

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110KV
E.ON PŘI PROVOZU NOVÉHO ZDROJE 120MVA
PRACUJÍCÍHO DO ROZVODNY 110KV PROSTĚJOV

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL KOLÁŘ



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110KV
E.ON PŘI PROVOZU NOVÉHO ZDROJE 120MVA
PRACUJÍCÍHO DO ROZVODNY 110KV PROSTĚJOV
STEADY STATE AND SHORT-CIRCUIT CONDITIONS OF THE 110KV E.ON
POWER NETWORK DURING AN OPERATION OF THE NEW 120MVA SOURCE
WORKING TO THE PROSTĚJOV 110KV SUBSTATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL KOLÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, CSc.

ABSTRAKT

Energetická soustava je nepostradatelným technickým systémem určeným k zásobování energií. Spotřeba energie se stále zvyšuje a i do budoucna je možno předpokládat vzrůstající trend. Díky tomu jsou do provozu uváděny nové zdroje energie. Je tedy důležité znát chování a parametry jak elektrizační soustavy, tak i nových energetických zdrojů, které k ní připojujeme. Z těchto důvodů se elektrizační soustava zjednodušuje a popisuje v jejím ustáleném chodu pomocí různých numerických metod. Také jsou určovány zkratové poměry, pomocí nichž se dimenzuje připojení nového zdroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrizační soustava, ustálený chod, Newton-Raphson, přechodný jev, zkratové poměry

ABSTRACT

Electrical power system is an essential technical system intended to power supply. The power drain is still increasing and it is possible to suppose rising trend in the future. Because of this fact there are installed new power sources into the system, so it is important to know manners and parameters of the electricity supply system as well as the new power sources which we are connecting to the grid. Due to these reasons, the electricity supply system is being simplified and described as the steady state operation with different numerical methods. To dimension a connection of the new power source to the grid, it has to be determined short-circuit conditions too.

KEYWORDS

electricity supply system, steady state, Newton-Raphson, transient phenomenon, short-circuit conditions

KOLÁŘ, Pavel *USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110kV E.ON PŘI PROVOZU NOVÉHO ZDROJE 120MVA PRACUJÍCÍHO DO ROZVODNY 110kV PROSTĚJOV*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2012. 85 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY V SÍTI 110kV E.ON PŘI PROVOZU NOVÉHO ZDROJE 120MVA PRACUJÍCÍHO DO ROZVODNY 110kV PROSTĚJOV“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc. a konzultantovi panu Ing. Petru Jandovi za podnětné rady a pomoc během tvorby této práce.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Úvod	9
2	Cíl práce	10
3	Elektrizační soustava	11
3.1	Ustálený chod sítě	11
3.1.1	Výpočet ustáleného chodu sítě jako lineární úloha	13
3.1.2	Výpočet ustáleného chodu sítě jako nelineární úloha	14
3.2	Newton-Raphsonova modifikovaná iterační metoda	17
4	Přechodné jevy v elektrizační soustavě	21
4.1	Přepětí v elektrizační soustavě	21
4.2	Stabilita v elektrizační soustavě	23
4.3	Zkratky v elektrizační soustavě	24
4.3.1	Druhy zkratů	25
4.3.2	Průběh zkratového proudu	25
4.3.3	Charakteristické hodnoty zkratového proudu	29
4.3.4	Příčiny vzniku zkratu	31
4.3.5	Účinky zkratového proudu a dimenzování elektrických zařízení	32
4.3.6	Metodika výpočtu zkratového proudu	33
5	Charakteristika uzlové oblasti napájené z R110kV Otrokovice	40
6	Ustálený chod a zkratové poměry UO Otrokovice	47
6.1	Ustálený chod	47
6.1.1	Poměry na vedení	47
6.1.2	Výkony transformátorů	48
6.1.3	Napětové poměry v uzlech	49
6.1.4	Celková bilance výkonů	50
6.2	Zkratové poměry	54
7	Ustálený chod a zkratové poměry UO Otrokovice po připojení nového zdroje do VPR	58
7.1	Ustálený chod	59
7.1.1	Poměry na vedení	62
7.1.2	Výkony transformátorů	62
7.1.3	Napětové poměry v uzlech	62
7.1.4	Celková bilance výkonů	67

7.2	Zkratové poměry	69
8	Neobvyklé provozní stavy	73
8.1	Výpadek vedení 5577	73
8.2	Výpadek vedení 5578	74
8.3	Posílání výkonu proti Sokolnicím	75
9	Závěr	77
	Literatura	79
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

3.1	Nahrazení ES galvanickým spojením prvků.	13
3.2	Fázorový diagram induktivního a kapacitního charakteru odběru[1]. . .	15
3.3	Náhradní Π –článek.	16
3.4	Algoritmus <i>Newton-Raphsonovy</i> iterační metody[8].	18
4.1	Druhy zkratů[2].	26
4.2	Průběh souměrného zkratového proudu.[2].	28
4.3	Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou[2].	29
4.4	Náhradní schémata pro souslednou, zpětnou a netočivou složku. . . .	34
4.5	Třífázový zemní zkrat	36
4.6	Náhradní složkové schéma pro třífázový zkrat	37
4.7	Jednofázový zkrat	38
4.8	Náhradní složkové schéma pro jednofázový zkrat	39
5.1	UO R110kV Otrokovice k 1.3.2013	41
6.1	Zatížení vedení při ustáleném chodu sítě	48
6.2	Zatížení transformátorů při ustáleném chodu sítě	50
6.3	Zatížení vypínačů při jednofázovém zkratu na přípojnicích	55
6.4	Zatížení vypínačů při třífázovém zkratu na přípojnicích	57
7.1	UO R110kV Otrokovice po připojení nového zdroje	58
7.2	Zatížení vedení při ustáleném chodu sítě po připojení nového zdroje ve VPR	63
7.3	Zatížení transformátorů při ustáleném chodu sítě po připojení nového zdroje ve VPR	65
7.4	Zatížení vypínačů při jednofázovém zkratu na přípojnicích	70
7.5	Zatížení vypínačů při třífázovém zkratu na přípojnicích	71
8.1	Část sítě UO Otrokovice při výpadku vedení 5577	74
8.2	Část sítě UO Otrokovice při výpadku vedení 5578	75
8.3	Část sítě UO Otrokovice při posílání výkonu proti Sokolnicím	76

SEZNAM TABULEK

3.1	Činný a jalový výkon dle fázového posunu φ a charakteru odběru . . .	15
4.1	Pravděpodobnost výskytu zkratu v sítích 110kV[1]	25
5.1	Rozvodny 110kV v UO Otrokovice a jejich dispečerské značení	40
5.2	Charakteristika a parametry vedení v UO Otrokovice	46
6.1	Vedení - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice	49
6.2	Transformátory - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice	51
6.3	Uzly - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice	52
6.4	Jednofázový zkrat na přípojnicích rozvoden UO Otrokovice	54
6.5	Třífázový zkrat na přípojnicích rozvoden UO Otrokovice	56
7.1	Vedení - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR	64
7.2	Transformátory - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR	66
7.3	Uzly - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR	67
7.4	Jednofázový zkrat na přípojnicích rozvoden UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR	69
7.5	Třífázový zkrat na přípojnicích rozvoden UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR	72
8.1	Poměry na vedení mezi výtopnou Prostějov a Otrokovicemi při výpadku vedení 5577	73
8.2	Poměry na vedení mezi výtopnou Prostějov a Otrokovicemi při výpadku vedení 5578	74
8.3	Poměry na vedení mezi výtopnou Prostějov a Vyškovem po vedení 556	75

1 ÚVOD

Elektrizační soustava (ES) tvoří podsystém energetiky. Jednotlivé články je možné rozdělit do tří skupin, a to na výrobní, přenosové a rozvodné, spotřební. Každé elektrické zařízení, a tedy i ES je možné popsat jak pro normální provozní stavy, tak i pro jevy poruchové, při nichž vznikají tzv. přechodné děje.

Normálním provozním stavem soustavy rozumíme ustálený chod, tedy rovnovážný stav, ve kterém se žádná z vnitřních veličin nemění, a tedy je považujeme za konstantní v čase. Těmito veličinami mohou být například napětí, proudy nebo výkony. Ustálený chod ES je řešen buď jako lineární úloha, nebo pomocí soustav nelineárních rovnic. Pro zajištění rychlé a přesné konvergence se v praxi používají iterační metody výpočtu, a to buď *Newton-Raphsonova* modifikovaná iterační metoda, nebo *Gauss-Seidlova* iterační metoda. V této práci se bude zabýváno pouze první zmiňovanou metodou, a to z důvodu jejího použití v dispečerském řídicím programu Sinaut Spectrum společnosti E.ON. K narušení ustáleného chodu ES dochází nejen při poruchách na zařízeních, jako jsou zkratky, zemní spojení, přepětí, nebo vypadnutí alternátoru ze synchronismu, ale i při různých manipulacích na zařízeních v ES nebo při změně zatížení ES. Při takovémto přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého vznikají přechodné jevy. Ty rozdělujeme z hlediska rychlosti odeznění přechodného děje sestupně na vlnové (přepětí), elektromagnetické (zkratky) a elektromechanické (statická a dynamická stabilita). Při zkoumání zkratových poměrů jsou tedy podstatné elektromagnetické přechodné jevy. Zkrat je nežádoucím vodičným spojením mezi jednotlivými fázemi ES, v soustavách s účinně uzemněným uzlem přímo anebo přes rezistor pak i mezi fází a zemí. Mezi hlavní příčiny vzniku zkratů jsou považovány poruchy izolace způsobené přímými údery blesků, přepětím, zestárnutím izolačních materiálů a přímé poškození jak venkovních vedení, tak i kabelů. Při zkratu dochází ke zmenšení impedance obvodů mezi napěťovými zdroji a místem zkratu (zkratový obvod), což vede k nadměrnému nárůstu proudu ve větvích. Tyto velké zkratové proudy mají devastující tepelné a silové účinky na zařízení, a ta proto musí být navržena tak, aby krátkodobě účinkům zkratových proudů odolala. Jejich zkratová odolnost je potom dána dynamickým zkratovým proudem, krátkodobým zkratovým proudem a vypínacím proudem, které musí být vždy nižší, než samotná zkratová odolnost. Výpočet zkratových poměrů je tedy důležitou a nedílnou součástí návrhu ES a jejích dílčích částí.

Při kontrole ustáleného chodu a zkratových poměrů 110kV distribuční sítě E.ON pro provoz nového zdroje o zdánlivém výkonu 120MVA pracujícího do rozvodny Prostějov bude brán zřetel na normu ČSN EN 60909.

2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je seznámit se s problematikou řešení ustáleného chodu sítě a přechodovými jevy, především pak zkratovými poměry v zadané distribuční soustavě 110kV společnosti E.ON. Ustálený stav bude řešen jako nelineární úloha za pomoci *Newton-Raphsonovy* modifikované iterační metody, kterou používá k výpočtu a analýze dispečerský řídicí program Sinaut Spectrum společnosti E.ON.

Stěžejní částí práce je posoudit možnou připojitelnost nového 120MVA zdroje ve výtopně Prostějov na základě výpočtu programu Sinaut Spectrum. Výpočet bude proveden jak pro ustálený stav, tak pro jednofázový a třífázový zkrat. Ukáže-li se, že tento zdroj nebude možné k soustavě jednoduše připojit, budou navrhnuty metody a postupy k zaručení spolehlivosti a bezpečnosti chodu ES s tímto novým zdrojem.

3 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA

Elektrizační soustava¹ je souborem jednotlivých energetických prvků, které můžeme rozdělit na výrobní, přenosové a spotřební. Výrobní články slouží k získávání elektrické energie přeměnou jiných druhů energií, jako jsou např. energie vodní, větrná, chemická, sluneční, jaderná atd. Jsou to různé typy elektráren a zařízení, které pracují na odlišných principech přeměny energie. Přenosové a rozvodné články ES mají za úkol dopravu vyrobené elektrické energie do místa spotřeby. Patří mezi ně přenosová a distribuční vedení, průmyslové rozvody venkovní i kabelové, rozvodny, transformátory atd. Posledním článkem jsou elektrické spotřebiče, které přeměňují elektrickou energii na jiný typ energie, např. světlo, teplo nebo mechanickou práci[7].

3.1 Ustálený chod sítě

Výpočet ustáleného chodu je velmi důležitý při analýze sítě a zjišťuje se jak při provozu stávající sítě, tak při plánování. Cílem je výpočet neznámého napětí v uzlech sítě, jeho úhlu, dodávek či odběrů činného a jalového výkonu a také zatížení jednotlivých linek. Ustáleným chodem sítě se rozumí rovnovážný stav, ve kterém se žádná z vnitřních veličin nemění a jsou proto považovány za konstanty. Ustálený chod ES je řešen buď jako lineární úloha, kde se předpokládá zadání odebíraných a dodávaných proudů v jednotlivých uzlech sítě anebo pomocí soustav nelineárních rovnic. Takovéto rovnice řešíme iteračními metodami s rychlou konvergencí, a to především *Gauss-Seidlovou* iterační metodou a *Newton-Raphsonovou* modifikovanou iterační metodou, která bude popsána v další kapitole. Pro výpočet je potřeba znát jednotlivé uzly sítě, které jsou charakterizovány pomocí čtyř tzv. uzlových veličin:

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

Uzly tak můžeme pomocí těchto veličin rozdělit na[7]:

- **Bilanční uzly**, neboli třídu U - δ , do kterých jsou připojeny zdroje výkonu a dopočítávány činné a jalové výkony. Mají za úkol hradit nerovnováhy mezi

¹ES ČR měla ke dni 1.1.2012 celkový instalovaný výkon 20 250MW a výroba elektrické energie v elektrárnách za rok 2011 dosáhla 87 561GWh.

výkony a dále hradí ztráty činných a jalových výkonů v síti, které jsou známy až po ukončení výpočtu a určení výsledné výkonové bilance.

- **Odběrové a dodávkové uzly**, neboli třídu $P-Q$, ve kterých jsou dopočítávány fázory napětí a jejich úhly.
- **Regulační a kompenzační uzly**, neboli třídu $U-P$, ve kterých se při výpočtu řeší, jak velký jalový výkon musí být v těchto uzlech odebírán nebo dodáván, aby byla dodržena zadaná hodnota napětí. Taktéž se dopočítává úhel napětí.

Při výpočtu je nutné dodržet zásadu, že chod sítě nesmí být přeuročen ani být neurčitý. Proto se uzly sítě popisují následovně:

- jeden bilanční uzel
- k uzlů dodávkových nebo odběrových
- $n - k - 1$ uzlů regulačních, kde n je celkový počet uzlů soustavy

Počítáme-li ustálený chod sítí velmi vysokého napětí, je zapotřebí uvažovat jak podélnou impedanci \bar{Z}_k (složenou z rezistence R_k a induktivní reaktance vedení X_k), tak i příčnou admitanci \bar{Y}_k (složenou z konduktance G_k a kapacitní susceptance vedení B_k)². Je to dáno tím, že při takto vysokých napětích jako je 110kV je při výpočtech potřeba uvažovat i s proudy v příčném směru přenosu, na které mají vliv kapacita vodičů a konduktance. Tyto proudy jsou řádově srovnatelné s proudy odběrů a mají tedy vliv na úbytky napětí a s nimi souvisejícími ztrátami výkonu. Můžeme však zavést následující zjednodušující podmínky[2]:

- Trojfázová soustava je souměrná v parametrech prvků, ve zdrojích i ve spotřebičích.
- Napětí a proudy jsou harmonickými funkcemi času s konstantním kmitočtem $f = 50\text{Hz}$.
- Parametry vedení, transformátorů a ostatních prvků jsou konstanty nezávislé na velikosti proudů a napětí.
- Náhrada prvků sítě s homogenně rozloženými parametry (Π -článek pro vedení nebo transformátor, Γ -článek pro transformátor).
- Odběry jsou zadány pomocí výkonů, kde proudy nejsou závislé na napětí.
- Parametry všech prvků sítě jsou přepočítány na jedno vztažné napětí.
- Napětí zdrojů a proudy odběrů neobsahují vyšší harmonické.

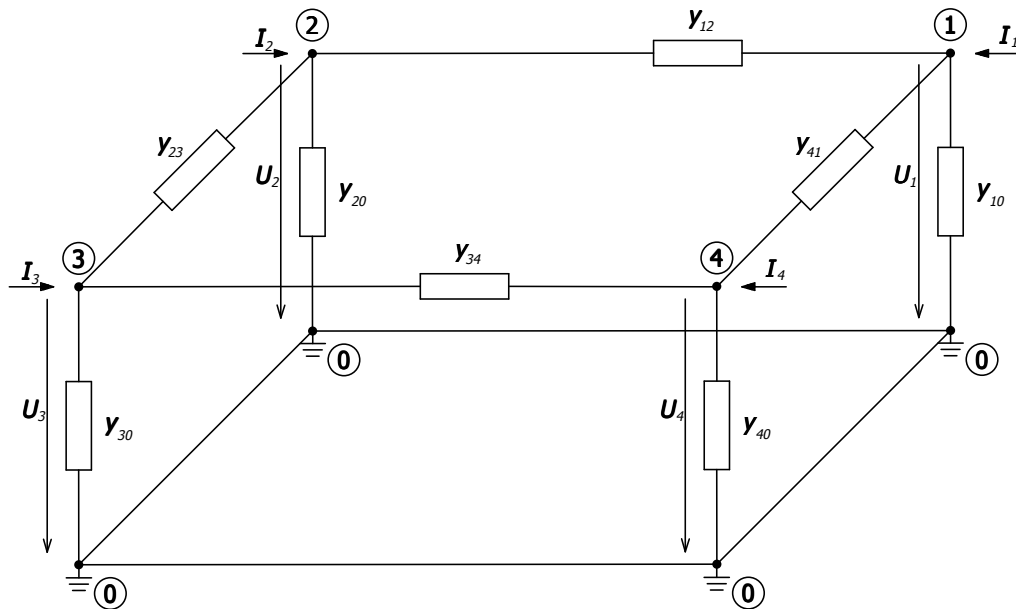
²Veličiny označeny s dolním indexem k jsou vztaženy na jednotku délky vedení l .

- ES se skládá ze souměrných zdrojů, přenosových prvků a odběrů. Potom ji můžeme řešit jako jednofázovou síť.

3.1.1 Výpočet ustáleného chodu sítě jako lineární úloha

Kapitola byla převzata z[7].

Při výpočtu ustáleného stavu sítě jako lineární úlohy je předpoklad, že jsou známy dodávané a odebírané výkony v uzlech sítě. Prvky ES jsou zadány jejich podélnými a příčnými admitancemi, které jsou spojeny mezi příslušný uzel sítě a referenční uzel o nulovém potenciálu - zem. Parametry všech prvků jsou přepočteny na jedno vztažné napětí a ES tedy lze nahradit galvanickým spojením prvků např. podle obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Nahrazení ES galvanickým spojením prvků.

Tuto síť můžeme matematicky popsat pomocí metody uzlových napětí³:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{14} \\ \bar{Y}_{21} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{24} \\ \bar{Y}_{31} & \bar{Y}_{32} & \bar{Y}_{33} & \bar{Y}_{34} \\ \bar{Y}_{41} & \bar{Y}_{42} & \bar{Y}_{43} & \bar{Y}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

kde $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3, \bar{U}_4$ jsou fázory neznámých uzlových napětí

³U fázorů uzlových proudů znaménko + značí dodávky a znaménko - odběry.

$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \bar{I}_4$ jsou zadané fázory uzlových proudů

Admitance jsou sestaveny podle druhého *Kirchhoffova* zákona takto: i -tý diagonální prvek \bar{Y}_{ii} je tvořen součtem admitancí všech větví incidenčních s i -tým uzlem, např.

$$\bar{Y}_{33} = \bar{y}_{23} + \bar{y}_{34} + \bar{y}_{30} \quad (3.2)$$

Mimodiagonální prvek \bar{Y}_{ij} $i \neq j$ je tvořen záporně vzatým součtem admitancí všech větví spojujících i -tý uzel s i -tým uzlem

$$\bar{Y}_{21} = -\bar{y}_{12} \quad (3.3)$$

Předpokladem je, že větve nemají vzájemné induktivní vazby.

3.1.2 Výpočet ustáleného chodu sítě jako nelineární úloha

Kapitola byla převzata z[7].

Nelineární úloha výpočtu ustáleného stavu sítě spočívá v neznalosti napětí v uzlech, stejně tak jako i odebíraných a dodávaných proudů. Předpokládá se tak pouze znalost dodávky a odběru činných a jalových výkonů. Znaménka u činných a jalových výkonů se určují z uzlu třídy P - Q , tedy z uzlu s dodávkou nebo z uzlu s odběrem. Pro ilustraci je stav popsán níže.

Na obrázku 3.2 je fázorový diagram, ze kterého je patrné, že napětí předbíhá proud o úhel φ , pro který platí $\varphi > 0$ a zároveň $\varphi = \delta - \alpha$. To znamená, že jde o induktivní charakter odběru. V tomto diagramu je navíc proud kladný, tudíž jde o uzel s dodávkou a proto bude činný i jalový výkon kladný. Kdybychom uvažovali proud se záporným znaménkem, šlo by o uzel odběrový a v něm by byl činný i jalový výkon záporný. Je-li fázový posuv mezi napětím a proudem $\varphi < 0$, jde o kapacitní charakter odběru a jalové výkony mají v tomto případě opačné znaménko než při induktivním odběru. Tyto jednotlivé situace, které mohou nastat, shrnuje tabulka 3.1.

Pomocí činných a jalových výkonů tedy můžeme určit komplexní jednofázový výkon v i -tém uzlu soustavy podle rovnice

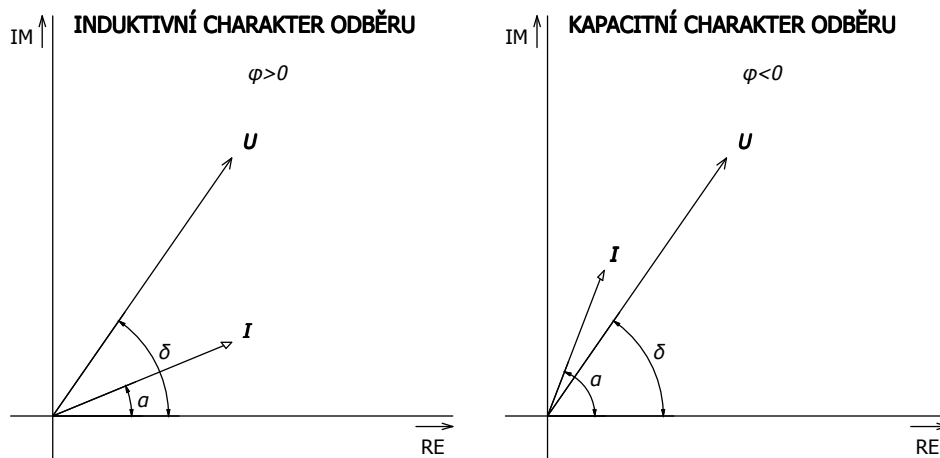
$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \bar{I}_i^* \quad (3.4)$$

Zdánlivý výkon je potom dán vztahem

$$\bar{S} = P + jQ = Ue^{j\delta} Ie^{-j\alpha} = UIe^{j\varphi} = S(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (3.5)$$

Tab. 3.1: Činný a jalový výkon dle fázového posunu φ a charakteru odběru

FÁZOVÝ POSUN	CHARAKTER ODBĚRU	TYP UZLU	
		DODÁVKA	ODBĚR
$\varphi > 0$	induktivní	$P > 0$ $Q > 0$	$P < 0$ $Q < 0$
$\varphi < 0$	kapacitní	$P > 0$ $Q < 0$	$P < 0$ $Q > 0$



Obr. 3.2: Fázorový diagram induktivního a kapacitního charakteru odběru[1].

Z rovnice 3.4 vyjádříme proud \bar{I}_i

$$\bar{I}_i = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} \quad (3.6)$$

Porovnáme-li jej se vztahem

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

Můžeme dále psát

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij}\bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.8)$$

Z rovnic 3.7 a 3.8 je patrné, že došlo k eliminaci bilančního uzlu a byla provedena volba napětí \bar{U}_1 . Známe-li napětí bilančního uzlu a admitanci \bar{Y}_{ij} , můžeme

rovnici 3.8 řešit jako soustavu nelineárních kvadratických rovnic. V případě zadaných uzlových výkonů hradí bilanční uzel rozdíl mezi odběrem a dodávkou a taktéž ztráty činného a jalového výkonu v síti. Za předpokladu nahrazení prvků sítě pomocí Π -článku je proud, který teče do uzlu i , určen podle vztahu 3.9 a v uzlu j podle 3.10.

$$\bar{I}_i = (\bar{U}_i - \bar{U}_j)\bar{y}_{ij} + \bar{U}_i\bar{y}_{i0} \quad (3.9)$$

$$\bar{I}_j = (\bar{U}_j - \bar{U}_i)\bar{y}_{ij} + \bar{U}_j\bar{y}_{j0} \quad (3.10)$$

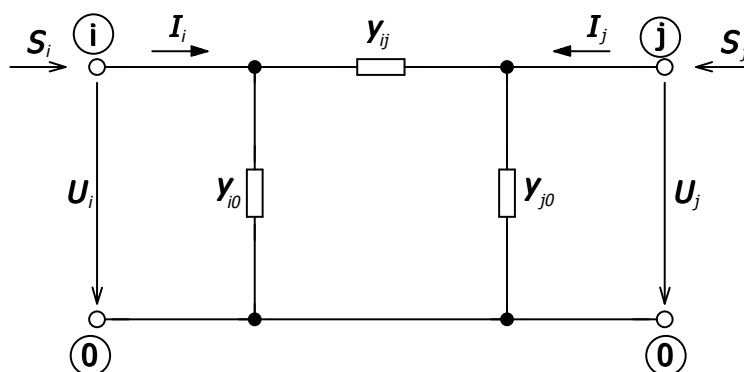
Komplexní jednofázový výkon v j -tém uzlu soustavy potom bude ekvivalentem vztahu 3.4

$$\bar{S}_j = P_j + jQ_j = \bar{U}_j\bar{I}_j^* \quad (3.11)$$

Algebraický součet činných a jalových výkonů tekoucích do uzlů i a j náhradního Π -článku představuje činné a jalové ztráty.

$$\Delta P_{ij} = P_i + P_j \quad (3.12)$$

$$\Delta Q_{ij} = Q_i + Q_j \quad (3.13)$$



Obr. 3.3: Náhradní Π -článek.

Trojfázová síť je nahrazena jednofázovým ekvivalentem, a proto jsou výše uvedené vztahy platné pro fázové hodnoty napětí a výkon přenášený jednou fází.

3.2 Newton-Raphsonova modifikovaná iterační metoda

Od poloviny minulého století se problémem výpočtu ustáleného stavu sítě zabývalo mnoho výpočtových metod. Až roku 1974 byla představena *Newton-Raphsonova* iterační metoda, která vede ke konvergenci mnohem rychleji, než ostatní iterační metody, ale je náročnější na výpočetní čas[8]. Rychlost konvergence iteračních metod obecně závisí na několika hlavních okolnostech. Patří mezi ně umístění bilančního uzlu, který je doporučeno volit v “elektrickém středu soustavy“, protože je největší admitancí v diagonálním směru admitanční uzlové matice. V bilančním uzlu však není vždy možné najít volný zdroj, který by pokryl ztráty, proto se dá jako bilanční uzel zvolit i jiný uzel v soustavě nebo ztráty rovnoměrně rozdělit mezi ostatní zdroje pracující do soustavy. Rychlost konvergence dále závisí na počtu a umístění dodávkových, odběrových, regulačních a kompenzačních uzlů a také na parametrech počítané soustavy[7].

V současnosti, kdy jsou energetické systémy mnohem větší a komplikovanější, je původní *Newtonova* metoda postupně modifikována jinými výpočetními metodami, aby se zajistila její větší účinnost. *Newton-Raphson* je široce používanou iterační metodou k řešení nelineárních algebraických rovnic postupným aproximováním na základě počátečního odhadu neznámé proměnné. Zjednodušený postup k sestavení algoritmu na obrázku 3.4 je následující[8]:

- vložení systémových dat
- vytvoření admitanční matice
- předpoklad (odhad) napětí v uzlech sítě a jeho úhlu
- nastavení iteračního kroku $k = 0$
- výpočet

Uvažujme funkci

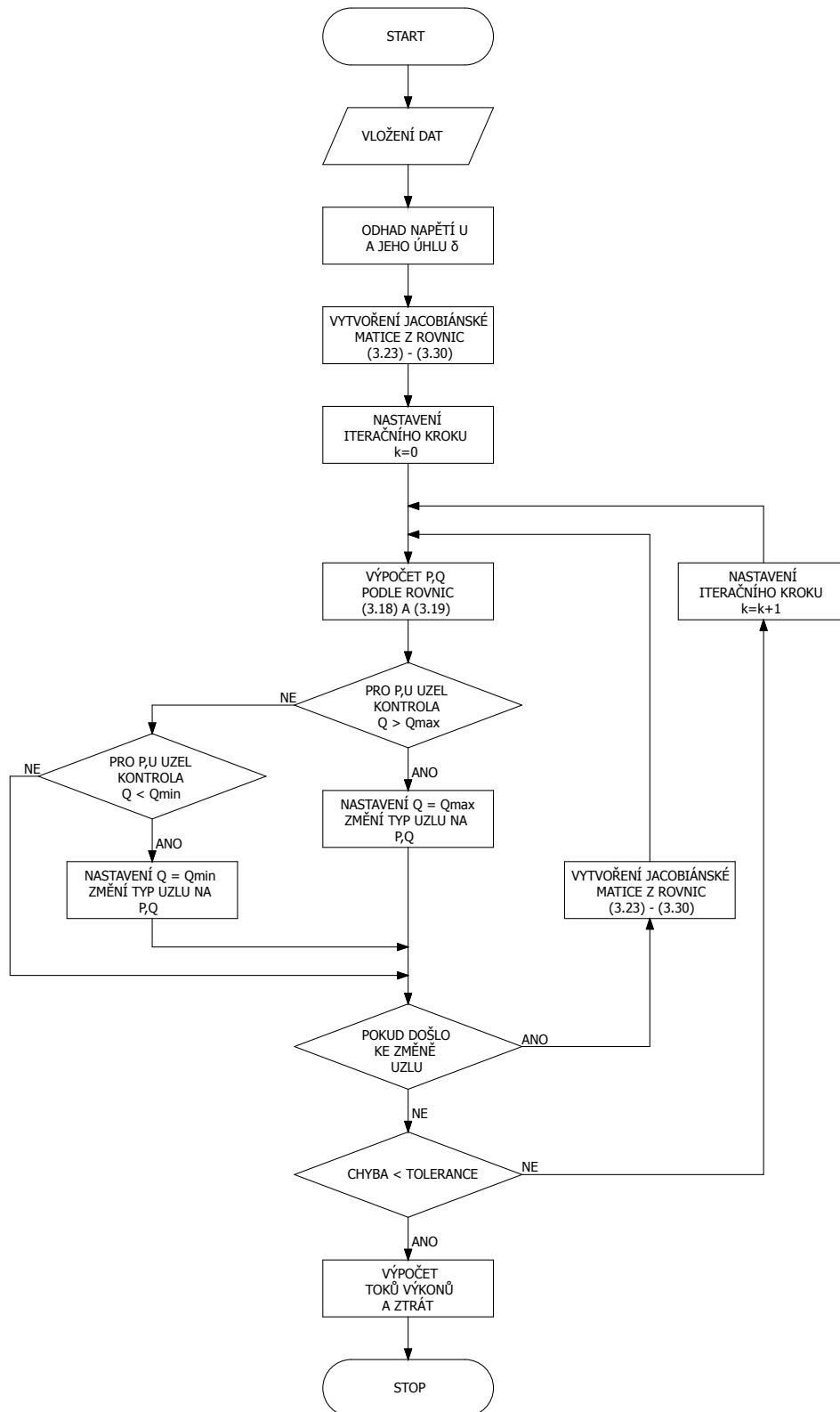
$$f(x) = c \tag{3.14}$$

Iterační proces je

$$x_i^{(k+1)} = x_i^k + \Delta x_i^k \tag{3.15}$$

kde index k označuje k -tou iteraci a

$$\Delta x_i^k = \frac{\Delta c^k}{\left(\frac{df}{dx}\right)_k} \tag{3.16}$$



Obr. 3.4: Algoritmus *Newton-Raphsonovy* iterační metody[8].

Tyto rovnice nyní aplikujeme na vztah 3.8 popisující ustálený chod sítě a přepíšeme do tvaru

$$P_i - jQ_i = \bar{U}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.17)$$

Dosažením polárního tvaru admitance a napětí do 3.17 získáme po úpravě a s uvážením, že $\cos(-x) = \cos x$ a $\sin(-x) = -\sin x$, soustavu $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů

$$P_i = \sum_{j=1}^n \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{Y}_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.18)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{Y}_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (3.19)$$

Proměnné, které hledáme, jsou δ a \bar{U} . Potom můžeme psát iterace

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^k + \Delta \delta_i^k \quad (3.20)$$

$$\bar{U}_i^{(k+1)} = \bar{U}_i^k + \Delta \bar{U}_i^k \quad (3.21)$$

Pro iterační výpočet diferencí $\Delta \delta_i$ a ΔU_i můžeme soustavu rovnic zjednodušeně psát pomocí matice ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \bar{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Prvky matice J_1 , J_2 , J_3 a J_4 jsou tzv. *Jacobiány* a souvisí s druhy uzlů sítě, pro regulační a kompenzační $P-U$ uzly je potřeba dopočítat úhel napětí δ a jalový výkon Q , pro dodávkové a odběrové uzly $P-Q$ potom úhel napětí δ a napětí \bar{U} . Jacobiány mohou být tedy zapsány jako

a) výpočet prvků J_1

- diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} \bar{U}_i \bar{U}_j \bar{Y}_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.23)$$

- mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -\bar{U}_i \bar{U}_j \bar{Y}_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \text{pro } i \neq j \quad (3.24)$$

b) výpočet prvků J_2

- diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \bar{U}_i} = 2\bar{U}_i\bar{Y}_{ii} \cos \alpha_{ii} + \sum_{j \neq i} \bar{U}_j\bar{Y}_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.25)$$

- mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \bar{U}_j} = \bar{U}_i\bar{Y}_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \text{pro } i \neq j \quad (3.26)$$

c) výpočet prvků J_3

- diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} \bar{U}_i\bar{U}_j\bar{Y}_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.27)$$

- mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -\bar{U}_i\bar{U}_j\bar{Y}_{ij} \cos(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \text{pro } i \neq j \quad (3.28)$$

d) výpočet prvků J_4

- diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \bar{U}_i} = 2\bar{U}_i\bar{Y}_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{j \neq i} \bar{U}_j\bar{Y}_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.29)$$

- mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \bar{U}_j} = -\bar{U}_i\bar{Y}_{ij} \sin(\alpha_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \text{pro } i \neq j \quad (3.30)$$

Při každé iteraci se kontroluje hodnota P a Q vůči jejich limitům. Pokud jsou $P > P_{max}$ a $Q > Q_{max}$, jsou P a Q nastaveny rovno P_{max} a Q_{max} . V případě, že $P < P_{min}$ a $Q < Q_{min}$, jsou P a Q nastaveny rovno P_{min} a Q_{min} . Na obrázku 3.4 je znázorněn algoritmus *Newton-Raphsonovy* iterační metody pro výpočet toků výkonů v uzlech sítě včetně kontroly P - Q limitů. Takováto metoda kontroly limitů, kterou používá mnoho programů na analýzu ustáleného stavu sítě, se nazývá obdélníková⁴ a je založena na zápisu $(P_{min} - P_{max}) / (Q_{min} - Q_{max})$ [8].

⁴Jde o určení plochy pod aproximační funkcí danou obdélníkem. Daná plocha se rozdělí na obdélníky, kde n je počet dílčích intervalů a $n + 1$ značí počet souřadnic x v celém intervalu.

4 PŘECHODNÉ JEVY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

Při popisu přechodných jevů v ES je zapotřebí provést hlubší členění dynamického systému. To je dáno rychlostí průběhu přechodného jevu a dle tohoto kritéria lze ES modelovat buď jako dynamický systém se soustředěnými parametry nebo jako dynamický systém s rozloženými parametry[3].

Nejrychlejšími přechodnými ději vyskytujícími se v ES jsou vlnové přechodné jevy, například atmosférické přepětí, u kterého se typický čas trvání pohybuje v intervalu $0,1\mu\text{s}$ - $1000\mu\text{s}$. Další skupinu tvoří elektromagnetické přechodné děje s typickým časem trvání 2ms - 1000ms . Ty jsou zastoupeny zkraty a dále jim bude věnována pozornost. U těchto jevů je vzhledem k jejich menší rychlosti časových změn možné zanedbat rychlost šíření elektromagnetických vln a modelovat tak ES jako dynamický systém se soustředěnými parametry. Třetí skupinu tvoří přechodné jevy elektromechanické, u nichž se čas trvání děje pohybuje v širokém rozmezí od několika desetin sekundy až po desítky sekund. Tyto jevy v ES charakterizují především mechanické pohyby rotorů generátorů. Typickým příkladem řešení elektromechanického přechodného jevu může být statická a dynamická stabilita[4].

4.1 Přepětí v elektrizační soustavě

Přepětí je definováno jako napětí, které je vyšší než nejvyšší provozovací napětí. Z hlediska rozlišení zdrojů impulsního přepětí jej rozdělujeme na:

- atmosférická přepětí – *LEMP* (lightning electromagnetic pulse)
- spínací přepětí vzniklá při spínání v obvodech sítích – *SEMP* (switching electromagnetic pulse)
- přepětí způsobená nukleárními výbuchy – *NEMP* (nuclear electromagnetic pulse)
- přepětí vzniklá při výbojích statické elektřiny – *ESD* (electrostatic discharge)

Atmosférická přepětí

Jejich zdrojem bývají především bouřky spojené s bleskovými výboji. Nejnebezpečnějším projevem je bleskový proud nebo jeho část vnikající do zařízení. Destruktivní účinek je dán vysokou energií uvolněnou ve velmi krátkém okamžiku – několika milisekundách. Impulsy bleskového proudu jsou popsány pomocí čela vlny, jejího vrcholu a týlu. V našich klimatických podmínkách se průměrná vrcholová hodnota atmosférického výboje pohybuje v rozmezí 20kA – 40kA [10]. Další nebezpečí

mohou představovat indukovaná přepětí při blízkých i vzdálenějších úderech blesku, při kterých vznikající rozdíly potenciálů dosahují napětí až stovek kilovoltů. Ty se mohou po vedení šířit i více kilometrů. Při zásahu do vedení *vn* nebo *vvn* dochází sice k tlumení vln přepětí na transformátorech, avšak kapacitní vazby mezi vinutími, indukční vazby mezi přívody nebo galvanickou vazbu při společném uzemnění odstranit nelze. Proto i zde může docházet k přenosu značné energie přepětových impulsů[9].

Spínací přepětí

Spínací přepětí se vyskytuje ve všech vysokonapětových i nízkonapětových silových sítích. Jejich vrcholová hodnota v některých případech přesahuje napětí 10kV a závisí na druhu, uspořádání a impedanci sítě a její zátěže. Spínací přepětí mohou způsobit nejen velké průmyslové stroje, ale i malé domácí elektrospotřebiče, např. sériové motorky u vysavačů, mixérů, nebo např. zářivková svítidla. Mezi zdroje spínacích přepětí patří především[9]:

- Odpínání nezatížených zařízení s indukčností připojených paralelně ke zdrojům napětí. Patří sem např. transformátory a kompenzační cívky. Tato zařízení mají i kapacitu, a tak po odepnutí ve stavu naprázdno může nastat tlumené kmitání ve vzniklém parazitním rezonančním obvodu.
- Odpínání sériově připojených zařízení s indukčností od proudových zdrojů. Indukčnost se v tomto případě snaží zachovat průchod proudu i po rozpojení obvodu.
- Fázově nebo frekvenčně řízená zařízení, při jejichž rychlém spínání dochází vlivem parazitních indukčností a kapacit ke vzniku nežádoucích kmitů. Jedná se např. o výkonové obvody polovodičových měničů.
- Jiskření sběračů na komutátorech a sběracích kroužcích točivých strojů.
- Rázové tlumivky a transformátory při spínání kapacitní zátěže. Na jejich rezonančních obvodech může při zapínacím proudovém rázu nastat tlumené kmitání.
- Zkratky, v jejichž případě dochází ke skokové změně proudu a napětí. V každém obvodu se nachází nějaká indukčnost a kapacita a tedy může dojít ke vzniku tlumených kmitů.

Nukleární elektromagnetický impuls

Jaderný výbuch ve výšce několika set kilometrů může být příčinou silného elektromagnetického rušení. Zdrojem rušení je tzv. *Comptonův jev*, díky kterému dochází ke vzniku velice strmého a silného elektromagnetického impulsu. Při jaderném výbuchu vzniká na dobu jednotek nanosekund záření gamma, což je tok fotonů s velmi

vysokou energií. Při cestě k zemi ve výšce 20km – 40km v ionosféře se fotony střetávají s plyny obsaženými ve vzduchu. Část energie fotonu způsobí únik orbitálního elektronu z atomu a zbytek energie je vyzářen v podobě nového fotonu s menší energií, jež se obdobně dále střetává s dalšími atomy. Dráha uniklých elektronů se vlivem magnetického pole Země zakřivuje směrem k povrchu a tímto postupem vzniká elektromagnetický impuls s velkou energií. Doba čela je 10ns a délka celého impulsu bývá v řádech stovek nanosekund, což jsou mnohem kratší časy než u atmosférických a spínacích přepětí.

Při jaderném výbuchu v atmosféře, tedy v menší výšce, vzniká typ elektromagnetického impulsu s menší amplitudou, ale delší dobou trvání (až stovky vteřin). Svými účinky postihuje především dlouhá podvodní a podzemní kabelová vedení[9].

Elektrostatické přepětí

Elektrostatický výboj nastane při vyrovnání náboje vzniklého mechanickým třením dvou izolantů. Vrcholová hodnota takto vzniklého přepětí dosahuje až několika desítek kilovoltů a přes svou malou energii dokáže poškodit elektrostaticky citlivé součástky, např. u polovodičových přechodů řízených elektrickým polem – tranzistory MOSFET[9].

4.2 Stabilita v elektrizační soustavě

Kapitola byla převzata z[3].

Pojem stabilita systému se zavádí u elektromechanických přechodných jevů, které jsou vymezeny dvěma zjednodušujícími předpoklady:

- Jejich doba trvání značně přesahuje dobu prostorového šíření fyzikálních veličin v ES charakterizujících tyto děje (proudy, napětí), což vede na tzv. elektrické systémy se soustředěnými parametry. To znamená, že při matematickém popisu systému přejdeme od parciálních diferenciálních rovnic na obyčejné diferenciální rovnice s časem, jako jedinou nezávislou proměnnou.
- Odchytky frekvencí a úhlových rychlostí jednotlivých alternátorů v ES jsou v porovnání s frekvencí ustáleného předporuchového stavu f_u , ω_0 velmi malé, takže je pro všechny statické prvky v ES možné předpokládat ustálený stav s konstantní frekvencí. To znamená, že všechny statické prvky budou matematicky popsány nediferenciálními rovnicemi.

Řešením takto sestaveného systému rovnic pro určitý počáteční (předporuchový)

stav a pro určitou změnu v ES získáme časové průběhy stavových veličin systému (proudů, napětí. . .). Výsledkem je buď nový ustálený stav a soustavu v tomto případě nazýváme stabilní, nebo neustálený stav, roste-li některá ze stavových proměnných nade všechny meze. V tomto případě nazýváme soustavu nestabilní. Stabilita soustavy je schopnost soustavy obnovit původní rovnovážný stav. Rozlišujeme statickou a dynamickou stabilitu systému. Otázka stability ES je především otázkou relativního pohybu rotorů synchronních alternátorů proti sobě, tedy jejich vzájemným úhlovým rozdílem. Buď se rotory dostanou na stejnou rychlost a stabilita zůstane zachována nebo se některé budou zrychlovat či zpomalovat a dojde k tzv. ztrátě synchronismu. Může dojít i k tzv. rozpadu soustavy, kdy se alternátory rozdělí do dvou či více skupin, z nichž každá bude mít svou vlastní frekvenci.

Statická stabilita

Soustava je staticky stabilní, jestliže po vzniku jakékoliv velmi malé změny provozních parametrů setrvá ve stejném rovnovážném stavu nebo stavu velmi blízkému stavu předporuchovému. Při výpočtech statické stability se soustava často zjednodušuje na jediný alternátor a nahrazení zbývajících částí soustavy přípojnícemi s konstantním napětím a frekvencí. Takto upravenou část soustavy nazýváme tvrdá síť. Dalšího zjednodušení výpočtu dosáhneme zanedbáním rezistence, která bývá většinou velmi malá.

Dynamická stabilita

Soustava je dynamicky stabilní vzhledem k určité konečné změně, jestliže se po této změně a po proběhnutí přechodného děje obnoví rovnovážný stav. Při vyšetřování dynamické stability provozu soustavy je častou úlohou zjištění elektromechanického přechodného jevu, ke kterému dochází po určité změně v soustavě. Kvalitativní posouzení dynamické stability umožňuje tzv. pravidlo ploch, kterým lze určit kritickou hodnotu zátěžného úhlu. Na dynamickou stabilitu systému mají největší vliv náhlé změny stavu soustavy, u kterých v důsledku nerovnováhy mezi dodávaným a odebíraným výkonem dosahují změny zátěžného úhlu velké hodnoty. Jsou to spínací pochody, nárazy zatížení a především zkraty, kde je změna impedance skoková.

4.3 Zkraty v elektrizační soustavě

Zkrat je nežádoucím vodivým spojením mezi jednotlivými fázemi ES, v soustavách s účinně uzemněným uzlem přímo anebo přes rezistor pak i mezi fází a zemí. Obvod mezi místem zkratu a zdroji, které ho napájejí, se nazývá zkratový obvod. Zkratové poměry jsou potom vyjádřením vlivu zkratu na vlastnosti ES a vyhod-

nocením zkratových odolností na účinky zkratového proudu. Zkratové poruchy jsou jedny z nejčastějších v ES a co do nebezpečnosti také jedny z nejzávažnějších. Tato práce se zabývá zkratovými poměry v distribuční síti 110kV, pro kterou je pravděpodobnost výskytu zkratu shrnuta v tabulce 4.1. Jak je z tabulky patrné, nejčastějšími poruchami v těchto venkovních vedeních bývají jednofázové zkraty. U kabelových vedení jsou nejrozšířenější zkraty souměrné, tedy třífázový a třífázový zemní.

Tab. 4.1: Pravděpodobnost výskytu zkratu v sítích 110kV[1]

DRUH ZKRATU	třífázový	jednofázový	dvoufázový	dvoufázový zemní
PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU	0.6%	91%	4.8%	3.8%

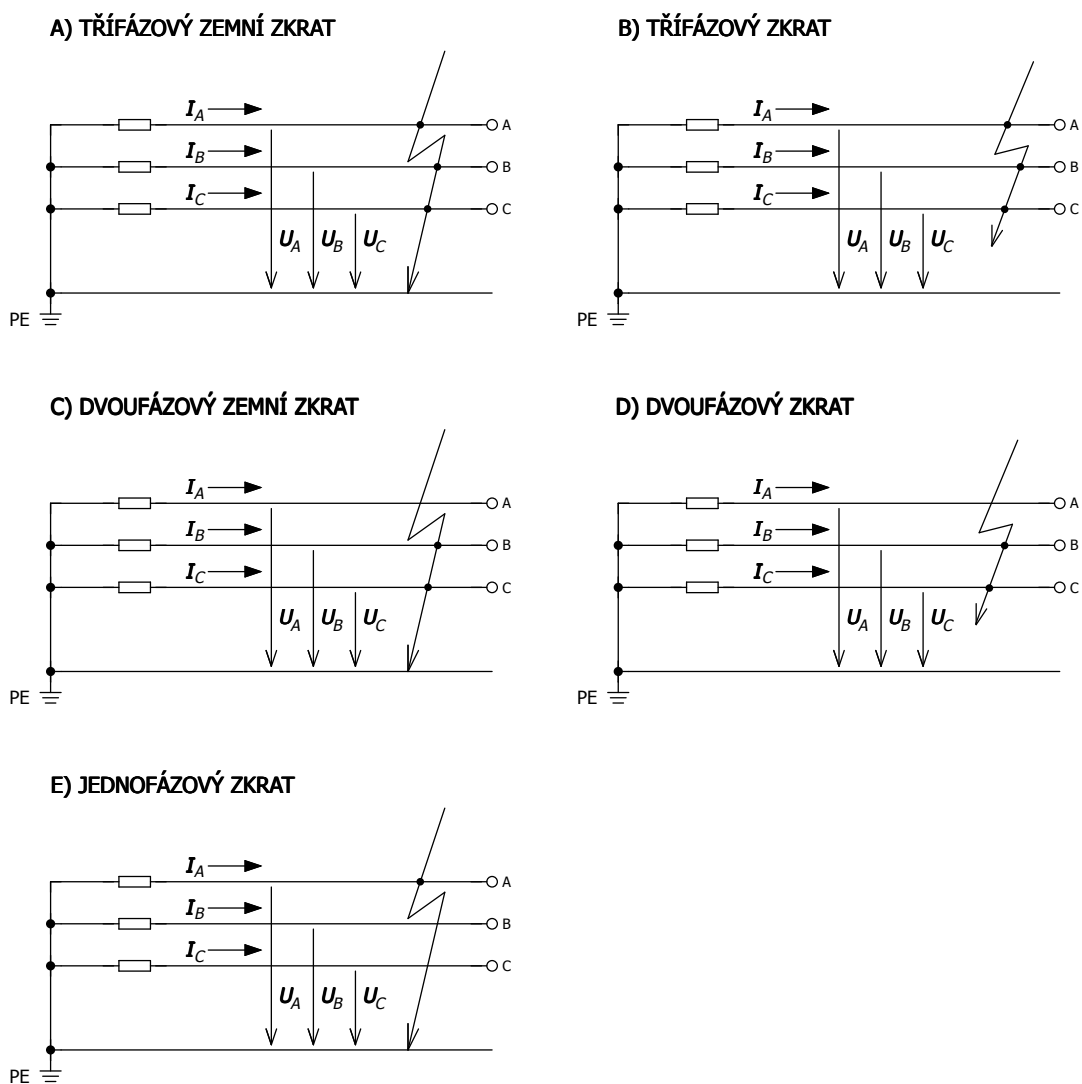
4.3.1 Druhy zkratů

Zkraty lze rozdělit z několika hledisek, a to podle velikosti přechodového odporu nebo podle způsobu zatížení třífázového zdroje. Dle prvního hlediska zkrat může být buď dokonalý (kovový), tj. se zanedbatelnou impedancí v místě poruchy nebo nedokonalý, tj. vytvořený přes takovou impedanci, kterou není možné zanedbat[4]. Při kovovém zkratu je napětí v místě zkratu prakticky nulové, přičemž do místa poruchy tečou zkratové proudy ze všech zdrojů soustavy, a to dle jejich výkonů a vzdálenosti od místa poruchy. Úbytky napětí vzrůstají od zdrojů až k místu zkratu, a proto se v celé ES může projevit pokles napětí. Napětí v jednotlivých místech zkratového obvodu se nazývají napětí zbytková[5]. U nedokonalých zkratů také může dojít k hoření oblouku. Podle způsobu zatížení třífázových zdrojů dělíme zkraty na souměrné a nesouměrné. Mezi souměrné zkraty patří zkrat třífázový a třífázový zemní, mezi nesouměrné pak zkraty jednofázové, dvoufázové a dvoufázové zemní[1].

4.3.2 Průběh zkratového proudu

Kapitola byla převzata z[2].

Při zkratové poruše dojde na svorkách zdrojů k náhlé změně impedance, což má za následek vznik přechodného jevu na všech prvcích ES. V prostoru ES se v důsledku velkého zkratového proudu poruší rovnováha mezi elektrickým a magnetickým polem a soustava tak přechází do nového rovnovážného stavu pomocí přechodných složek napětí a proudu s vlastní periodou příslušných obvodů. Při stanovení časového průběhu proudu a napětí během zkratu obvykle zanedbáme příčné admitance



Obr. 4.1: Druhy zkratů[2].

prvků ES včetně odběrů, čímž dojde k značnému zjednodušení. Tím se vyloučí vliv elektrického pole a přechodné složky napětí a proudu jsou aperiodické nebo mají frekvenci zdrojů. Oproti stavu před zkratem dochází ke změně rozložení energie magnetického pole v náhradním obvodu bez odběrů a příčných admitancí. Tato změna je během doby zkratové poruchy spojitá. Při stálém buzení synchronních zdrojů zkratového proudu se vlivem reakce kotvy zmenšuje energie magnetického pole v nich, zatímco v ostatních pasivních prvcích ES se v důsledku zvětšujícího se proudu zvyšuje. Pomocí přechodných složek proudu se v náhradním obvodu transformuje přebytek energie magnetických polí ze zdrojů do ostatních prvků náhradního obvodu. Uvažujeme-li tedy tyto zjednodušující předpoklady (stálé buzení, prvky ES

nahrazeny pouze podélnou impedancí induktivního charakteru), okamžitá hodnota zkratového proudu je neharmonickou funkcí času se třemi přechodnými složkami, které exponenciálně zanikají.

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

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

φ_k je úhel impedance obvodu zkratového proudu

I_k'' je počáteční efektivní hodnota subtranzitního časového proudu, tzv. 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 střídavé složky zkratového proudu

i_{ka} je okamžitá hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu

i_k je okamžitá hodnota zkratového proudu

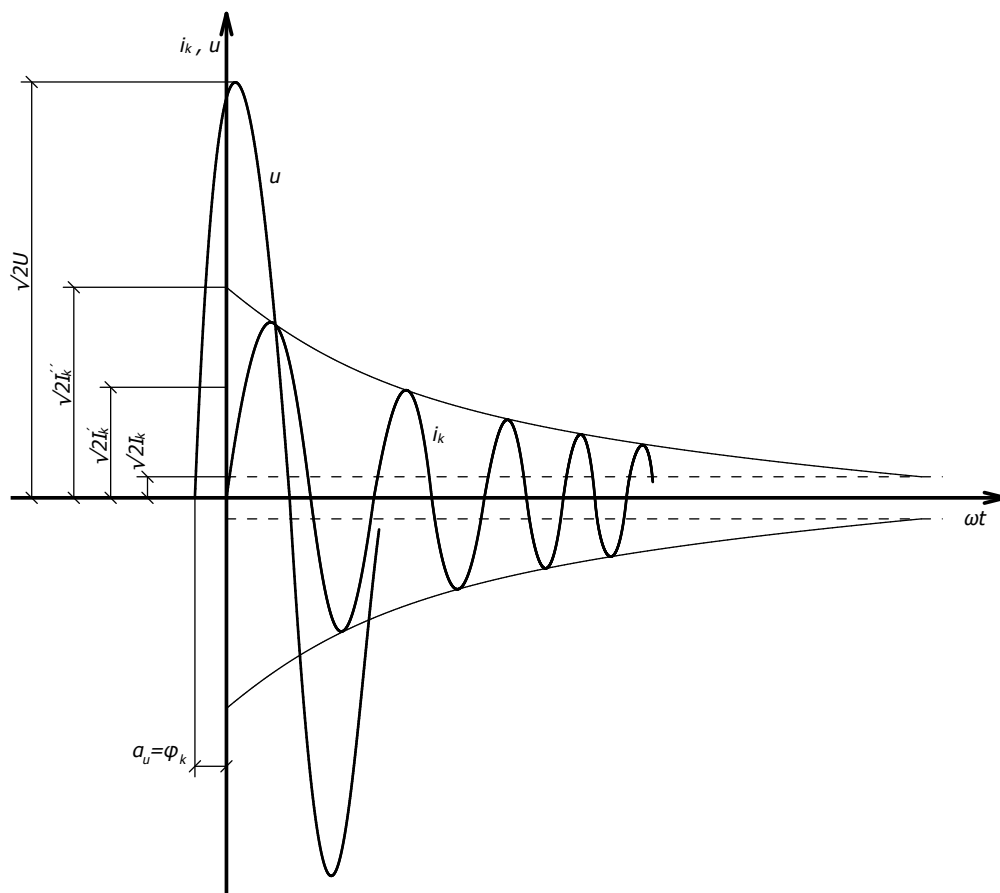
Z rovnice 4.1 vyplývá, že velikost zkreslení střídavého zkratového proudu stejnosměrnou složkou je závislá na okamžité hodnotě napětí při vzniku zkratu, tj. na úhlu α_u . Stejnosměrná složka nevznikne a zkratový proud bude souměrný pouze v té fázi třífázové soustavy, ve které platí

$$\alpha_u = \varphi_k \quad (4.2)$$

Počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratu $t = 0$ s musí být stejná jako úhel zkratové impedance. V tom případě se bude časový průběh okamžité hodnoty zkratového proudu řídit vztahem 4.3. Za předpokladu, že zkrat vznikl za chodu

naprázdno, je počáteční hodnota zkratového proudu nulová a kdyby nedošlo k přerušení proudu jistícím zařízením, ustálil by se zkratový proud na harmonickém průběhu s amplitudou $\sqrt{2}I_k$.

$$i_k = \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + I_k \right] \sin(\omega t) \quad (4.3)$$



Obr. 4.2: Průběh souměrného zkratového proudu.[2].

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

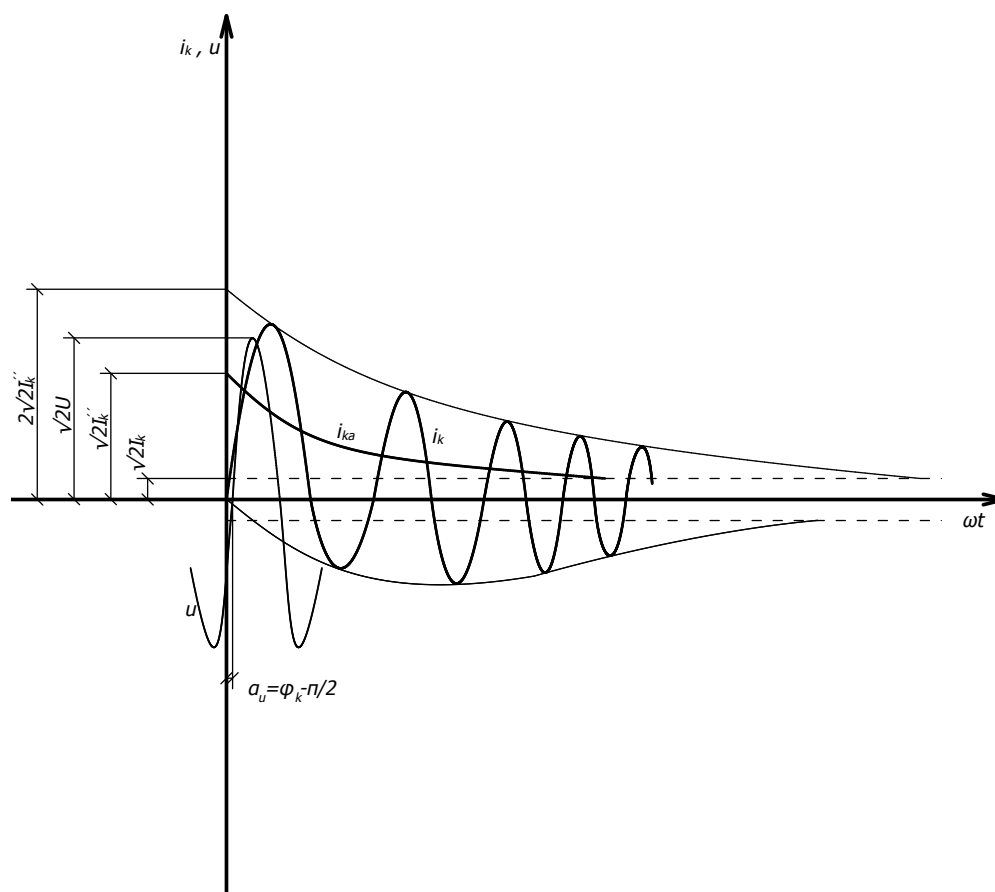
$$\alpha_u = \varphi_k - \frac{\pi}{2} \quad (4.4)$$

Za tohoto předpokladu bude střídavý zkratový proud zkreslován stejnosměrnou složkou nejvíce a bude platit

$$i_k = \sqrt{2}I_k'' e^{-\frac{t}{\tau_s}} - \sqrt{2} \left[(I_k'' - I_k') e^{-\frac{t}{\tau_d}} + (I_k' - I_k) e^{-\frac{t}{\tau_d}} + I_k \right] \cos(\omega t) \quad (4.5)$$

V tomto případě dosáhne aperiodická složka maximální hodnoty a tudíž je tento stav, kdy napětí v okamžiku vzniku zkratu prochází nulou, nejméně příznivým okamžikem a tedy určujícím stavem pro kontrolu elektrických zařízení na silové a tepelné účinky zkratového proudu.

Časové konstanty jsou závislé na rezistenci a indukčnosti vnějších obvodů zkratového proudu a na parametrech zdrojů zkratového proudu.



Obr. 4.3: Průběh zkratového proudu s maximálně vyvinutou stejnosměrnou složkou[2].

4.3.3 Charakteristické hodnoty zkratového proudu

Kapitola byla převzata z[2].

Mezi charakteristické hodnoty zkratového proudu patří:

- počáteční rázový zkratový proud I_k''
- nárazový zkratový proud I_{km}

- vypínací zkratový proud I_{vyp} a jeho stejnosměrná složka I_{avyp}
- ekvivalentní oteplovací proud I_{ke}
- ustálený oteplovací proud I_k
- doba trvání zkratu t_k

Počáteční rázový zkratový proud I_k'' je efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu a platí pro něj

$$I_k'' = \frac{cU_v}{\sqrt{3}|\bar{Z}|} \quad (4.6)$$

kde k_1 je součinitel stanovený normou

U_v je vztažné sdružené napětí

\bar{Z}_k je výsledná výpočtová impedance

c je napěťový součinitel stanovený normou

Nárazový zkratový proud I_{km} je nejvyšší vrcholová hodnota zkratového proudu, která nastává při prvním maximu v čase $t = 0,01s$ po vzniku zkratu. Používá se pro kontrolu dynamických účinků zkratového proudu. Při praktických výpočtech se určí z počátečního rázového zkratového proudu podle vztahu 4.6, kde κ je součinitel nárazového zkratového proudu daný normou.

$$I_{km} = \kappa\sqrt{2}I_k'' \quad (4.7)$$

Symetrický vypínací zkratový proud I_{vyp} je definován jako efektivní hodnota střídavého zkratového proudu v okamžiku vypnutí zkratu t_k . Využívá se společně se stejnosměrnou složkou vypínacího zkratového proudu při kontrole vypínačů a jisticích zařízení. Určí se ze vztahu

$$I_{vyp} = \left(I_k'' - I_k'\right) e^{-\frac{t_k}{\tau_d}} + \left(I_k' - I_k\right) e^{-\frac{t_k}{\tau_d}} + I_k \quad (4.8)$$

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

$$I_{avyp} = \sqrt{2}I_k'' e^{-\frac{t_k}{\tau_s}} \quad (4.9)$$

Ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} je efektivní hodnota fiktivního proudu harmonického průběhu, který za dobu trvání zkratu t_k vyvine při průchodu rezistencí

R stejné množství tepla Q jako časově proměnlivý zkratový proud s nejvyšší možnou stejnosměrnou složkou. Používá se při kontrole na tepelné účinky zkratového proudu a při praktických výpočtech se určí z počátečního rázového zkratového proudu pomocí koeficientu k_e , který je tabelován v normě. Platí

$$I_{ke} = k_e I_k'' \quad (4.10)$$

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

4.3.4 Příčiny vzniku zkratu

Příčinou chybného vodivého spojení mezi krajními vodiči, středním vodičem nebo zemí může být:

- mechanické poškození izolace, např. poškození kabelu při zemních pracích nebo přetržení vodiče venkovního vedení apod.
- poškození izolace v důsledku zvýšeného elektrického namáhání při spínacích pochodech nebo úderu blesku
- chybná manipulace nebo montáž
- přirozené znehodnocení izolace např. vlhkostí
- náhodné spojení vodiče s uzemněným předmětem
- nedostatečná vzdušná vzdálenost a zkratová odolnost
- přepětí
- cizí kovové části na holých spojích

Poměrně častou příčinou vzniku zkratu jsou vady a nedokonalosti elektrických zařízení. Tyto nedostatky jsou buď způsobeny špatnou výrobou, nebo k nim dochází během provozu. K opálení kontaktů, poškození spojů a předčasnému stárnutí izolace vodičů dochází např. častým proudovým přetížením. Velký počet zkratů bývá způsoben i nedbalou montáží, kde je na vině špatné uložení kabelů či neodborné provedení kabelových koncovek. Zkraty zaviněné nedostatečnou vzdušnou poskoko-ovou vzdáleností už dnes nejsou tak běžné. Zkraty vznikají nejčastěji poškozením elektrického zařízení cizími zásahy, a to především u kabelových rozvodů v zemi v důsledku překopání při různých stavebních pracích. Dalším významným faktorem ovlivňujícím výskyt zkratů jsou povětrnostní podmínky a přírodní vlivy jako třeba pády stromů a větví. K chybné manipulaci dochází nejčastěji u odpojovačů, kdy vznikne mezi kontakty odpojovače oblouk, který zionizuje prostředí mezi póly a po chvíli dojde k třífázovému zkratu. Výkony oblouku jsou v takovém případě značné a dosahují výkonů v řádech od 10^3 kW do 10^4 kW na centimetr délky oblouku[5].

4.3.5 Účinky zkratového proudu a dimenzování elektrických zařízení

Zkratky se v ES projevují nepříznivými účinky, které ohrožují jak samotný provoz ES, tak i bezpečnost obsluhy pracující na elektrických zařízeních. Tyto účinky jsou vyvolány buď samotným zkratovým proudem (tepelné, silové a indukční účinky) nebo poklesem napětí ve zkratovém obvodu, což má vliv na stabilitu systému. Proto je bezpodmínečně nutné elektrická zařízení dimenzovat tak, aby účinkům zkratových proudů odolala[6]. Zkratová odolnost je charakterizována těmito hodnotami:

- krátkodobým proudem I_{th} , který udává, jak velkým proudem je možné zařízení zatížit, aniž by došlo k jeho poškození nadměrným oteplením (udává se většinou po dobu 1s a 3s)
- dynamickým proudem I_{dyn} , který udává, jaký proudový náraz snese dané zařízení při zkratu (udává se např. u odpínačů, odpojovačů, přístrojových transformátorech proudu)
- vypínacím proudem I_{vyp} , který udává maximální hodnotu zkratového proudu, který jistící zařízení bezpečně vypne

Tepelné namáhání

Má-li elektrické zařízení vyhovět tepelným účinkům zkratového proudu, je pro něj směrodatný ekvivalentní oteplovací proud I_{ke} . Musí platit

$$I_{ke} \leq I_{th} \quad (4.11)$$

Dynamické účinky

Pro dimenzování elektrického zařízení na dynamické účinky zkratového proudu je směrodatný nárazový zkratový proud I_{km} . Platí

$$I_{km} \leq I_{dyn} \quad (4.12)$$

Bezpečné vypínání

Vypínače se vn a vvn dimenzují dle jmenovitého vypínacího výkonu S_{vyp} , který vypne vypínač bez závady při udané strmosti S vlastní kmitočtu f_0 a překmitu p zotavného napětí, a to v mezích jmenovitého a nejvyššího provozního napětí dle vztahu

$$S_{vyp} = \sqrt{3}U_s I_{vyp} \quad (4.13)$$

4.3.6 Metodika výpočtu zkratového proudu

Kapitola byla převzata z[2][1].

Velmi často se v praxi předpokládají při zjišťování zkratových poměrů určitá zjednodušení. To je dáno především rozsahem ES, obtížným získáváním vstupních hodnot a také numerickou náročností přesnějších metod. Dosáhne se tak možnosti aplikace metod pro řešení ustálených stavů na děje přechodné i za cenu jisté nepřesnosti. Mezi tyto zjednodušující předpoklady patří:

- Za zdroje zkratového proudu se uvažují pouze větší synchronní stroje o výkonu větším než 0,5MVA. Ve skutečnosti jsou zdrojem zkratového proudu všechny prvky ES s energií nahromaděnou v magnetickém nebo elektrickém poli.
- Zkrat se uvažuje z chodu zdrojů zkratového proudu naprázdno nebo při jejich jmenovitém zatížení. Napětí zdrojů se uvažují soufázová a u všech zdrojů v náhradním schématu zkratového obvodu stejná. Ve skutečnosti jsou vnitřní napětí zdrojů různá co do fáze i modulu.
- Impedance odběrů se neuvažují.
- Proud v příčných admitancích prvků ES lze zanedbat. Všechny prvky ES se proto nahrazují pouze podélnou impedancí. U generátorů, transformátorů a venkovních vedení *vvn* a *zvn* se uvažuje pouze podélná reaktance.
- předpokládá se lineární charakteristika podélné impedance všech prvků ES a neměnnost parametrů prvků během zkratu.
- Zdroje zkratového proudu se uvažují pomocí subtranzitní reaktance, tj. reaktance, kterou vykazuje zdroj na začátku poruchy. Ve skutečnosti se reaktance zdroje v průběhu přechodného děje mění a zvětšuje se až na synchronní reaktanci.
- Charakteristické hodnoty zkratového proudu jsou uvažovány při největší možné stejnosměrné složce.
- Uvažuje se dokonalý zkrat.
- Soustava před zkratem se předpokládá symetrická.

Za těchto zjednodušujících předpokladů tvoří obvod zkratového proudu lineární schéma. Stejná harmonická vnitřní napětí zkratového proudu v tomto náhradním obvodu zkratového proudu jsou připojena mezi jeden z uzlů schématu a uzel referenční. Podstatou výpočtu je zjištění zkratové impedance sousledné, zpětné a netočivé pro místo zkratu. Z těchto impedancí se určí počáteční rázový zkratový proud pro jednotlivé druhy zkratů.

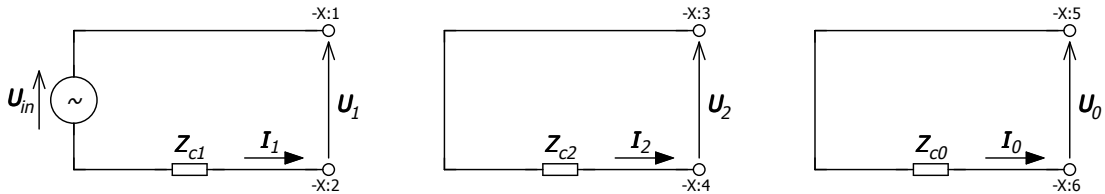
Metoda souměrných složek

Výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokladem je symetrická struktura elektrických zařízení např. u transponovaných vedení. Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav.

Uvažujme jednoduchou symetrickou trojfázovou soustavu s alternátorem jako zdrojem napětí sousledné složkové soustavy. Obvod zahrnuje impedanci složenou z impedance alternátoru a impedance vnější části obvodu. Fázory napětí a proudů fázemi A, B, C v soustavě souměrných složek¹ budou

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_0 + \bar{a}^2\bar{U}_1 + \bar{a}\bar{U}_2 \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_0 + \bar{a}\bar{U}_1 + \bar{a}^2\bar{U}_2\end{aligned}\quad (4.14)$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_0 + \bar{a}^2\bar{I}_1 + \bar{a}\bar{I}_2 \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_0 + \bar{a}\bar{I}_1 + \bar{a}^2\bar{I}_2\end{aligned}\quad (4.15)$$



Obr. 4.4: Náhradní schémata pro souslednou, zpětnou a netočivou složku.

Jednotkové fázory natočení jsou

$$\begin{aligned}\bar{a} &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1\angle\frac{2\pi}{3} \\ \bar{a}^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1\angle-\frac{2\pi}{3} \\ 0 &= 1 + \bar{a}^2 + \bar{a}\end{aligned}\quad (4.16)$$

¹Indexy 0, 1, 2 označují netočivou, souslednou a zpětnou složkovou soustavu.

Přepočítání z nesouměrných složek fázorů napětí v místě zkratu a složkových proudů na složky fázorů souměrných

$$\begin{aligned}\bar{U}_0 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C) \\ \bar{U}_1 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a}\bar{U}_B + \bar{a}^2\bar{U}_C) \\ \bar{U}_2 &= \frac{1}{3}(\bar{U}_A + \bar{a}^2\bar{U}_B + \bar{a}\bar{U}_C)\end{aligned}\quad (4.17)$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_0 &= \frac{1}{3}(\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C) \\ \bar{I}_1 &= \frac{1}{3}(\bar{I}_A + \bar{a}\bar{I}_B + \bar{a}^2\bar{I}_C) \\ \bar{I}_2 &= \frac{1}{3}(\bar{I}_A + \bar{a}^2\bar{I}_B + \bar{a}\bar{I}_C)\end{aligned}\quad (4.18)$$

Pro fázory souměrných složek vnitřního napětí alternátoru a fázory složkových impedancí platí

$$\begin{aligned}\bar{U}_{i1} &= \bar{Z}_{c1}\bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ \bar{U}_{i2} &= \bar{Z}_{c2}\bar{I}_2 + \bar{U}_2 \\ \bar{U}_{i0} &= \bar{Z}_{c0}\bar{I}_0 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (4.19)$$

Alternátor je zdrojem pouze sousledné složky napětí, proto platí

$$\begin{aligned}\bar{U}_{i1} &= \bar{U}_{in} = c\bar{U}_f \\ \bar{U}_{i2} &= 0 \\ \bar{U}_{i0} &= 0\end{aligned}\quad (4.20)$$

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

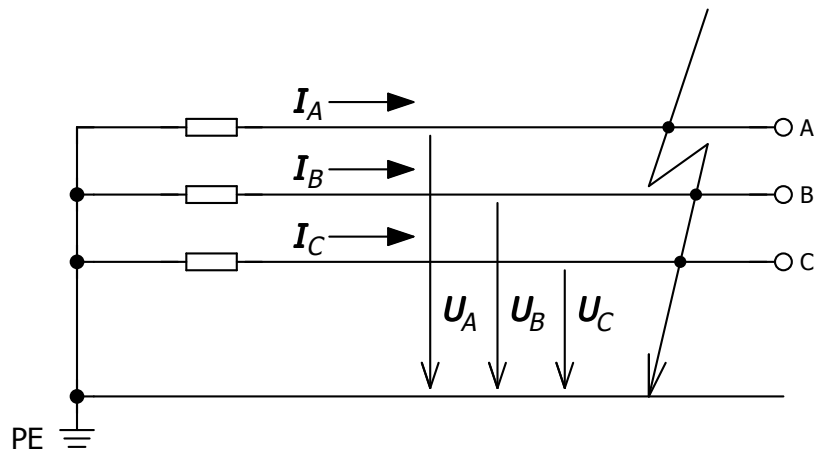
$$\begin{aligned}\bar{U}_{in} &= \bar{U}_f = \bar{Z}_{c1}\bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ 0 &= \bar{Z}_{c2}\bar{I}_2 + \bar{U}_2 \\ 0 &= \bar{Z}_{c0}\bar{I}_0 + \bar{U}_0\end{aligned}\quad (4.21)$$

Z těchto rovnic vyplývá, že zdrojem napětí sousledné složkové soustavy je alternátor a že původcem proudu zpětné a netočivé soustavy je napěťová nesymetrie

v místě poruchy. Je ovšem potřeba doplnit základní rovnice dalšími třemi rovnicemi dle uvažovaného typu zkratu proto, že v místě poruchy určujeme šest veličin - $\bar{U}_0, \bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{I}_0, \bar{I}_1, \bar{I}_2$.

Třífázový zemní zkrat

Tento zkrat je znázorněn na obrázku 4.5, na obrázku 4.6 je náhradní složkové schéma. V místě zkratu pro něj můžeme psát rovnice



Obr. 4.5: Třífázový zemní zkrat

$$\bar{U}_A = \bar{U}_B = \bar{U}_C = 0 \quad (4.22)$$

Z toho podle rovnic 4.14 vyplývá

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = 0 \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_0 + \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 = 0 \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_0 + \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Součtem této soustavy rovnic zjistíme $\bar{U}_0 = 0$. Uvážením této hodnoty při odečtení druhé rovnice od první dostaneme

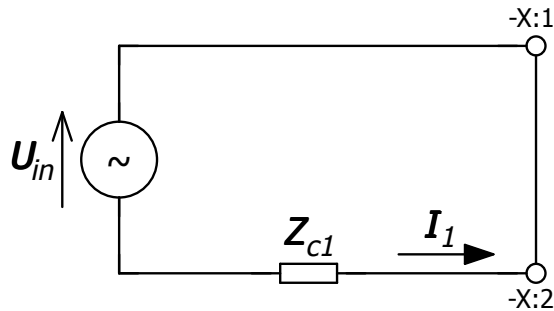
$$\bar{U}_0 = \bar{U}_1 = \bar{U}_2 = 0 \quad (4.24)$$

Dosazením do rovnic 4.21 dostáváme

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \frac{\bar{U}_{in}}{\bar{Z}_{c1}} \\ \bar{I}_2 &= 0 \\ \bar{I}_0 &= 0\end{aligned}\tag{4.25}$$

Po dosazení za rovnice 4.15 a při respektování chodu naprázdno zjistíme proudy v jednotlivých fázích

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{c1}} \\ \bar{I}_B &= \bar{a}^2 \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{c1}} \\ \bar{I}_C &= \bar{a} \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{c1}}\end{aligned}\tag{4.26}$$



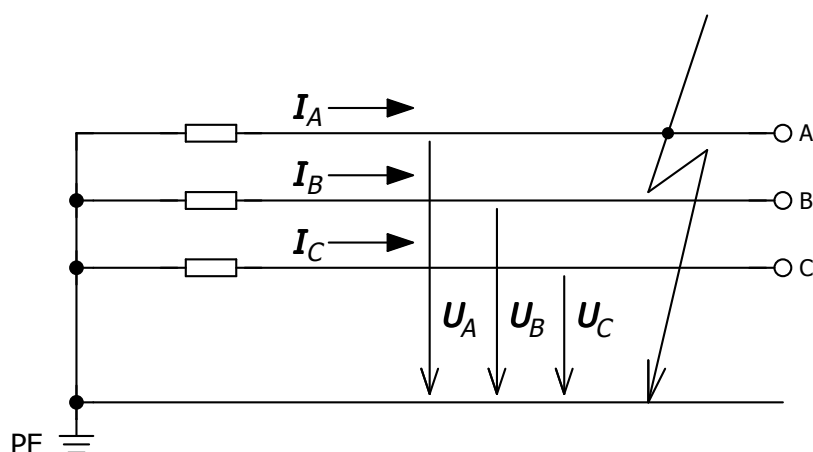
Obr. 4.6: Náhradní složkové schéma pro třífázový zkrat

Při výpočtu třífázového zkratu se uplatní jen sousledná složková soustava.

Jednofázový zkrat

Tento zkrat je znázorněn na obrázku 4.7, na obrázku 4.8 je náhradní složkové schéma. V místě zkratu pro něj můžeme psát rovnice

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= 0 \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_C = 0\end{aligned}\tag{4.27}$$



Obr. 4.7: Jednofázový zkrat

Podle rovnic 4.14 a 4.15 budou fázory napětí a proudu v místě poruchy

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = 0 \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_0 + \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 = 0 \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_0 + \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 = 0\end{aligned}\tag{4.28}$$

Vzájemným odečtením posledních dvou rovnic dostaneme

$$(\bar{a} - \bar{a}^2) \bar{I}_1 + (\bar{a}^2 - \bar{a}) \bar{I}_2 = 0\tag{4.29}$$

z čehož vyplývá $\bar{I}_1 = \bar{I}_2$. Dosadíme-li toto do rovnice 4.15, zjistíme $\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2$. Základní rovnice 4.21 pak má tvar

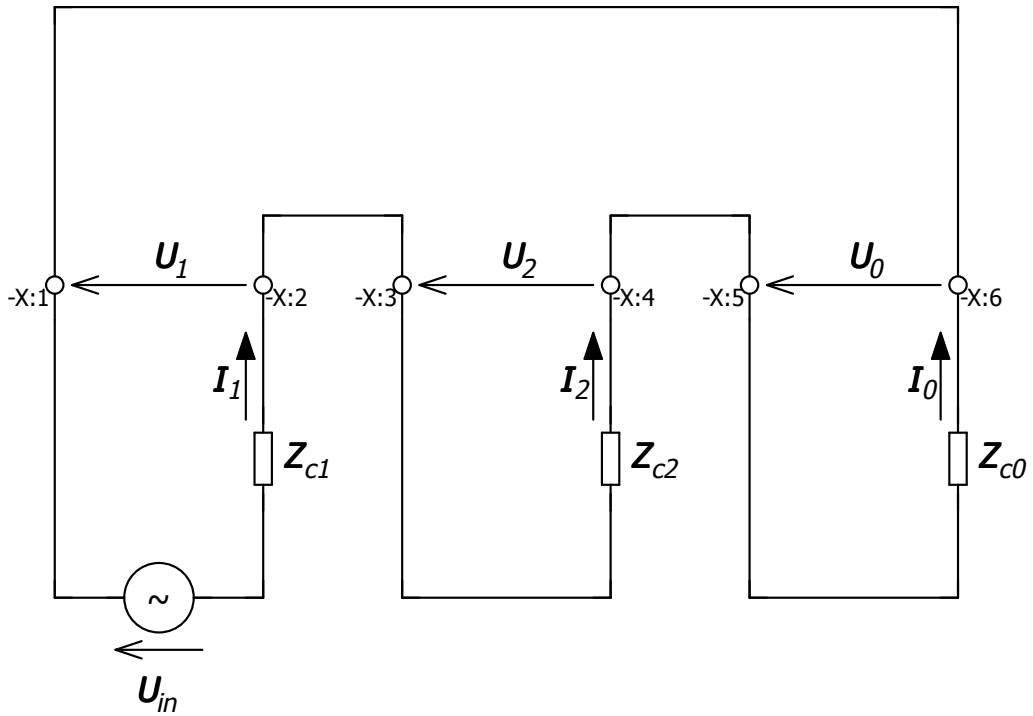
$$\begin{aligned}\bar{U}_{in} &= \bar{Z}_{c1} \bar{I}_1 + \bar{U}_1 \\ 0 &= \bar{Z}_{c2} \bar{I}_1 + \bar{U}_2 \\ 0 &= \bar{Z}_{c0} \bar{I}_1 + \bar{U}_0\end{aligned}\tag{4.30}$$

a jejich sečtením a respektováním rovnice 4.28 platí

$$\bar{U}_{in} = (\bar{Z}_{c1} + \bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c0}) \bar{I}_1\tag{4.31}$$

odkud

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_{in}}{\bar{Z}_{c1} + \bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c0}}\tag{4.32}$$



Obr. 4.8: Náhradní složkové schéma pro jednofázový zkrat

Proud protékající fází A tedy bude

$$\bar{I}_A = \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \frac{3\bar{U}_f}{\bar{Z}_{c1} + \bar{Z}_{c2} + \bar{Z}_{c0}} \quad (4.33)$$

Při výpočtu jednofázového zkratu se uplatní všechny tři složkové impedance, tedy sousledná, zpětná i nulová. V případě zanedbání činných odporů reaktance.

5 CHARAKTERISTIKA UZLOVÉ OBLASTI NAPÁJENÉ Z R110KV OTROKOVICE

Uzlová oblast (UO) napájená z rozvodny v Otrokovicích je znázorněna na obrázku 5.1 a patří pod oblast východ distribuční sítě 110kV provozovanou společností E.ON Distribuce, a.s. Kromě nadřazené transformační stanice 400/110kV Otrokovice (OKC) čítá dalších dvacet pět dílčích rozveden. Ty jsou navzájem propojeny okružním rozvedem. Výjimku tvoří rozvodny Slavičín (SLM) a Konice (KNC), které jsou připojeny rozvedem paprskovým. Seznam rozveden včetně jejich dispečerského značení je uveden v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Rozvodny 110kV v UO Otrokovice a jejich dispečerské značení

DISPEČERSKÁ ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	DISPEČERSKÁ ZKRATKA	ROZVODNA R110kV
BAR	Otrokovice, Barum	OKD	Otrokovice, ČD
BHN	Otrokovice, Bahňák	PNV	Pánov
CHR	Chropyně	PRT	Prostějov
FA	Napajedla, Fatra	RYC	Rychlov
HO	Hodonín	SLM	Slavičín
HUN	Hulín	SLU	Slušovice
KNC	Konice	SVI	Zlín, Svit
KUN	Kunovice	UBR	Uherský Brod
KY	Kyjov	UHD	Uherské Hradiště
MAD	Mladcová	VKA	Velká nad Veličkou
MLE	Malenovice, ZPS	VLM	Veselí na Moravě
NAD	Nedakonice, ČD	VPR	výtopna Prostějov
NZD	Nezamyslice, ČD	ZDO	Zdounky
OKC	Otrokovice		

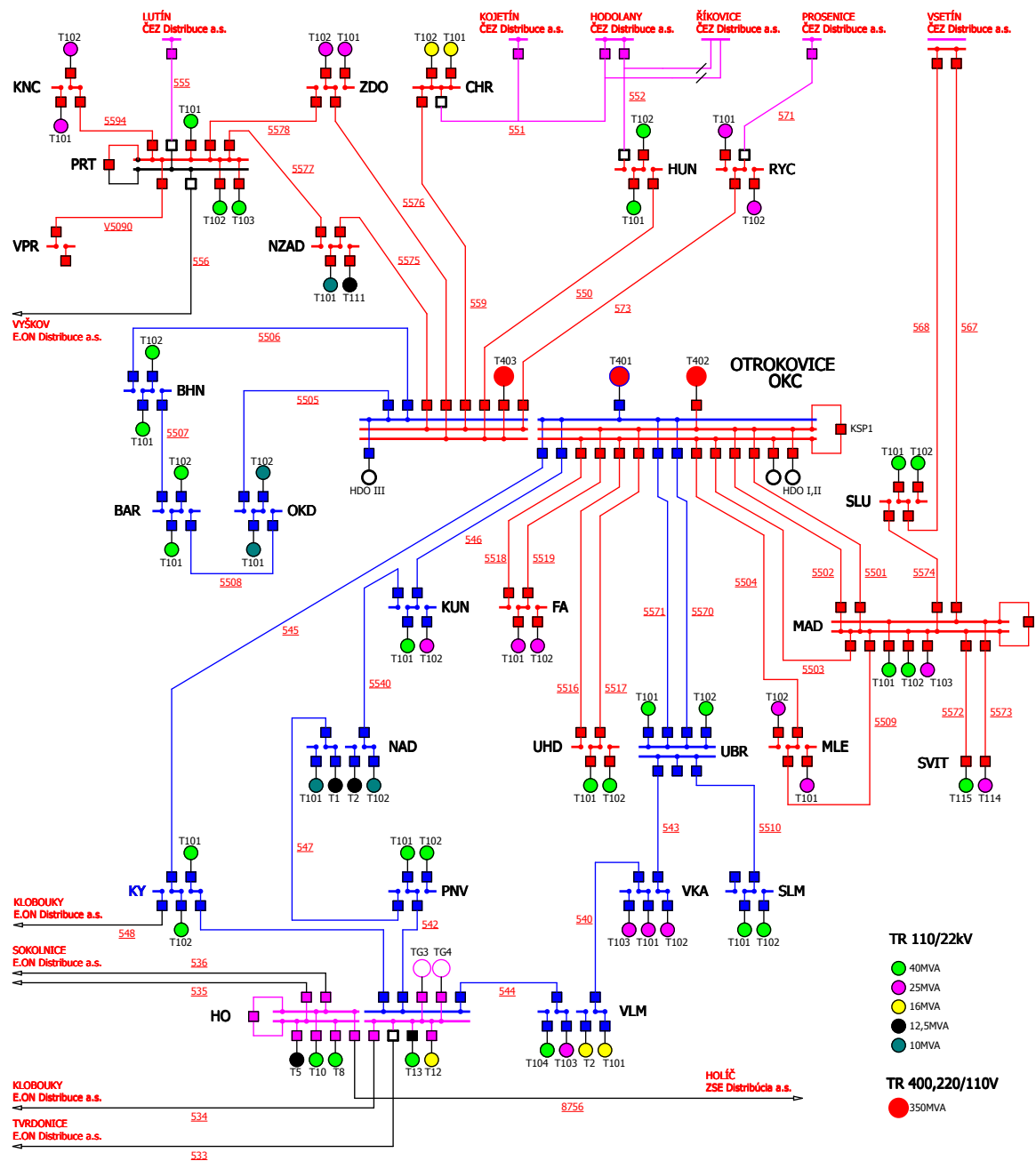
Parametry a popis rozveden UO Otrokovice

BAR - Otrokovice, Barum

Rozvodna s průmyslovým rozvedem společnosti Barum continental s.r.o. slouží pro distribuci na úrovni *vn* 6kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Do přípojnic je také vyveden výkon dvou generátorů z Teplárny Otrokovice, a.s. TG OKT o výkonech 32MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 5000MVA.

BHN - Otrokovice - Bahňák

Rozvodna E.ON slouží pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 5000MVA.



Obr. 5.1: UO R110kV Otrokovice k 1.3.2013

CHR - Chropyně, Technoplast

Rozvodna s průmyslovým rozvedem pro firmu Technoplast, a.s. sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 6kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 16MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

FA - Napajedla, Fatra

Rozvodna s průmyslovým rozvodem pro firmu Fatra, a.s. sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 6kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

HO - Hodonín

Rozvodna E.ON s průmyslovým rozvodem sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 6kV a 22kV. Jedná se o systém se dvěma přípojnici příčně i podélně dělenými s transformátory T5 s výkonem 12,5MVA, T8 a T10 a T13 o výkonech 40MVA a T12 o výkonu 16MVA. Dále je zde vyveden výkon elektrárny Hodonín se dvěma generátory TG3 a TG4 o výkonech 63MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

HUN - Hulín

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

KNC - Konice

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

KUN - Kunovice

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 o výkonu 40MVA a T102 o výkonu 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

KY - Kyjov

Rozvodna E.ON s průmyslovým rozvodem sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Také je zde vyveden výkon tří generátorů Teplárny Kyjov, a.s. TG KY1 o výkonech 10MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

MAD - Mladcová

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o systém se dvěma přípojnici příčně dělenými s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA a T103 o výkonu 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 5000MVA.

MLE - Malenovice, ZPS

Rozvodna E.ON s průmyslovým rozvedem pro firmu ZPS - Slévárna, a.s. slouží pro distribuci na úrovni *vn* 6kV a 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s trojvintovými transformátory T101 a T102 o výkonech 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 5000MVA.

NAD - Nedakonice, ČD

Rozvodna slouží pro napájení trakčního vedení na úrovni *vn* 22kV a 27kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 10MVA a T1 a T2 o výkonech 12,5MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

NZD - Nezamyslice, ČD

Rozvodna slouží pro napájení trakčního vedení na úrovni *vn* 22kV a 27kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 o výkonu 10MVA a T111 o výkonu 12,5MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

OKC - Otrokovice

Nadřazená transformační stanice 400/110kV Otrokovice je vybavena systémem tří přípojníc podélně a příčně dělených značených A,B,C a jednou přípojnící pomocnou. Do nich jsou vyvedeny trojvintové transformátory 400/110kV T401, T402 a T403 o výkonech 350MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 5000MVA. Tato rozvodna je s přenosovou soustavou 400kV provozovanou společností ČEPS, a.s. propojena vedením V417 směrem na Sokolnice a vedením V418 ve směru na Prosenice.

OKD - Otrokovice, ČD

Rozvodna slouží pro napájení trakčního vedení na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 10MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 5000MVA.

PNV - Pánov

Rozvodna E.ON slouží pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

PRT - Prostějov

Rozvodna E.ON slouží pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o systém se dvěma přípojnícemi příčně dělený s transformátory T101, T102 a T103 o výkonech

40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA. S výtopnou Prostějov (VPR) je propojena kabelovým vedením V5090 typu AXLJ 1x1200mm² o délce 1680m.

RYC - Rychlov

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

SLM - Slavičín

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

SLU - Slušovice

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

SVI - Zlín, Svit

Rozvodna s průmyslovým provozem v areálu Svit Zlín sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 6kV. Transformátory T115 o výkonu 40MVA a T114 o výkonu 25MVA mají každý vlastní přívod z rozvodny Mladcová (MAD). Dále je zde vyveden výkon generátorů TG 42+32+8x4MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

UBR - Uherský Brod

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o systém se dvěma přípojnicemi příčně dělenými s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

UHD - Uherské Hradiště

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 40MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

VKA - Velká nad Veličkou, Kordárna

Rozvodna s průmyslovým rozvodem pro firmu Kordárna, a.s. sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101, T102 a T103 o výkonech 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

VLM - Veselí na Moravě, Železářny

Rozvodna s průmyslovým rozvodem pro firmu Železářny Veselí, a.s. sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 6kV a 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T104 o výkonu 40MVA, T103 o výkonu 25MVA a T102 a T101 o výkonech 16MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

VPR - výtopna Prostějov

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém s transformátorem T01 o výkonu 12,5MVA a generátorem TG VPR o výkonu 68MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA. Tato rozvodna je připojena kabelovým vedením V5090 k rozvodně Prostějov (PRT).

ZDO - Zdounky

Rozvodna E.ON sloužící pro distribuci na úrovni *vn* 22kV. Jedná se o jednopřípojnicový systém podélně dělený s transformátory T101 a T102 o výkonech 25MVA. Zkratová odolnost rozvodny je 3500MVA.

Všechny tyto rozvodny jsou propojeny vedením 110kV, jehož parametry jako jsou přenosová schopnost $P_{v(max)}$, proudová zatížitelnost I_{nv} a typ vedení udává tabulka 5.2.

V rámci společnosti E.ON Distribuce, a.s. je UO Otrokovice propojena vedením 556 směrem na rozvodnu Vyškov, vedením 535 a 536 do rozvodny Sokolnice, vedením 534 do rozvodny Klobouky a vedením 533 do rozvodny Tvrdonice. Tyto rozvodny jsou součástí UO Sokolnice spadající taktéž pod oblast východ. Na sever je distribuční síť propojena se sítí společnosti ČEZ Distribuce, a.s. vedením 555 do rozvodny Lutín, vedením 551 a 552 do rozvodnen Kojetín, Hodolany, Říkovice, vedením 571 do rozvodny v Prosenicích a vedením 567 a 568 do rozvodny ve Vsetíně. Z rozvodny v Hodoníně je pak soustava spojena s distribuční sítí slovenského distributora ZSE Distribúcia, a.s. a rozvodnou Holíč. Tato vedení, která spojují UO Otrokovice se sousedními oblastmi, jsou v tabulce 5.2 uvedena pod čarou.

Tab. 5.2: Charakteristika a parametry vedení v UO Otrokovice

VEDENÍ	ÚSEK	$P_{v(max)}$ [MW]	I_{nv} [A]	TYP VEDENÍ
540	VKA-VLM	80	450	185AlFe6
541	HO-KY	70	450	185AlFe6
542	HO-PNV	80	450	185AlFe6
543	UBR-VKA	80	450	185AlFe6
544	HO-VLM	80	450	185AlFe6
545	OKC-KY	80	450	185AlFe6
546	OKC-KUN	80	450	185AlFe6
547	NAD-PNV	80	450	185AlFe6
550	OKC-HUN	70	450	185AlFe6
559	OKC-CHR	80	450	185AlFe6
573	OKC-RYC	85	450	185AlFe6
5090	VPR-PRT	150	800	AXLJ 1x1200
5501	OKC-MAD	70	450	185AlFe6
5502	OKC-MAD	70	450	185AlFe6
5503	OKC-MAD	70	450	185AlFe6
5504	OKC-MLE	95	450	240AlFe6
5505	OKC-OKD	80	450	185AlFe6
5506	OKC-BHN	80	450	185AlFe6
5507	BAR-BHN	80	450	185AlFe6
5508	BAR-OKD	80	450	185AlFe6
5509	MAD-MLE	70	450	185AlFe6
5510	SLM-UBR	50	350	185AlFe6
5516	OKC-UHD	70	420	185AlFe6
5517	OKC-UHD	70	420	185AlFe6
5518	OKC-FA	90	450	240AlFe6
5519	OKC-FA	90	450	240AlFe6
5540	KUN-NAD	80	450	185AlFe6
5570	OKC-UBR	80	450	185AlFe6
5571	OKC-UBR	80	450	185AlFe6
5572	MAD-SVI	40	450	185AlFe6
5573	MAD-SVI	25	450	185AlFe6
5574	MAD-SLU	70	450	185AlFe6
5575	OKC-NZAD	95	450	240AlFe6
5576	OKC-ZDO	95	450	240AlFe6
5577	NZAD-PRT	95	450	240AlFe6
5578	PRT-ZDO	95	450	240AlFe6
5594	KNC-PRT	40	450	185AlFe6
533	HO-Tvrdonice	80	450	185AlFe6
534	HO-Klobouky	80	450	185AlFe6
535	HO-Sokolnice	80	450	185AlFe6
536	HO-Sokolnice	80	450	185AlFe6
548	KY-Klobouky	95	450	240AlFe6
551	CHR-Kojetín	80	450	185AlFe6
551	CHR-Hodolany	80	450	185AlFe6
551	CHR-Říkovice	80	450	185AlFe6
552	HUN-Říkovice	70	450	185AlFe6
552	HUN-Hodolany	70	450	185AlFe6
555	PRT-Lutín	80	450	185AlFe6
556	PRT-Vyškov	80	450	185AlFe6
567	MAD-Vsetín	65	450	185AlFe6
568	SLU-Vsetín	65	450	185AlFe6
571	RYC-Prosenice	85	800	240AlFe6
8756	HO-Holič	80	450	185AlFe6

6 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY UO OTROKOVICE

K výpočtu ustáleného chodu a zkratových poměrů v UO R110kV Otrokovice slouží dispečerský řídicí program Sinaut Spectrum společnosti E.ON. Na dispečinku E.ONu v Brně je používán nejen ke sledování aktuálního skutečného stavu distribuční sítě, ale také k různým simulacím a výpočtům. Pracuje s konkrétními údaji o všech prvcích v distribuční soustavě, ať už jde o průřezy vedení, jejich délky, dovolená zatížení transformátorů, zkratové odolnosti jednotlivých rozvodů a podobně. Díky tomu je možné provést reálnou simulaci jak ustáleného chodu, tak i zkratových poměrů, a to především v místech, kde bývají zkraty nejtěžší - na přípojnicích. V následujících tabulkách jsou uvedeny napěťové poměry v jednotlivých rozvodnách, na vedeních, jejich zatížení, dále pak zatížení na transformátorech a kontrola celkové bilance výkonu. Při zkratových poměrech je brán zřetel především na vypínací schopnost výkonových vypínačů a v tabulkách tedy nalezneme příslušné zkratové výkony a proudy v dílčích rozvodnách.

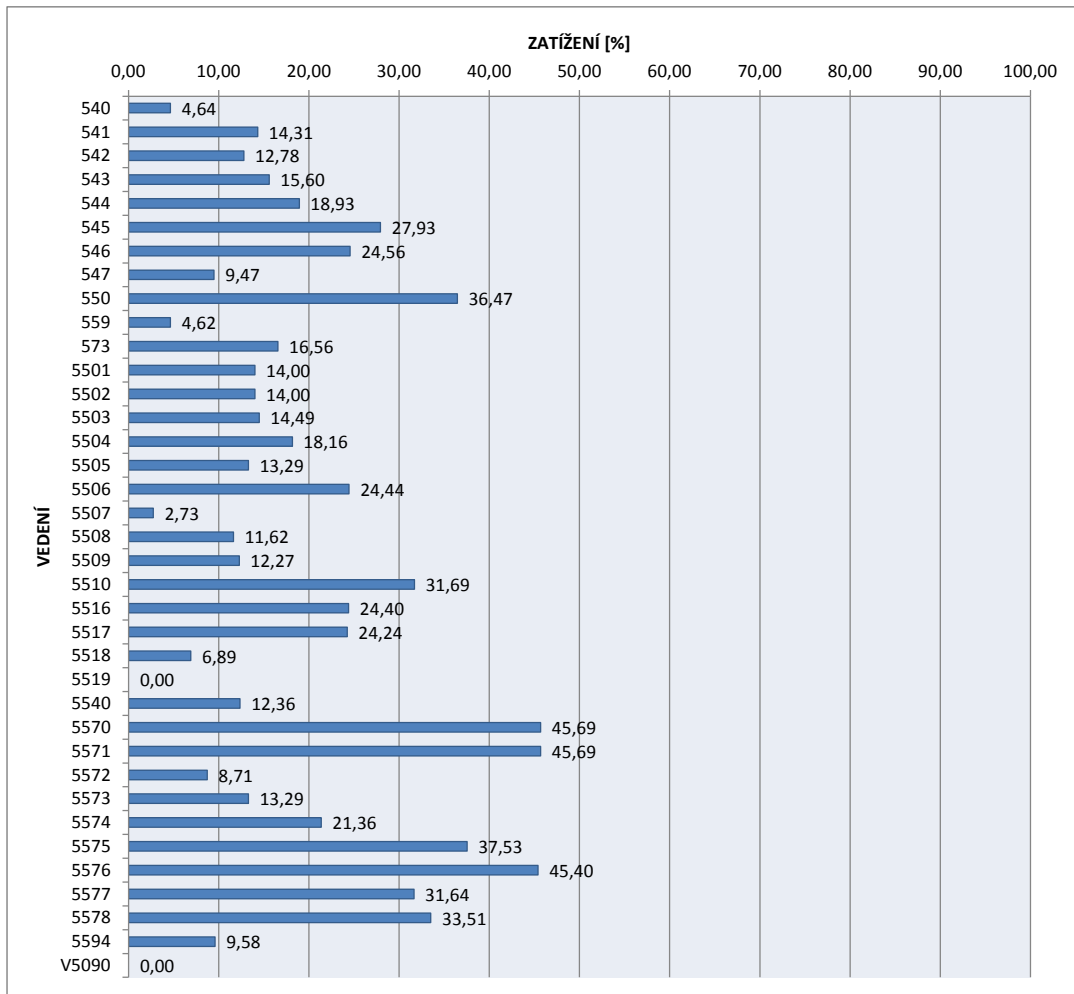
6.1 Ustálený chod

Teorie ustáleného chodu sítě byla popsána ve třetí kapitole s názvem *Elektrizační soustava*. V této kapitole jsou shrnuty poměry na vedení, transformátorech a také uzlech sítě. Dále je proveden výpočet bilance výkonů.

6.1.1 Poměry na vedení

Na distribučním vedení sledujeme především poměry na začátku a na konci vedení. V tabulce 6.1 jsou spodním indexem $_1$ značeny veličiny na začátku vedení - činný a jalový výkon P_v a Q_v , proud I_v a napětí U_v . Spodním indexem $_2$ jsou značeny tytéž veličiny na konci vedení. Dále je zde uvedeno procentuální zatížení vedení, které je dáno poměrem proudové zatížitelnosti I_{nv} uvedené v tabulce 5.2 a proudem vyšším z dvojice I_{v1} a I_{v2} značeným I_{max} . Jako poslední jsou uvedeny ztráty činného výkonu ΔP_v , které na vedení vzniknou.

Hodnoty zatížení z tabulky 6.1 ukazují, že zatížení jednotlivých vedení jsou poměrně malá. Pouze tři vedení mají zatížení kolem 45%, a to 5570, 5571 a 5576. Při ustáleném chodu tedy není žádné z vedení přetěžováno a je tak předpoklad, že přenosová schopnost bude zachována i při kritériu N-1 nebo při zvýšení přenášeného výkonu. Vedení 5519 a 5090 nejsou pod zátěží. Zatížení jednotlivých vedení ukazuje obrázek 6.1.



Obr. 6.1: Zatížení vedení při ustáleném chodu sítě

6.1.2 Výkony transformátorů

U transformátorů byly sledovány hodnoty odebíraných a dodávaných činných P_t a jalových Q_t výkonů na straně 110kV. Dále odebíraný proud I_t na straně 110kV, jmenovitý proud I_{nt} transformátoru, jejich procentuální proudová zatížitelnost daná poměrem I_t ku I_{nt} , ztráty činného výkonu ΔP_t v transformátoru, jmenovitý zdánlivý výkon S_{nt} transformátoru a jmenovitý převod p transformátoru.

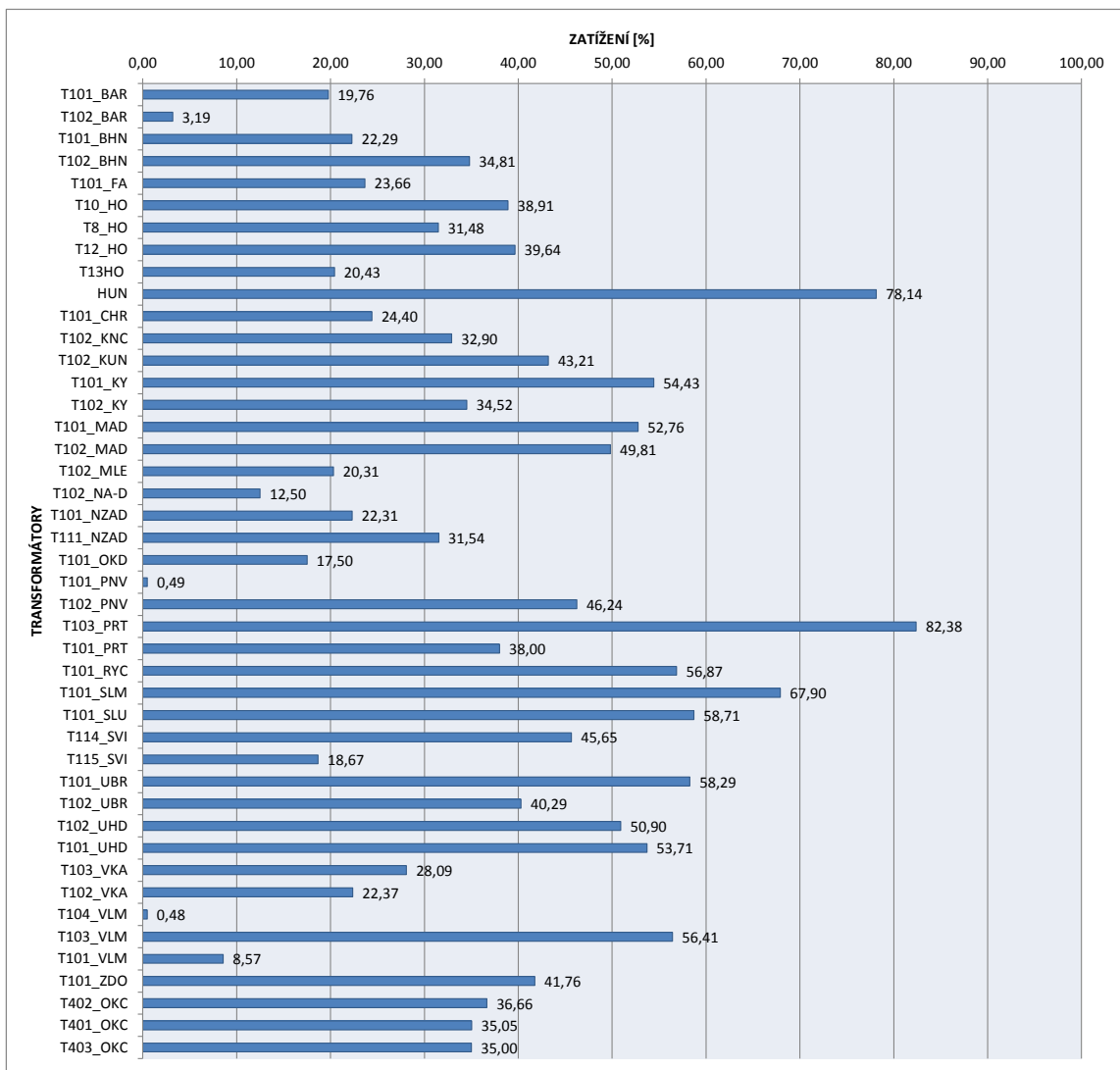
Oproti vedení je zatížení transformátorů vyšší. Průměrná hodnota zatížení je 36,16% zatímco u vedení bylo průměrné zatížení 20,08%. Nejvíce jsou zatížené transformátory T103 v rozvodně v Prostějově, a to na 82,38% a T101 v rozvodně Hulín na 78,14%. Většina transformátorů ale představuje dostatečnou výkonovou rezervu. Zatížení jednotlivých transformátorů ukazuje obrázek 6.2.

Tab. 6.1: Vedení - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice

VED.	ÚSEK	P_{v1} [MW]	Q_{v1} [MVA _r]	I_{v1} [A]	U_{v1} [kV]	P_{v2} [MW]	Q_{v2} [MVA _r]	I_{v2} [A]	U_{v2} [kV]	I_{nv}/I_{max} [%]	ΔP_v [MW]
540	VKA-VLM	0,5	-3,7	18,7	115,3	-0,5	4,1	20,9	115,1	4,64	-0,002
541	HO-KY	11,1	6,5	64,4	115,5	-11,2	-5,7	62,2	116,3	14,31	-0,043
542	HO-PNV	10,8	4,1	57,5	116,1	-10,8	-3,7	56,9	116,3	12,78	-0,013
543	UBR-VKA	13,6	-2,7	69,5	115,1	-13,6	3,3	70,2	115,2	15,60	-0,041
544	HO-VLM	15,4	7,3	85,2	115,3	-15,4	-6,6	83,3	116,3	18,93	-0,078
545	OKC-KY	-25,4	-0,8	125,2	117,2	25,1	1,8	125,7	115,5	27,93	-0,320
546	OKC-KUN	-22,4	0,2	110,5	117,2	22,3	0,5	110,5	116,4	24,56	-0,146
547	NAD-PNV	8,4	-0,3	41,9	116,1	-8,4	1,6	42,6	116,3	9,47	-0,028
550	OKC-HUN	-32,7	-5,8	163,6	117,4	32,5	5,9	164,1	116,3	36,47	-0,221
559	OKC-CHR	-4,2	0,8	20,8	117,4	4,2	0,2	20,5	117,3	4,62	-0,005
573	OKC-RYC	14,8	2,6	74,5	116,8	-14,9	-1,5	73,6	117,4	16,56	-0,054
5501	OKC-MAD	-12,8	0,4	63,0	117,4	12,8	-0,2	63,0	117,3	14,00	-0,016
5502	OKC-MAD	-12,8	0,4	63,0	117,4	12,8	-0,2	63,0	117,3	14,00	-0,016
5503	OKC-MAD	-13,3	0,0	65,2	117,4	13,2	0,3	65,2	117,3	14,49	-0,016
5504	OKC-MLE	-16,6	-0,1	81,7	117,4	16,6	0,1	81,7	117,4	18,16	-0,006
5505	OKC-OKD	11,6	3,7	59,8	117,3	-11,6	-3,6	59,6	117,4	13,29	-0,005
5506	OKC-BHN	-21,7	-5,4	109,9	117,4	21,7	5,5	110,0	117,3	24,44	-0,015
5507	BAR-BHN	2,3	-1,0	12,0	117,3	-2,3	1,1	12,3	117,3	2,73	0,000
5508	BAR-OKD	-9,8	-4,2	52,2	117,3	9,8	4,2	52,3	117,3	11,62	-0,002
5509	MAD-MLE	-11,2	-0,2	55,2	117,4	11,2	0,4	55,2	117,3	12,27	-0,010
5510	SLM-UBR	-27,1	-7,8	141,4	115,2	26,7	8,1	142,6	113,1	31,69	-0,373
5516	OKC-UHD	21,7	4,4	109,8	116,4	-21,8	-4,0	109,1	117,4	24,40	-0,138
5517	OKC-UHD	21,7	4,4	109,8	116,4	-21,8	-4,0	109,1	117,4	24,24	-0,138
5518	OKC-FA	-6,3	0,3	31,0	117,4	6,3	0,0	31,0	117,4	6,89	-0,002
5519	OKC-FA	0,0	0,3	1,4	117,4	-	-	-	-	-	-
5540	KUN-NAD	11,1	-1,5	55,4	116,3	-11,1	1,7	55,6	116,4	12,36	-0,009
5570	OKC-UBR	40,4	7,3	205,6	115,2	-40,8	-7,6	204,7	117,2	45,69	-0,456
5571	OKC-UBR	40,4	7,3	205,6	115,2	-40,8	-7,6	204,7	117,2	45,69	-0,456
5572	MAD-SVI	-6,2	-5,0	39,2	117,3	6,2	5,0	39,2	117,3	8,71	-0,001
5573	MAD-SVI	-11,1	-4,8	59,8	117,3	11,1	4,8	59,8	117,3	13,29	-0,001
5574	MAD-SLU	18,8	4,8	96,1	116,7	-18,9	-4,4	95,4	117,3	21,36	-0,070
5575	OKC-NZAD	-33,8	-4,9	167,8	117,4	33,3	5,0	168,9	115,2	37,53	-0,435
5576	OKC-ZDO	40,6	5,8	204,3	116,0	-41,0	-6,0	203,7	117,4	45,40	-0,343
5577	NZAD-PRT	27,8	4,7	142,4	114,1	-27,9	-4,4	141,7	115,2	31,64	-0,177
5578	PRT-ZDO	-29,7	-4,5	149,7	116,0	29,4	4,9	150,8	114,1	33,51	-0,322
5594	KNC-PRT	-8,1	-1,5	41,8	114,1	8,1	2,5	43,1	113,6	9,58	-0,022
V5090	VPR-PRT	-	-	-	114,1	0,0	1,5	7,6	114,1	-	0,000

6.1.3 Napěťové poměry v uzlech

Napěťové poměry v uzlech je důležité ověřit z hlediska dovolené tolerance napětí $\pm 10\%$. V distribuční síti o nominálním napětí 110kV je potom nejnižší přípustná spodní hranice napětí 99kV a nejvyšší dovolená horní hranice napětí 121kV. Tabulka 6.3 sleduje napětí na přípojnicích v jednotlivých rozvodnách U_{uzl} a jeho úhel posunutí φ_{uzl} . Z této tabulky je zřejmé, že všechny rozvodny jsou na povolené hladině napětí. Průměrná hodnota napětí v uzlu je 116,1kV.



Obr. 6.2: Zatížení transformátorů při ustáleném chodu sítě

6.1.4 Celková bilance výkonů

Celková bilance je dána vyrobeným výkonem a výkonem spotřebovaným. Za ideálních podmínek by mělo platit, že po odečtení těchto výkonů a s přihlédnutím ke ztrátám výkonu na jednotlivých vedeních a transformátorech bude suma výkonů rovna nule.

Ztráty na vedení

Ztráty na vedení ΔP_v při ustáleném chodu sítě ukazuje tabulka 6.1. Součtem těchto ztrát získáme celkové ztráty činného výkonu na vedení v UO Otrokovice.

$$\sum \Delta P_v = 3,98 \text{ MW} \quad (6.1)$$

Tab. 6.2: Transformátory - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice

TRANSF.	ROZVODNA	P_t [MW]	Q_t [MVar]	I_t [A]	I_{nt} [A]	I_t/I_{nt} [%]	ΔP_t [MW]	S_{nt} [MVA]	p [-] (*kV)
T101	BAR	-7,5	3,9	41,5	210	19,76	-	40	110/6
T102	BAR	0	-1,4	6,7	210	3,19	-	40	110/6
T101	BHN	-9,4	-1,5	46,8	210	22,29	-0,047	40	110/22
T102	BHN	-14,5	-3	73,1	210	34,81	-0,036	40	110/22
T101	FA	-6,3	0	31	131	23,66	-	25	110/22
T10	HO	23,3	11,5	128,8	331	38,91	-0,08	40	110/22
T8	HO	18,8	9,4	104,2	331	31,48	-0,072	40	110/22
T12	HO	-4,6	-4,9	33,3	84	39,64	-	16	110/6
T13	HO	-8,7	-1,1	42,9	210	20,43	-0,05	40	110/22
T101	HUN	-32,5	-5,9	164,1	210	78,14	-0,18	40	110/22
T101	CHR	-4,2	-0,2	20,5	84	24,40	-	16	110/6
T102	KNC	-8,1	-2,5	43,1	131	32,90	-0,025	25	110/22
T102	KUN	-11,2	-2,2	56,6	131	43,21	-0,42	25	110/22
T101	KY	-22	-6,4	114,3	210	54,43	-0,107	40	110/22
T102	KY	-14,2	-2,8	72,5	210	34,52	-0,036	40	110/22
T101	MAD	-22,3	-2,8	110,8	210	52,76	-0,058	40	110/22
T102	MAD	-21,1	-2,8	104,6	210	49,81	-0,095	40	110/22
T102	MLE	-5,4	0,1	26,6	131	20,31	-	25	110/22/6
T102	NA-D	-1,3	0	6,5	52	12,50	-	10	110/22
T101	NZAD	-2,3	0,4	11,6	52	22,31	-	10	110/22
T111	NZAD	-3,1	-1	16,4	52	31,54	-	12,5	110/27
T101	OKD	-1,8	0,4	9,1	52	17,50	-	10	110/22
T101	PNV	0	-0,2	1,1	226	0,49	-0,038	40	110/22
T102	PNV	-19,2	-3,5	97,1	210	46,24	-0,091	40	110/22
T103	PRT	-33,7	-6	173	210	82,38	-0,095	40	110/22
T101	PRT	-15,4	-3,5	79,8	210	38,00	-0,069	40	110/22
T101	RYC	-14,8	-2,6	74,5	131	56,87	-0,093	25	110/22
T101	SLM	-16,7	-8,1	142,6	210	67,90	-0,068	40	110/22
T101	SLU	-23,9	-6,9	123,3	210	58,71	-0,118	40	110/22
T114	SVI	11,1	4,8	59,8	131	45,65	-0,083	25	110/6
T115	SVI	6,2	5	39,2	210	18,67	-0,033	40	110/6
T101	UBR	-23,5	-6,9	122,4	210	58,29	-0,118	40	110/22
T102	UBR	-16,6	-3,1	84,6	210	40,29	-0,045	40	110/22
T102	UHD	-21,1	-4,4	106,9	210	50,90	-0,51	40	110/22
T101	UHD	-22,3	-4,4	112,8	210	53,71	-0,11	40	110/22
T103	VKA	-7,2	-1,2	36,8	131	28,09	-0,025	25	110/22
T102	VKA	-5,8	-0,3	29,3	131	22,37	-	25	110/22
T104	VLM	0	-0,2	1	210	0,48	-0,036	40	110/22
T103	VLM	-14,4	-3,2	73,9	131	56,41	-0,091	25	110/22
T101	VLM	-1,4	-0,2	7,2	84	8,57	-	16	110/6
T101	ZDO	-10,9	-1,3	54,7	131	41,76	-0,037	25	110/22
T402	OKC	136,7	8,3	673,4	1837	36,66	-0,035	350,00	400/110
T401	OKC	128,5	24,8	643,8	1837	35,05	-0,029	350,00	400/110
T403	OKC	129,5	15,8	642,9	1837	35,00	-0,03	350,00	400/110

Ztráty na transformátorech

Ztráty na transformátorech ΔP_t při ustáleném chodu sítě ukazuje tabulka 6.2. Součtem těchto dílčích ztrát získáme celkové ztráty činného výkonu na transformá-

Tab. 6.3: Uzly - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice

DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	U_{uzl} [kV]	φ_{uzl} [°]	DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	U_{uzl} [kV]	φ_{uzl} [°]
BAR	Otrokovice, Barum	117,3	-2,88	OKD	Otrokovice, ČD	117,3	-2,86
BHN	Otrokovice, Bahňák	117,3	-2,89	PNV	Pánov	116,1	-4,96
CHR	Chropyně	117,3	-2,99	PRT	Prostějov	114,1	-6,17
FA	Napajedla, Fatra	117,4	-2,89	RYC	Rychlov	116,8	-3,39
HO	Hodonín	117,4	-4,99	SLM	Slavičín	113,1	-5,76
HUN	Hulín	116,3	-3,59	SLU	Slušovice	116,6	-3,38
KNC	Konice	113,6	-6,52	SVI	Zlín, Svit	117,3	-2,96
KUN	Kunovice	116,4	-4,30	UBR	Uherský Brod	115,2	-4,83
KY	Kyjov	115,5	-5,16	UHD	Uherské Hradiště	116,4	-3,49
MAD	Mladcová	117,3	-2,97	VKA	Velká nad Veličkou	115,1	-5,29
MLE	Malenovice, ZPS	117,4	-2,86	VLM	Veselí na Moravě	115,3	-5,33
NAD	Nedakonice, ČD	116,3	-4,44	VPR	výtopna Prostějov	114,1	-6,17
NZD	Nezamyslice, ČD	115,2	-5,07	ZDO	Zdounky	116,0	-4,28
OKC	Otrokovice	117,4	-2,81				

torech v UO Otrokovice.

$$\sum \Delta P_t = 2,96 \text{ MW} \quad (6.2)$$

Odebíraný výkon

Odebíraný výkon při ustáleném chodu sítě ukazuje tabulka 6.2 ve sloupci P_t se záporným znaménkem. Součtem těchto dílčích odběrů získáme celkový odebíraný činný výkon v UO Otrokovice.

$$\sum P_{odb} = 447,4 \text{ MW} \quad (6.3)$$

Dodávaný výkon

Dodávaný výkon při ustáleném chodu sítě ukazuje tabulka 6.2 ve sloupci P_t s kladným znaménkem. Součtem těchto dílčích dodávek získáme celkový dodávaný činný výkon v UO Otrokovice.

$$\sum P_{dod} = 454,1 \text{ MW} \quad (6.4)$$

Bilance výkonů

Bilanci výkonů ustáleného chodu sítě v UO Otrokovice získáme součtem všech výše uvedených činných výkonů.

$$\sum P = \sum P_{dod} - \sum P_{odb} - \sum \Delta P_v - \sum \Delta P_t \quad (6.5)$$

$$\sum P = 454,1\text{MW} - 447,4\text{MW} - 3,98\text{MW} - 2,96\text{MW} = -0,24\text{MW} \quad (6.6)$$

Rozdíl 0,24MW je dán chybou měření - vezmeme-li v potaz třídu přesnosti měřících transformátorů $t_p = 0,5$ a třídu přesnosti převodníků co by rozhraní pro dispečerský řídicí program Sinaut Spectrum $t_p = 0,5$, můžeme konstatovat, že výpočet ustáleného chodu sítě UO Otrokovice bez připojení nového zdroje 120MVA proběhl úspěšně.

Ve skutečnosti jsou ztráty na transformátorech vyšší, než uvádí vztah 6.2. V tabulce 6.2 chybí u některých transformátorů údaj o ztrátách. Společnost E.ON v těchto případech nemá k dispozici všechny údaje, se kterými dispečerský řídicí program Sinaut Spectrum pracuje. Jedná se především o soukromé transformátory firem a společností jako jsou České dráhy, a.s., Barum Continental, s.r.o., Technoplast Chropyně, a.s. atd. Vezmeme-li ovšem v potaz, že u ostatních transformátorů se jejich ztráty pohybují řádově v desetinách procenta vlastního výkonu, je možné jejich ztráty alespoň částečně odhadnout a dopočítat. Suma výkonů transformátorů, u kterých neznáme přesné ztráty, je:

$$\sum P_t = 43,7\text{MW} \quad (6.7)$$

Budeme-li uvažovat průměrné ztráty 0,5% z výkonu, jsou ztráty na těchto transformátorech

$$\sum \Delta P_{tr} = \frac{0,5}{100} \sum P_t = \frac{0,5}{100} \cdot 43,7\text{MW} = 0,2185\text{MW} \quad (6.8)$$

Celkové ztráty na všech transformátorech potom budou

$$\sum \Delta P_{tc} = \sum \Delta P_t + \sum \Delta P_{tr} = 2,96\text{MW} + 0,2185\text{MW} = 3,1785\text{MW} \quad (6.9)$$

Dosadíme-li nyní tyto ztráty do rovnice 6.10, získáme opravenou bilanci výkonů v UO Otrokovice.

$$\sum P = \sum P_{dod} - \sum P_{odb} - \sum \Delta P_v - \sum \Delta P_{tc} \quad (6.10)$$

$$\sum P = 454,1\text{MW} - 447,4\text{MW} - 3,98\text{MW} - 3,1785\text{MW} = -0,4585\text{MW} \quad (6.11)$$

I v tomto případě se rozdíl 0,4585MW dá považovat za chybu měření a tedy za výsledek, jenž potvrzuje správnost výpočtu ustáleného chodu sítě.

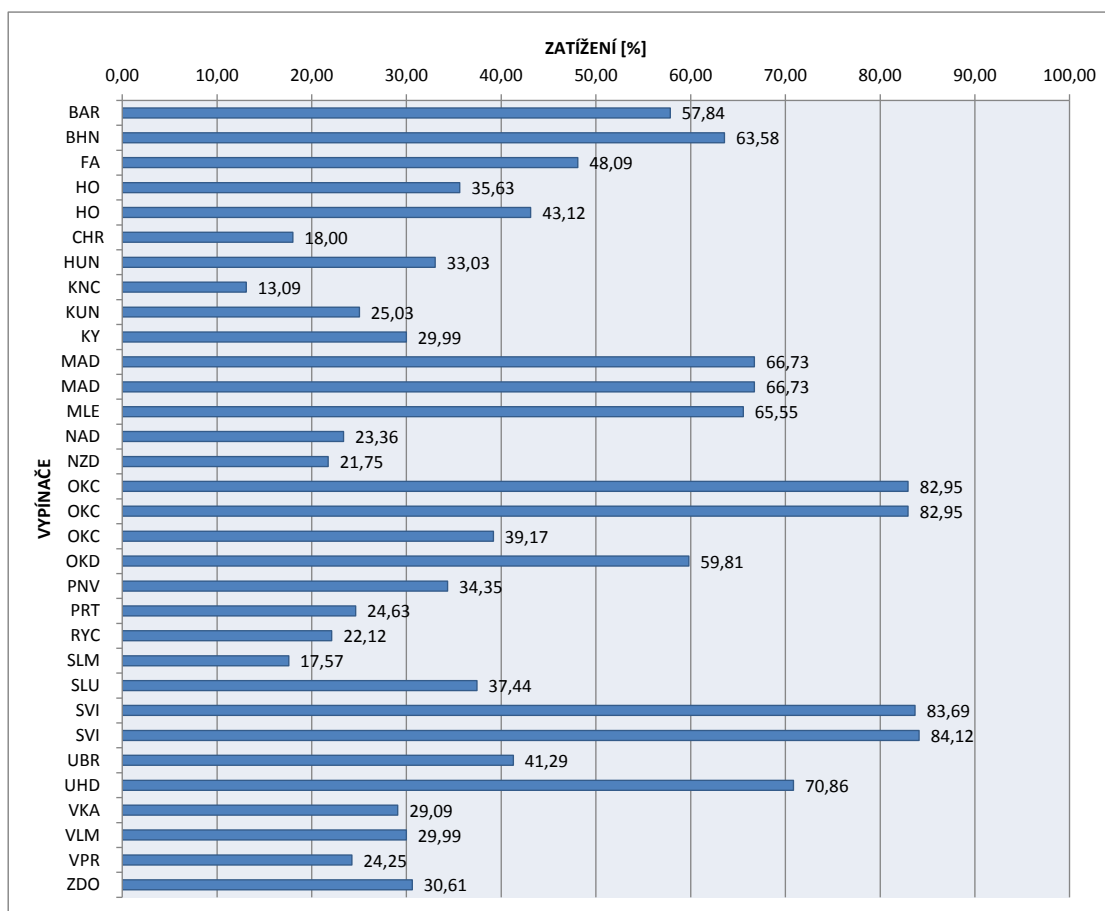
6.2 Zkratové poměry

Dle teorie ve čtvrté kapitole a její podkapitole *Účinky zkratového proudu a dimenzování elektrických zařízení* je zkratová odolnost charakterizována krátkodobým proudem I_{th} , dynamickým proudem I_{dyn} a vypínacím proudem I_{vyp} . Tyto tři veličiny jsou důležité pro kontrolu elektrických zařízení proto, aby tato zařízení vyhověla tepelným a dynamickým účinkům zkratového proudu a bezpečně vypnula postižený obvod v případě vypínačů.

Tab. 6.4: Jednofázový zkrat na přípojnicích rozveden UO Otrokovice

DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	$S''_{k(1f)}$ [MVA]	$I''_{k(1f)}$ [kA]	S_{vyp} [MVA]	$S''_{k(1f)}/S_{vyp}$ [%]
BAR	Otrokovice, Barum	2892,0	15,18	5000	57,84
BHN	Otrokovice, Bahňák	3178,8	16,16	5000	63,58
FA	Napajedla, Fatra	1683,2	8,83	3500	48,09
HO	Hodonín	1247,2	6,55	3500	35,63
HO	Hodonín	1509,2	7,92	3500	43,12
CHR	Chropyně	630,1	3,31	3500	18,00
HUN	Hulín	1155,9	6,07	3500	33,03
KNC	Konice	458,0	2,41	3500	13,09
KUN	Kunovice	876,1	4,60	3500	25,03
KY	Kyjov	1049,8	5,51	3500	29,99
MAD	Mladcová	3336,5	17,51	5000	66,73
MAD	Mladcová	3336,5	17,51	5000	66,73
MLE	Malenovice, ZPS	3277,7	17,20	5000	65,55
NAD	Nedakonice, ČD	817,6	4,29	3500	23,36
NZD	Nezamyslice, ČD	761,2	4,00	3500	21,75
OKC	Otrokovice	4147,5	21,77	5000	82,95
OKC	Otrokovice	4147,5	21,77	5000	82,95
OKC	Otrokovice	1958,6	10,28	5000	39,17
OKD	Otrokovice, ČD	2990,5	15,70	5000	59,81
PNV	Pánov	1202,3	6,31	3500	34,35
PRT	Prostějov	861,9	4,52	3500	24,63
RYC	Rychlov	774,2	4,06	3500	22,12
SLM	Slavičín	615,0	3,23	3500	17,57
SLU	Slušovice	1310,4	6,88	3500	37,44
SVI	Zlín, Svit	2929,3	15,38	3500	83,69
SVI	Zlín, Svit	2944,1	15,45	3500	84,12
UBR	Uherský Brod	1445,0	7,58	3500	41,29
UHD	Uherské Hradiště	2480,0	13,02	3500	70,86
VKA	Velká nad Veličkou	1018,0	5,34	3500	29,09
VLM	Veselí na Moravě	1049,6	5,51	3500	29,99
VPR	výtopna Prostějov	848,9	4,46	3500	24,25
ZDO	Zdounky	1071,2	5,62	3500	30,61

Exportovaná data z dispečerského řídicího programu Sinaut Spectrum však obsahují údaje pouze o velikostech jednofázového a třífázového počátečního rázového zkratového proudu a jeho výkonu. Proto je tak možné provést pouze kontrolu na zkratovou odolnost v případě vypínací schopnosti vypínačů.



Obr. 6.3: Zatížení vypínačů při jednofázovém zkratu na přípojnících

Zkratové poměry nastávající při jednofázovém zkratu na přípojnících jednotlivých rozveden v UO Otrokovice jsou uvedeny v tabulce 6.4, kde $I''_{k(1f)}$ značí počáteční rázový zkratový proud, $S''_{k(1f)}$ počáteční rázový zkratový výkon, S_{vyp} maximální možný vypínací výkon a zatížení jednotlivých vypínačů $S''_{k(1f)}/S_{vyp}$ dáno poměrem těchto výkonů. Graficky je zatížení vypínačů znázorněno na obrázku 6.3. Zkratový výkon je dán vztahem

$$S''_{k(1f)} = \sqrt{3}U_{110}I''_{k(1f)} \quad (6.12)$$

Z tabulky 6.4 je patrné, že všechny rozvodny a jejich vypínače v UO Otrokovice z hlediska zkratové odolnosti a vypínací schopnosti při jednofázovém zkratu vyhoví. V několika rozvodnách ovšem dochází ke značnému přiblížení k limitní hodnotě maximálního zkratového výkonu S_{vyp} , který jsou vypínače ještě schopné bezpečně vypnout. Taková situace nastala v rozvodně napájející průmyslový areál Svit

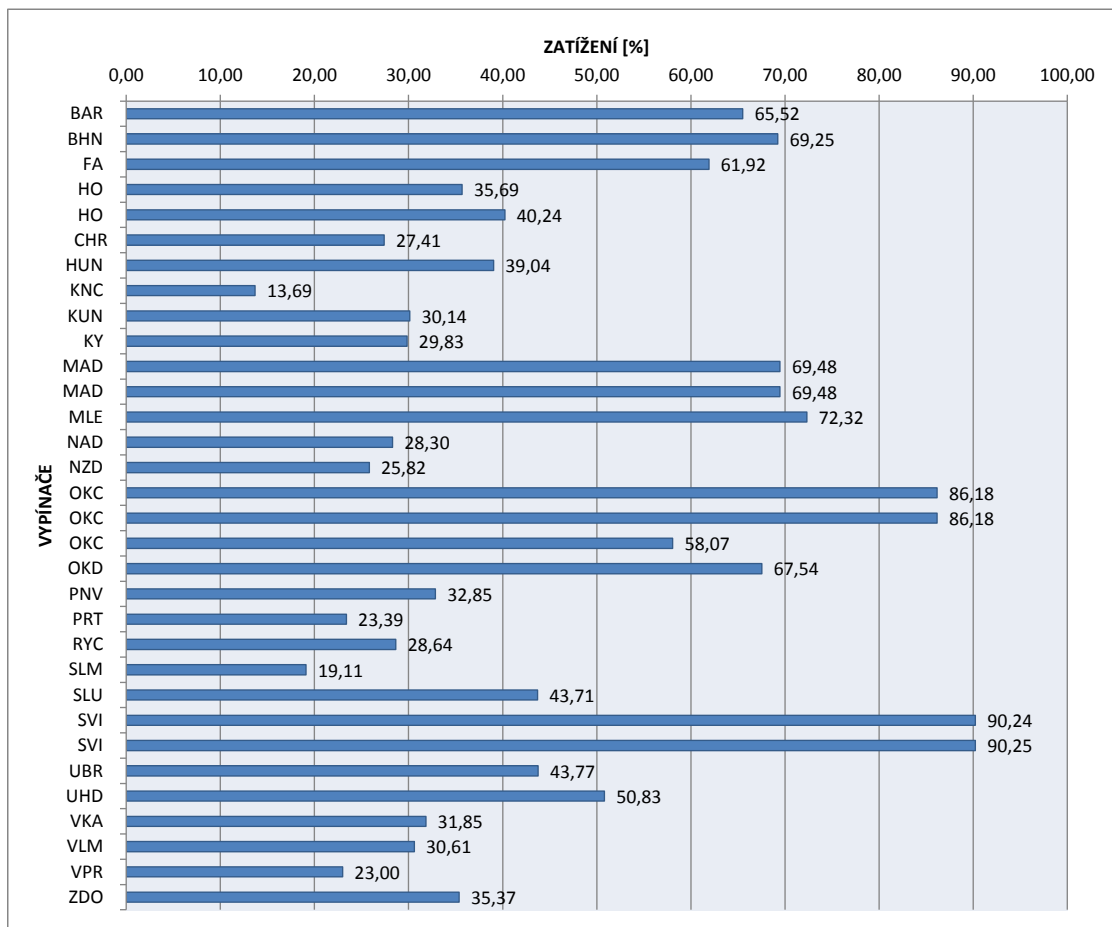
Zlín (SVI), kde je zatížení vypínačů 83,69% a 84,12%, dále v rozvodně Otrokovice (OKC), kde je zatížení dvou vypínačů 82,95%.

Zkratové poměry nastávající při třífázovém zkratu na přípojnicích jednotlivých rozveden v UO Otrokovice jsou uvedeny v tabulce 6.5. Značení veličin je obdobné jako u jednofázového zkratu s rozdílným dolním indexem $_{3f}$. Graficky je zatížení vypínačů znázorněno na obrázku 6.4.

Tab. 6.5: Třífázový zkrat na přípojnicích rozveden UO Otrokovice

DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	$S''_{k(3f)}$ [MVA]	$I''_{k(3f)}$ [kA]	S_{vyp} [MVA]	$S''_{k(3f)}/S_{vyp}$ [%]
BAR	Otrokovice, Barum	3275,8	17,193	5000	65,52
BHN	Otrokovice, Bahňák	3462,6	18,184	5000	69,25
FA	Napajedla, Fatra	2167,2	11,375	3500	61,92
HO	Hodonín	1249,1	6,556	3500	35,69
HO	Hodonín	1408,5	7,393	3500	40,24
CHR	Chropyně	959,2	5,035	3500	27,41
HUN	Hulín	1366,3	7,171	3500	39,04
KNC	Konice	479,3	2,516	3500	13,69
KUN	Kunovice	1054,8	5,536	3500	30,14
KY	Kyjov	1044,2	5,481	3500	29,83
MAD	Mladcová	3473,9	18,233	5000	69,48
MAD	Mladcová	3473,9	18,233	5000	69,48
MLE	Malenovice, ZPS	3616,1	18,980	5000	72,32
NAD	Nedakonice, ČD	990,6	5,199	3500	28,30
NZD	Nezamyslice, ČD	903,8	4,744	3500	25,82
OKC	Otrokovice	4308,8	22,616	5000	86,18
OKC	Otrokovice	4308,8	22,616	5000	86,18
OKC	Otrokovice	2903,7	15,240	5000	58,07
OKD	Otrokovice, ČD	3377,2	17,726	5000	67,54
PNV	Pánov	1149,9	6,035	3500	32,85
PRT	Prostějov	818,6	4,296	3500	23,39
RYC	Rychlov	1002,3	5,261	3500	28,64
SLM	Slavičín	668,9	3,511	3500	19,11
SLU	Slušovice	1529,8	8,029	3500	43,71
SVI	Zlín, Svit	3158,4	16,577	3500	90,24
SVI	Zlín, Svit	3158,9	16,580	3500	90,25
UBR	Uherský Brod	1531,9	8,041	3500	43,77
UHD	Uherské Hradiště	1778,9	9,337	3500	50,83
VKA	Velká nad Veličkou	1114,8	5,851	3500	31,85
VLM	Veselí na Moravě	1071,4	5,623	3500	30,61
VPR	výtopna Prostějov	804,9	4,225	3500	23,00
ZDO	Zdounky	1238,1	6,498	3500	35,37

Z tabulky 6.5 je patrné, že všechny rozvodny a jejich vypínače v UO Otrokovice z hlediska zkratové odolnosti a vypínací schopnosti při třífázovém zkratu vyhoví. Stejně jako u jednofázového zkratu se hodnoty zatížení vypínačů v některých rozvodnách značně blíží maximální povolené mezi. Nejvyšší zatížení vypínačů bylo vypočteno opět v rozvodnách průmyslového areálu Svit Zlín (SVI), a to 90,24%

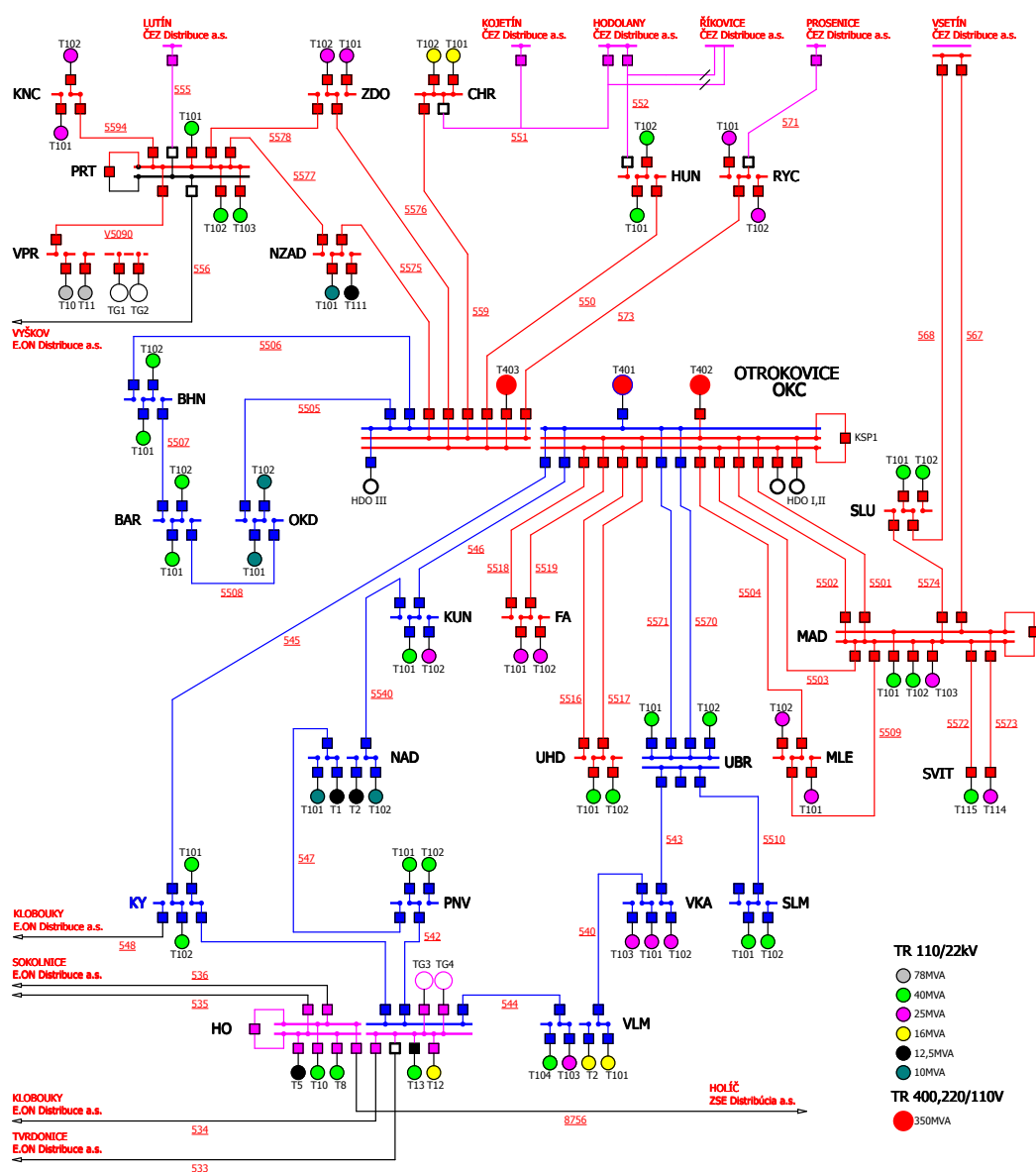


Obr. 6.4: Zatížení vypínačů při třífázovém zkratu na přípojnicích

a 90,25%, dále v rozvodně Otrokovice (OKC), kde je zatížení dvou vypínačů 86,18%. Z vypočtených hodnot také můžeme konstatovat, že při třífázovém zkratu na přípojnicích dochází ve většině případů ke zhoršení zkratových poměrů oproti zkratu jednofázovému. Výjimku tvoří např. rozvodna Pánov (PNV).

7 USTÁLENÝ CHOD A ZKRATOVÉ POMĚRY UO OTROKOVICE PO PŘIHOJENÍ NOVÉHO ZDROJE DO VPR

Výtopna Prostějov (VPR) v současné době disponuje jedním odstaveným generátorem TG VPR o výkonu 68MVA, transformátorem T10 o výkonu 78MVA a transformátorem vlastní spotřeby TVS. Je připojena kabelovým vedením V5090 s parametry AXLJ 1x1200mm² o délce 1680m k rozvodně Prostějov (PRT).



Obr. 7.1: UO R110kV Otrokovice po připojení nového zdroje

Situace po připojení nového zdroje je zobrazena na obrázku 7.1. Po připojení dalšího zdroje s označením TG2 a transformátoru T11 ke stávajícímu se rozšíří výroba a výkon na 120MVA. Tím se změní zatížení vedení a transformátorů v UO Otrokovice a také zkratové poměry na přípojnicích v jednotlivých rozvodnách, které byly sledovány v minulé kapitole. Je proto nutné provést výpočet celé oblasti pro nové parametry a ověřit tak bezpečnost a spolehlivost dodávky elektrické energie.

7.1 Ustálený chod

K vyhodnocení stavu sítě v ustáleném chodu je nutné dbát na nařízení obsažená ve směrnici *Pravidla provozování distribučních soustav* (PPDS), konkrétně pak v příloze 4 s názvem *Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. Tuto směrnici schvaluje Energetický regulační úřad (ERÚ). Kapitola 10 PPPZ udává podmínky pro připojení. Patří mezi ně mimo jiné i tyto podmínky:

- zvýšení napětí
- změna napětí při spínání

Zvýšení napětí

Zvýšení napětí vyvolané provozem připojených výroben nesmí v nejnepríznivějším případě (přípojném bodu) překročit 2% pro výroby s přípojným místem v síti *vn* a 110kV ve srovnání s napětím bez jejich připojení, současně nesmí být překročeny limity napětí v předávacím místě zdroje.

$$\Delta u_{vn} \leq 2\% \quad (7.1)$$

Úroveň napětí musí být posouzena s ohledem na výši skutečné hodnoty napětí v předávacím místě.

Změny napětí při spínání

Změny napětí ve společném napájecím bodě, způsobené připojováním a odpojováním jednotlivých generátorů nebo zařízení, nevyvolávají nepřipustné zpětné vlivy, tj. pokud největší změna napětí pro výroby s předávacím místem v síti *vn* nepřekročí 2%.

$$\Delta u_{max} \leq 2\% \quad (7.2)$$

Toto platí, pokud spínání není častější než jednou za 1,5 minuty. Při velmi malé četnosti spínání, např. jednou denně, může PDS připustit větší změny napětí, pokud to dovolí poměry v síti. Při spínání zdrojů v sítích *vn* a *nn* současně nesmí být

překročeny limity napětí $\pm 10\% U_n$ v předávacím místě zdroje. Úroveň napětí musí být posouzena s ohledem na vyšší skutečné hodnoty napětí v předávacím místě.

Pro výroby v síti 110kV platí pro omezení změny napětí vyvolané spínáním:

a) Normální provoz

- Spínání jedné výrobní jednotky

$$\Delta u_{max} \leq 0,5\% \quad (7.3)$$

- Spínání celého zařízení

$$\Delta u_{max} \leq 2\% \quad (7.4)$$

b) Poruchový provoz

- Pro změnu napětí při spínání celého zařízení platí

$$\Delta u_{max} \leq 5\% \quad (7.5)$$

V kapitole 11 PPPZ jsou uvedeny zpětné vlivy na napájecí síť. Aby nebyla rušena zařízení dalších odběratelů a provozovaná zařízení PDS, je zapotřebí omezit zpětné vlivy místních výroben. Pro posouzení je třeba vycházet ze zásad pro posuzování zpětných vlivů a jejich přípustných mezí. Bez další kontroly zpětných vlivů mohou být výroby připojeny, pokud poměr zkratového výkonu sítě ke jmenovitému výkonu celého zařízení je větší než 500. Pro individuální posouzení připojení jedné nebo více vlastních výroben v jednom společném napájecím bodu je třeba vycházet z následujících mezních podmínek:

Flikr

Pro posouzení jedné nebo více výroben v jednom předávacím místě je zapotřebí se zřetelem na kolísání napětí vyvolávající flikr dodržet ve společném napájecím bodě vn mezní hodnotu

$$P_{lt} \leq 0,37 \quad (7.6)$$

Dlouhodobou míru flikru P_{lt} s více jednotlivými zařízeními je potřeba vypočítat pro každé zvlášť a výslednou hodnotu pro flikr ve společném napájecím bodě určit podle vztahu

$$P_{lt} = \sqrt{\sum_i P_{lt_i}^2} \quad (7.7)$$

Proudy harmonických

Harmonické vznikají především u zařízení se střídači nebo měniči frekvence. Harmonické proudy emitované těmito zařízeními musí udat výrobce, např. zprávou o typové zkoušce. Pokud je ve společném napájecím bodu připojeno několik zařízení, pak se určí harmonické proudy přípustné pro jednotlivá zařízení násobením poměru zdánlivého výkonu zařízení k celkovému připojitelnému nebo plánovanému výkonu ve společném napájecím bodu. Měření proudů harmonických a mezharmionických se musí provádět podle ČSN EN 61000-4-7 ed.2. Proudů harmonických, přiváděné zkresleným napětím sítě do výrobního zařízení (např. do obvodů filtru), se výrobnímu zařízení nepřipočítávají.

Ovlivnění zařízení HDO

Zařízení hromadného dálkového ovládání (HDO) bývají provozována na frekvencích v rozmezí 183,3Hz - 283,3Hz. Místně použitá frekvence je 217Hz. Vysílací úroveň bývá obvykle 1,6% – 2,5% U_n .

Výrobní, případně zařízení pro kompenzaci účinníku připojené do přípojnice, do které se vysílá signál HDO, ovlivňují zatížením vysílače HDO. Proto je nutné posoudit vliv výrobní na zatížení vysílače HDO. Informaci o jeho zatížení poskytuje provozovatel distribuční soustavy (PDS). Pokud je toto blízké maximu, je připojení bez opatření nepřípustné. V opačném případě je možné zvýšení zatížení vysílače do 5A u vysílače do 110kV.

Při posuzování poklesů hladiny signálu HDO, který způsobí výrobní, se uvažují tato hlediska:

- Zdroje připojené k síti statickými střídači bez filtrů zpravidla nezpůsobují významné snížení hladiny signálu HDO. Pokud jsou vybaveny filtry nebo kompenzačními kondenzátory, pak je zapotřebí přezkoušet sériovou rezonanci s reaktancí nakrátko transformátoru výrobní.
- Zdroje, jejichž synchronní nebo asynchronní generátory jsou připojeny do sítě přes transformátor, vyvolávají pokles signálu HDO, který závisí na reaktanci generátoru a transformátoru, frekvenci HDO a zkratovém výkonu sítě.

Mimo omezení poklesu hladiny signálu HDO nesmí být produkována nežádoucí rušivá napětí. Obecně platí:

- Výrobnou vyvolané rušivé napětí, jehož frekvence odpovídá místně použité frekvenci HDO nebo leží v její bezprostřední blízkosti, nesmí překročit 0,1% U_n .
- V předchozím uvedená napětí, jejichž frekvence je o 100Hz pod nebo nad

místně použitou frekvencí HDO, nesmějí v přípojném bodu překročit 0,3% U_n .

Výrobní, které mají z hlediska impedancí na frekvenci HDO charakter točivých strojů, připojované k sítím *vn* PDS musí být od instalovaného výkonu 1MW výše vybaveny hradícím členem.

Kapitola byla převzata z [11].

7.1.1 Poměry na vedení

Nové poměry na vedení jsou shrnuty v tabulce 7.1. Kabelové vedení V5090 je nyní logicky zatíženo, a to na hodnotu 67.45% avšak s dostatečnou rezervou k dalšímu navýšení výkonu. Naopak klesla zatížení především u vedení, která propojují rozvodny Prostějov (PRT) a Otrokovice (OKC) a to jmenovitě 5575, 5576, 5577 a 5578. To je dáno možností Prostějova tuto energii spotřebovat a není tak nutné ji posílat proti Otrokovicím. Zatížení jednotlivých vedení ukazuje obrázek 6.1.

7.1.2 Výkony transformátorů

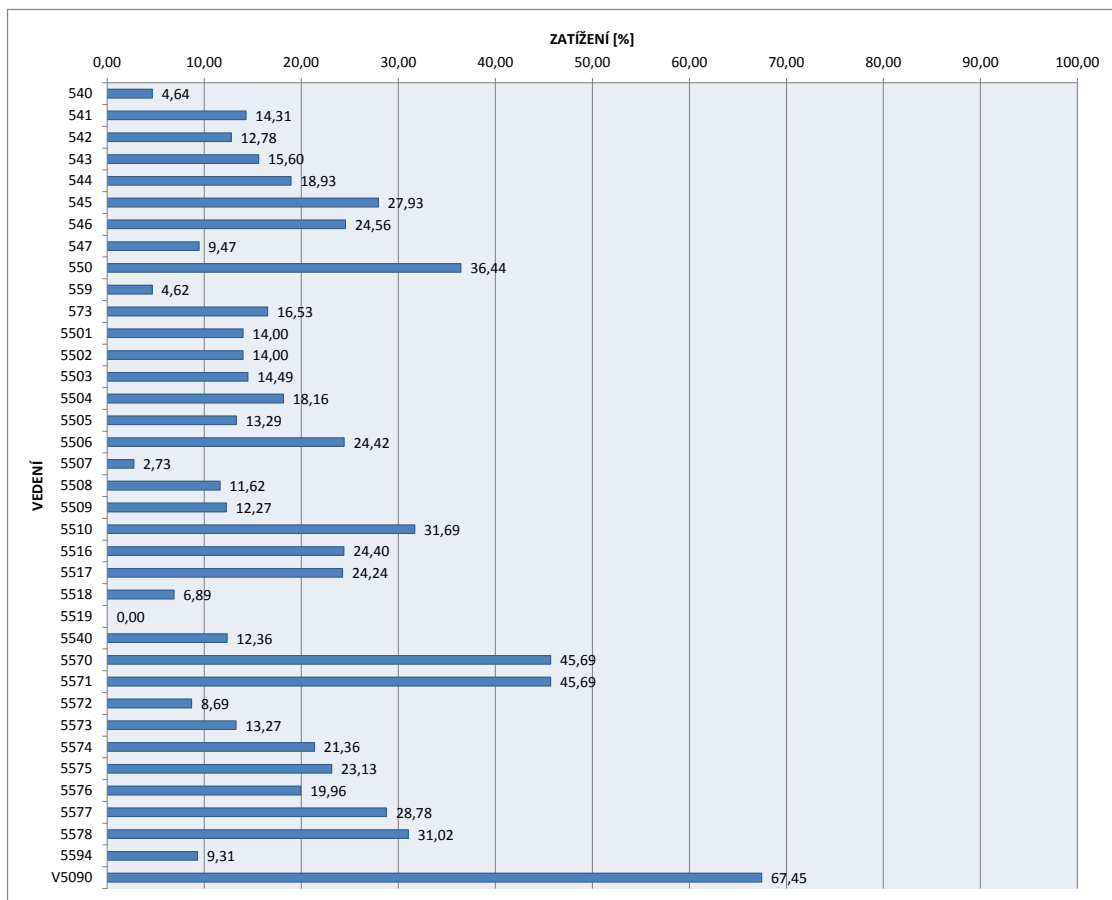
Nové poměry na transformátorech jsou uvedeny v tabulce 7.2. Transformátor T10 ve výtopně Prostějov je nyní zatěžován na 67.45%. Oproti předchozímu stavu klesly zatížení především transformátorů v Otrokovicích, a to jmenovitě T401 a T402. Zatížení jednotlivých transformátorů ukazuje obrázek 7.3.

7.1.3 Napěťové poměry v uzlech

Nové poměry v uzlech sítě jsou uvedeny v tabulce 7.3. Oproti minulému stavu došlo ke zvýšení napětí v rozvodnách blízkých výtopně Prostějov, tedy v Prostějově (PRT), v Konicích (KNC) a v samotné výtopně Prostějov (VPR) o 3,1kV, dále pak v rozvodně Zdouanky (ZDO), kde napětí vzrostlo o 1,2kV.

V tomto případě je nutné zkontrolovat napětí v uzlech nejen na dovolené spodní a vrchní hranice napětí 99kV a 121kV, ale také podle směrnice *Pravidla provozování distribučních soustav* (PPDS), konkrétně pak podle Přílohy 4 s názvem *Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy* a také Přílohy 7 s názvem *Pravidla pro podpůrné služby (PpS) zdrojů připojených k sítím provozovatele distribuční soustavy*.

$$\Delta u_{vn} \leq 2,2\text{kV} \tag{7.8}$$



Obr. 7.2: Zatížení vedení při ustáleném chodu sítě po připojení nového zdroje ve VPR

Je zřejmé, že po připojení nového zdroje podmínka v rovnici 7.1 není splněna. V rozvodnách Konice (KNC), Prostějov (PRT) a výtopna Prostějov (VPR) došlo ke změně napětí o více než 2,2kV. Jednou z možností jak napětí na přípojnicích regulovat je sekundární regulace U/Q .

Sekundární regulace napětí (ASRU)

Sekundární regulace napětí (ASRU) automaticky udržuje zadané napětí v pilotním uzlu přenosové soustavy. Zadané napětí je určeno terciální regulací napětí.

ASRU se je složena z dílčích regulací, mezi které patří:

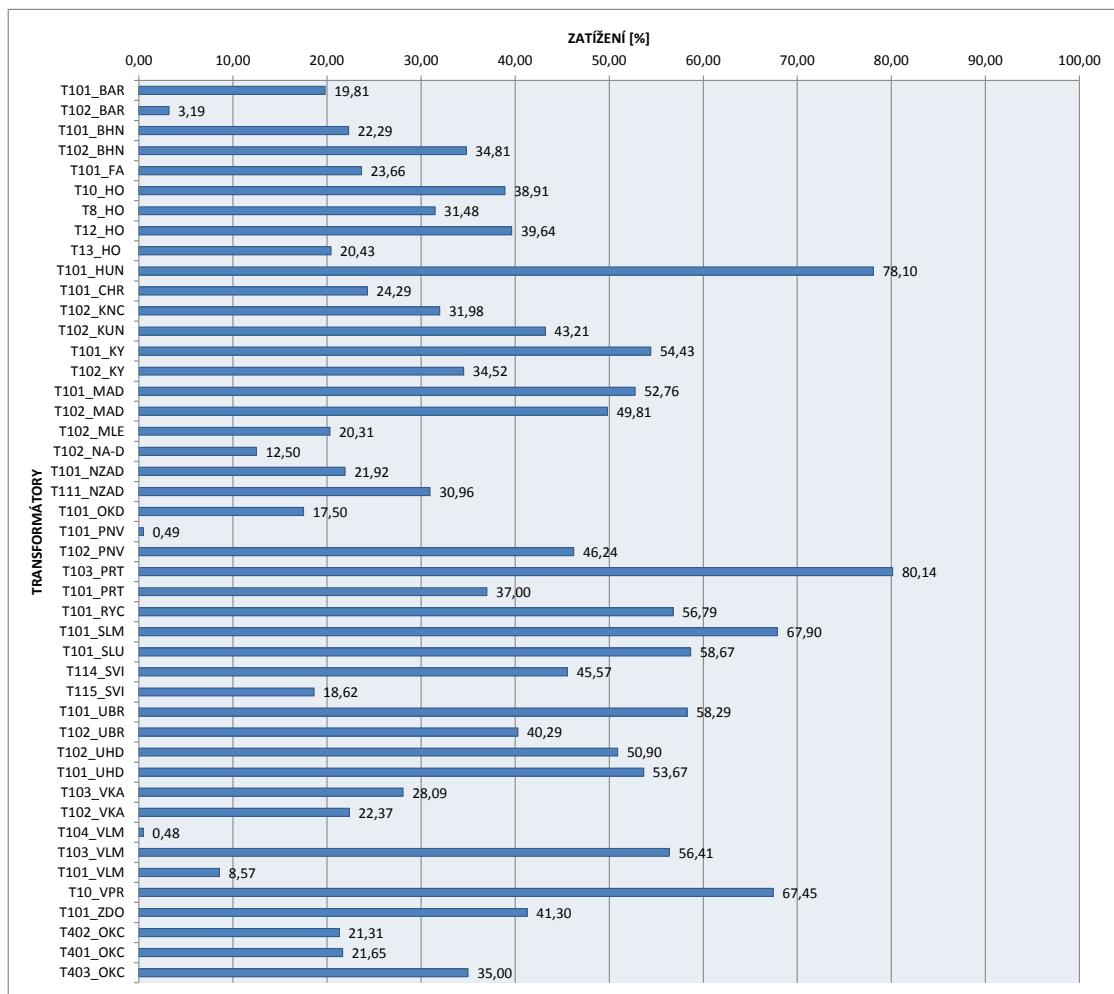
- automatická regulace napětí
- skupinová regulace napětí
- sekundární regulace jalového výkonu

Tab. 7.1: Vedení - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR

VED.	ÚSEK	P_{v1} [MW]	Q_{v1} [MVar]	I_{v1} [A]	U_{v1} [kV]	P_{v2} [MW]	Q_{v2} [MVar]	I_{v2} [A]	U_{v2} [kV]	I_{nv}/I_{max} [%]	ΔP_v [MW]
540	VKA-VLM	0,5	-3,7	18,7	115,3	-0,5	4,1	20,9	115,1	4,64	-0,002
541	HO-KY	11,1	6,5	64,4	115,5	-11,2	-5,7	62,2	116,3	14,31	-0,043
542	HO-PNV	10,8	4,1	57,5	116,1	-10,8	-3,7	56,9	116,3	12,78	-0,013
543	UBR-VKA	13,6	-2,7	69,5	115,1	-13,6	3,3	70,2	115,2	15,60	-0,041
544	HO-VLM	15,4	7,3	85,2	115,3	-15,4	-6,6	83,3	116,3	18,93	-0,078
545	OKC-KY	-25,4	-0,8	125,2	117,2	25,1	1,8	125,7	115,5	27,93	-0,32
546	OKC-KUN	-22,4	0,2	110,5	117,2	22,3	0,5	110,5	116,4	24,56	-0,146
547	NAD-PNV	8,4	-0,3	41,9	116,1	-8,4	1,6	42,6	116,3	9,47	-0,028
550	OKC-HUN	-32,7	-5,8	163,5	117,4	32,5	5,9	164	116,4	36,44	-0,221
559	OKC-CHR	-4,2	0,8	20,8	117,4	4,2	0,2	20,4	117,3	4,62	-0,005
573	OKC-RYC	14,8	2,6	74,4	116,9	-14,9	-1,5	73,6	117,4	16,53	-0,054
5501	OKC-MAD	-12,8	0,4	63	117,4	12,8	-0,2	63	117,3	14,00	-0,016
5502	OKC-MAD	-12,8	0,4	63	117,4	12,8	-0,2	63	117,3	14,00	-0,016
5503	OKC-MAD	-13,3	0	65,2	117,4	13,2	0,3	65,2	117,3	14,49	-0,016
5504	OKC-MLE	-16,6	-0,1	81,7	117,4	16,6	0,1	81,7	117,4	18,16	-0,004
5505	OKC-OKD	11,6	3,7	59,8	117,4	-11,6	-3,6	59,6	117,4	13,29	-0,005
5506	OKC-BHN	-21,7	-5,4	109,8	117,4	21,7	5,5	109,9	117,3	24,42	-0,014
5507	BAR-BHN	2,3	-1	12	117,3	-2,3	1,1	12,3	117,3	2,73	0
5508	BAR-OKD	-9,8	-4,2	52,2	117,4	9,8	4,2	52,3	117,3	11,62	-0,002
5509	MAD-MLE	-11,2	-0,2	55,1	117,4	11,2	0,4	55,2	117,3	12,27	-0,01
5510	SLM-UBR	-27,1	-7,8	141,4	115,2	26,7	8,1	142,6	113,1	31,69	-0,373
5516	OKC-UHD	21,7	4,4	109,8	116,4	-21,8	-4	109,1	117,4	24,40	-0,138
5517	OKC-UHD	21,7	4,4	109,8	116,4	-21,8	-4	109,1	117,4	24,24	-0,138
5518	OKC-FA	-6,3	0,3	31	117,4	6,3	0	31	117,4	6,89	-0,003
5519	OKC-FA	0	0,3	1,4	117,4	-	-	-	-	-	-
5540	KUN-NAD	11,1	-1,5	55,4	116,3	-11,1	1,7	55,6	116,4	12,36	-0,009
5570	OKC-UBR	40,4	7,3	205,6	115,2	-40,8	-7,6	204,7	117,2	45,69	-0,456
5571	OKC-UBR	40,4	7,3	205,6	115,2	-40,8	-7,6	204,7	117,2	45,69	-0,456
5572	MAD-SVI	-6,2	-5	39,1	117,3	6,2	5	39,2	117,3	8,69	-0,001
5573	MAD-SVI	-11,1	-4,8	59,7	117,3	11,1	4,8	59,8	117,3	13,27	-0,003
5574	MAD-SLU	18,8	4,8	96,1	116,7	-18,9	-4,4	95,4	117,3	21,36	-0,07
5575	OKC-NZAD	19,3	-7	101,2	117,4	-19,5	8,1	104,1	117,2	23,13	-0,161
5576	OKC-ZDO	-15,9	8,9	89,8	26,4	15,9	-8,2	87,8	117,4	19,96	-0,065
5577	NZAD-PRT	-25,1	7,9	129,5	117,2	24,9	-7,5	128,2	117,2	28,78	-0,145
5578	PRT-ZDO	26,8	-7,6	137,5	117,2	-27,1	8,2	139,6	117,2	31,02	-0,274
5594	KNC-PRT	-8,1	-1,5	40,7	117,2	8,1	2,4	41,9	116,7	9,31	-0,021
V5090	VPR-PRT	-109,4	6,7	539,6	117,2	109,3	-5,3	539,2	117,2	67,45	-0,046

- regulace odboček transformátoru

ASRU pracuje na principu, kdy je regulační odchylka vyhodnocena automatickou regulací napětí, která spočítá celkový jalový výkon nutný k jejímu potlačení. Hodnota požadovaného jalového výkonu je poslána na výrobní, v jejichž blocích se provede rozdělení úkolu v rámci skupinové regulace napětí na jednotlivé stroje (SRUQ)[13].



Obr. 7.3: Zatížení transformátorů při ustáleném chodu sítě po připojení nového zdroje ve VPR

Jedinou podmínkou v systému ASRU je, aby generátory měly možnost dálkové regulace napětí.

Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

Sekundární regulace U/Q je automatická funkce, která využívá celý regulační rozsah jalového výkonu výroby k udržení velikosti napětí v pilotním uzlu DS a minimalizuje přetoky jalové energie v DS. Vyráběný jalový výkon je rozdělován na jednotlivé zdroje, které do daného uzlu pracují.

Regulační proces má být aperiodický nebo maximálně s jedním překmitem a ukončený do 1 minuty. SRUQ musí být zároveň schopna spolupracovat s prostředky terciální regulace napětí a jalového výkonu [12].

Tab. 7.2: Transformátory - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR

TRANSF.	ROZVODNA	P_t [MW]	Q_t [MVA _r]	I_t [A]	I_{nt} [A]	I_t/I_{nt} [%]	ΔP_t [MW]	S_{nt} [MVA]	p [-] (*kV)
T101	BAR	-7,5	-3,9	41,6	210	19,81	-	40	110/6
T102	BAR	0	-1,4	6,7	210	3,19	-	40	110/6
T101	BHN	-9,4	-1,5	46,8	210	22,29	-0,047	40	110/22
T102	BHN	-14,5	-3	73,1	210	34,81	-0,036	40	110/22
T101	FA	-6,3	0	31	131	23,66	-	25	110/22
T10	HO	23,3	11,5	128,8	331	38,91	-0,8	40	110/22
T8	HO	18,8	9,4	104,2	331	31,48	-0,072	40	110/22
T12	HO	-4,6	-4,9	33,3	84	39,64	-	16	110/6
T13	HO	-8,7	-1,1	42,9	210	20,43	-0,05	40	110/22
T101	HUN	-32,5	-5,9	164	210	78,10	-0,18	40	110/22
T101	CHR	-4,2	-0,2	20,4	84	24,29	-	16	110/6
T102	KNC	-8,1	-2,4	41,9	131	31,98	-0,025	25	110/22
T102	KUN	-11,2	-2,2	56,6	131	43,21	-0,042	25	110/22
T101	KY	-22	-6,4	114,3	210	54,43	-0,107	40	110/22
T102	KY	-14,2	-2,8	72,5	210	34,52	-0,036	40	110/22
T101	MAD	-22,3	-2,8	110,8	210	52,76	-0,058	40	110/22
T102	MAD	-21,1	-2,8	104,6	210	49,81	-0,095	40	110/22
T102	MLE	-5,4	0,1	26,6	131	20,31	-	25	110/22/6
T102	NA-D	-1,3	0	6,5	52	12,50	-	10	110/22
T101	NZAD	-2,3	0,4	11,4	52	21,92	-	10	110/22
T111	NZAD	-3,1	-1	16,1	52	30,96	-	12,5	110/27
T101	OKD	-1,8	0,4	9,1	52	17,50	-	10	110/22
T101	PNV	0	-0,2	1,1	226	0,49	-0,038	40	110/22
T102	PNV	-19,2	-3,5	97,1	210	46,24	-0,091	40	110/22
T103	PRT	-33,7	-5,9	168,3	210	80,14	-0,092	40	110/22
T101	PRT	-15,4	-3,5	77,7	210	37,00	-0,069	40	110/22
T101	RYC	-14,8	-2,6	74,4	131	56,79	-0,093	25	110/22
T101	SLM	-26,7	-8,1	142,6	210	67,90	-0,068	40	110/22
T101	SLU	-23,9	-6,9	123,2	210	58,67	-0,117	40	110/22
T114	SVI	11,1	4,8	59,7	131	45,57	-0,083	25	110/6
T115	SVI	6,2	5	39,1	210	18,62	-0,033	40	110/6
T101	UBR	-23,5	-6,9	122,4	210	58,29	-0,118	40	110/22
T102	UBR	-16,6	-3,1	84,6	210	40,29	-0,045	40	110/22
T102	UHD	-21,1	-4,4	106,9	210	50,90	-0,051	40	110/22
T101	UHD	-22,3	-4,4	112,7	210	53,67	-0,11	40	110/22
T103	VKA	-7,2	-1,2	36,8	131	28,09	-0,025	25	110/22
T102	VKA	-5,8	-0,3	29,3	131	22,37	-	25	110/22
T104	VLM	0	-0,2	1	210	0,48	-0,036	40	110/22
T103	VLM	-14,4	-3,2	73,9	131	56,41	-0,091	25	110/22
T101	VLM	-1,4	-0,2	7,2	84	8,57	-	16	110/6
T10	VPR	119,4	-6,7	539,6	800	67,45	-0,549	78	110/11,5
T101	ZDO	-10,9	-1,2	54,1	131	41,30	-0,037	25	110/22
T402	OKC	78,9	10,6	391,5	1837	21,31	-0,012	350,00	400/110
T401	OKC	76,3	26,8	397,8	1837	21,65	-0,011	350,00	400/110
T403	OKC	129,5	15,8	642,9	1837	35,00	-0,03	350,00	400/110

Tab. 7.3: Uzly - výpočet ustáleného chodu UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR

DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	U_{uzl} [kV]	φ_{uzl} [°]	DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	U_{uzl} [kV]	φ_{uzl} [°]
BAR	Otrokovice, Barum	117,3	-0,80	OKD	Otrokovice, ČD	117,4	-0,78
BHN	Otrokovice, Bahňák	117,3	-0,81	PNV	Pánov	116,1	-4,17
CHR	Chropyně	117,3	-0,91	PRT	Prostějov	117,2	1,87
FA	Napajedla, Fatra	117,4	-0,81	RYC	Rychlov	116,9	-1,30
HO	Hodonín	117,4	-5,50	SLM	Slavičín	113,1	-4,98
HUN	Hulín	116,4	-1,51	SLU	Slušovice	116,7	-1,29
KNC	Konice	116,7	1,53	SVI	Zlín, Svit	117,3	-0,87
KUN	Kunovice	116,4	-3,51	UBR	Uherský Brod	115,2	-4,04
KY	Kyjov	115,5	-4,37	UHD	Uherské Hradiště	116,4	-1,40
MAD	Mladcová	117,3	-0,89	VKA	Velká nad Veličkou	115,1	-4,50
MLE	Malenovice, ZPS	117,4	-0,78	VLM	Veselí na Moravě	115,3	-4,54
NAD	Nedakonice, ČD	116,3	-3,65	VPR	výtopna Prostějov	117,2	1,99
NZD	Nezamyslice, ČD	117,2	0,78	ZDO	Zdounky	117,2	-0,04
OKC	Otrokovice	117,4	-0,73				

7.1.4 Celková bilance výkonů

Bilance výkonů při nových parametrech sítě se oproti minulému stavu bude lišit především zvýšením dodávky činného výkonu do soustavy. Jak se změní odebíraný výkon stejně tak jako ztráty na vedeních a transformátorech ukazují výpočty níže.

Ztráty na vedení

Ztráty na vedení ΔP_v po připojení nového 120MVA zdroje do sítě ukazuje tabulka 7.1. Součtem těchto dílčích ztrát získáme celkové ztráty činného výkonu na vedení v UO Otrokovice.

$$\sum \Delta P_v = 3,393 \text{ MW} \quad (7.9)$$

Ztráty na transformátorech

Ztráty na transformátorech ΔP_t po připojení nového 120MVA zdroje do sítě ukazuje tabulka 7.2. Součtem těchto dílčích ztrát získáme celkové ztráty činného výkonu na transformátorech v UO Otrokovice.

$$\sum \Delta P_t = 3,347 \text{ MW} \quad (7.10)$$

Stejně tak jako v šesté kapitole je ovšem nutné dopočítat ztráty na ostatních transformátorech. Suma jejich výkonů je:

$$\sum P_t = 37,4 \text{ MW} \quad (7.11)$$

Budeme-li uvažovat průměrné ztráty 0,5% z výkonu, jsou ztráty na těchto transformátorech

$$\sum \Delta P_{tr} = \frac{0,5}{100} \sum P_t = \frac{0,5}{100} \cdot 37,4\text{MW} = 0,187\text{MW} \quad (7.12)$$

Celkové ztráty na všech transformátorech potom budou

$$\sum \Delta P_{tc} = \sum \Delta P_t + \sum \Delta P_{tr} = 3,347\text{MW} + 0,187\text{MW} = 3,534\text{MW} \quad (7.13)$$

Odebíraný výkon

Odebíraný výkon po připojení nového 120MVA zdroje do sítě ukazuje tabulka 7.2 ve sloupci P_t se záporným znaménkem. Součtem těchto dílčích odběrů získáme celkový odebíraný činný výkon v UO Otrokovice.

$$\sum P_{odb} = 457,4\text{MW} \quad (7.14)$$

Dodávaný výkon

Dodávaný výkon po připojení nového 120MVA zdroje do sítě ukazuje tabulka 7.2 ve sloupci P_t s kladným znaménkem. Součtem těchto dílčích dodávek získáme celkový dodávaný činný výkon v UO Otrokovice.

$$\sum P_{dod} = 463,5\text{MW} \quad (7.15)$$

Bilance výkonů

Bilanci výkonů po připojení nového 120MVA zdroje do sítě v UO Otrokovice získáme součtem všech výše uvedených činných výkonů.

$$\sum P = \sum P_{dod} - \sum P_{odb} - \sum \Delta P_v - \sum \Delta P_{tc} \quad (7.16)$$

$$\sum P = 463,5\text{MW} - 457,4\text{MW} - 3,393\text{MW} - 3,534\text{MW} = -0,827\text{MW} \quad (7.17)$$

Rozdíl 0,827MW je opět dán chybou měření stejně jako v minulé kapitole.

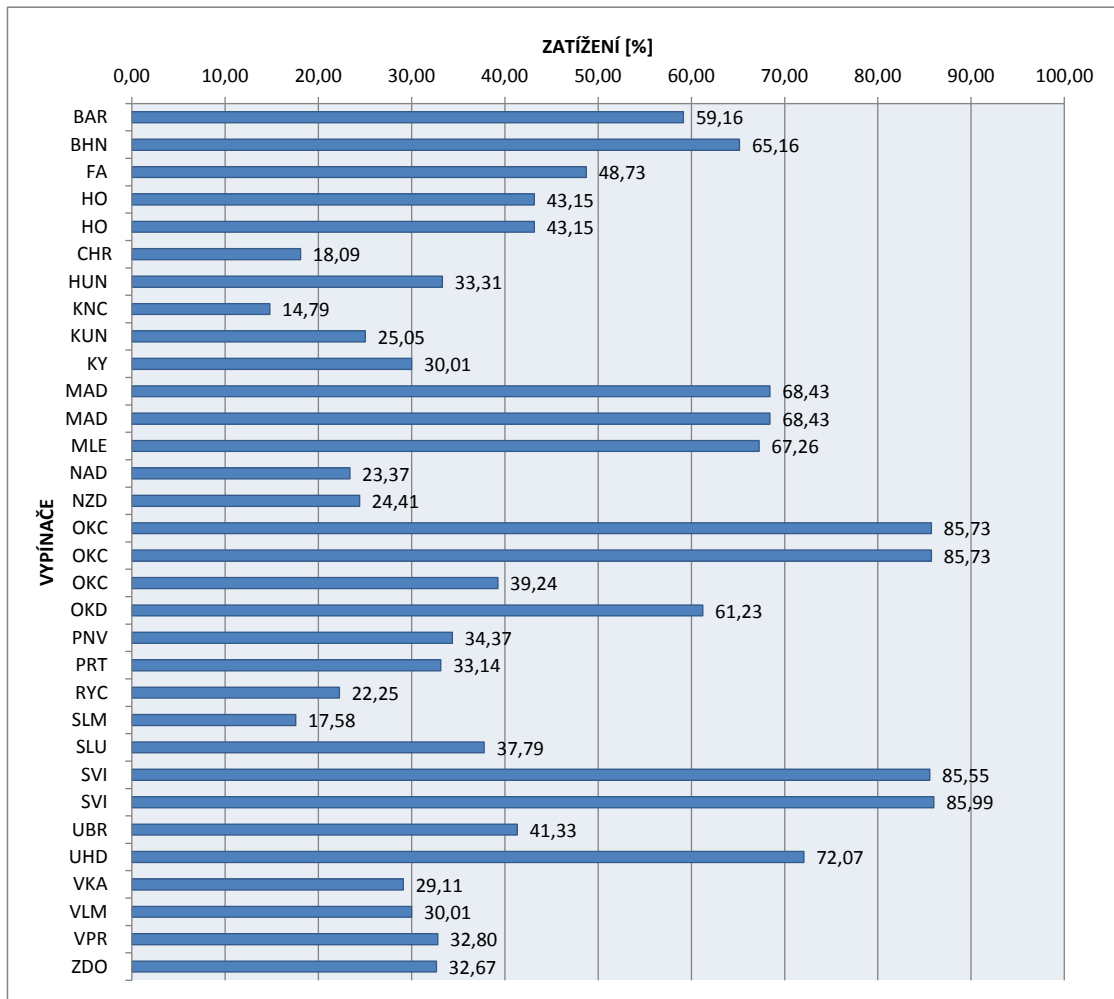
Tab. 7.4: Jednofázový zkrat na přípojnicích rozveden UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR

DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	$S''_{k(1f)}$ [MVA]	$I''_{k(1f)}$ [kA]	S_{vyp} [MVA]	$S''_{k(1f)}/S_{vyp}$ [%]
BAR	Otrokovice, Barum	2957,9	15,53	5000	59,16
BHN	Otrokovice, Bahňák	3258,2	17,10	5000	65,16
FA	Napajedla, Fatra	1705,5	8,95	3500	48,73
HO	Hodonín	1510,2	7,93	3500	43,15
HO	Hodonín	1247,3	6,55	3500	43,15
CHR	Chropyně	633,2	3,32	3500	18,09
HUN	Hulín	1165,7	6,12	3500	33,31
KNC	Konice	517,5	2,72	3500	14,79
KUN	Kunovice	876,6	4,60	3500	25,05
KY	Kyjov	1050,4	5,51	3500	30,01
MAD	Mladcová	3421,7	17,96	5000	68,43
MAD	Mladcová	3421,7	17,96	5000	68,43
MLE	Malenovice, ZPS	3362,8	17,65	5000	67,26
NAD	Nedakonice, ČD	818,0	4,29	3500	23,37
NZD	Nezamyslice, ČD	854,5	4,48	3500	24,41
OKC	Otrokovice	4286,4	22,50	5000	85,73
OKC	Otrokovice	4286,4	22,50	5000	85,73
OKC	Otrokovice	1962,1	10,30	5000	39,24
OKD	Otrokovice, ČD	3061,3	16,07	5000	61,23
PNV	Pánov	1203,0	6,31	3500	34,37
PRT	Prostějov	1159,8	6,09	3500	33,14
RYC	Rychlov	778,6	4,09	3500	22,25
SLM	Slavičín	615,3	3,23	3500	17,58
SLU	Slušovice	1322,8	6,94	3500	37,79
SVI	Zlín, Svit	2994,4	15,72	3500	85,55
SVI	Zlín, Svit	3009,8	15,80	3500	85,99
UBR	Uherský Brod	1446,6	7,59	3500	41,33
UHD	Uherské Hradiště	2522,5	13,24	3500	72,07
VKA	Velká nad Veličkou	1018,7	5,35	3500	29,11
VLM	Veselí na Moravě	1050,2	5,51	3500	30,01
VPR	výtopna Prostějov	1148,0	6,03	3500	32,80
ZDO	Zdounky	1143,5	6,00	3500	32,67

7.2 Zkratové poměry

Jak se změnilы zkratové poměry po připojení nového 120MVA zdroje do sítě ve výtopně Prostějov ukazují následující tabulky 7.4 a 7.5 a obrázky 7.4 7.5.

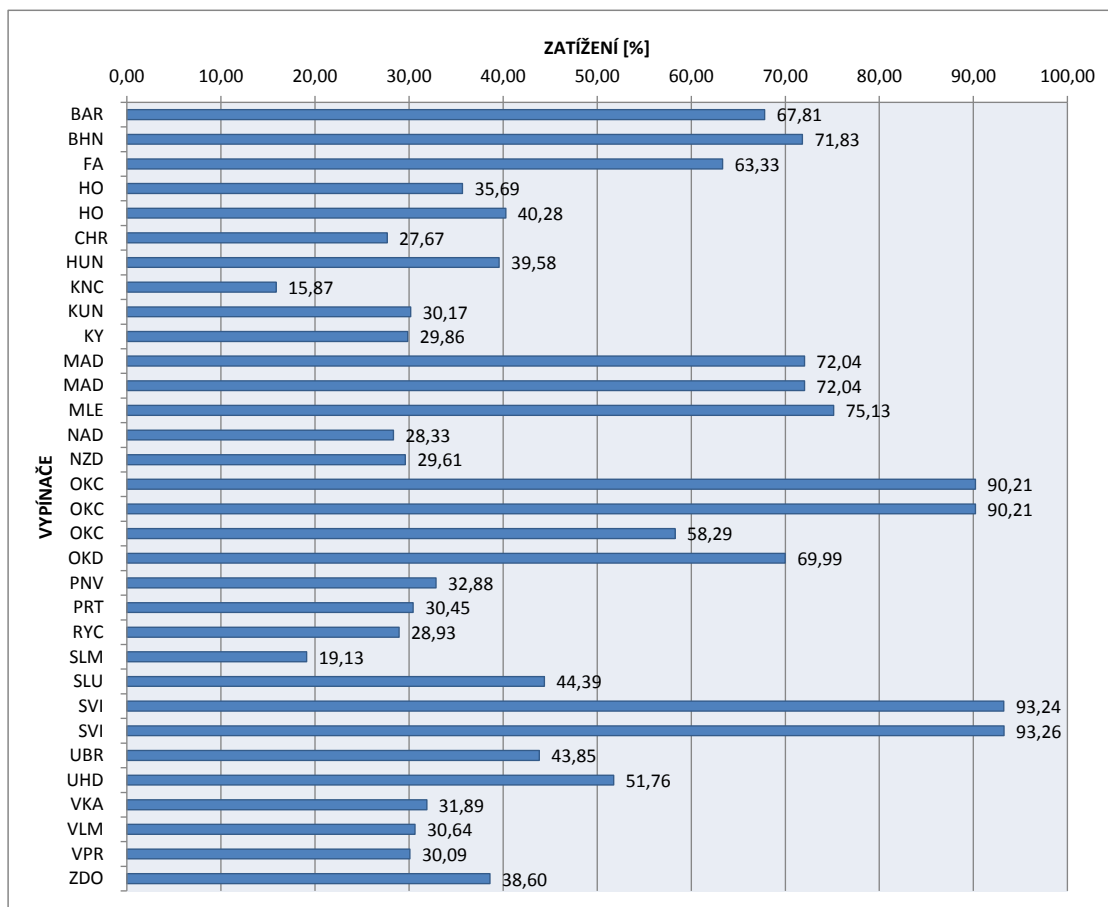
V případě jednofázového zkratu se téměř ve všech rozvodnách zvýšil počáteční rázový zkratový proud $I''_{k(1f)}$ a s ním i zatížení vypínačů $S''_{k(1f)}/S_{vyp}$. Nejvíce se nárůst tohoto proudu projevil přímo na přípojnicích ve výtopně Prostějov (VPR) a v Prostějově (PRT), kde došlo ke zvýšení hodnoty o 1,57kA. Tento nárůst je reprezentován, i co se týče zatížení vypínačů v těchto dvou rozvodnách, a to o 8,51% v případě rozvodny Prostějov a 8,55% ve výtopně Prostějov. Nebyl však překročen maximální přípustný limit S_{vyp} , a to ani v případě dalších rozveden. Zatížení vy-



Obr. 7.4: Zatížení vypínačů při jednofázovém zkratu na přípojnicích

pínačů v těchto dvou rozvodnách se pohybuje okolo 33% a nehrozí tak nebezpečí překročení maximálního vypínacího výkonu.

Podobná situace nastala i v případě třífázového zkratu. Opět se nárůst zatížení vypínačů projevil nejvíce v rozvodnách výtopna Prostějov a Prostějov, kde vzrostlo přibližně o 7% na hodnoty okolo 30%. I v tomto případě ale není překročen maximální dovolený zkratový výkon v žádné z rozvodnách v UO Otrokovic, a tak lze konstatovat, že v rámci kontroly sítě na zkratové poměry s připojením nového 120MVA zdroje nenastaly v síti žádné problémy.



Obr. 7.5: Zatížení vypínačů při třífázovém zkratu na přípojnicích

Tab. 7.5: Třífázový zkrat na přípojnicích rozvodů UO Otrokovice po připojení nového zdroje ve VPR

DISP. ZKRATKA	ROZVODNA R110kV	$S''_{k(3f)}$ [MVA]	$I''_{k(3f)}$ [kA]	S_{vyp} [MVA]	$S''_{k(3f)}/S_{vyp}$ [%]
BAR	Otrokovice, Barum	3390,7	17,797	5000	67,81
BHN	Otrokovice, Bahňák	3591,5	18,85	5000	71,83
FA	Napajedla, Fatra	2216,7	11,635	3500	63,33
HO	Hodonín	1249,1	6,556	3500	35,69
HO	Hodonín	1409,9	7,4	3500	40,28
CHR	Chropyně	968,6	5,084	3500	27,67
HUN	Hulín	1385,4	7,272	3500	39,58
KNC	Konice	555,4	2,915	3500	15,87
KUN	Kunovice	1056	5,543	3500	30,17
KY	Kyjov	1045,1	5,485	3500	29,86
MAD	Mladcová	3601,9	18,905	5000	72,04
MAD	Mladcová	3601,9	18,905	5000	72,04
MLE	Malenovice, ZPS	3756,7	19,717	5000	75,13
NAD	Nedakonice, ČD	991,6	5,204	3500	28,33
NZD	Nezamyslice, ČD	1036,4	5,44	3500	29,61
OKC	Otrokovice	4510,6	23,675	5000	90,21
OKC	Otrokovice	4510,6	23,675	5000	90,21
OKC	Otrokovice	2914,6	15,298	5000	58,29
OKD	Otrokovice, ČD	3499,7	18,368	5000	69,99
PNV	Pánov	1150,9	6,041	3500	32,88
PRT	Prostějov	1065,7	5,593	3500	30,45
RYC	Rychlov	1012,6	5,315	3500	28,93
SLM	Slavičín	669,4	3,514	3500	19,13
SLU	Slušovice	1553,5	8,154	3500	44,39
SVI	Zlín, Svit	3263,4	17,128	3500	93,24
SVI	Zlín, Svit	3264	17,131	3500	93,26
UBR	Uherský Brod	1534,7	8,055	3500	43,85
UHD	Uherské Hradiště	1811,6	9,508	3500	51,76
VKA	Velká nad Veličkou	1116,1	5,858	3500	31,89
VLM	Veselí na Moravě	1072,4	5,628	3500	30,64
VPR	výtopna Prostějov	1053,3	-	3500	30,09
ZDO	Zdounky	1350,9	7,09	3500	38,60

8 NEOBVKLÉ PROVOZNÍ STAVY

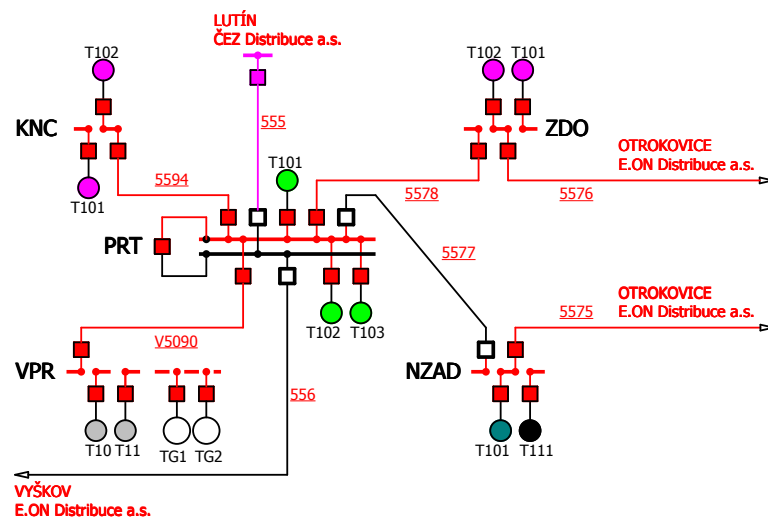
Tato kapitola se zabývá neobvyklými provozními stavy, ke kterým může v UO Otrokovice dojít v následku neočekávaných událostí. Jsou zde popsány tři mimořádné stavy. Prvními dvěma budou výpadky vedení jednoho z dvojice 5577 a 5578, které jsou jediným sprostředkovatelem elektrické energie mezi Otrokovicemi a nově připojenou výtopnou Prostějov. V tomto případě je potřeba posoudit, zda při výpadku jednoho z vedení nedojde k překročení přenosové schopnosti u vedení druhého, což by mohlo mít za následek poškození nebo zničení vedení a rozpad této části ES. Třetím mimořádným provozním stavem je zkouška posílání výkonu proti Sokolnicím po vedení 556 ve směru na rozvodnu ve Vyškově.

8.1 Výpadek vedení 5577

Při výpadku vedení 5577 se téměř veškerá energie a výkon vyrobený ve výtopně Prostějov posílá proti Otrokovicím pouze po lince tvořené vedením 5578 a 5576, která na sebe navazují v rozvodně Zdounky. Situace je znázorněna na obrázku 8.1. V tomto případě, jak je vidět z tabulky 8.1, dochází k velkému zatížení vedení 5576 na hodnotu 90,49% a lehkému přetížení vedení 5578 mezi rozvodnami Prostějov a Zdounky. Procentuální míra přetížení vedení procházejícím proudem je 101,82%. Na tomto vedení a také na vedení 5576 také dochází k nejvyšším ztrátám činného výkonu, a to dohromady 4,354MW. Ztráty činného výkonu na těchto dvou vedeních jsou tedy dokonce vyšší než celkové ztráty všech vedení uvedené v kapitole 7, kde byly spočteny na 3,393MW. Za zjednodušujícího předpokladu, že ztráty na ostatních vedeních zůstanou stejné, budou ztráty na všech vedení při tomto stavu $\Delta P_v = 7,26\text{MW}$. V důsledku výpadku vedení 5577 se tedy celkové ztráty činného výkonu na vedeních zvednou o celých 214%.

Tab. 8.1: Poměry na vedení mezi výtopnou Prostějov a Otrokovicemi při výpadku vedení 5577

VED.	ÚSEK	P_{v1} [MW]	Q_{v1} [MVar]	I_{v1} [A]	U_{v1} [kV]	P_{v2} [MW]	Q_{v2} [MVar]	I_{v2} [A]	U_{v2} [kV]	I_{vv}/I_{max} [%]	ΔP_v [MW]
5578	PRT-ZDO	-92,4	16,4	458,2	118,2	89,4	-24,7	456,6	117,3	101,82	-2,99
5576	ZDO-OKC	77,2	-29,5	405,8	117,6	-78,6	25,9	407,2	117,3	90,49	-1,364
V5090	VPR-PRT	109,3	-16,2	539,6	117,6	-109,4	17,6	540,9	118,2	67,61	-0,043



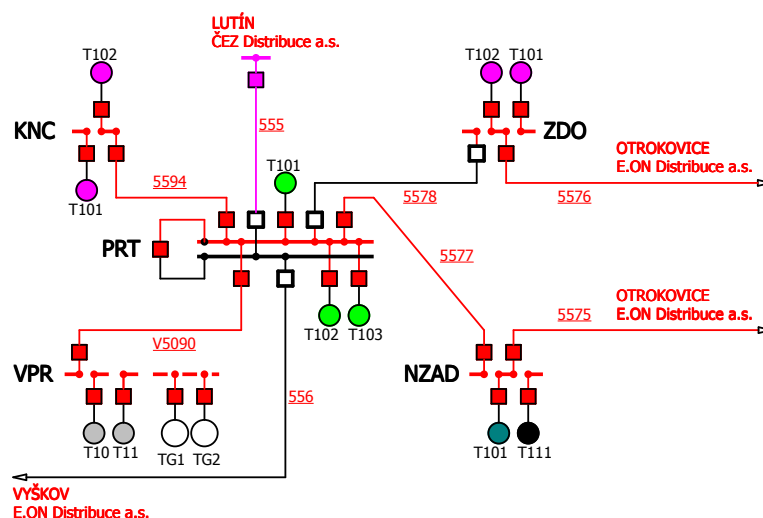
Obr. 8.1: Část sítě UO Otrokovice při výpadku vedení 5577

8.2 Výpadek vedení 5578

Druhou variantou je výpadek vedení 5578, kdy se téměř veškerá energie a výkon vyrobený ve výtopně Prostějov posílá proti Otrokovicím pouze po lince tvořené vedením 5577 a 5575, která na sebe navazují v rozvodně Nezamyslice. Situace je znázorněna na obrázku 8.2. I při tomto provozním stavu dochází k přetížení vedení, a to jak na 5577 tak i 5575. Procentuální míra přetížení vedení procházejícím proudem je značně vysoká a činí 118,93% a 115,36% jak ukazuje tabulka 8.2. Na obou vedeních také dochází k vysokým ztrátám činného výkonu, a to dohromady 6,625MW, což je ještě více, než v případě výpadku vedení 5577. Pokud opět předpokládáme, že ztráty na ostatních vedeních zůstanou stejné, budou ztráty na všech vedení při tomto stavu $\Delta P_v = 9,712\text{MW}$. V důsledku výpadku vedení 5578 se tedy celkové ztráty činného výkonu na vedeních zvednou o celých 286%.

Tab. 8.2: Poměry na vedení mezi výtopnou Prostějov a Otrokovicemi při výpadku vedení 5578

VED.	ÚSEK	P_{v1} [MW]	Q_{v1} [MVar]	I_{v1} [A]	U_{v1} [kV]	P_{v2} [MW]	Q_{v2} [MVar]	I_{v2} [A]	U_{v2} [kV]	I_{nv}/I_{max} [%]	ΔP_v [MW]
5577	PRT-NZAD	106,8	-22,3	534,5	117,5	-109,3	15	535,2	119	118,93	-2,507
5575	NZAD-OKC	-103,6	22,1	519,1	117,8	99,5	-34	517	117,4	115,36	-4,118
V5090	VPR-PRT	109,3	-16	536	119	-109,4	17,4	537,2	119	67,15	-0,043



Obr. 8.2: Část sítě UO Otrokovice při výpadku vedení 5578

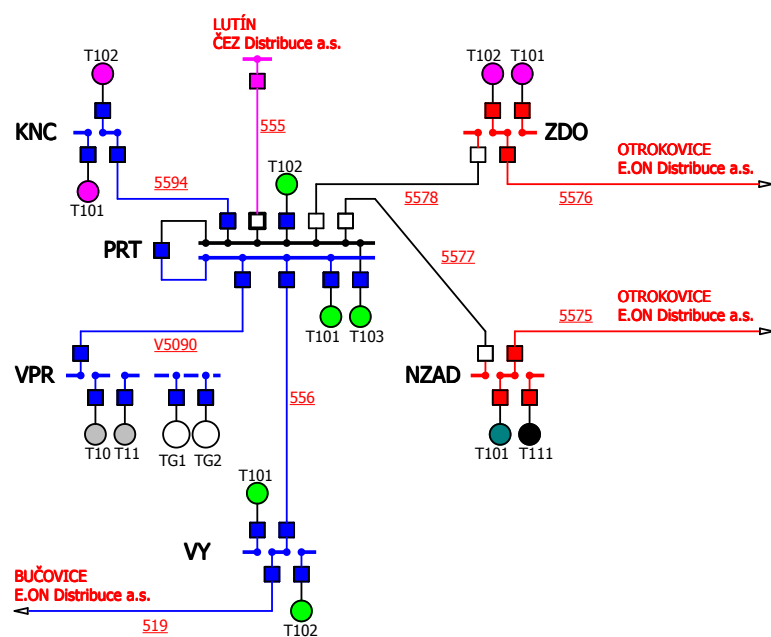
8.3 Posílání výkonu proti Sokolnicím

Při tomto provozním stavu se rozvodny výtopna Prostějov, Prostějov a Konice odpojí od UO Otrokovice pomocí vypnutí vedení 5577 a 5578 mezi rozvodnami Prostějov, Zdounky a Nezamyslice. Naopak se připojí k UO Sokolnice pomocí vedení 556 mezi rozvodnami Prostějov a Vyškov. Situace je znázorněna na obrázku 8.3. Vedení 556 nyní bude zatěžováno velkou částí výkonu vyrobeným ve výtopně Prostějov. Poměry na vedení ukazuje tabulka 8.3, ze které je patrné, že opět dochází k lehkému překročení přenosové schopnosti vedení 556, a to na hodnotu 101,73%. Také ztráty činného výkonu na tomto přetíženém vedení jsou značné, dosahují hodnoty 2,74MW.

Tab. 8.3: Poměry na vedení mezi výtopnou Prostějov a Vyškovem po vedení 556

VED.	ÚSEK	P_{v1} [MW]	Q_{v1} [MVA _r]	I_{v1} [A]	U_{v1} [kV]	P_{v2} [MW]	Q_{v2} [MVA _r]	I_{v2} [A]	U_{v2} [kV]	I_{nv}/I_{max} [%]	ΔP_v [MW]
556	PRT-VY	-92,4	18,5	457,8	118,9	89,7	-22,9	456,3	117,1	101,73	-2,74
V5090	VPR-PRT	109,3	-16	536,7	118,9	-109,4	17,4	537,9	118,9	67,24	-0,043

Jak je zřejmé, při všech třech zkoumaných provozních stavech dochází k přetížení některého z vedení a ke značnému zvýšení ztrát činného výkonu. Je proto zapotřebí při budoucím zvyšování výkonu ve výtopně Prostějov zvážit tato rizika a zajistit bezpečnost dodávky elektrické energie v dané oblasti. Je na provozovateli



Obr. 8.3: Část sítě UO Otrokovice při posílání výkonu proti Sokolnicím

distribuční sítě přijmout taková opatření, aby nedocházelo k výpadkům jednotlivých vedení, případně zajistit spolehlivost dodávky elektrické energie i při výpadku vedení. Jako jedno z možných řešení se nabízí zvýšení přenosové schopnosti stávajících vedení nebo výstavba dalších linek na posílení současných vedení a rovnoměrnějšímu rozdělení přenášeného výkonu.

9 ZÁVĚR

Diplomová práce teoreticky pojednává o problematice ustáleného stavu sítě a výpočtu zkratových poměrů v elektrizační soustavě. Ustálenému stavu sítě se věnuje třetí kapitola, kde jsou popsány metody řešení sítí jako lineární a nelineární úloha. Podstatný je výpočet ustáleného stavu sítě jako nelineární úloha, konkrétně pak výpočet pomocí Newton-Raphsonovy modifikované iterační metody, kterou využívá řídicí systém společnosti E.ON Sinaut Spectrum a je zde popsána. Práce se dále zabývá přechodnými jevy, především pak zkraty jednofázovými a trojfázovými, které jsou detailně popsány ve čtvrté kapitole. Jako metoda výpočtu zkratu je uvedena metoda souměrných složek. Okrajově jsou zmíněny také přechodné jevy vlnové, tedy přepětí a elektromechanické – statická a dynamická stabilita systému.

Stěžejní částí práce je popis a rozbor uzlové oblasti Otrokovice provozované společností E.ON Distribuce, a.s. V páté kapitole jsou charakterizovány jednotlivé rozvodny uzlové oblasti Otrokovice z hlediska zkratové odolnosti, přípojnicového systému a také jejich vybavení transformátory a generátory. Druhá část kapitoly je věnována popisu a parametrům vedení mezi jednotlivými rozvodnami.

Kapitola šestá předkládá výsledky z měření ustáleného chodu sítě, mezi které patří poměry na vedení, výkony a zatížení transformátorů v rozvodnách, napětí na přípojnicích a výpočet celkové bilance výkonu. Druhá polovina kapitoly je zaměřena na výsledky měření zkratových poměrů na přípojnicích v jednotlivých rozvodnách v případě výskytu jednofázového a třífázového zkratu. Shrnutí těchto výsledků je takové, že žádná z vedení a transformátorů nejsou během provozu přetěžována, uzlová napětí se pohybují v toleranci určené pro *vvn* a zkratové odolnosti rozveden jsou dostačující pro oba typy měřených zkratů.

V sedmé kapitole jsou uvedeny výsledky z měření ustáleného stavu a zkratových poměrů v uzlové oblasti Otrokovice po připojení nového zdroje 120MVA ve výtopně Prostějov. Z důvodu připojení nového zdroje k distribuční síti je v potaz brán dokument *Pravidla provozování distribučních soustav, zvláště pak jeho příloha 4 Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. Z této přílohy je citováno z podmínek pro připojení nových zdrojů. Jedná se především o zvýšení napětí, změnu napětí při spínání, flickr, proudy harmonických a ovlivnění zařízení HDO. Shrnutím naměřených výsledků je závěr, že po připojení nového zdroje nedojde k přetížení žádného z vedení ani transformátorů, ale není splněna podmínka o zvýšení napětí v uzlech. Té nevyhovují napětí na přípojnicích v rozvodnách Konice, Prostějov a výtopna Prostějov. Jednou z možností, jak splnit podmínku o zvýšení napětí, je např. sekundární U/Q regulace. V druhé části kapitoly jsou shrnuty výsledky z měření zkratových proudů na přípojnicích v rozvodnách. Lze konstatovat, že všechny rozvodny z hlediska zkratové odolnosti vyhoví účinkům jednofázového

i třífázového zkratu.

Poslední osmá kapitola pojednává o neobvyklých provozních stavech, které mohou nastat v oblasti výtopny Prostějov po připojení nového zdroje 120MVA a negativně tak ovlivnit bezpečnost a spolehlivost dodávky elektrické energie. Jedná se především o výpadky vedení mezi rozvodnou v Prostějově a rozvodnou v Otrokovících, tedy vedení 5577 a 5578. V obou případech dochází ke vzrůstu zatížení samostatné linky ať už po trase Prostějov - Zdounky - Otrokovice nebo Prostějov - Nezamyslice - Otrokovice. Výsledky z měření ukazují, že obě linky budou při výpadku jednoho z vedení přetížené a vzniknou na nich velké ztráty činného výkonu. Stejná situace nastane i ve třetím zkoumaném provozním stavu, ve kterém jsou rozvodny výtopna Prostějov, Prostějov a Konice odpojeny od uzlové oblasti Otrokovice a výkon vyrobený ve výtopně Prostějov poslán přes vedení 556 směrem k rozvodně ve Vyškově do uzlové oblasti Sokolnice.

Závěrem diplomové práce je poznatek, že po připojení nového zdroje 120MVA ve výtopně Prostějov, je zapotřebí navrhnout U/Q regulaci a zajistit tak napětí v uzlech v požadovaných mezích. Také by bylo vhodné přijmout taková opatření, aby nedocházelo k výpadkům vedení nebo zajistit spolehlivost dodávky elektrické energie např. zvýšením přenosové schopnosti stávajících vedení nebo výstavbou nových linek a tím rovnoměrnějším rozložením přenášeného výkonu.

LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V., PAAR, M. *Přenosové sítě*. Brno: VUT, 2007.
- [2] BLAŽEK, V., SKALA, P. *Distribuce elektrické energie*. Brno: VUT, 2005.
- [3] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL, 1987.
- [4] KVASNICA, P., GABAJ, L. *Přechodné jevy v elektrizačnéj sústave: Príklady zo skratov*. 1.vyd. Bratislava: STU, 1994. ISBN 80-227-0655-8
- [5] PAUZA, J. *Zkratky v elektrických rozvodech*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1970. ISBN 04-509-70
- [6] MEDVEC, Z. *Přechodové jevy v elektrizačních soustavách: Návodý do cvičení*. 1.vyd. Ostrava: VŠB, 2001. ISBN 80-7078-856-9
- [7] HALUZÍK, E. *Řízení provozu elektrizačních soustav: Učební texty*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1983. 126s.
- [8] SYAI'IN, M., SOEPRIJANTO, A. *Improved Algorithm of Newton Raphson Power Flow using GCC limit based on Neural Network*. Surabaya: ITS, [online]. [cit. 13. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.ijens.org/Vol_12_I_01/125601-7474-IJECS-IJENS.pdf>.
- [9] BURANT, J. *Blesk a přepětí: Systémové řešení ochran*. Praha: FCC Public, 2006. 256s. ISBN 80-86534-10-3
- [10] ROUS, Z. *Přepětové ochrany v elektrických instalacích do 1000V*. 1.vyd. Praha: IN-EL, 1999. 146s. ISBN 80-86230-06-6
- [11] PPDS *Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*
- [12] PpS *Pravidla pro podpůrné služby zdrojů připojených s sítím provozovatele distribuční soustavy*
- [13] ČEPS, a.s. *KODEX PŘENOSOVĚ SOUSTAVY - Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy*

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

α	úhel proudu [°]
α_u	počáteční fáze fázoru napětí v okamžiku vzniku zkratu [°]
δ	úhel napětí [°]
φ	úhel zdánlivého výkonu [°]
φ_{uzl}	úhel napětí na přípojnicích [°]
φ_k	úhel impedance obvodu zkratového proudu [°]
ω	úhlová rychlost [min^{-1}]
κ	součinitel nárazového zkratového proudu [-]
τ_d''	subtranzitní časová konstanta [s]
τ_d'	tranzitní časová konstanta [s]
τ_s	časová konstanta stejnosměrné složky zkratového proudu [s]
\bar{a}	operátor natočení [°]
B_k	kapacitní susceptance vztažená k jednotce délky [Sm^{-1}]
c	napěťový součinitel [-]
e	Eulerovo číslo [-]
f	napěťový součinitel [Hz]
f_0	vlastní kmitočet zotavného napětí [Hz]
f_u	frekvence ustáleného stavu [Hz]
G_k	konduktance vztažená k jednotce délky [Sm^{-1}]
\bar{I}^*	komplexně sdružená hodnota fázoru proudu [A]
\bar{I}_0	fázor netočivé složky proudu souměrné složkové soustavy [A]
\bar{I}_1	fázor sousledné složky proudu souměrné složkové soustavy [A]
\bar{I}_2	fázor zpětné složky proudu souměrné složkové soustavy [A]
I_{avypp}	aperiodická složka vypínacího zkratového proudu [A]

\bar{I}_A	fázor proudu ve fázi A	[A]
\bar{I}_B	fázor proudu ve fázi B	[A]
\bar{I}_C	fázor proudu ve fázi C	[A]
I_{dyn}	jmenovitý dynamický zkratový proud	[A]
\bar{I}_i	fázor proudu v i -tém uzlu sítě	[A]
\bar{I}_i^*	komplexně sdružený fázor proudu v i -tém uzlu sítě	[A]
\bar{I}_j	fázor proudu v j -tém uzlu sítě	[A]
\bar{I}_j^*	komplexně sdružený fázor proudu v j -tém uzlu sítě	[A]
I_k	efektivní hodnota ustáleného zkratového proudu	[A]
i_k	okamžitá hodnota zkratového proudu	[A]
I'_k	počáteční efektivní hodnota tranzitního zkratového proudu	[A]
I''_k	počáteční rázový zkratový proud	[A]
i_{ka}	okamžitá hodnota stejnosměrné složky zkratového proudu	[A]
I_{ke}	ekvivalentní oteplovací proud	[A]
I_{km}	nárazový zkratový proud	[A]
i_{ks}	okamžitá hodnota střídavého zkratového proudu	[A]
I_{th}	jmenovitý krátkodobý oteplovací proud	[A]
I_{vyp}	souměrný vypínací zkratový proud	[A]
I_{nv}	maximální proudová zatížitelnost vedení	[A]
I_{v1}	proud na začátku vedení	[A]
I_{v2}	proud na konci vedení	[A]
I_t	proud odebíraný transformátorem	[A]
I_{nt}	jmenovitý proud transformátoru	[A]
$I''_{k(1f)}$	jednofázový počáteční rázový zkratový proud	[A]
$I''_{k(3f)}$	třífázový počáteční rázový zkratový proud	[A]

J	Jacobián	[-]
k_1	součinitel pro různé druhy zkratu	[-]
k_e	koeficient určující dobu trvání a místo zkratu	[-]
p	překmit zotavného napětí	[-]
p	jmenovitý převod transformátoru	[-]
P	činný výkon	[W]
P_i	činný výkon v i -tém uzlu sítě	[W]
P_j	činný výkon v j -tém uzlu sítě	[W]
P_{lt}	dlouhodobá míra flikru	[-]
P_{max}	horní limit činného výkonu	[W]
P_{min}	dolní limit činného výkonu	[W]
P_v	přenosová schopnost vedení	[W]
P_{v1}	činný výkon na začátku vedení	[W]
P_{v2}	činný výkon na konci vedení	[W]
ΔP_v	ztráty činného výkonu na vedení	[W]
P_{odb}	odebíraný činný výkon	[W]
P_{dod}	dodávaný činný výkon	[W]
P_t	odebíraný a dodávaný činný výkon transformátorů	[W]
ΔP_t	ztráty činného výkonu na transformátoru	[W]
ΔP_{tc}	celkové ztráty činného výkonu na transformátorech	[W]
ΔP_{ij}	ztráty činného výkonu mezi uzly i a j	[W]
Q	jalový výkon	[VAr]
Q_i	jalový výkon v i -tém uzlu sítě	[VAr]
Q_j	jalový výkon v j -tém uzlu sítě	[VAr]
Q_{v1}	jalový výkon na začátku vedení	[VAr]

Q_{v2}	jalový výkon na konci vedení	[VAr]
Q_t	odebíraný a dodávaný jalový výkon transformátorů	[VAr]
Q_{max}	horní limit jalového výkonu	[VAr]
Q_{min}	dolní limit jalového výkonu	[VAr]
ΔQ_{ij}	ztráty jalového výkonu mezi uzly i a j	[VAr]
R_k	rezistance vztažená k jednotce délky	$[\Omega\text{m}^{-1}]$
s	strmost zotavného napětí	$[\text{Vs}^{-1}]$
\bar{S}	fázor zdánlivého jednofázového výkonu	[VA]
\bar{S}_i	fázor zdánlivého jednofázového výkonu v i -tém uzlu sítě	[VA]
\bar{S}_i^*	komplexně sdružený fázor zdánlivého jednofázového výkonu v i -tém uzlu sítě	[VA]
\bar{S}_j	fázor zdánlivého jednofázového výkonu v j -tém uzlu sítě	[VA]
S_{nt}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	[VA]
S_{vyp}	jmenovitý vypínací výkon vypínače	[VA]
$S''_{k(1f)}$	jednofázový počáteční rázový zkratový výkon	[VA]
$S''_{k(3f)}$	třífázový počáteční rázový zkratový výkon	[VA]
U	absolutní hodnota napětí v uzlu sítě	[V]
U_{uzl}	velikost napětí na přípojnicích	[V]
U_{v1}	napětí na začátku vedení	[V]
U_{v2}	napětí na konci vedení	[V]
\bar{U}_0	fázor netočivé složky napětí souměrné složkové soustavy	[V]
\bar{U}_1	fázor sousledné složky napětí souměrné složkové soustavy	[V]
\bar{U}_2	fázor zpětné složky napětí souměrné složkové soustavy	[V]
\bar{U}_A	fázor sdruženého napětí ve fázi A	[V]
\bar{U}_B	fázor sdruženého napětí ve fázi B	[V]

\bar{U}_C	fázor sdruženého napětí ve fázi C [V]
\bar{U}_f	fázor napětí na svorkách alternátoru [V]
\bar{U}_i	fázor napětí v i -tém uzlu sítě [V]
\bar{U}_i^*	komplexně sdružený fázor napětí v i -tém uzlu sítě [V]
\bar{U}_{in}	fázor vnitřního napětí alternátoru [V]
\bar{U}_{i0}	fázor nulové složky vnitřního napětí alternátoru v souměrné složkové soustavě [V]
\bar{U}_{i1}	fázor sousledné složky vnitřního napětí alternátoru v souměrné složkové soustavě [V]
\bar{U}_{i2}	fázor zpětné složky vnitřního napětí alternátoru v souměrné složkové soustavě [V]
\bar{U}_j	fázor napětí v j -tém uzlu sítě [V]
\bar{U}_j^*	komplexně sdružený fázor napětí v j -tém uzlu sítě [V]
U_s	sdružené obnovené napětí [V]
U_v	sdružená hodnota vztažného napětí [V]
X_k	reaktance vztažená k jednotce délky [Ωm^{-1}]
\bar{y}_{i0}	admitance mezi uzlem i a zemí [S]
\bar{Y}_{ii}	admitance diagonálního prvku matice MUN [S]
\bar{y}_{ij}	admitance mezi uzlem i a j [S]
\bar{Y}_{ij}	admitance mimodiagonálního prvku matice MUN [S]
\bar{y}_{j0}	admitance mezi uzlem j a zemí [S]
\bar{Y}_k	příčná admitance vztažená k jednotce délky [Sm^{-1}]
\bar{Z}_{c0}	netočivá složka impedance souměrné složkové soustavy [Ω]
\bar{Z}_{c1}	sousledná složka impedance souměrné složkové soustavy [Ω]
\bar{Z}_{c2}	zpětná složka impedance souměrné složkové soustavy [Ω]
\bar{Z}_k	podélná impedance vztažená k jednotce délky [Ωm^{-1}]

Zkratky uvedené v textu:

- ES - elektrizační soustava
- UO - uzlová oblast
- LEMP - lightning electromagnetic pulse (atmosférické přepětí)
- SEMP - switching electromagnetic pulse (spínací přepětí)
- NEMP - nuclear electromagnetic pulse (nukleární elektromagnetický impuls)
- ESD - electrostatic discharge (elektrostatické přepětí)
- HDO - hromadné dálkové ovládání
- PPDS - Pravidla provozování distribučních soustav
- PPPZ - Pravidla pro provozování paralelních zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy
- PDS - Provozovatel distribuční soustavy
- PpS - Pravidla pro podpůrné služby zdrojů připojených k sítím provozovatele distribuční soustavy
- ASRU - automatická sekundární regulace napětí
- SRUQ - sekundární regulace napětí a jalového výkonu

V obrázcích jsou vektory veličin značeny tučně.