké učení technické v Brně : SNTL, 1983. 126 s.
- [2] BLAŽEK, Vladimír; SKALA, Petr. *Distribuce elektrické energie*. první. Vysoké učení technické v Brně : SNTL, 2004. 138 s.
- [3] BLAŽEK, Vladimír; PAAR, Martin. *Přenosové sítě*. první. Vysoké učení technické v Brně : SNTL, 2004. 123 s.
- [4] PAUZA, Josef. *Zkratky v elektrických rozvodech*. první. Brno : SNTL, 1970. 248 s.
- [5] [Http://www.eon-distribuce.cz/](http://www.eon-distribuce.cz/). [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.eon-distribuce.cz/cs/distribuce-elekriny/distribucni-soustava/technicke-informace.shtml>
- [6] VERNER, Josef. *Elektrické stanice a vedení*. druhé. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně.
- [7] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně.
- [8] Rozvod elektrické energie. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.arcelormittal.com/ostrava/pdf/RozvodElektrickeEnergie_ERU.pdf

PŘÍLOHY

Příložené cd obsahuje výpočty dispečerského programu SINAUT Spektrum 4.4. Pozn. Značení odpovídá Tab. 5-1 i Tab. 5-4. Ve výsledcích je před zkratkou písmeno M, které značí, že se jedná o oblast východ.