



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ČVUT V PRAZE**

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd
Department of Economics, Management and Humanities

Analýza můstkového provozu distribuční sítě na úrovni VN

Distribution network at HV bridged operation analysis

Bakalářská práce
Bachelor thesis

Autor
Author

Petr Janda

Vedoucí práce
Thesis supervisor

Ing. Aleš Krula
PREdistribuce, a. s.

Praha

květen 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janda** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **434845**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza můstkového provozu distribuční sítě na úrovni VN

Název bakalářské práce anglicky:

Distribution network at HV bridged operation analysis

Pokyny pro vypracování:

1. Teoretický rozbor: technické specifikace elektrických silnoproudých rozvodů, podrobněji zaměřeno na paprskový a můstkový rozvod VN
2. Možnosti přechodu z paprskové na okružní formu
3. Ekonomická analýza transformace jedné sítě na druhou
4. Návrh realizace přechodu z paprskového na můstkový rozvod

Seznam doporučené literatury:

1. Fejt, Z., Čermák, J.: Elektroenergetika. Skripta ČVUT, 1985
2. Němeček, F.: Přenos a rozvod elektrické energie. Skripta ČVUT, 1983
3. Fencl, F.: Elektrický rozvod a rozvodná zařízení. Skripta ČVUT, 2009

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Aleš Krula, PRE Distribuce, a.s.

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.01.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **27.05.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, práce, projekty, SW atd.) uvedené v textu nebo přiloženém seznamu literatury.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce, panu ing. Aleši Krulovi za ochotu, cenné rady, pomoc a podklady, bez kterých bych nebyl schopen dílo vypracovat. Děkuji panu doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc., za rady a věcné připomínky. Díky patří rovněž panu doc. Ing. Zdeňku Müllerovi, Ph.D., který byl tak laskav a dovolil mi využít školní licenci softwaru E-Vlivy 3 a vlastně všem z katedry elektroenergetiky ČVUT FEL, kteří mi pravidelně umožňovali přístup do počítačové laboratoře, kde jsem tento program využíval. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům, kteří mi byli oporou v době studia.

.....

Abstrakt

Cílem této práce je analyzovat můstkový provoz distribuční sítě a porovnat ho s provozem paprskovým. Úkolem je zaměřit se na spolehlivost dávky elektrické energie a technické a ekonomické faktory provozu sítě jako můstkové. Při popisu problematiky jsem hledal možnosti provozu můstkově propojené sítě na základě ekonomické výhodnosti a elektrotechnické spolehlivosti a bezpečnosti. Podařilo se mi porovnat chody obou provozů sítě a ukázat výpočet ekonomických nákladů na výstavbu můstkové sítě s novým transformátorem. Na základě zjištěných údajů je možné stanovit výhody jednotlivých způsobů provedení sítě a učinit rozhodnutí, zdali je můstkový provoz sítě v konkrétní aplikaci výhodný či nikoliv.

Abstract

The main objective of this thesis is to analyse bridge operation of a distribution network and compare it to the beam network operation. The task is to focus on the reliability of electric energy supply, technical and economic factors of bridged operated network. While solving the problem, I was looking for the possibilities of bridge operation based on economic advantageousness and electrotechnical reliability and safety. I have succeeded in comparison of both network operations and I have shown how to calculate the expenses for buying and activation a new electric transformer. Based on the information I got, it is possible to tell the pros and cons of the particular network operation and to make a decision whether the bridge operation is worth constructing or not.

Klíčová slova

Distribuční síť, můstkový provoz sítě, vysoké napětí, nízké napětí, paprskový provoz sítě, spolehlivost dodávky elektrické energie, chod sítě, paralelní provoz transformátorů, venkovní vedení, kabelové vedení

Key words

Distribution network, network bridged operation, high voltage, low voltage, network beam operation, reliability of electric energy supply, load flow, parallel power distribution, outside feeder, cable feeder

Obsah

1	Seznam použitých zkratk	1
2	Úvod	2
3	Typy silnoproudých rozvodů distribuční sítě VN	3
3.1	Paprskový rozvod.....	3
3.2	Můstkový rozvod.....	3
3.3	Průběžný rozvod	4
3.4	Mřížový rozvod	5
4	Rozdělení distribuční sítě	6
4.1	Rozdělení podle uložení vodičů.....	6
4.2	Rozdělení podle napětí distribuční sítě (VVN, VN, NN)	6
4.2.1	Hladina VVN.....	6
4.2.2	Hladina VN.....	7
4.2.3	Hladina NN.....	7
5	Vodiče a kabely	7
5.1	Dimenzování vodičů a kabelů.....	8
5.1.1	Dimenzování vodičů s ohledem na pracovní teplotu.....	8
5.1.2	Jištění vodičů proti nadproudům a přepětím.....	8
6	Vedení distribučních sítí	9
6.1	Venkovní vedení.....	10
6.1.1	Vodiče pro venkovní vedení.....	10
6.2	Kabelové vedení	10
7	Provozovatele distribučních sítí v České republice	11
7.1	PREdistribuce, a.s.	12
8	Spolehlivost dodávky elektrické energie	13
8.1	Stupně důležitosti spotřeby elektrické energie.....	13
8.1.1	Spotřeba 1. stupně důležitosti	13
8.1.2	Spotřeba 2. stupně důležitosti	13
8.1.3	Spotřeba 3. stupně důležitosti	14
8.2	Vybrané ukazatele spolehlivosti dodávky elektrické energie	14
8.2.1	SAIDI.....	14
8.2.2	SAIFI	15
8.3	Porovnání ukazatelů SAIDI a SAIFI tuzemských DS.....	15
8.3.1	Podíl kabelových a venkovních vedení tuzemských DS	17
8.3.2	Motivační regulace kvality	18
9	Ekonomická stránka můstkového provozu sítě	19
9.1	Ekonomický přínos z pohledu distributora elektrické energie.....	20
9.2	Stávající bonus a jeho změna v návaznosti na změnu spolehlivosti.....	21
9.2.1	Bonus za nadstandartní SAIFI.....	22
9.2.2	Bonus za nadstandartní SAIDI	22
9.3	Náklady spojené s pořízením elektrotechnických zařízení.....	24
9.3.1	Pořízení a hospodárnost nového transformátoru	24
10	Porovnání paprskového a můstkového provozu sítě	28
10.1	Výpočetní model.....	28
10.1.1	Ustálený chod sítě	28

10.1.2	Paralelní chod transformátorů	29
10.2	Popis prvků sítě.....	31
10.2.1	Napájecí uzly.....	32
10.2.2	Transformátor 110/22 kV	32
10.2.3	Vedení	32
10.2.4	Zátěže	34
10.3	Software E-Vlivy 3	34
10.3.1	Chod sítě s oddělenými napáječi	35
10.3.2	Můstkový provoz sítě	36
10.3.3	Porovnání ztrát v obou provozech sítě	38
10.3.4	Zkraty	38
11	Závěr	42
12	Literatura	44
13	Seznam tabulek a obrázků	45
14	Přílohy	46
14.1	Příloha 1: Výkaz zisku a ztráty PREdistribuce, a. s.....	46
14.2	Příloha 2: Parametry použitých prvků sítě.....	47
14.3	Příloha 3: Parametry prvků sítě s větším zatížením	48
14.4	Příloha 4: Schéma paprskové sítě.....	49
14.5	Příloha 5: Porovnání zkratů	49

1 Seznam použitých zkratk

VVN	velmi vysoké napětí	u_k	poměrné napětí nakrátko
VN	vysoké napětí	S	zdánlivý výkon
NN	nízké napětí	S_n	jmenovitý zdánlivý výkon
U	napětí	P	činný výkon
(k)V	(kilo)volt	Q	jalový výkon
AlFe	lano z několika hliníkových žil, které jsou obtočeny kolem ocelového jádra	dU_n	úbytek napětí
$m.^\circ C.W^{-1}$	metr.Celsius.Watt ⁻¹ – jednotka měrné tepelné kapacity	dP	spotřeba činného výkonu
A	Ampér	dQ	spotřeba jalového výkonu
DS	distribuční soustava	I_{zkr}	zkratový proud
PREdi	PREdistribuce, a. s.	S_{zkr}	zkratový výkon
ERÚ	Energetický regulační úřad	U_1, U_2	jmenovité napětí primárního, sekundárního vinutí transformátoru
(M)VA	(mega)voltampér	P_k	ztráty nakrátko transformátoru
(M)Wh	(mega)watthodina	P_0	ztráty naprázdno transformátoru
(k)W	(kilo)watt	I_{n1}, I_{n2}	jmenovitý proud primárního, sekundárního vinutí transformátoru
(k)VAr	(kilo)voltampér reaktanční	$\cos \varphi$	účinník
Hz	Hertz		
I_{n1}, I_{n2}	jmenovitý proud primárního, sekundárního vinutí transformátoru		
XLPE	sestíněný polyetylen		
PE	polyetylen		
PVC	polyvinylchlorid		
X	reaktance		
Ω	Ohm		
B	magnetická indukce		
(m)H	(mili)henry		
Z	impedance		
U_k	napětí nakrátko		

2 Úvod

Elektrická energie v dnešní době představuje neodmyslitelnou součást každodenního života každého z nás. Je však třeba si uvědomit, že mezi elektrárnou a svítící žárovkou je oblast technologicky velmi náročných postupů, prvků, zařízení a zodpovědnosti. Problém výroby, přenosu a distribuce elektrické energie je velmi komplexní a je dobré zdůraznit, že první uspokojivé výsledky v tomto odvětví lidského vědění přišly až na přelomu 19. a 20. století.

Elektrizační soustava v plném rozsahu tohoto pojmu v sobě zahrnuje výrobu elektrické energie v elektrárnách, které v místě výroby přeměňují nejrůznější formy energie z nejrůznějších zdrojů (obnovitelné zdroje, fosilní paliva, jaderná energie a mnoho dalších) na energii elektrickou. Přenos elektrické energie velkého výkonu si žádá co nejvyšší kvalitu, spolehlivost a co nejmenší možnou ztrátovost, podobně jak si to žádá koncový spotřebitel. Ten pak díky dodávce elektřiny distribuční soustavou přemění dodanou elektrickou energii na požadovanou energii jiného druhu (mechanickou, světelnou, tepelnou apod.).

Elektrická energie je celosvětově rozšířená a v tuto chvíli nenahraditelná z důvodu řady nesporných výhod, které skýtá. Patří mezi ně hlavně dobrá účinnost při získávání z jiných forem energie, poměrně snadný transport i na dlouhé vzdálenosti, ekologičnost při její spotřebě a snadná přeměna zpět na jiné, spotřebitelem požadované formy energie. Rozšíření a využívání elektrické energie v takovém rozsahu, jak ho známe dnes, však znamená obrovské nároky na její dodávku, protože na ní závisí lidské životy, bezpečnost, majetek a kvalita života. Z tohoto důvodu je třeba zajistit, aby v každém okamžiku množství vyrobené a dodané energie pokrylo její spotřebu.

Předmětem mé práce bude analyzovat a porovnat způsoby provozu sítě z několika hledisek. Jedním z nich bude kvalita dodávky elektřiny v distribuční síti, která začíná v transformační stanici 110/22 kV a dále je vedena přes další transformace, jistící a ochranné prvky až ke koncovému uživateli, většinou na napětí 230 V. Budu zkoumat kvalitu elektrické energie z hlediska dosažených hodnot u společnosti PREdistribuce, a. s., a pokusím se analyzovat chod můstkového provozu sítě jak z hlediska ekonomického, tak z hlediska technického. Porovnání provozu můstkového a stávajícího paprskového by mělo poskytnout představu o možných výhodách a úskalích, kterými mohou být na jedné straně právě vyšší spolehlivost dodávky a s ní spojená ekonomická výhodnost a na straně druhé náročnější technické provedení a vyšší provozní a bezpečnostní nároky.

3 Typy silnoproudých rozvodů distribuční sítě VN

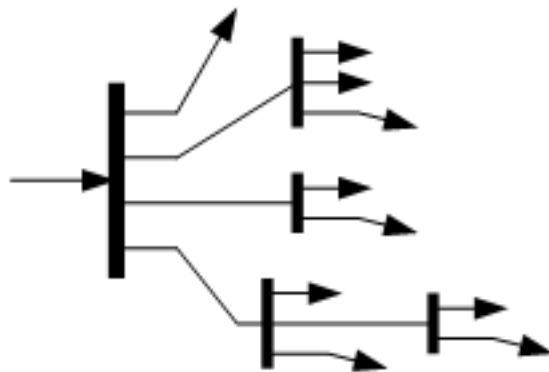
Struktura sítě ať už VVN, VN nebo NN je jedním ze zásadních kritérií, které určují její vlastnosti, použitelnost a výhody ve srovnání s jinými typy rozvodů.

Elektrický silnoproudý rozvod je soubor vodivých drah, které zajišťují spojení od zdroje elektrické energie až k jejímu spotřebiteli (spotřebiči). Tímto spojením se nemyslí jen samotné vodiče, ale i celá řada prvků se specifickou funkcí: měřicí a řídicí přístroje, jistící a ochranné prvky, uzly a rozvodná vybavení, spínací přístroje a další zařízení.

3.1 Paprskový rozvod

Paprskový provoz sítě VN je běžná varianta hned z několika důvodů. Jeho provoz je nejlevnější a struktura nejpřehlednější. Jednoduchá a přehledná topologie má však zásadní nedostatek v provozní spolehlivosti. Síť je napájena jedním napáječem, z kterého jsou vedeny odbočky přímo ke spotřebičům, nebo se jednotlivé paprsky dále dělí na více dílčích paprsků. Z tohoto popisu vyplývá, že výpadek postiženého paprsku vyřadí všechny spotřebiče, které jsou jím napájeny. Neexistuje jiná cesta a jiný zdroj napájení postižených odběratelů.

Pro dodávku elektrické energie 1. stupně, tedy tam, kde by výpadek spotřebiče znamenal ohrožení lidských životů, zničení majetku a zařízení nebo by způsobil velké finanční ztráty znehodnocením výroby, je tento rozvod nepoužitelný, neboť nemůže zajistit požadovanou spolehlivost dodávky. [1]



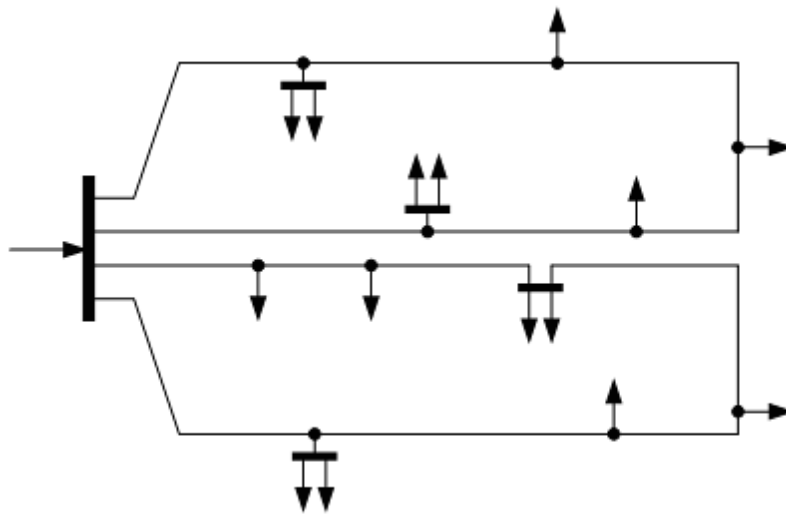
Obrázek 3-1: Struktura paprskového rozvodu [2]

3.2 Můstkový rozvod

Provoz distribuční sítě jako můstkové je využíván tam, kde je třeba klást větší důraz na spolehlivost dodávky elektrické energie. Systém se vyznačuje tím, že je napájen minimálně ze dvou napáječů a z hlavního okruhu jsou vedeny odbočky k jednotlivým spotřebičům nebo

k podružným rozvaděčům. Díky topologii s hlavním okruhem, ze kterého jsou vedeny odbočky ve formě dílčích paprskových nebo smyčkových vedení, se tato forma silnoproudého rozvodu nazývá též okružní či smyčková. Při poruše v části okruhu se postižená část odpojí a zbytek okruhu je dočasně provozován jako dva paprskové rozvody.

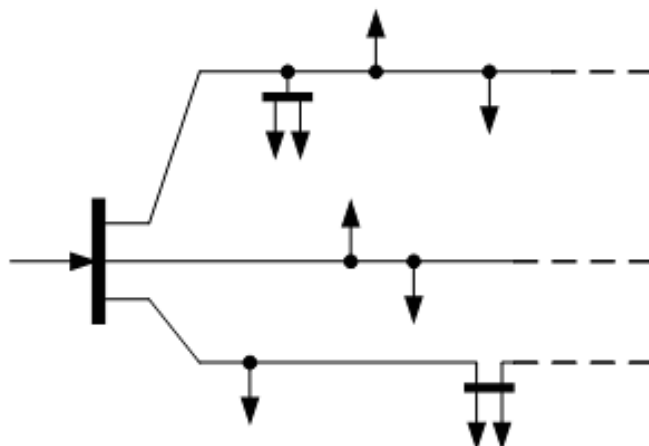
Z uvedeného vyplývá, že se tento typ sítě hodí tam, kde je třeba zajistit nepřerušovanou dodávku elektrické energie i v případě poruchy na vedení, tedy zejména v obytných zástavbách, velkých průmyslových závodech apod. Vyšší spolehlivost a kvalita jde ruku v ruce s vyššími náklady na vybudování a provoz a nižší přehledností. [1]



Obrázek 3-2: Struktura můstkového rozvodu [2]

3.3 Průběžný rozvod

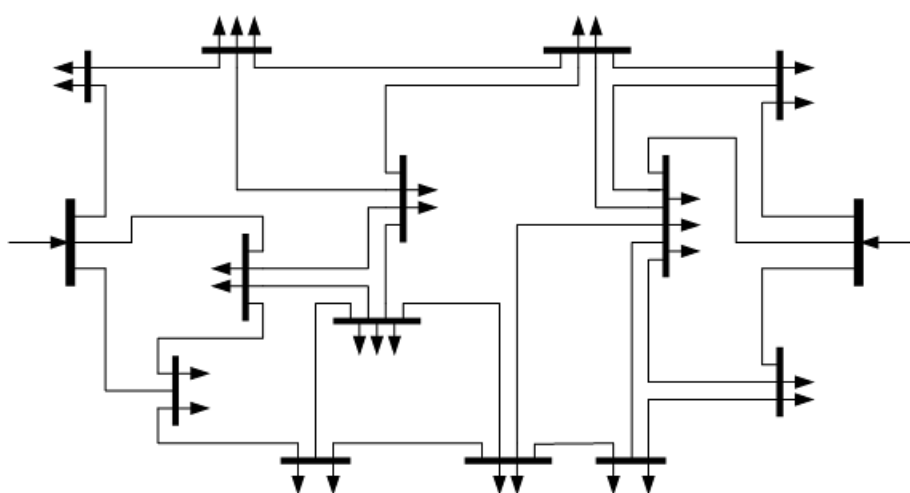
Tento typ elektrické silnoproudé rozvodné sítě se vyznačuje průběžným vedením, ze kterého jsou vedeny většinou paprskové odbočky. Průběžný svazek, nebo více svazků, prochází celou délkou napájeného spotřebitelského území. Je tedy násobně delší než odbočky z něj vyvedené. Odbočky napájejí spotřebiče nebo podružné rozvodnice paprskově nebo okružně. Využití průběžného rozvodu nacházíme zpravidla pro napájení osvětlení, ať už ve větších průmyslových halách nebo areálech, ale i v menších zástavbách vesnic. Je vhodný k napájení menších odběratelů, tedy spotřebičů s menšími výkony. Pro větší odběratele by tento rozvod nebyl vhodný zejména kvůli velkým odběrným proudům z jednotlivých odboček a velkému úbytku napětí po délce průběžného svazku. [1]



Obrázek 3-3: Struktura průběžného rozvodu [2]

3.4 Mřížový rozvod

Mřížový rozvod je proveden za účasti nejméně dvou napájecích míst. Hustě propojené rozvaděče a odbočky jsou tedy napájeny vždy ze dvou a více směrů. V uzlech tohoto rozvodu mohou propojovat větší počet paprsků. Takovýto silnoproudý elektrický rozvod může pokrývat plochu (městskou zástavbu, průmyslový areál) i s velkým odebíraným výkonem. Je zřejmé, že díky napájení každého uzlu rozvodu minimálně ze dvou směrů se tento rozvod vyznačuje velmi vysokou úrovní provozní spolehlivosti. Výpadek uzlu nebo porucha na vedení nezpůsobí přerušení dodávky elektřiny spotřebiči, protože ten je napájen dalším, minimálně jedním paprskem. Podobně jako u rozvodu okružního je vysoká spolehlivost a tedy praktické použití kompenzováno vysokými pořizovacími náklady, náročnější přehledností a nízkou možností využití propojovacích cest. [1]



Obrázek 3-4: Struktura mřížového rozvodu [2]

4 Rozdělení distribuční sítě

Pod pojmem distribuční síť rozumíme vedení a zařízení, která zásobují průmyslové objekty a obyvatele elektrickou energií. Distribuční síť vysokého napětí (VN) v sobě zahrnuje několik napěťových hladin od 1 do 50 kV. Podle konkrétního provozu napěťové hladiny očekáváme od sítě určitou spolehlivost dodávky elektrické energie. Odvíjí se od ní také technologické, investiční a provozní náklady, protože přenášet elektrickou energii na delší vzdálenosti je nevhodné na hladinách nižšího napětí.

Podle typologie uložení silnoproudého rozvodu jsme v kapitole 3 rozdělili několik základních provedení distribuční sítě. Existují však další dělení, podle kterých můžeme distribuční síť zařadit [3].

4.1 Rozdělení podle uložení vodičů

Podle způsobu uložení vodičů můžeme jednotlivé části sítí nebo celé sítě rozdělit podle do následující skupin [3]:

1. kabelová síť uložená v zemi
2. síť tvořená venkovními holými vodiči AlFe, které jsou upevněny na konzolách nebo sloupech
3. síť tvořená závěsnými kabely
4. smíšená síť tvořená kombinací výše uvedených způsobů

4.2 Rozdělení podle napětí distribuční sítě (VVN, VN, NN)

Napětí distribuční soustavy se pohybuje v jasně definovaných hladinách podle toho, z jaké transformační stanice napětí je energie dodávána.

4.2.1 Hladina VVN

4.2.1.1 Napěťová hladina 110 kV

Vedení 110 kV slouží k přenášení větších výkonů zpravidla transformací 400/110 kV do transformační stanice 110/22 kV, ze které je dále vedeno snížené napětí 22 kV. Existuje i méně používaná hladina 220 kV, která je jakýmsi mezistupněm mezi 400 a 110 kV. Větší odběratelé, jako zejména některé průmyslové podniky, které mají vyšší požadavky na odebíraný výkon, mohou být připojeni přímo na hladinu 110 kV a pomocí vlastních transformačních stanic si dle potřeby volí napěťovou hladinu dle svých potřeb.

Vedení takovéto napěťové hladiny se označuje jako vedení velmi vysokého napětí a vztahují se na něj zvláštní požadavky stran bezpečnosti a spolehlivosti z důvodu přenášeného výkonu.

4.2.2 Hladina VN

4.2.2.1 *Napětová hladina 35 kV*

Relativně málo se vyskytující napětová hladina 35 kV existuje v České republice především na části území severních Čech. Funkčně je shodná s hladinou 22 kV.

4.2.2.2 *Napětová hladina 22 kV*

Tato napětová hladina slouží k distribuci elektrické energie menším odběratelům, obcím a městům. Takovéto vedení již nemusí splňovat tak přísná bezpečnostní kritéria jako vedení 110 kV, nicméně přenášený výkon stále není zanedbatelný, proto i zde je třeba určitých opatření, která zajistí kvalitu dodávky elektrické energie.

Vedení 22 kV se zpravidla dále transformuje pro potřeby většiny běžných spotřebitelů na hladinu 400/230 V.

4.2.2.3 *Další hladiny*

V některých distribučních sítích se lze setkat i s jinými napětovými hladinami. Vyskytují se poměrně ojediněle a bývají spojeny s konkrétním distributorem elektrické energie. Je možné se setkat například s napětím 3 kV, 6 kV nebo 10 kV. Všechny tyto hladiny však plní podobné funkce jako blíž popsaná hladina 22 kV.

4.2.3 Hladina NN

4.2.3.1 *Napětová hladina 400/230 V*

Pro maloodběratele a běžné koncové spotřebitele je nejvýznamnější a nejpoužívanější hladina nízkého napětí 400/230 V fázového, respektive sdruženého napětí. Napětí této velikosti nemůže přenášet požadovaný výkon na velkou vzdálenost, proto je z vyšší napětové hladiny transformuje blízko místa spotřeby [3].

5 Vodiče a kabely

Pro silnoproudé rozvody elektrické energie se používají silové izolované vodiče jednak pro pevné uložení, jednak pro pohyblivé přívody (šňůry). Průřezy takovýchto vodičů se vyrábějí v normovaných rozměrech. Vodiče se označují písmennými značkami, které definují materiál žil, izolace a charakter vodiče. Dále pak pod písmennými označeními můžeme nalézt materiál pláště a obaly na plášti [4].

5.1 Dimenzování vodičů a kabelů

Při provozu silnoproudého elektrického rozvodu je třeba respektovat zadané provozní poměry s ohledem na [4]:

1. dovolenou provozní teplotu
2. hospodárnost
3. mechanickou pevnost
4. dynamické a tepelné účinky zkratových proudů
5. dovolený úbytek napětí
6. ochranu před nebezpečným dotykem

5.1.1 Dimenzování vodičů s ohledem na pracovní teplotu

Podle druhu izolace vodiče se určuje jeho dovolená provozní teplota při základní teplotě vzduchu.

Jmenovitý proud I_N se stanovuje pro konkrétní uložení vodiče při základní teplotě prostředí:

1. v klidném vzduchu
2. v zemi s měrným tepelným odporem $0,7 \text{ }^\circ\text{CmW}^{-1}$
3. při uložení ve vodě

Dovolený proud vodičů I je proud, který protéká vodiči, které jsou uloženy jinak, než jak je uvedeno výše nebo je teplota okolí jiná než základní. Dovolený proud se pak vypočítá podle vztahu

$$I = k_1 k_2 k_3 \dots k_i I_N$$

Kde I je dovolený proud vodičů [A]

I_N jmenovitý proud [A]

$k_1 \dots k_i$ přepočítané koeficienty pro jinou provozní teplotu, jiné provozní podmínky nebo jiný způsob uložení než základní [4]

5.1.2 Jištění vodičů proti nadproudům a přepětím

Nadproudy ve vodičích vznikají přetížením sítě nebo spotřebiče, nestabilitou (zvýšením) napětí, zkratem a dalšími vlivy. Jištění proti nadproudům se používá zejména kvůli zamezení tepelného přetížení vodiče, které může způsobit požár nebo výbuch a v důsledku je pak ohrožen život, zdraví, nebo majetek osob. Jako jisticích prvků se používá zpravidla jističů, pojistek a nadproudových relé. Podle [4] mají jmenované ochranné prvky následující vlastnosti, které předurčují jejich použití v konkrétních aplikacích.

5.1.2.1 Pojistky

Účelem pojistek je jistit vodiče proti nadproudu a zkratu. Až v druhé řadě mohou pojistky jistit elektrická zařízení, stroje nebo spotřebiče. Velké, zejména zkratové nadproudy, vypínají pojistku ve velmi krátkém čase, takže velikost nadproudu omezují. V principu pojistka funguje jako nejslabší část elektrického obvodu. Je tvořena materiálem s určitým elektrickým odporem. Při průchodu proudu pojistkou na ní vznikne úbytek napětí, který se projeví ztrátou výkonu ve formě tepla. Zahřátím vodiče pojistky dojde k jejímu přehoření a tím se přeruší elektrický obvod.

5.1.2.2 Jističe

Jističe jsou podobně jako pojistky samočinné elektrické přístroje, které jsou určeny pro omezení nadproudů. Jističe se provádějí v mnoha konstrukčních řešeních: jako jednopólové nebo trojpólové, střídavé nebo stejnosměrné, ochranné, jističe pro vedení, pro motory a tak podobně. Rozdíl mezi jističem a pojistkou vyplývá z jeho konstrukce. Na rozdíl od tavné pojistky, která se při splnění funkce ochranného prvku zničí a je třeba ji nahradit, jistič pouze vybaví a lze jej opět sepnout a uvést do původního stavu. Jistič má delší vypínací dobu, což při náhlých změnách proudu, zejména při zkratu, znamená, že jistič zkratový proud vypne, ale nemusí se mu podařit jej omezit.

Sítě VN a VVN používají pojistky a jističe jen s určitými omezeními. Vedení VN a VVN se zemní zemnicími lany a proti velkým přepětím, například po úderu blesku se venkovní vedení chrání bleskojistkami. Bleskojistka je zařízení spojené se zemí. Když se na ní objeví určité napětí, bleskojistka se zkratuje a svede proud. Poté se opět uzavře a stane se nevodivou. K ochranám silových zařízení například transformátorů, se používají systémy, které odpínají stroj od určitého chráněného území. Pro ochranu těchto zařízení se používají ochrany napěťové, rozdílové, distanční a jiné, protože většinou sledujeme i další parametry elektrické energie, na které reagují příslušné ochrany. Pro chránění zařízení v kabelových, ale i moderně vybavených venkovních sítích se používají logické ochrany, které vyhodnocují signály z měřících přístrojů. Tyto ochrany vyhodnocují měřené parametry a podle jejich velikosti nebo jiných měřených parametrů odpínají vedení nebo stroje.

6 Vedení distribučních sítí

Účel distribuční sítě byl popsán v kapitole 3. Podle tohoto účelu se volí různé způsoby jejího provedení, a to zejména pomocí venkovního vedení, nebo v zemi uloženého kabelového vedení. Vedení VN propojuje jednotlivé transformátory, které pak napájí další transformátory na jiné napěťové hladině, až dojde k transformaci napětí na požadovanou hodnotu pro koncového

odběratele. Použití venkovního nebo kabelového vedení závisí vždy na konkrétních podmínkách technických i ekonomických [5].

6.1 Venkovní vedení

V případě, že vedení není prováděno v hustě zastavěné lokalitě, používá se venkovního vedení. Při nedostatku prostoru, nebo při riziku, že by venkovní vedení mohlo ohrozit zdraví nebo majetek, je třeba se uchýlit k vedení kabelovému, uloženému v zemi. Venkovní vedení má výhodu v tom, že jeho pořízení je ekonomicky méně náročné. Není třeba hloubit trasy pro uložení kabelových vodičů a není ani třeba komplikovanějších technologických vybavení samotného vedení. Provozní náklady a náklady na údržbu jsou však od určité doby provozu vyšší, neboť na venkovní kabely působí řada vnějších vlivů, které ovlivňují jeho parametry. Je také náchylnější k mechanickým poruchám. Odstranění těchto poruch je však díky lepší přístupnosti snazší.

6.1.1 Vodiče pro venkovní vedení

Ze samotné podstaty elektrické sítě je jasné, že nejdůležitějším článkem soustavy jsou vodiče. Volba vhodného vodiče určuje provozní spolehlivost, bezpečnost ale i ekonomičnost provozu elektrické sítě. Podle volby vodičů je také třeba dimenzovat stožáry pro jejich uchycení. Venkovní vodiče a jejich parametry jsou ovlivňovány řadou faktorů, zejména klimatických a jsou na ně tedy kladeny následující nároky z hlediska bezproblémovosti provozu [5]:

1. vhodná měrná hmotnost vodičů tak, aby je šlo snadno montovat a dopravit, ale dostatečně veliká na to, aby nebyly ovlivňovány poryvy větru
2. dostatečně malý průměr vodičů kvůli omezení plochy, na kterou působí větrné poryvy, ale dostatečně velký pro omezení ztrát korónou
3. mechanická pevnost
4. odolnost proti chvění
5. odolnost proti působení chemických pochodů a změnám teploty
6. nízké pořizovací náklady

6.2 Kabelové vedení

Kabelová vedení nachází uplatnění tam, kde z nějakých důvodů nelze použít běžnější a provozně i investičně méně nákladné venkovní vedení. Tyto důvody mohou mít nejrůznější povahu. Nejčastěji se musí ke kabelovým vedením uchýlit z prostorových důvodů, kvůli městské zástavbě. Ovšem i atmosférické podmínky, například v silné námrazové oblasti, nebo

v oblasti s agresivním ovzduším, mohou vést k použití kabelového vedení. Pořizovací náklady, které jsou spojené jak s hloubením kabelových tunelů, tak se samotným provedením vodičů, jsou několikanásobně vyšší než u venkovního vedení. Kabelové vedení se běžně používá pro nízké a vysoké napětí do 110 kV.

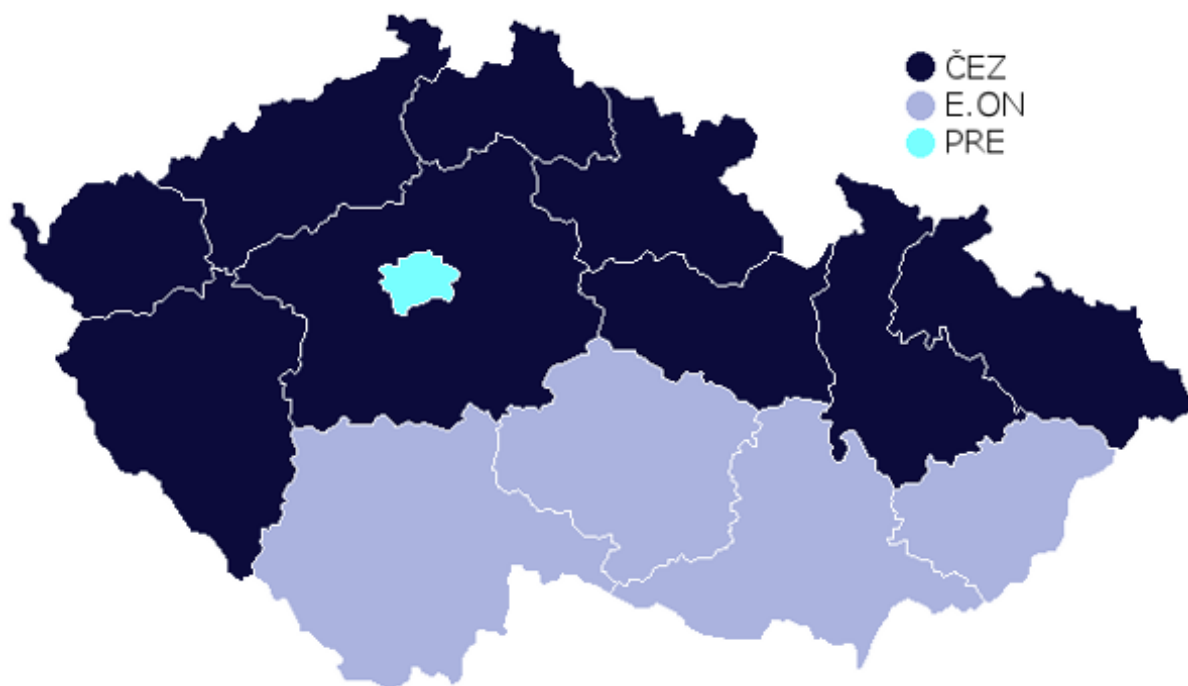
Pro jádra kabelových vedení se nejčastěji používá měď nebo hliník. Oba kovy mají určité výhody a nevýhody, měď má lepší elektrotechnické vlastnosti, hliníková jádra zase mechanické. Tato jádra se zhotovují buď jako plné vodiče homogenního průřezu, nebo jsou provedena jako lano z většího množství zapletených vodičů.

7 Provozovatele distribučních sítí v České republice

V České republice působí v současné době tři provozovatelé distribučních soustav. Jsou to ČEZ distribuce, a.s., E.ON distribuce, a.s. a PREdistribuce, a.s. Tyto společnosti jsou přímo připojeny na přenosovou soustavu, kterou provozuje ČEPS, a.s. a případně zásobují další lokální distributory elektrické energie, kteří jsou připojeni na zařízení provozované zmíněnými třemi provozovateli DS.

Provozovatelé distribučních soustav provádějí činnost v souladu s nařízeními Energetického regulačního úřadu a příslušných legislativ vycházejících z energetického zákona (č. 458/2000 Sb.). Jejich hlavním úkolem je spolehlivě a hospodárně dodávat elektrickou energii v požadovaném množství, požadované kvalitě a v požadovaný čas na požadované místo. Kromě toho zajišťují provozovatelé i podpůrné služby související s provozem distribuční soustavy [6][7].

Největší podíl odběratelů v České republice má společnost ČEZ distribuce, a. s., s přibližně 3 610 tisíci odběrných míst na všech napětíových hladinách. Druhou v pořadí dle počtu odběratelů je E.ON distribuce, a.s., s přibližně 1 514 tisíci odběratelů. Nejméně odběrných míst, zhruba 780 tisíc, má PREdistribuce, a.s. Důvod je zřejmý z obrázku 7-1. PREdistribuce provozuje distribuční soustavu pouze na území hlavního města Prahy a města Roztoky. E.ON distribuce pokrývá jižní Čechy a jižní a střední Moravu. Zbytek České republiky zásobuje elektrickou energií ČEZ distribuce [8].



Obrázek 7-1: Přehled distribučních soustav ČR [9]

7.1 PREdistribuce, a.s.

Na úvod této kapitoly bych rád vysvětlil, proč budu čtenáře blíže seznamovat pouze se společností PREdistribuce, a. s. Je to proto, že zadání bakalářské práce pochází právě od PREdistribuce, a. s., a dále zkoumaná síť a můstkový provoz se bude vztahovat na síť provozovanou PREdistribucí, a. s.

Společnost PREdistribuce, a. s., (zkráceně PREdi) zajišťuje dodávku elektrické energie na území Prahy a města Roztoky. Na území hlavního města Prahy dále zprostředkovává podpůrné služby v rámci DS. PREdi distribuuje elektřinu zhruba 780 tisícům odběratelům. Takto vymezené území se vyznačuje velmi hustou občanskou i průmyslovou zástavbou, což znamená vysoké nároky na spolehlivost a kvalitu dodávky elektrické energie. Oblast města Prahy rovněž klade vyšší požadavky na technická zařízení počínaje transformovnými až po vedení, které ze zřejmých důvodů musí být provedeno jako kabelové, uložené v hloubených trasách nebo v kabelových tunelech ložených v zemi.

PREdistribuce, a.s., byla založena v roce 2005 jako dceřiná společnost Pražské energetiky, a. s., a je součástí Skupiny PRE. PREdistribuce, a.s., je držitelkou licence na distribuci elektřiny č. 120504 769, udělené energetickým regulačním úřadem v roce 2005 s účinností od 1. 1. 2006. PREdistribuce disponuje 22 transformovnými 110/22 kV [10].

8 Spolehlivost dodávky elektrické energie

Pod pojmem spolehlivost dodávky elektrické energie je myšlena provozní spolehlivost silnoproudého elektrického rozvodu a připojených zařízení. Rozumí se jím schopnost této soustavy přenést a distribuovat elektrickou energii v žádaném množství a kvalitě na požadované místo v požadovaném čase. Podle náročnosti a požadavků je třeba přizpůsobit elektrický silnoproudý rozvod, což může ve zvláštních případech znamenat náročnější provedení rozvodu a přístrojového vybavení.

8.1 Stupně důležitosti spotřeby elektrické energie

Vzhledem k obecné důležitosti elektrické energie se dělí odběratelé na skupiny, podle závislosti na její dodávce. V určitých případech je nepřerušovaná dodávka elektrické energie otázkou ohrožení života, jako například ve zdravotnických zařízeních. Takovíto odběratele proto potřebují jistotu nepřetržitého zásobení elektřinou. Jistě je patrný rozdíl mezi výpadkem napájení ve fakultní nemocnici a v domácnosti, proto se odběratelé dělí do následujících tří skupin.

8.1.1 Spotřeba 1. stupně důležitosti

Jako spotřebiče 1. stupně důležitosti označujeme ty, u nichž při výpadku napájení, který způsobí jejich nefunkčnost, může dojít k ohrožení života nebo zdraví osob, nebo ty spotřebiče, jejichž výpadek má za následek značné ekonomické či technologické ztráty. Za spotřebiče 1. stupně důležitosti bývají označovány například zdravotnická zařízení, zařízení pro zpracování dat, vojenské a zásadní administrativní objekty a podobně.

Zajištění nepřerušované dodávky elektrické energie musí být realizováno záložním zdrojem elektrické energie, jímž je zpravidla silový transformátor, který je napojen na nadřazenou síť elektrizační soustavy (např. VVN) nebo vlastní generátor (motorgenerátor, akumulátory, parogenerátor ...) [1]. Zdvojením (nebo obecně znásobením) napáječů ve smyslu můstkového nebo mřížového provozu lze rovněž zabezpečit nepřerušovaný přístup k elektrické energii.

8.1.2 Spotřeba 2. stupně důležitosti

U takovýchto spotřebitelů není nezbytná nepřetržitá dodávka elektrické energie, protože výpadek zařízení neohrozí zdraví osob ani nezpůsobí zásadní ekonomické ztráty. Výpadek se projeví zastavením výroby, avšak nedojde u něj k narušení technologií (ani zdraví osob). Dodávku elektrické energie je třeba, pokud možno, co nejrychleji obnovit, avšak nevyžadují se

zvláštní zařízení či opatření zajišťující nepřetržitou dodávku energie z náhradních zdrojů. Příkladem spotřeby 2. stupně důležitosti jsou dílny, průmyslové provozy nebo obráběcí stroje [1].

8.1.3 Spotřeba 3. stupně důležitosti

Tímto posledním stupněm důležitosti dodávky elektrické energie rozumíme všechny ty spotřebitele, jež nespádají ani do jedné z předchozích dvou skupin. Jsou zde zahrnuta zařízení, u nichž přerušení dodávky elektrické energie nezpůsobí větší komplikace ve smyslu zdravotním, ekonomickém nebo technologickém. Zahrnujeme sem rozvod energie do domácností, škol, správních budov, úřadů (s výjimkou těch, které by při výpadku přišly například o důležitá data počítačové sítě), sklady materiálu a další [1].

8.2 Vybrané ukazatele spolehlivosti dodávky elektrické energie

Pro číselné vyjádření a porovnání jednotlivých distribučních soustav z hlediska spolehlivosti dodání elektrické energie se využívá několika ukazatelů, které jsou ovšem všechny jistou obdobou dvou základních. Nejzajímavějšími informacemi popisující kvalitu dodávky elektrické energie je průměrná doba trvání výpadku a průměrný počet výpadků na jednoho odběratele připojeného v rámci jedné distribuční sítě. Tyto ukazatele se nazývají SAIDI a SAIFI a v následující podkapitolách budou podrobněji probrány. Používanými obdobami těchto ukazatelů je například ukazatel CAIDI, který popisuje průměrnou dobu trvání jednoho přerušení dodávky elektřiny. Je však patrné, že jde pouze o podíl dvou předchozích popsáných ukazatelů – $CAIDI = SAIDI/SAIFI$.

8.2.1 SAIDI

Z anglického System Average Interruption Duration Index (zkráceně SAIDI) je ukazatelem spolehlivosti dodávky elektrické energie. Tento index znázorňuje poměr součtu doby trvání přerušení dodávky elektrické energie jednotlivým spotřebitelům ku celkovému počtu odběratelům neboli [11]:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot N_i}{N}$$

kde	$SAIDI$ je	ukazatel spolehlivosti dodávky elektrické energie	[min.rok ⁻¹]
	t_i	doba trvání i -tého přerušení dodávky elektrické energie	[min]
	N_i	počet spotřebitelů postižených i -tým přerušením dodávky elektrické energie	

N celkový počet odběratelů.

8.2.2 SAIFI

Z anglického System Average Interruption Frequency Index (zkráceně SAIFI) je podobným ukazatelem, jako je předchozí SAIDI. Rozdíl mezi oběma indexy je takový, že SAIDI počítá s dobou přerušeni dodávky elektrické energie, ale SAIFI místo doby kalkuluje s počtem jednotlivých přerušeni na odběratele. Dá se tedy formulovat vztahem [11]:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot N_i}{N}$$

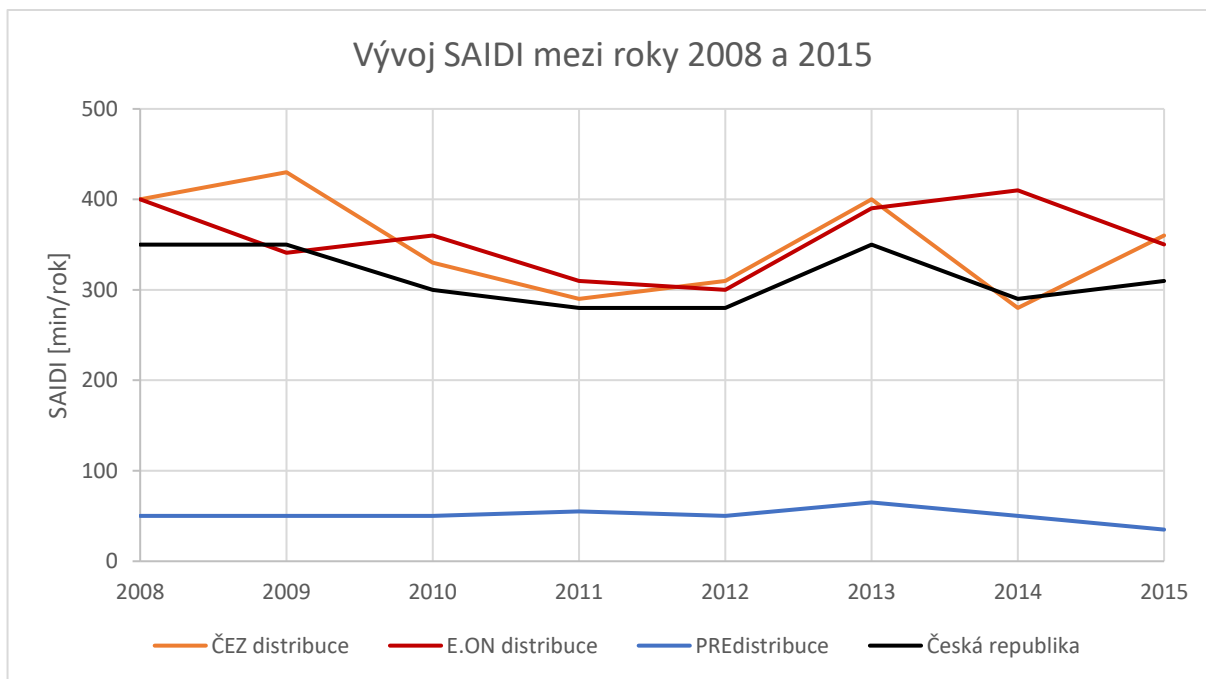
kde $SAIFI$ je ukazatel spolehlivosti [rok⁻¹]
 n_i je počet přerušeni dodávky elektrické energie

8.3 Porovnání ukazatelů SAIDI a SAIFI tuzemských DS

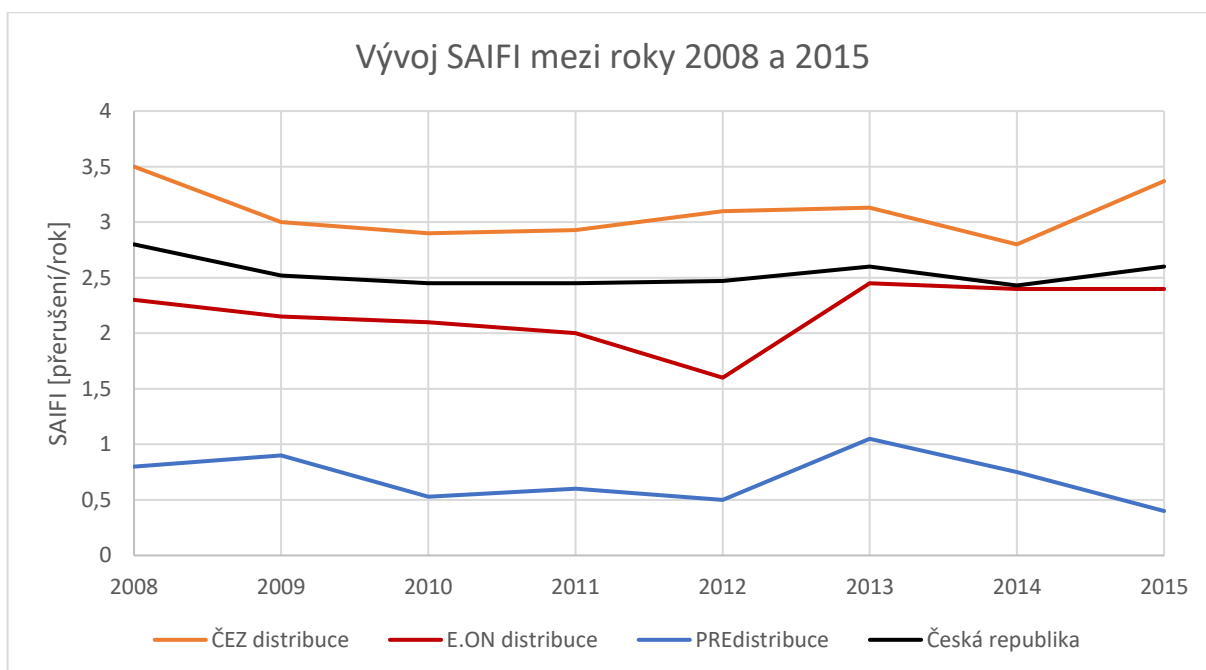
Ukazatelé SAIDI a SAIFI tak, jak jsou popsány v odstavci 8.2, jsou hlavními kritérii pro hodnoceni kvality dodávky elektrické energie, z čehož plyne jejich důležitost a význam. Energetický regulační úřad (ERÚ) v této souvislosti zavádí takzvaný Mechanismus motivační regulace kvality, jehož kritéria jsou právě dva ukazatele nepřetržitosti SAIDI a SAIFI.

Jednotlivým držitelům licence na distribuci elektrické energie jsou stanoveny individuální parametry ukazatele kvality. V případě jednotlivých ukazatelů kvality, které se označí jako SAIDI_Q a SAIFI_Q, se jedná o ukazatele celosystémové. Znamená to, že platí pro celou distribuční soustavu příslušného provozovatele bez ohledu na napěťovou hladinu [12].

Držitelům licence distribuce elektrické energie se určí výše penále nebo bonusu v závislosti na úrovni kvality dodávky elektrické energie dle dosažených hodnot ukazatelů nepřetržitosti distribuce elektrické energie za rozhodné období (většinou 1 rok) vzhledem k úřadem (ERÚ) stanoveným limitům a požadavkům.



Obrázek 8-1: Ukazatel nepřetržitosti SAIDI v období let 2008 až 2015 tuzemských DS [8]



Obrázek 8-2: Ukazatel nepřetržitosti SAIFI v období let 2008 až 2015 tuzemských DS [8]

Grafy 8-1 a 8-2 ukazují vývoj ukazatelů kvality dodávky elektrické energie ve sledovaném období mezi léty 2008 až 2015¹. V obou případech je patrné, že nejspolehlivějším dodavatelem je PREdistribuce, a. s., s nejnižším počtem přerušeni na odběratele za rok i s nejnižším počtem minut přerušeni na odběratele za rok. Je však nutné brát v této souvislosti v úvahu skutečnosti,

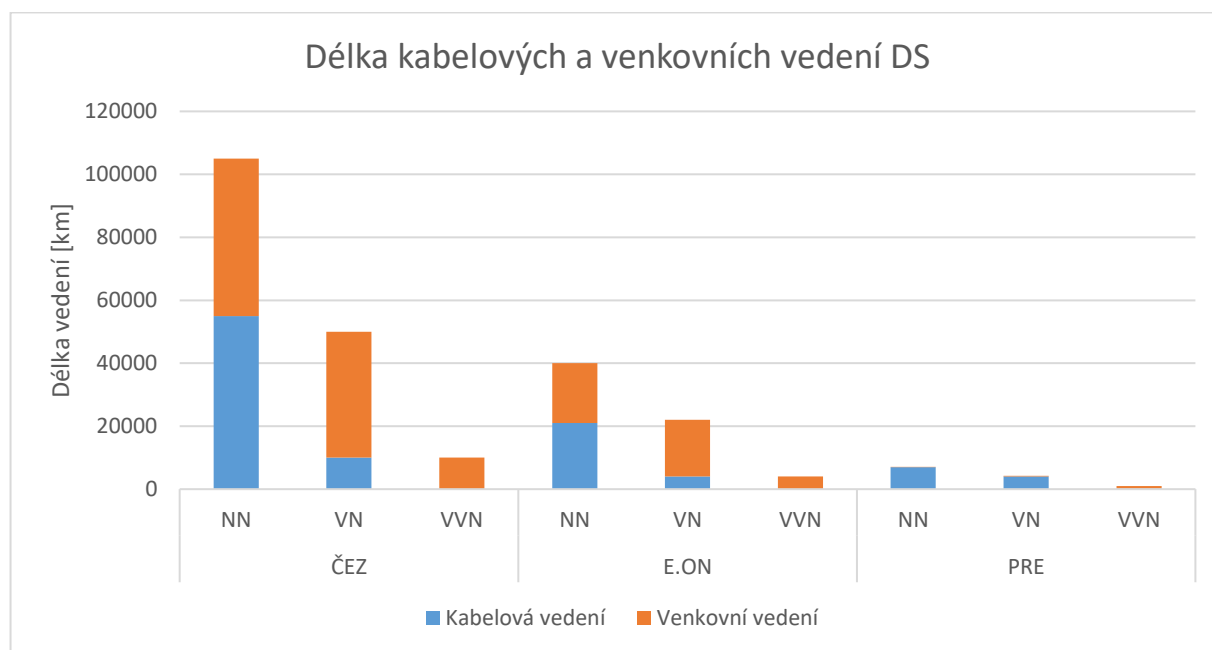
¹Data obsahují období končící rokem 2015. Čtvrté čtvrtletí roku 2016 ještě nebylo ERÚ vyhodnoceno, a proto nelze považovat data za rok 2016 za kompletní. Z tohoto důvodu nejsou v grafech zaznamenána.

kteří objasňují grafy a text v následujícím odstavci, a sice většinový podíl kabelových vedení na distribuční síti.

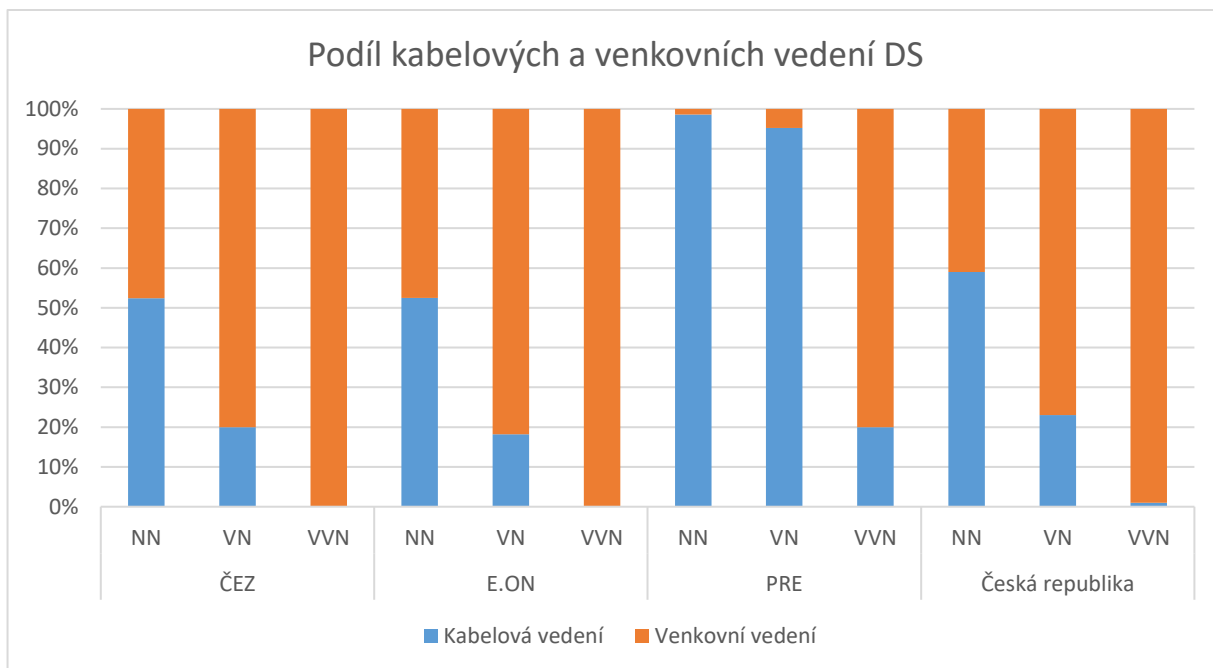
Z grafů 8-1 a 8-2 je též možno vyčíst, že celonárodní trend vývoje SAIDI a SAIFI přibližně udává největší český distributor elektrické energie ČEZ distribuce a. s., protože má vliv na nejvíce odběrných míst v ČR.

8.3.1 Podíl kabelových a venkovních vedení tuzemských DS

PREdistribuce, a. s., je na rozdíl od zbylých dvou provozována jako městská síť. To v důsledku znamená, že zásobuje méně uživatelů, ale zejména, že kvůli prostorovým možnostem jsou vedení realizována jako kabelová uložená v zemi. Tato varianta sice znamená vyšší náklady na výstavbu a složitější odstranění případných poruch, je však velmi odolná vůči klimatickým a jiným náhodným vlivům. Zejména povětrnostní podmínky, námraza nebo poškození například pádem stromu jsou eliminovány na minimum. Obrázky 8-3, respektive 8-4, znázorňují absolutní délky vedení jednotlivých DS, respektive poměr mezi délkou kabelových a venkovních vedení.



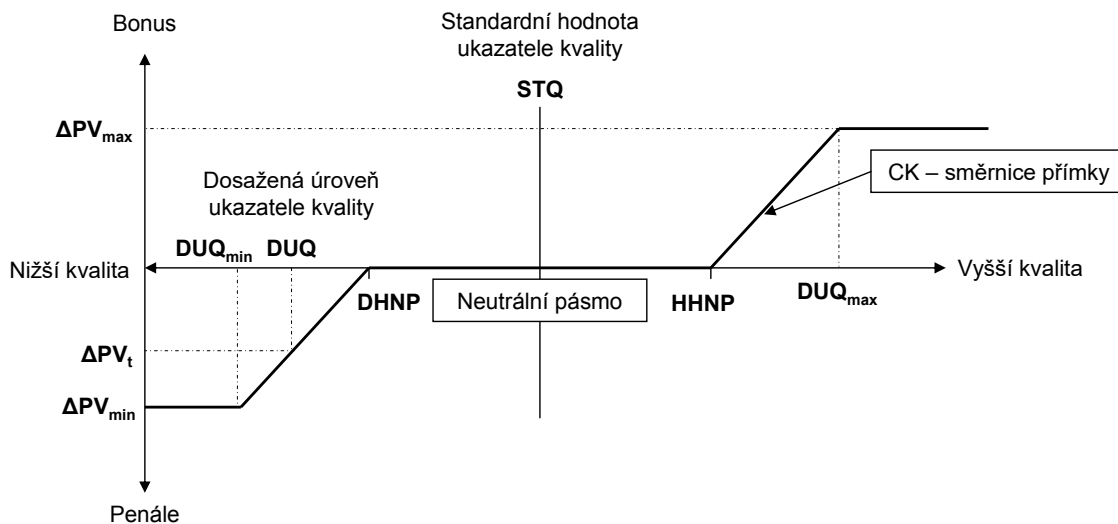
Obrázek 8-3: Celková délka vedení jednotlivých tuzemských DS [8]



Obrázek 8-4: Podíl kabelových a venkovních vedení distribučních soustav České republiky [8]

8.3.2 Motivační regulace kvality

Energetický regulační úřad pomocí motivační regulace kvality určuje požadované parametry distribuce elektrické energie společně s horní, respektive dolní mezí, od kterých jsou uplatňovány maximální bonusy, respektive penále. Rovněž se dle vyhlášky ERÚ počítá s takzvaným neutrálním pásmem, což je interval, v rámci něhož nedojde k uplatnění bonusu ani penále.



Obrázek 8-5: Schéma motivační regulace kvality [12]

Kde [12] ΔPV_t je finanční vyjádření bonusu nebo penále za dosaženou kvalitu [Kč]
 t pořadové číslo sledovaného regulovaného roku

DUQ	hodnota dosažené úrovně kvality v období rozhodném pro hodnocení kvality služeb pro příslušný rok regulačního období	[min/rok; přerušení/rok]
CK	jednotková cena kvality	[Kč]
ΔPV_{\max}	maximální hodnota bonusu za dosaženou službu	[Kč]
ΔPV_{\min}	maximální hodnota penále za dosaženou službu	[Kč]
DHNP	dolní hranice neutrálního pásma	[min/rok; přerušení/rok]
HHNP	horní hranice neutrálního pásma	[min/rok; přerušení/rok]
STQ	hodnota požadované úrovně kvality ($SAIDI_Q$, $SAIFI_Q$)	[min/rok; přerušení/rok]
DUQ_{\max}	limitní hodnota ukazatele kvality, od níž je uplatňována maximální hodnota bonusu za dosaženou kvalitu služeb	[min/rok; přerušení/rok]
DUQ_{\min}	limitní hodnota ukazatele kvality, od níž je uplatňována maximální hodnota penále za dosaženou kvalitu služeb	[min/rok; přerušení/rok]

8.3.2.1 Výjimečné události nezahrnuté do výpočtů $SAIDI_Q$, $SAIFI_Q$

Do výpočtů motivační regulace kvality jsou zahrnuty pouze události, na které má provozovatel DS vliv. Podle přílohy č. 4, vyhlášky č. 540/2005 Sb. nejsou do výpočtu zahrnuty [12]:

1. poruchová (neplánovaná) přerušení přenosu nebo distribuce, která jsou zapříčiněná poruchou způsobenou zařízením přenosové nebo distribuční soustavy nebo jejím provozem za nepříznivých povětrnostních podmínek
2. neplánovaná přerušení přenosu nebo distribuce způsobená zásahem třetí osoby
3. neplánovaná přerušení způsobená událostí mimo soustavu daného provozovatele soustavy nebo výrobce
4. neplánovaná přerušení přenosu nebo distribuce elektřiny vynucená
5. neplánovaná přerušení přenosu nebo distribuce elektřiny mimořádná

9 Ekonomická stránka můstkového provozu sítě

Simulacemi a porovnáním sítí s jedním napáječem, tedy sítí, které jsou provedeny jako paprskové a můstkových sítí, které jsou napájeny minimálně ze dvou napáječů, zjistím, jakým způsobem se liší obě provedení při propojení napájecích zdrojů. Na základě vyhodnocení těchto informací mohu odhadnout vývoj spolehlivosti dodávky elektrické energie a její eventuální

ekonomický dopad. Zejména se zaměřím na ukazatele spolehlivosti z kapitoly 5.2, protože to jsou nejdůležitější ukazatele, podle kterých ERÚ stanovuje nezanedbatelné bonusy (případně penále) pro distributory elektrické energie, konkrétně pak pro společnost PREDi.

Na úrovni VN se jednotlivé části sítě, které fungují jako paprsky často budují propojené s oddělovacím zařízením. Provoz pak probíhá při rozpojené propojce, ale možnost sepnutí existuje. Tato možnost se buduje zejména pro případ, kdy je třeba na vedení provádět práce, revize, opravy a podobně. V takovém případě se odpojí potřebná část a zbytek se napojí na druhou cestu, aby alespoň v části sítě byla zachována dodávka elektrické energie.

Přechod na můstkový provoz s více napáječi může zahrnovat i náklady za pořízení dalších napáječů (transformátorů), náklady na propojovací cesty, tedy v případě pražské sítě náklady na kabelové tunely, náklady na dispečink, sledovací, měřicí a ovládací techniku a další a to v případě, že neexistuje varianta již existujícího spojení s jinou částí sítě.

9.1 Ekonomický přínos z pohledu distributora elektrické energie

Budeme-li předpokládat, že přechod z paprskové (či jiné méně spolehlivé formy elektrického rozvodu) na okružní formu přinese zvýšení spolehlivosti dodávky elektřiny v podobě nižších ukazatelů SAIDI a SAIFI. Pak se tato změna projeví pozitivně v ekonomickém portfoliu distributora elektrické energie ve smyslu přírůstku peněz jako bonusu od ERÚ.

Jinými slovy, pro distributora je výhodné dodávat elektrickou energii co nejspolehlivěji, neboť Energetický regulační úřad tuto nadstandardní spolehlivost ocení peněžitým bonusem. Tento bonus se stanovuje pro každou distribuční společnost zvlášť.

Pro oba ukazatele spolehlivosti dodávky elektrické energie ERÚ stanovuje referenční hodnotu a hranice neutrálního pásma (obrázek 8-5). Dále ERÚ určuje roční zpříšňování referenčních hodnot a tím pádem určuje hodnoty požadované do příštích několika let. Tyto hodnoty jsou pro distributory elektrické energie závazné. Z povahy různosti distribučních sítí vyplývá, že referenční hodnoty SAIDI a SAIFI každého dodavatele jsou odlišné. Odlišné jsou také šířky neutrálního pásma, maximální bonusy, případně penále, za nedodržení předepsaných limitů.

SAIFI	Referenční hodnota	Roční zpříšňování	Požadovaná hodnota pro rok 2016	Požadovaná hodnota pro rok 2017	Požadovaná hodnota pro rok 2018	Hranice neutrálního pásma	Maximální bonus/penále
ČEZ Distribuce	2,36	1,25 %	2,331	2,301	2,273	±5 %	±15 %
E.ON Distribuce	1,57	0,75 %	1,558	1,535	1,553	±5 %	±15 %
PREdistribuce	0,44	(25 %, 3 %) ²	0,33	0,32	0,31	±10 %	±25 %

² Zpříšnění 25 % platí pro následující rok, tedy rok 2016. V dalších letech se hodnota zpříšňuje o 3 %.

SAIDI	Referenční hodnota	Roční zpříšňování	Požadovaná hodnota pro rok 2016	Požadovaná hodnota pro rok 2017	Požadovaná hodnota pro rok 2018	Hranice neutrálního pásma	Maximální bonus/penále
ČEZ Distribuce	262,7	2,50 %	256,133	249,729	243,486	±5 %	±15 %
E.ON Distribuce	275,36	5,00 %	261,592	248,512	236,087	±5 %	±15 %
PREdistribuce	37,37	5 %	35,502	33,726	33,726	±10 %	±25 %

Tabulka 9-1: Závazné parametry ukazatelů kvality pro jednotlivé společnosti [12]

9.2 Stávající bonus a jeho změna v návaznosti na změnu spolehlivosti

Cílem ERÚ v rámci motivační regulace kvality je dostatečně motivovat provozovatele distribučních soustav ke zvyšování kvality dodávky elektřiny koncovým odběratelům. Z tohoto důvodu ERÚ navýšil maximální limit bonusu, respektive penále (kapitola 7.3.2) z původních $\pm 3 \%$ na $\pm 4 \%$ ze zisku dané společnosti. Jelikož ERÚ vypočítává bonus nebo penále s obou ukazatelů SAIDI i SAIFI, maximální bonus nebo penále za každý z nich se určuje z poloviny zisku společnosti.

Tabulka 14-1 v Příloze 1 ukazuje výkaz zisku a ztráty společnosti PREdistribuce a.s. v tisících Kč pro dva roky – 2014 a 2015. Data z účetní závěrky za rok 2016 bohužel nejsou k dispozici, nicméně pro ukázkou výpočetního mechanismu tyto hodnoty poslouží dobře [10]. Podle této výsledovky, přesněji řečeno z výsledku hospodaření společnosti, mohu vypočítat finanční ohodnocení PREdi za spolehlivost dodávky elektrické energie odběratelům.

Výsledek hospodaření za běžnou činnost v hodnotě **1 052 026 tis. Kč** určuje maximální výši bonusu, který může PREdi obdržet. 4 % z této částky je přibližně **42 milionů Kč**. Maximální výše bonusu nebo penále pro oba ukazatele kvality je pak polovina ze zmíněné částky, tedy **21 milionů Kč**.

Skutečné dosažené hodnoty kvality dodávky elektrické energie ukazuje následující tabulka.

	2015		2014	
	SAIFI [přerušení/rok]	SAIDI [min/rok]	SAIFI [přerušení/rok]	SAIDI [min/rok]
ČEZ Distribuce	3,29	361,72	2,77	281,42
E.ON Distribuce	2,27	352,9	2,27	409,3
PREdistribuce	0,36	30,93	0,74	43,37

Tabulka 9-2: Hodnoty ukazatele kvality provozovatelů DS v letech 2015 a 2014 [12]

Pomocí grafického znázornění schématu regulační motivace kvality a tabulek 9-1 a 9-2 mohu spočítat reálný bonus pro společnost PREdi.

9.2.1 Bonus za nadstandartní SAIFI

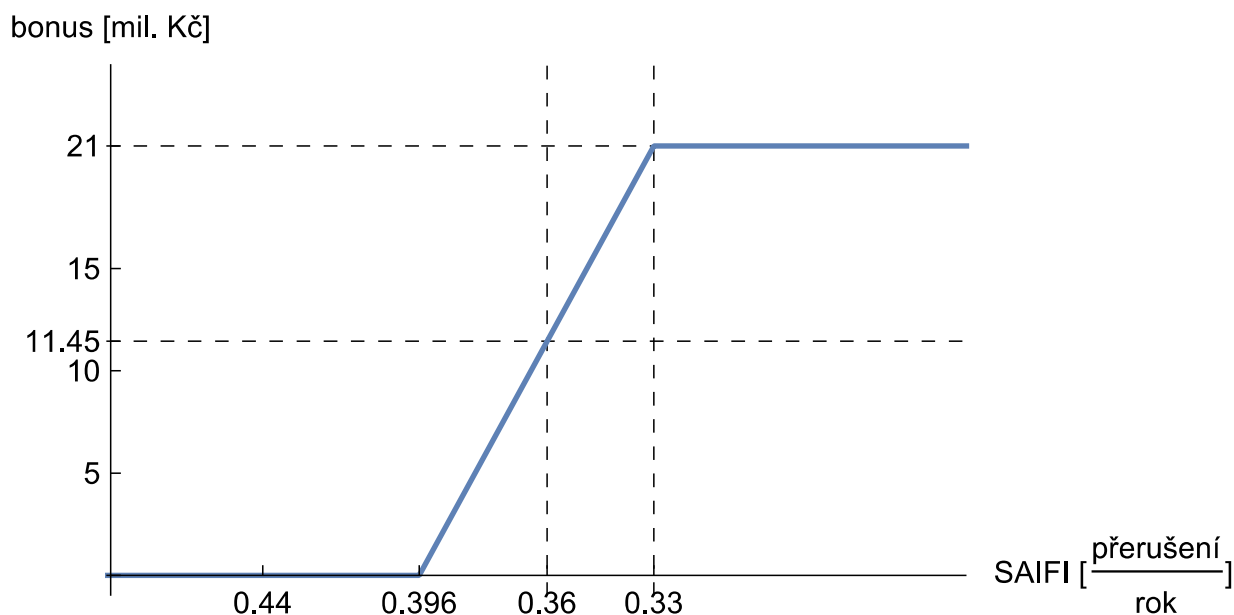
Z tabulek je na první pohled patrné, že PREDi splňuje požadované hodnoty spolehlivosti dodávky elektrické energie. Hodnoty jsou nižší než referenční, čili se pohybují v pravé části grafu, v oblasti neutrálního pásma nebo bonusu. Šířky jednotlivých pásem jsou rovněž stanoveny, pro neutrální pásmo je to 10 % referenční hodnoty, pro maximální bonus pak 25 % referenční hodnoty.

Hranice neutrálního pásma vyčíslená pro ukazatel SAIFI je 10 % z referenční hodnoty 0,44 přerušeni za rok, tedy 0,396 přerušeni za rok.

Hranice maximálního bonusu, tedy 25 % z 0,44 přerušeni za rok je 0,33 přerušeni za rok.

Z vypočteného plyne, že PREDi obdrží od ERÚ bonus menší než maximální, tedy **méně než 21 mil. Kč**. Z hodnot hranic pásem a znalostí maximálního možného bonusu pak lze snadno stanovit reálný bonus, který PREDi obdržela za rok 2015, jako bod ležící na přímce jednotkové ceny kvality. Skutečný bonus tedy činí **11,455 mil. Kč**.

Následující graf znázorňuje výše popsany bonus, za ukazatel SAIFI. Všechny hodnoty, jak maximální bonus, referenční hodnota i skutečně dosažená výše bonusu jsou zřejmé z textu.



Obrázek 9-1: K výpočtu bonusu za SAIFI pro PREDistribuci, a. s. za rok 2015

9.2.2 Bonus za nadstandartní SAIDI

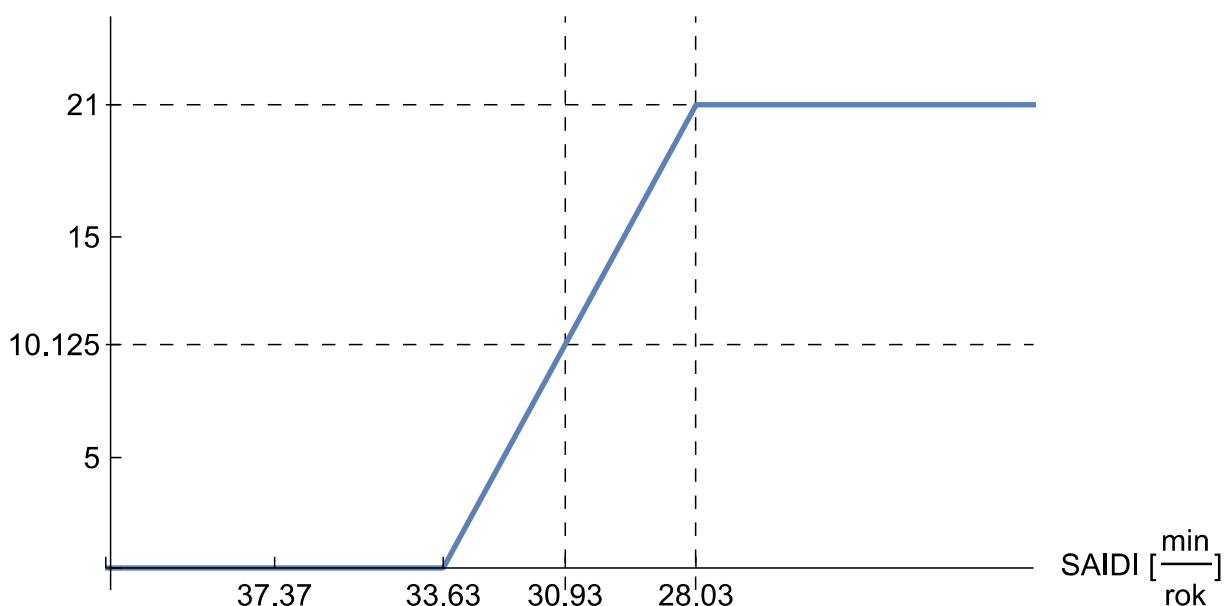
Analogicky jako pro SAIFI můžeme stanovit bonus, který PREDi obdrží za nízkou hodnotu ukazatele SAIDI.

Šířky jednotlivých pásem jsou shodné pro SAIFI i SAIDI a jsou uvedeny v tabulce 9-1. Spočítal jsem, že hraniční hodnota neutrálního pásma SAIDI je 33,63 minut za rok a hranice maximálního bonusu je 28,03 přerušení za rok.

Z výpočtu plyne, že PREDi opět obdrží od ERÚ bonus ve výši odpovídající přímce jednotkové ceny kvality pro ukazatel SAIDI, konkrétně tedy za dosažnou hodnotu **30,93 minut za rok** PREDi získá **10,125 mil. Kč**.

Celkový bonus od ERÚ, který PREDi získá je součtem dílčích bonusů za jednotlivé ukazatele. Celkem tedy PREDi získá asi **21,580 mil. Kč**.

bonus [mil. Kč]



Obrázek 9-2: K výpočtu bonusu za SAIDI pro PREDistribuci, a. s. za rok 2015

Dá se očekávat, že při můstkovém provozu a zdvojení napájecích transformátorů, kterážto problematika bude probrána v následující kapitole, klesnou ještě více oba ukazatele spolehlivosti SAIDI a SAIFI. Tento pokles by v souladu s předchozími výpočty a grafy 9-1 a 9-2 znamenal ještě větší bonus od ERÚ.

Respektujeme-li tabulku 9-1, která určuje roční zpřísnování limitů SAIDI a SAIFI, je třeba si uvědomit, že distributoři elektrické energie musí podnikat i další opatření vedoucí ke zvýšení spolehlivosti, než jen topologické změny sítě a připojování napáječů. Tento způsob zvýšení spolehlivosti by sám o sobě nemusel stačit na roční zpřísnování, už jen kvůli časové náročnosti přestavby sítě. Z tohoto důvodu je velice těžké predikovat vývoj ukazatelů kvality dodávky elektřiny pouze na základě zapojení dalšího napáječe k odběrné oblasti. Jelikož nemám dostatečné množství informací o všech opatřeních, které PREDi podniká za účelem zlepšení dodávky elektřiny, a navíc by tato problematika přesahovala možnosti této práce, nelze přesně určit parametry SAIDI a SAIFI v budoucích letech. Zároveň tak je nemožné předpovědět

poruchy v síti, kromě těch, které lze odhadnout například ze stáří zařízení. Z těchto důvodů se podobné výpočty provádějí až na základě skutečných změřených hodnot, které se mohou lišit od předchozích odhadů.

9.3 Náklady spojené s pořízením elektrotechnických zařízení

Mnou zkoumaná modelová síť jako paprsková, je napájena z jednoho napáječe, tedy z jednoho transformátoru 110/22 kV. Okružní síť by znamenala propojení připojených odběrů k jiné síti s již pracujícím transformátorem, který by musel být dimenzován na převzetí případné zátěže při výpadku prvního zdroje. Druhou možností je zdvojení napájení, tedy připojení nového transformátoru, který bude pracovat paralelně s prvním a oba dva budou ekvivalentně fungovat jako zdroj zálohy pro případ výpadku jednoho z nich.

9.3.1 Pořízení a hospodárnost nového transformátoru

Při pořizování a uvádění do provozu nového transformátoru je třeba uvažovat mimo pořizovací ceny transformátoru a nákladů na zbudování transformovny i následující položky:

1. náklady na dopravu a montáž
2. údržba strojů
3. ztrátové náklady
4. řídicí systémy ovládající složitěji pracují paralelní provoz
5. mzdové náklady související s dispečinkem paralelně pracující sítě

Pořizovací cena transformátoru závisí na více faktorech jako například tržní cena mědi a ostatních kovů použitých na výrobu jader, vinutí a dalších součástí. Nicméně podle [6] budu předpokládat, že se cena nového transformátoru o výkonu 63 MVA pohybuje okolo 17 mil. Kč. Náklady na údržbu nových transformátorů představují asi 1 % z průměrné roční hodnoty investice, která se vypočítá na základě doby životnosti transformátoru, která je 40 let.

Dalším aspektem je faktor poruchovosti. Poruchovost transformátorů roste s dobou provozu. Starší transformátory tak znamenají vyšší náklady na údržbu a provoz a také představují vyšší riziko z hlediska možné příčiny přerušení dodávky elektrické energie.

Podle [6] a [13] se pokusím ukázat postup výpočtu průměrných ročních nákladů provozu můstkové sítě ve smyslu zdvojení napájecích míst novým transformátorem. Průměrné roční náklady, které by plynuly z pořízení nového transformátoru bez uvažování zvýšení nákladů v podobně dispečerských služeb, můžeme s určitými omezeními odhadnout výpočtem. Přesnou cenu lze těžko stanovit přesně, neboť je třeba odhadnout provozní náklady a tím pádem predikovat provoz stroje. Je třeba uvažovat ztráty ve stroji, které lze rovněž těžko přesně

odhadnout, protože ztráty nakrátko závisí na připojené zátěži. Ztráty spojené s provozem transformátoru určují množství zmařené energie, kterou oceňuje Energetický regulační úřad jednotkovou cenu v korunách za megawatthodinu a její velikost se v průběhu let mění. Cena elektrické energie za ztráty byla například v roce 2014 podle ERÚ stanovena na 1243,51 Kč/MWh [6].

Ztráty v transformátorech dělíme na:

1. ztráty naprázdno
 - a. ztráty hysterezní
 - b. ztráty vířivými proudy
2. ztráty nakrátko

Ztráty naprázdno neboli ztráty v železe jsou ztráty související s konstrukcí a vlastnostmi magnetického obvodu transformátoru a jsou nezávislé na zatížení. Jejich velikost je tedy konstantní a nazývají se stálé ztráty.

Ztráty nakrátko, kterým se jinak říká ztráty v mědi, souvisí s obvodou všech aktivních vinutí transformátoru. Jsou to Joulovy ztráty způsobené průchodem proudu vodiči a jsou to tedy ztráty proměnné, závislé přímo úměrně na kvadrátu zatěžovacího proudu.

Podle [13] lze celkové činné ztráty transformátoru popsat rovnicí

$$P_z = P_0 + P_{kn} \frac{S^2}{S_n^2}$$

kde	P_z	jsou	činné ztráty v transformátoru při zatížení S v	[kW]
	P_0		ztráty naprázdno transformátoru	[kW]
	P_{kn}		ztráty nakrátko transformátoru	[kW]
	S		zatížení transformátoru	[MVA]
	S_n		jmenovitý výkon transformátoru	[MVA]

Vzorec pro výpočet činných ztrát v transformátoru lze rozšířit na vzorec pro výpočet ztrátové energie při zohlednění času provozu:

$$W_{zr} = P_0 T_{pr} + P_{kn} \frac{S_m^2}{S_n^2} T_z$$

kde	W_{zr}	jsou	roční ztráty elektrické energie v transformátoru v	[kWh]
	T_{pr}		roční doba provozu transformátoru	[h]
	T_z		doba plných ztrát transformátoru	[h]
	S_m		roční maximum zatížení transformátoru	[MVA]

Analogicky jako pro výpočet ztrát činných bychom napsali vzorec pro výpočet ztrát jalových, které jsou třeba brát v úvahu zvláště u strojů velkých výkonů:

$$Q_z = Q_0 + Q_{kn} \frac{S^2}{S_n^2} = i_0 S_n + u_k S_n \frac{S^2}{S_n^2}$$

kde	Q_z	jsou	jalové ztráty v transformátoru při zatížení S v	[kW]
	Q_0		jalové ztráty naprázdno transformátoru	[kW]
	Q_{kn}		jalové ztráty nakrátko transformátoru	[kW]
	i_0		poměrný proud naprázdno transformátoru	[MVA]
	u_k		poměrné napětí nakrátko transformátoru	[MVA]

Jalové ztráty v transformátoru lze určit pomocí měrného činitele ztrát k_Δ . Velikost tohoto činitele se liší podle místa připojení transformátoru. Je-li jalová spotřeba transformátoru kompenzována, a je tím pádem malá, je možné ji zanedbat. Pro transformátory připojené v distribuční síti 110/22 kV je podle [13] měrný činitel ztrát $k_\Delta = 0,15$.

Dle výše popsaného vyvstává otázka, zdali je při paralelním chodu transformátorů lepší odpojit stroje při poklesu zatížení a vyhnout se tak generování ztrát naprázdno tohoto zařízení. Nebo jestli je výhodnější připojením dalšího transformátoru ušetřit za ztráty nakrátko, které s rostoucím zatížením prudce stoupají.

9.3.1.1 Doba využití maxima

Doba využití maxima je čas, za který by se při maximálním odebíraném (dodávaném) výkonu spotřebovalo (vyrobilo) stejné množství elektrické energie, jako se spotřebovalo (vyrobilo) při proměnlivém výkonu za sledované období.

9.3.1.2 Doba plných ztrát

Doba plných ztrát je pojem, který je pro hodnocení finanční analýzy provozu transformátoru nezbytný. Doba plných ztrát je čas, po který by maximální ztrátový výkon působil stejné ztráty, jako způsobil časově proměnný výkon ve sledovaném období. Matematicky jej lze formulovat takto:

$$T_z = \frac{\int_0^T 3RI(t)^2}{3RI_m^2}$$

kde	T_z	je	doba plných ztrát	[h]
	$I(t)$		okamžitý ztrátový proud fáze ve sledovaném období	[A]
	I_m		maximální proud	[A]
	R		celkový odpor fázového vodiče	[Ω]

9.3.1.3 Přechodový výkon

Zatížení, při kterém je výhodnější připojit další transformátor, nebo obráceně, kdy je výhodnější transformátor odpojit (podle toho, zda zatížení stoupá, nebo klesá) je takzvaný přechodový výkon. Při jeho stanovení se vychází z kritéria minimálních provozních nákladů skupiny transformátorů.

Náklady na ztráty elektrického výkonu ve skupině s n transformátory při jejich zatížení S se dají popsat vzorcem, který je odvozen ze vzorce pro celkové činné ztráty transformátoru, ale respektuje počet transformátorů a také ocenění za ztrátový výkon:

$$N_{zp} = n(c_0 P_0 + c_k P_{kn} \frac{S^2}{n^2 S_n^2})$$

kde	N_{zp}	jsou	náklady na ztráty elektrického výkonu n transformátorů	[Kč]
	c_0		ocenění ztrát naprázdno	[Kč/kW]
	c_k		ocenění ztrát nakrátko	[Kč/kW]

Pro dokončení výpočtu výrobních nákladů, které souvisí s uvedením nového transformátoru do provozu, je třeba do výpočtu mimo ztráty zahrnout a zohlednit i počáteční investice, náklady na provoz a další aspekty uvedené v kapitole 9.3.1. Je třeba též brát na zřetel, že doba životnosti stroje je poměrně dlouhá, a proto se do vzorce musí zohlednit i časová hodnota peněz v podobě diskontu. Vztah pro určení diskontovaných výrobních nákladů za dobu životnosti se určí jako součet výrobních nákladů a nákladů investičních dle tohoto vzorce:

$$N_{vT\check{z}} = \sum_{T=1}^{T_{\check{z}}} N_{zpT} (1+r)^{-T} + N_{ip}$$

kde	$N_{vT\check{z}}$	jsou	výrobní náklady za dobu životnosti	[Kč]
	N_{zpT}		náklady na ztráty v transformátoru v roce T	[Kč]
	N_{ip}		investiční náklady transformátoru	[Kč]
	$T_{\check{z}}$		doba životnosti transformátoru	[roky]
	r		diskont	[%]

Sloučením dvou předchozích rovnic, přesněji řečeno dosazením z rovnice předposlední do rovnice poslední dostaneme výraz pro výpočet diskontovaných nákladů za dobu životnosti, který respektuje i ocenění ztrát elektrické energie v roce T :

$$N_{vT\check{z}} = \sum_{T=1}^{T_{\check{z}}} n(c_{0T} P_0 + c_{kT} P_{kn} \frac{S^2}{n^2 S_n^2}) (1+r)^{-T} + N_{ip}$$

Pomocí tohoto vzorce by bylo možné stanovit náklady na pořízení nového transformátoru. Bylo by třeba uvažovat nad několika kritérii, které by rozhodly o koupi nového transformátoru. Zásadami ukazateli by bylo zatížení transformátorů, které by muselo být navrženo tak, aby žádný z transformátorů nebyl zbytečně nezatížen a negeneroval ztráty naprázdno. Současně by žádný transformátor nemohl být přetížen, aby v něm nevznikaly ztráty nakrátko, závisující na zatížení. Dalším hlediskem by bylo zvýšení spolehlivosti, které může mít pozitivní vliv na peněžitý bonus od energetického regulačního úřadu. Porovnáním těchto a eventuálně i dalších hledisek by pak byl učiněn závěr, je-li technologicky a ekonomicky výhodné nový transformátor pořídit a uvést do provozu.

10 Porovnání paprskového a můstkového provozu sítě

Pro analýzu můstkového provozu sítě budeme vycházet z modelu, kde budu simulovat rozdíl mezi můstkovým a paprskovým provozem sítě. Budu předpokládat, že stávající distribuční síť je na úrovni VN provedena od zdroje (transformátoru) jako paprsková. Při výpadku zdroje nebo poruše na vedení budu zkoumat množství nedodané energie. Je zřejmé, že pokud je určitý odběr napájen ze dvou nebo více cest, je zajištěna rezerva pro výpadek některého z vedení nebo zdroje napájení.

10.1 Výpočetní model

Model sítě představuje soustavu vedení a zařízení, jejíž elektrické veličiny lze za určitých podmínek matematicky řešit a stanovit jejich parametry. Model, kterým se budu zabývat, bude specifický tím, že bude obsahovat dva obecně různé napájecí uzly, ke kterým budou připojeny transformátory. Tyto transformátory budou zatíženy opět různými zátěžemi a vedeními. Obě dvě soustavy bude možné propojit, nebo je provozovat samostatně. Matematickým řešením tohoto systému se v této práci zabývat nebudu, protože by to dalece překračovalo její možnosti, ale alespoň se pokusím jej naznačit. Také je potřeba uvést určité předpoklady a omezení, pro které má vůbec smysl zabývat se možnostmi propojení obou napájecích soustav.

10.1.1 Ustálený chod sítě

Ustáleným chodem sítě se rozumí stav, kdy v síti nedochází k žádným přechodným dějům, jako jsou poruchy (zkraty, zemní spojení), přepínání či odpinání vedení, zařízení nebo odboček.

Ustálený chod předpokládá znalost napěťových poměrů, činných a jalových výkonů a ztrát v zařízeních a na vedení. Tato znalost je nezbytná pro řízení elektrizační soustavy a ve svém

důsledku tedy i při návrhu změny sítě. Parametry ustáleného chodu sítě je rovněž nutné znát při výpočtu přechodných dějů v síti, například při výpočtu dynamické a statické stability.

Pro matematické řešení ustáleného chodu sítě můžeme po zavedení zjednodušujících předpokladů sestavit soustavu lineárních rovnic. Tuto sestavu získáme na základě povahy sítě například pomocí metody smyčkových proudů nebo metody uzlových napětí.

Pro řešení lineárních rovnic zavádíme tyto zjednodušující předpoklady [5]:

1. předpokládáme symetrii prvků v parametrech a u odběrů a zdrojů v napětích a proudech u třífázových soustav
2. příčná admitance zejména vedení a transformátorů se zanedbává, protože proudy v příčném směru, a tedy i ztráty a úbytky napětí jsou zanedbatelné oproti podélnému směru
3. parametry vedení a transformátorů jsou konstanty nezávislé na proudu a napětí
4. napětí vedení a transformátorů jsou harmonické funkce času o frekvenci 50 Hz
5. odběry jsou zadány pomocí proudů nezávislých na napětí, které je na jejich svorkách

10.1.2 Paralelní chod transformátorů

PREdistribuce v běžném provozu nevyužívá paralelního chodu transformátorů VVN/VN do společné sběrnice v žádné části sítě, protože při paralelním chodu transformátorů existují úskali v podobě značného zkratového proudu, a tedy i zkratového výkonu při eventuální poruše. Tyto zkratové poměry mohou být až několikanásobně vyšší při paralelním chodu transformátorů. Na druhou stranu je však třeba brát v potaz, že při přijetí patřičných opatření paralelní práce zajistí vyšší spolehlivost dodávky elektrické energie, a tedy i nižší ukazatele SAIDI a SAIFI.

Paralelní chod transformátorů se využívá při nerovnoměrném zatížení například během dne a noci, kdy by použití jediného transformátoru bylo technologicky a ekonomicky nevýhodné. Paralelním chodem se rozumí práce alespoň dvou transformátorů do společné sběrnice. To znamená, že mají paralelně propojená jak vstupní, tak i výstupní vinutí. Žádný z transformátorů nesmí být trvale přetížen [16].

Mimo zvýšení spolehlivosti existují i další výhody paralelní práce transformátorů. Při nízkém odběru, kdy například noční odběr klesne pod hodnotu, kdy je výhodné používat oba transformátory současně, je možné jeden odpojit a napájet síť paprskově jedním napáječem (transformátorem) [13]. Lze se tak nákladům spojeným s provozem dvou transformátorů místo jednoho.

Nevýhody spočívají již ve zmíněném zhoršení zkratových poměrů a v neposlední řadě i v ekonomické náročnosti pořízení i provozu více transformátorů.

Nepracují-li transformátory na společné přípojnici, tedy nemají-li vzájemně propojená primární vinutí, je třeba důsledně dbát na to, aby sítě napájející oba transformátory měly stejné parametry. Napájecí napětí musí mít stejnou velikost, kmitočet a stejnou fázi. Je velmi důležité, aby úhel mezi napájecími napětími byl nulový, nebo minimální. Při nenulovém posunu obou napětí vůči sobě by tekly vedením vyrovnávací proudy vyvolané touto nestejnou fází. Tyto proudy by mohly být poměrně veliké, síť by přetěžovala a mohly by v síti způsobit značné škody na zařízení.

10.1.2.1 Podmínky paralelního chodu transformátorů

Podmínky paralelní práce transformátorů vyplývají z chodu naprázdno: při chodu naprázdno nemá takto pracujícími transformátory protékat vyrovnávací proud, který by tyto stroje zatěžoval. Nulový vyrovnávací proud poteče při nulovém rozdílu napětí sekundárního vinutí, tedy budou-li všechna napětí stejně veliká a budou mít stejnou fázi. Tyto podmínky budou splněny, bude-li splněno následující [16] :

1. transformátory pracují se stejným jmenovitým napětím
2. mají stejný převod
3. mají stejný hodinový úhel
4. mají stejný úbytek napětí způsobený proudem naprázdno

10.1.2.2 Rozložení zatížení při paralelním chodu transformátorů

V souladu s předchozími podmínkami můžeme psát rovnice, které budou popisovat rozložení zatížení jednotlivých transformátorů ve skupině. Správné rozložení zatížení mezi transformátory pracující paralelně je klíčové pro jejich spolehlivý chod.

Ukažme si rozložení zatížení na příkladu dvou transformátorů A a B [6]:

Podle kapitoly 10.3.1 musí být stejná vstupní napětí:

$$U_A = U_B$$

Podmínky z téže kapitoly říkají, že musí být stejný i úbytek napětí:

$$Z_A I_A = Z_B I_B$$

$$z_A i_A = z_B i_B$$

Jelikož platí,

$$Z_A = \frac{U_{kA}}{I_{NA}}$$

$$u_{kA} = \frac{U_{kA}}{U_2}$$

Pak

$$Z_A = \frac{U_2 u_{kA}}{I_{NA}}$$

Analogicky

$$Z_B = \frac{U_2 u_{kB}}{I_{NB}}$$

Po dosazení do první rovnice a dosazení vztahu

$$S_n = UI_n$$

Dostaneme

$$\frac{S_A}{S_{nA}} u_{kA} = \frac{S_B}{S_{nB}} u_{kB}$$

V takovém případě ale mohou nastat dvě situace. A sice, že transformátory budou mít stejné výkony a různá napětí nakrátko (1), nebo budou mít stejná napětí nakrátko a různé jmenovité výkony (2). Pak můžeme psát

$$(1) S_A = \frac{S_{nA}}{S_{nA} + S_{nB}} S \cdot 10^{-6} \quad [\text{MVA}]$$

Nebo

$$(2) S_A = \frac{u_{kB}}{u_{kA} + u_{kB}} S \cdot 10^{-6} \quad [\text{MVA}]$$

Paralelní práce transformátorů do společně sběrnice není tolik populární řešení z důvodu zhoršení zkratových poměrů v síti. Jak bude ukázáno, transformátory pracující v normálním režimu nemají propojená vinutí kvůli omezení zkratových proudů a proudů vyrovnávacích způsobujících ztráty. Při práci fungují jako paprskové zdroje napájící svou oblast.

Při poruše je však výhodné, aby mohl být druhý transformátor připojen na oblast nefunkčního zdroje, což je rychlejší, je-li transformátor v provozu a pouze převezme nedodaný výkon odpojeného zdroje.

Z ekonomického hlediska je třeba najít optimální variantu, je-li výhodnější provozovat dva transformátory současně v paralelním zapojení nebo jako paprskový chod, kdy každý napájí svou oblast s možností vzájemného propojení.

10.2 Popis prvků sítě

V rámci kapitoly 9 se zaměřuji na reálnou analýzu můstkového zapojení distribuční sítě, kterou porovnávám s provozem paprskovým. Skutečná městská síť, kterou provozuje PREDistribuce, a. s., je poměrně složitý systém zauzlených a paralelně či paprskově provozovaných odboček, který se však vyznačuje jistými specifiky. Například jak bylo, popsáno v kapitole 7.3.1, PREDi

provozuje síť téměř bezvýhradně jako kabelovou. Podívejme se tedy na parametry zařízení sítě, které budu uvažovat pro další simulace a výpočty³.

10.2.1 Napájecí uzly

V případě mého řešení je na místě si uvědomit, že analýza sítě probíhá na úrovni vysokého napětí. Znamená to tedy, že za napájecí uzel budu považovat napěťově nadřazenou síť 110 kV, jejímž zdrojem je transformace velmi vysokého napětí na vysoké napětí 400/110 kV. Napájecí uzel je definován jmenovitým a provozním napětím a zkratovým proudem, respektive výkonem.

10.2.2 Transformátor 110/22 kV

Modelová simulovaná síť obsahuje parametry transformátorů 110/22 kV o zdánlivém výkonu 63 MVA, které PREdi skutečně v síti provozuje. Detailní přehled parametrů použitých transformátorů ukazuje následující tabulka.

	T102	T103
U₁ [kV]	110	110
U₂ [kV]	23	23
S_t [MVA]	63	63
P_k [kW]	359	176
U_k [%]	16,8	17,5
i₀ [%]	0,28	0,39
P₀ [kW]	41,58	23
Zap. prim.	YN	YN
Zap. sekun.	yn	yn
H. úhel	1	1
Reg. odb.	ANO	ANO
Počet. odb.	8	8
Krok [%]	2	2
I_{n1} [A]	331	331
I_{n2} [A]	1581	1581
Blok. tr.	NE	NE

Tabulka 10-1: Parametry použitých transformátorů

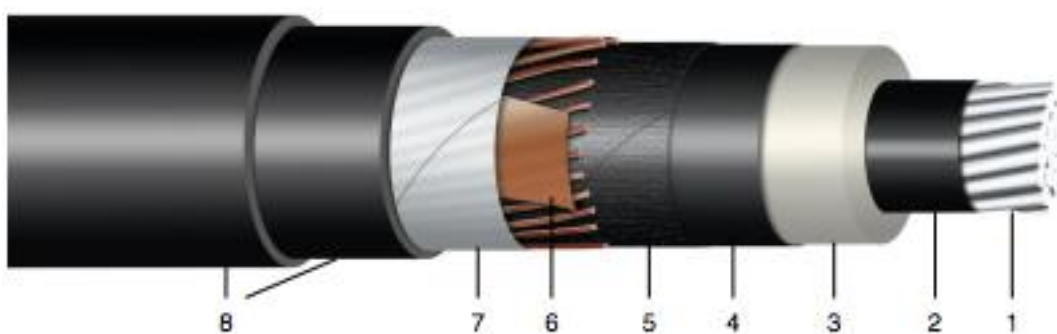
10.2.3 Vedení

K distribuci elektrické energie používá PREdi zejména kabelových vedení typu AXEKVCEY, které mají následující vybrané elektrotechnické a mechanické parametry [14]:

³ Úplný výčet prvků sítě včetně názvů a všech parametrů poskytuje příloha 2

10.2.3.1 Kabely 22-AXEKVCEY 12,7/22 kV

Jádro:	lanované, kulaté a komprimované hliníkové jádro podle ČSN EN 60228, třída 2
Dolní polovodivá vrstva:	vytlačovaná Izolace: XLPE, jmenovitá tloušťka 5,5 mm
Horní polovodivá vrstva:	vytlačovaná, nesloupatelná
Separátor:	polovodivá, vodu blokující páska
Koncentrický vodič:	žíhané měděné dráty a protispirála z měděné pásky
Plášť:	PE, černý
Ochranný plášť:	bezolovnaté PVC, černý nebo červený podle požadavku



Obrázek 10-1: Řez kabelem AXEKVCEY [15]

Legenda k obr. 10-1 [15]:

- 1 je hliníkové jádro
- 2 vnitřní polovodivá vrstva
- 3 izolace ze zestíněného polyetylenu
- 4 vnější polovodivá vrstva
- 5 polovodivá vodublokující páska
- 6 stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky
- 7 vodublokující páska
- 8 vnější plášť PE+PVC

Počet žil x průřez jádra kabelu [mm ²]	R/km [Ω/km]	X/km [Ω/km]	B/km [mH/km]	I _{max} [A]
1 x 240	0,13	0,127	94	506

Tabulka 10-2: Elektrotechnické parametry použitého kabelového vedení AXEKVCEY

Průměr jádra [mm]	Hmotnost [kg/km]	Poloměr ohybu [mm]
45	2390	900

Tabulka 10-3: Mechanické parametry použitého kabelu AXEKVCEY

Provozní teplota kabelu je maximálně 90 °C v jádře. Rázové napětí 120 kV [14].

10.2.4 Zátěže

Zátěže v podobě odběrných míst s definovaným odebíraným proudem představují pokračování distribuční soustavy z hladiny 22 kV buď přímo k větším průmyslovým podnikům či objektům s vlastní transformací na požadované napětí, nebo představují distribuční transformaci 22/0,4/(0,6) kV, kteréžto napětí je následně dodáváno koncovým maloobděratelům.

Zátěže je třeba volit tak, aby žádný z transformátorů nebyl nadměrně přetížen, ale zároveň aby transformátory nebyly ani nereálně málo zatížené, tedy aby zhruba respektovaly transformátory zatížené reálnou částí distribuční sítě. Zatížení obou transformátorů jsem volil zhruba 50–55 % jmenovitého výkonu.

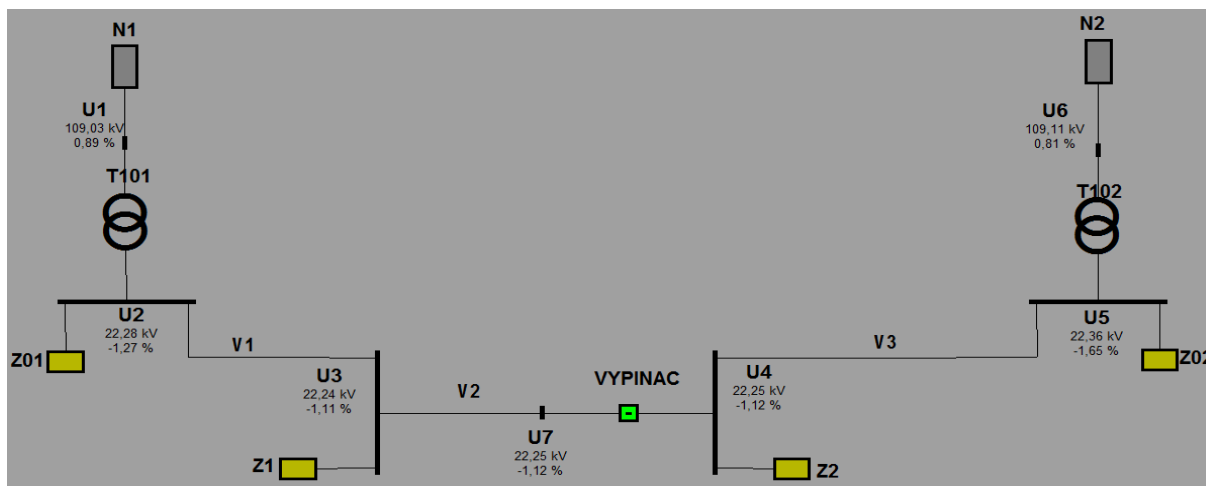
10.3 Software E-Vlivy 3

Program E-Vlivy 3 umožňuje komplexní analýzu rozsáhlých, zauzlených a nejrůzněji provozovaných elektrických sítí různého napětí. Program podporuje funkce standardní výpočetní analýzy, ve svých rozšířeních se však zaměřuje i na kvalitu elektřiny, připojitelnost zdrojů do DS a další funkce, které jsou velmi užitečné pro určení parametrů chodu sítě spojených s provozem a rozvojem distribuční sítě.

Komunikace programu s uživatelem při zadávání vstupních dat i návrhu topologie sítě probíhá skrze grafické rozhraní, což zvyšuje komfort a přehlednost při práci.

Pro účely zkoumání můstkového provozu sítě mi byla poskytnuta licence od katedry elektroenergetiky ČVUT FEL. Tato licence je omezena na síť s maximálním počtem 100 uzlů. Program umožňuje, mimo řadu jiných funkcí, simulovat chod sítě, počítat úbytky napětí v jednotlivých uzlech, počítat ztráty v síti, zkoumat připojitelnost zátěží a počítat jedno, dvou i třífázové zkraty, časový vývoj těchto zkratů a jejich velikosti. Dokáže také simulovat a zobrazit frekvenční analýzu a fázorové diagramy poměrů v síti.

Důležitými funkcemi pro mou práci bude zejména chod sítě a úbytky napětí při paralelním chodu se dvěma napáječi a při paprskovém chodu s dvakrát jedním napáječem. Modelové schéma sítě je na následujícím obrázku.



Obrázek 10-2: Modelové schéma sítě s paralelně pracujícími transformátory

10.3.1 Chod sítě s oddělenými napájecí

Schéma sítě se dvěma napájecí se liší od obrázku 10-2 pouze v tom, že neuvažují paralelní chod transformátorů, tedy že prvek VYPINAC je ve stavu Vypnuto, vedení mezi uzly U3 a U4 je rozpojené a oba transformátory pracují do vlastních zátěží. Schéma sítě pracující do oddělených zátěží lze pozorovat s příloze 3.

Pomocí programu E-Vlivy 3 jsem vypočítal chod sítě. Následující tabulka zobrazuje proudy a výkony ve větvích sítě. Je zřejmé, že při rozpojení uzlu U3 a U4 bude vedením V2 téct skoro nulový proud, který má induktivní charakter.

Prvek	uzel	I [A]	Z [Ω]	P [kW]	Q [kVar]	S [kVA]
N1	U1	168,3	3,5	-7373,1	-30912,4	31779,6
T101	U1	168,3	1,2	-7373,1	-30912,3	31779,4
	U2	802,8	1,2	30328,9	6390,1	30994,7
V1	U2	43,4	0,7	-1579,9	-552,3	1673,7
	U3	45,2	0,7	1576,9	735,7	1740,1
V2	U3	0,7	0,1	0,0	27,7	27,7
	U7	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2
V3	U4	192,1	0,3	6437,4	3648,3	7399,3
	U5	191,0	0,3	-6464,6	-3585,7	7392,5
N2	U6	144,7	3,5	-5596,0	-26777,6	27356,1
Z1	U3	45,5	282,3	1576,9	763,7	1752,1
Z2	U4	192,1	66,9	6437,4	3648,2	7399,3
Z01	U2	759,9	16,9	28749,0	5837,7	29335,7
Z02	U5	508,0	25,4	19468,5	2774,1	19665,1
T102	U6	144,7	32,2	-5596,0	-26777,5	27356,0
	U5	689,7	32,2	25933,0	6359,8	26701,5

Tabulka 10-4: Proudů a výkonů ve větvích odděleně pracující sítě

V souladu s přílohou 2, která zobrazuje parametry zátěží, tečou ve větvích proudy, které jsou dány právě zátěžemi připojenými na jednotlivé transformátory. Tyto proudy korespondují s výkony v jednotlivých větvích v závislosti podle odběrných míst.

Uzel	U [kV]	dUn [%]	Zk [Ω]	Sk [MVA]
U1	109,0	0,9	3,9	3429,5
U2	22,3	-1,3	1,4	383,4
U3	22,2	-1,1	2,0	265,1
U4	22,2	-1,1	1,7	309,7
U5	22,4	-1,6	1,4	370,0
U6	109,1	0,8	3,9	3429,6
U7	22,2	-1,1	2,1	252,7

Tabulka 10-5: Napětí v uzlech sítě

Tabulka 10-2 ukazuje napětí v uzlech sítě. Je vidět, že úbytky napětí v uzlech nedosahují vyšších hodnot než zhruba 1 %. Naopak se v síti projevují přírůstky napětí (v podobě záporného úbytku), který je způsoben relativně nízkým zatížením obou transformátorů. V takovém případě se uplatňuje tzv. Ferratiho jev, který může být nebezpečný zvláště při náhlém odlehčení sítě.

Uzel	U [kV]	dUn [%]	Zk [Ohm]	Sk [MVA]
U1	108,7	1,2	3,9	3429,5
U2	22,1	-0,2	1,4	383,4
U3	22,0	0	2,0	265,1
U4	21,8	0,7	1,7	309,7
U5	21,9	0,3	1,4	370,0
U6	108,5	1,3	3,9	3429,6
U7	22,0	0	2,1	252,7

Tabulka 10-6: Napětí v uzlech zatížené sítě

Tabulka 10-6 ukazuje napětí a úbytky napětí v uzlech sítě s jinými parametry zátěží, které mají vyšší odběry. Zátěže je samozřejmě třeba volit adekvátně, aby nedocházelo k přetížení transformátorů, ani k proudovému přetížení vodičů. Na těchto zátěžích pak vznikají reálné úbytky napětí, které však stále nepřesahují hodnotu maximálně 1,34 %. Parametry zatížené sítě s většími odběry jsou v příloze 3.

10.3.2 Můstkový provoz sítě

Takovýto provoz sítě byl podrobně teoreticky rozebírán v předchozích kapitolách z několika úhlů pohledu. Podívejme se na simulaci provozu sítě s paralelně pracujícími transformátory a uvědomme si, že je důležité, aby byly respektovány podmínky podle 10.3.1. Schéma takto pracující sítě můžeme sledovat na obrázku 10-2.

V tento okamžik vedením V2 teče proud, který je dán jednak nestejným rozložením zátěží jednotlivých transformátorů, jednak drobně se lišícím proudem naprázdno obou transformátorů, respektive úbytkem napětí způsobeným tímto proudem.

Prvek	uzel	I [A]	Z [Ohm]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
N1	U1	163,1	3,5	-6614,7	-30083,8	30802,4
T101	U1	163,1	1,2	-6614,7	-30083,6	30802,2
	U2	777,8	1,2	29237,3	6785,6	30014,3
V1	U2	28,1	0,7	-515,4	-953,4	1083,8
	U3	32,4	0,7	514,0	1138,3	1249,0
V2	U3	29,3	0,1	1063,5	-374,1	1127,4
	U7	29,5	0,1	-1063,7	401,9	1137,1
V3	U4	212,2	0,3	7504,1	3247,8	8176,8
	U5	211,3	0,3	-7537,3	-3191,1	8185,0
N2	U6	149,9	3,5	-6361,7	-27602,1	28325,7
Z1	U3	45,5	282,3	1577,6	764,0	1752,9
Z2	U4	192,1	66,9	6440,3	3649,9	7402,6
Z01	U2	759,5	16,9	28721,9	5832,2	29308,0
Z02	U5	508,3	25,4	19490,3	2777,2	19687,2
T102	U6	149,9	32,2	-6361,7	-27601,9	28325,5
	U5	714,6	32,2	27027,6	5968,3	27678,7

Tabulka 10-7: Proudý a výkony ve větvích můstkové sítě

Porovnáním hodnot v tabulkách 10-4 a 10-7 vidíme, že při paralelním provozu sítě převezme část výkonu, který poskytuje transformátor T101 transformátor T102. Příslušnými vedeními jednotlivých transformátorů protéká nižší, respektive vyšší proud z důvodu nerovnoměrně rozložených zátěží. Výkony přenášené v jednotlivých větvích se rovněž přizpůsobí a vyrovnají tak nesymetrické parametry prvků. Zdánlivé výkony jednotlivých transformátorů, které podle tabulky dosahují zhruba poloviny jejich jmenovitého zdánlivého výkonu (63 MVA), jsou dány jejich zhruba 50% zatížením. V druhém případě jsou transformátory zatíženy na cca 80 %, což se projeví ve výkonech ve větvích, protékajících proudech a také v úbytcích napětí, o čemž vypovídá tabulka 10-9.

Uzel	U [kV]	dUn [%]	Zk [Ω]	Sk [MVA]
U1	109,0	0,9	3,8	3545,8
U2	22,3	-1,3	0,9	593,9
U3	22,2	-1,1	1,0	558,4
U4	22,2	-1,1	0,9	561,0
U5	22,4	-1,7	0,9	582,3
U6	109,1	0,8	3,8	3545,8
U7	22,2	-1,1	0,9	561,0

Tabulka 10-8: Napětí v uzlech méně zatížené můstkové sítě

Uzel	U [kV]	dUn [%]	Zk [Ohm]	Sk [MVA]
U1	108,6	1,3	3,8	3545,8
U2	21,9	0,3	0,9	593,9
U3	21,5	2,1	1,0	558,4
U4	21,6	2,0	0,9	561,0
U5	21,8	0,9	0,9	582,3
U6	108,6	1,3	3,8	3545,8
U7	21,6	2,0	0,9	561,0

Tabulka 10-9: Napětí a úbytky v uzlech sítě s větším zatížením

Napětí v uzlech a úbytky těchto napětí se při provozu sítě jako můstkové příliš neliší od provozu s oddělenými napáječi. Rozdílné impedance uzlů takto propojené sítě vysvětlují jiné rozložení protékajících proudů.

10.3.3 Porovnání ztrát v obou provozech sítě

Zejména provoz transformátorů s sebou nese jistou ztrátovost, která se odvíjí od jeho konstrukce a provedení (kapitola 9.3.1). Ztráty však vznikají i ve vedení vlivem protékajícího proudu, který na nenulovém činném odporu vodičů způsobuje vývin ztrát v podobě tepla. Tabulka 10-9 porovnává ztráty v síti můstkové a paprskové. Různé rozložení ztrát je dáno vlivem různě rozloženého proudu, který částmi sítě protéká jinak veliký. Součty ztrát jalových i činných v obou způsobech provozu jsou přibližně stejné. Liší se úseky, na kterých se ztráty projeví. Můstkový provoz v mém případě bude o něco ztrátovější, protože se do součtu zahrnou i ztráty na vedení V2, kterým při paprskovém provedení neprotéká žádný proud způsobující činné ztráty.

Prvek	dP [kW]	dQ [kVAr]	Prvek	dP [kW]	dQ [kVAr]
T101	32729,85	32543,71	T101	38036,45	33906,37
V1	188,16	4,354	V1	356,221	172,66
V2	5,25	21,107	V2	0	24,92
V3	141,313	52,612	V3	66,111	22,668
T102	34713,79	31987,67	T102	29172,34	30516,25

Tabulka 10-10: Ztráty ve větvích sítě (vlevo paralelní provoz, vpravo paprskový)

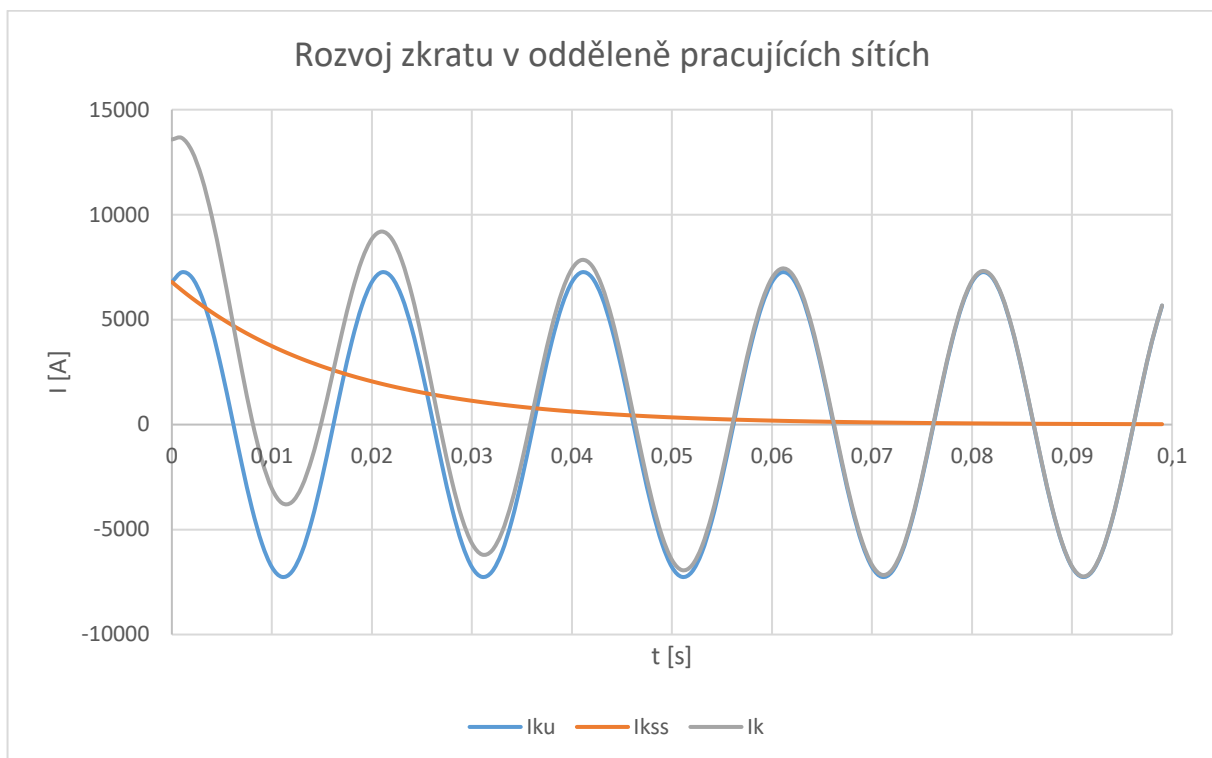
10.3.4 Zkraty

Z technologického hlediska největším rizikem pro paralelní provoz transformátorů představují zkraty, přesněji řečeno zkratové výkony a proudy, které mohou být klidně několikanásobně vyšší v případě propojených transformátorů než v případě paprskově pracujících sítí.

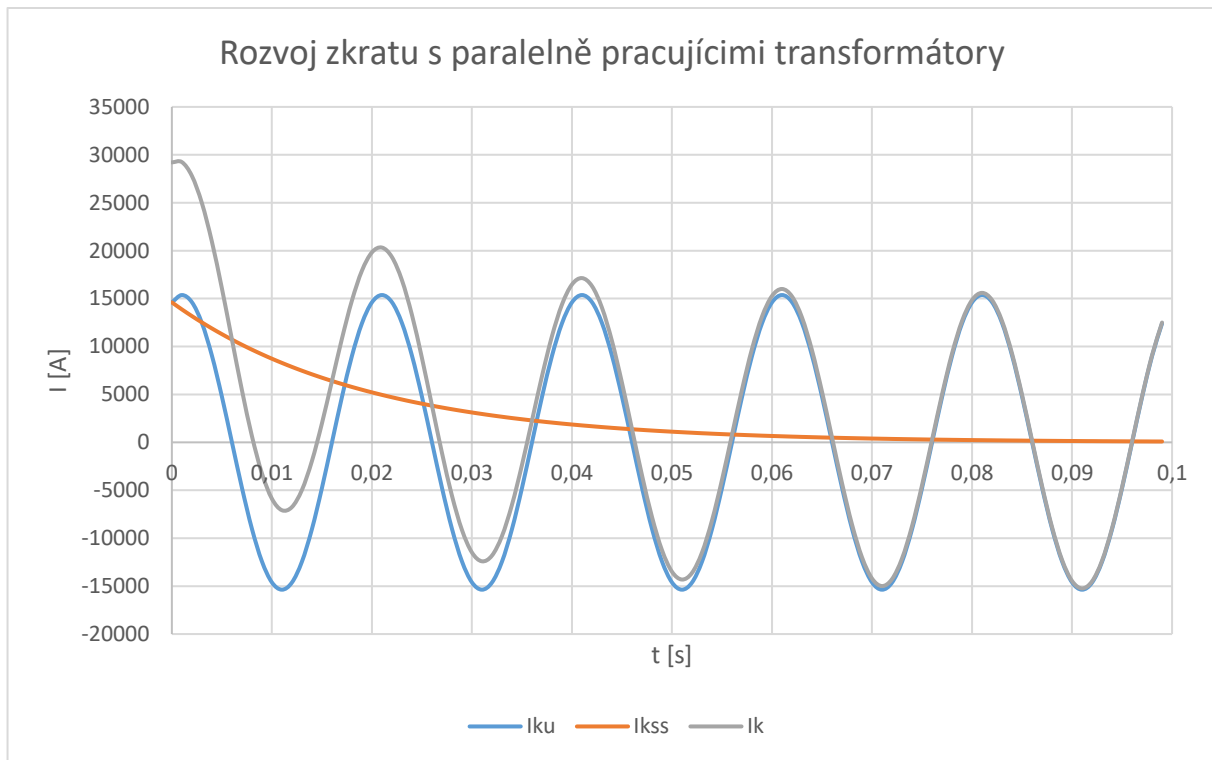
Obrázky 10-3 a 10-4 zobrazují rozvoje třífázového zkratu v uzlu U3 opět pro obě varianty provozu sítě. V grafech jsou znázorněny všechny složky zkratového proudu. Rázový zkratový proud I_k dosahuje u paralelně pracujících transformátorů více než dvojnásobku rázového

proudu u paprskově provedené sítě, která pracuje do vlastních zátěží. Ustálená hodnota zkratového proudu I_{ku} a stejnosměrná složka zkratového proudu I_{kss} lze považovat za odeznenou zhruba po 80 ms. Obě hodnoty jsou na začátku zkratu v čase $t=0$ s, podobně jako rázová složka zkratového proudu, zhruba dvakrát větší u paralelně pracujících transformátorů než odpovídající složky zkratového proudu paprskově fungující sítě.

Z popisu sítě a schématu vyplývá, že při odděleně pracujících sítích se na velikosti zkratu bude podílet vždy jen příslušný transformátor, podle toho, v jakém místě vedení zkrat nastane. Následující grafy zobrazují průběhy třífázových zkratů v uzlu U3.



Obrázek 10-3: Rozvoj zkratu v odděleně pracujících sítích



Obrázek 10-4: Rozvoj zkratu v můstkovém provozu sítě

Příloha 3 obsahuje graf, který dává do perspektivy průběhy obou předchozích zkratů. Je na něm lépe a názorněji vidět, o kolik je zkratový proud vyšší při paralelním provozu sítě než při provozu s oddělenými transformátory.

10.3.4.1 Ochrana před zkraty

Ochrana před zkraty spočívá jak v preventivních opatřeních, tak v systémech řešících nastalý zkrat. Preventivní ochrana ve svém důsledku znamená vhodnými prostředky zamezit, nebo znesnadnit vznik zkratu. Pakliže tyto systémy selžou nebo nejsou přítomny a je třeba řešit vzniklý zkrat, je třeba postupovat tak, že se zmenší zkratový proud a rychle se odepne místo zkratu od zdroje napětí [13].

Preventivní opatření spočívají v používání co nejdokonalejší izolace jednotlivých fází mezi sebou i vůči zemi. Podle typu a kvality provedení rozveden je třeba klást na izolace patřičný důraz, zvláště tam, kde může při manipulaci nebo jiných poruchách dojít ke zkratu vlivem malé vzájemné vzdálenosti vodičů.

Omezení zkratových proudů se dosahuje zvětšením reaktance transformátorů nebo alternátorů konstrukčními úpravami, které ovšem nemusí být žádoucí v jiných ohledech. V případě potřeby lze instalovat do obvodu umělé reaktance, takzvané reaktory, což jsou silové tlumivky bez železného jádra. Jejich reaktance způsobí omezení zkratových proudů, které se bez nich vyvíjejí velmi rychle, než stihnou zareagovat jistící a odpínací prvky sítě.

K vypínání zkratových proudů se používá prvků popsaných v kapitole 5, tedy pojistky nebo samočinné vypínače. Je vhodné zdůraznit, že v sítích vyšších napětí se používá ochranných relé, které aktivují výkonový vypínač.

Vyžadují-li si okolnosti zachování parametrů transformátorů při paralelním propojení, možností jak zlepšit zkratové poměry v síti je na vhodná místa zařadit reaktory s vhodnými parametry. Jinou možností je vhodně nadimenzovat zemnění transformátorů například speciálními odpory, tzv. shunty. Samozřejmostí je použití moderních zapouzdřených rozvodů, které bývají naplněny netečným plynem jako SF₆, který minimalizují možnost vzniku zkratu například při manipulaci. Zkratová odolnost prvků sítě je velice důležitá pro bezpečný chod, proto se tyto rozvodny často opatřují moderní technikou jisticích prvků a sledovacích zařízení, které jsou schopny zkraty i jiné poruchy velmi rychle rozpoznat a patřičně na ně reagovat.

11 Závěr

V první části práce jsem se zaměřil na teoretickou přípravu návrhu můstkového provozu distribuční sítě. Popsal jsem základní typy rozvodů a jejich možné výhody nebo nevýhody, typy vedení a vodičů a jejich jištění. Popsal jsem také různá kritéria dělení distribuční sítě.

Můstkový provoz sítě zaručuje vyšší spolehlivost dodávky elektrické energie, protože spotřebitele napájí nejméně ze dvou napájecích míst. Při výpadku jednoho převezmou po dobu odstraňování poruchy či havárie další napáječe. Z tohoto důvodu jsem se také značnou měrou zabýval hledisky spolehlivosti a nepřetržitosti SAIDI a SAIFI a to se zaměřením na pražskou distribuční soustavu, kterou provozuje PREDistribuce, a. s.. Na základě dosažených hodnot těchto ukazatelů jsem spočítal bonus, který obdrží tento distributor elektrické energie od Energetického regulačního při dodržení určitých hodnot kvality dodávky. Například za rok 2015 PREDi získala 21,580 milionů Kč. Různé distribuční sítě se liší v kvalitě dodávky elektrické energie. Možné příčiny tohoto rozdílu spočívají v počtu napájených uživatelů, ale také v polohopisných možnostech, ze kterých plynou různé způsoby provozu sítě, různé způsoby vedení vodičů, různá topologie sítě a podobně. Z těchto vlastností konkrétní sítě pak pramení její náchylnost na různé ovlivnitelné nebo neovlivnitelné faktory, ale i pořizovací a provozní cena.

Můstkový provoz v distribuční síti se na úrovni VN provádí většinou propojením již fungujících částí sítě. Další možnosti realizace můstkového provozu sítě spočívají například ve zdvojení napájecích míst – transformátorů. V práci jsem ukázal možnost výpočtu nákladů na pořízení a uvedení do provozu nového transformátoru. Do výpočtů jsou zahrnuty oceněné ztráty v transformátoru, doba plných ztrát a doba využití maxima, ale i investiční náklady související s pořízením transformátoru.

V praktické části návrhu sítě jsem se zaměřil na porovnání nejběžnějšího provozu sítě jako paprskové a můstkového provedení sítě. Určil jsem si prvky sítě a jejich parametry, které jsem použil pro výpočty v softwaru E-Vlivy 3. Pomocí tohoto výpočetního programu jsem zkoumal chod sítě. Nejdůležitějšími parametry byly proudy ve větvích sítě, výkony, úbytky napětí v uzlech sítě, výkony a ztráty na vedení a transformátorech. V jednotlivých kapitolách jsou pak porovnány odpovídající si parametry obou provedení sítě včetně výhod jednoho nebo druhého z nich.

Z hlediska největšího možného rizika můstkového provozu jsem simuloval zkraty v síti, které jsem popsal a znázornil graficky. Nebezpečí zkratového proudu v mém případě představovalo pro můstkový provoz dvojnásobek oproti provozu paprskovému. V reálné síti může

představovat riziko také různý fázový posun napájecích napětí vůči sobě. Je třeba zajistit, aby toto a další podmínky byly správně dodrženy. Paralelní provoz je poměrně komplexní záležitost, kde se projeví jakékoliv nepřesnosti. Od různých hodinových úhlů transformátoru až po zkratky mohou být při nedůslednosti ohroženy životy a zařízení v síti. Přistoupí-li se k můstkovému provozu sítě zodpovědně, může to být účinný nástroj, pomocí něhož lze zajistit velmi spolehlivou dodávku elektrické energie do oblastí, kde je nepřetržitá dodávka zásadní. Můstkový provoz též přispívá k lepšímu rozložení protékajících proudů a výkonů v síti, čímž se vyrovná například proudové namáhání jedné části trasy vůči jiné.

12 Literatura

- [1] FENCL, František. *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*. Vyd. 3. př. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 8001027716.
- [2] PROCHÁZKA, Radek. *Druhy elektrického silnoprůdého rozvodu* [online]. 2007. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4035-druhy-elektrického-silnoprudeho-rozvodu>
- [3] RICHTER, Miroslav. *Návrh rekonstrukce distribuční sítě v zadané oblasti*. Brno, 2008. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] FEJT, Zdeněk a Jaroslav ČERMÁK. *Elektroenergetika*. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1981.
- [5] NOVÁK, Vojtěch. *Návrh elektrické sítě nn v dané lokalitě*. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009. b.n.
- [6] FÁBIK, Zoltán. *Výměna transformátorů 110/22 kV*. 2015
- [7] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV* [online]. Dostupné z: https://www.predistribuce.cz/Files/legislativa/ppds_2016/
- [8] *Roční zpráva o provozu ES ČR* [online]. 2016. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/3769f65b-3789-4e93-be00-f84416e1ca03
- [9] *O elektřině* [online]. Dostupné z: https://www.energyconsultant.cz/images/mapa_elektriny.png
- [10] *O nás* [online]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/o-spolecnosti/o-nas/>
- [11] *Spolehlivost dodávek elektrické energie* [online]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2015/AMPER_EproB_XIV/02-Prezentace_Paar_amper_v3.pdf
- [12] *Zásady cenové regulace pro období 2016-2018 pro odvětví elektroenergetiky, plynárenství a pro činnosti operátora trhu v elektroenergetice a plynárenství* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.eru.cz/documents/10540/462862/Zasady-cenove-regulace-IV-RO.pdf/e438802a-b956-4df7-8353-89ccfd72a1ae>
- [13] VÍTEK, Miroslav. *Ekonomika dopravních energetických systémů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 8001025462.
- [14] *22-AXEKVCEY 12,7/22 (25) kV* [online]. Dostupné z: http://www.vodice-kabely.cz/index.php?option=com_mtree&task=att_download&link_id=218&cf_id=50
- [15] *Silové kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylénu / Power Cables with XLPE Insulation* [online]. nedatováno, s. 1. Dostupné z: [44](http://81.0.246.66/nkt_pk/datasheets_pdf/22-</div><div data-bbox=)

- [16] VOŽENÍLEK, Petr, Vladimír NOVOTNÝ a Pavel MINDL. *Elektromechanické měniče*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
ISBN 9788001048757.

13 Seznam tabulek a obrázků

Tabulka 9-1: Závazné parametry ukazatelů kvality pro jednotlivé společnosti [12]	21
Tabulka 9-2: Hodnoty ukazatele kvality provozovatelů DS v letech 2015 a 2014 [12]	21
Tabulka 10-1: Parametry použitých transformátorů	32
Tabulka 10-2: Elektrotechnické parametry použitého kabelového vedení AXEKVCEY	33
Tabulka 10-3: Mechanické parametry použitého kabelu AXEKVCEY	33
Tabulka 10-4: Proudů a výkonů ve větvích odděleně pracujících sítě	35
Tabulka 10-5: Napětí v uzlech sítě	36
Tabulka 10-6: Napětí v uzlech zatížené sítě	36
Tabulka 10-7: Proudů a výkonů ve větvích můstkové sítě	37
Tabulka 10-8: Napětí v uzlech méně zatížené můstkové sítě	37
Tabulka 10-9: Napětí a úbytky v uzlech sítě s větším zatížením	38
Tabulka 10-10: Ztráty ve větvích sítě (vlevo paralelní provoz, vpravo paprskový)	38
Tabulka 14-1: Výkaz zisku a ztráty společnosti PREdistribuce, a. s. za roky 2014 a 2015	46
Tabulka 14-2: Tabulka parametrů všech prvků	47
Tabulka 14-3: Tabulka parametrů všech prvků sítě s větším zatížením	48
Obrázek 3-1: Struktura paprskového rozvodu [2]	3
Obrázek 3-2: Struktura můstkového rozvodu [2]	4
Obrázek 3-3: Struktura průběžného rozvodu [2]	5
Obrázek 3-4: Struktura mřížového rozvodu [2]	5
Obrázek 7-1: Přehled distribučních soustav ČR [9]	12
Obrázek 8-1: Ukazatel nepřetržitosti SAIDI v období let 2008 až 2015 tuzemských DS [8] ..	16
Obrázek 8-2: Ukazatel nepřetržitosti SAIFI v období let 2008 až 2015 tuzemských DS [8] ..	16
Obrázek 8-3: Celková délka vedení jednotlivých tuzemských DS [8]	17
Obrázek 8-4: Podíl kabelových a venkovních vedení distribučních soustav České republiky [8]	18
Obrázek 8-5: Schéma motivační regulace kvality [12]	18
Obrázek 9-1: K výpočtu bonusu za SAIFI pro PREdistribuci, a. s. za rok 2015	22
Obrázek 9-2: K výpočtu bonusu za SAIDI pro PREdistribuci, a. s. za rok 2015	23
Obrázek 10-1: Řez kabelem AXEKVCEY [15]	33
Obrázek 10-2: Modelové schéma sítě s paralelně pracujícími transformátory	35
Obrázek 10-3: Rozvoj zkratu v odděleně pracujících sítích	39
Obrázek 14-1: Modelové schéma sítě s transformátory pracujícími odděleně	49
Obrázek 14-2: Porovnání zkratů v obou způsobech provozu	49

14 Přílohy

14.1 Příloha 1: Výkaz zisku a ztráty PREdistribuce, a. s.

	2015	2014
Tržby za distribuční služby ve Skupině	5 923 187	6 493 197
Tržby za distribuční služby mimo Skupinu	3 461 051	3 021 465
Náklady na přenosové a systémové služby	- 4 983 231	- 5 105 502
Obchodní marže	4 401 007	4 409 160
Výnosy z ostatních služeb	31 842	53 761
Výkonová spotřeba	- 1 386 963	- 1 447 986
Spotřeba materiálu a energie	- 42 458	- 41 706
Nakoupené služby	- 1 344 505	- 1 406 280
Přidaná hodnota	3 045 886	3 014 935
Osobní náklady	- 439 664	- 444 076
Mzdové náklady	- 283 767	- 281 357
Odměny členům orgánů společnosti	- 12 864	- 10 955
Náklady na sociální zabezpečení a zdravotní pojištění	- 104 989	- 103 529
Sociální náklady	- 38 044	- 48 235
Daně a poplatky	- 2 343	- 1 709
Odpisy dlouhodobého nehmotného a hmotného majetku	- 1 447 300	- 1 404 125
Tržby z prodeje majetku a materiálu	11 355	8 854
Tržby z prodeje majetku	9 682	6 736
Tržby z prodeje materiálu	1 637	2 118
Zůstatková cena prodaného majetku	- 12 547	- 10 529
Změna stavu rezerv a opravných položek	959	23 589
Ostatní provozní výnosy	230 856	245 525
Ostatní provozní náklady	- 14 410	- 32 731
Provozní výsledek hospodaření	1 372 792	1 399 733
Výnosové úroky	7	
Nákladové úroky	- 73 316	- 42 513
Ostatní finanční výnosy	8	9
Ostatní finanční náklady	- 288	- 320
Finanční výsledek hospodaření	- 73 589	- 42 824
Daň z příjmu za běžnou činnost	- 247 177	- 264 345
– splatná	- 284 745	- 249 620
– odložená	1 568	14 725
Výsledek hospodaření za běžnou činnost	1 052 026	1 092 564
Výsledek hospodaření za účetní období	1 052 026	1 092 564

Tabulka 14-1: Výkaz zisku a ztráty společnosti PREdistribuce, a. s. za roky 2014 a 2015

14.2 Příloha 2: Parametry použitých prvků sítě

Nap. uzel	Název	U _{vnt} [kV]	U _{prv} [kV]	I _{zkr} [kA]	S _{zkr} [MVA]	R/X	R ₀ /R ₁ [-]	X ₀ /X ₁ [-]	Maxim. Sk	Zap.		H. úhel	Blok. tr.
										prim.	sekun.		
	N1	110	110	20	3810,512	0	1	1	NE				
	N2	110	110	20	3810,512	0	1	1	NE				
Trafo	Název	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	St [MVA]	P _k [kW]	U _k [%]	io [%]	P _o [kW]	Zap. prim.	Zap. sekun.	H. úhel	Blok. tr.	
		T101	110	23	63	359	16,8	0,28	41,58	YN	yn	1	NE
	T102	110	23	63	176	17,5	0,39	23	YN	yn	1	NE	
		Reg. odb.	Počet. odb.	Krok [%]	I _{n1} [A]	I _{n2} [A]	X _{n1} [Ohm]	R _{n1} [Ohm]	X _{n2} [Ohm]	R _{n2} [Ohm]	Ro/R1 [-]	Xo/X1 [-]	
	T101	ANO	8	2	331	1581	0	0	0	0	1	1	
	T102	ANO	8	2	331	1581	0	0	0	0	1	1	
Vedení	Název	Druh	Typ	R/km	X/km	B/km	Délka [km]	I _{max} [A]	Ro/R1 [-]	Xo/X1 [-]			
	V1	kabel-22	AXEKVCEY	0,13	0,127	94	4	506	1	1			
	V2	kabel-22	AXEKVCEY	0,13	0,127	94	0,6	506	1	1			
V3	kabel-22	AXEKVCEY	0,13	0,127	94	1,9	506	1	1				
Zátěž	Název	U [kV]	I [A]	cos φ	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Q _k [kVAr]					
	Z01	22	750	0,98	28007,26	5687,12	28578,84	0					
	Z2	22	190	0,87	6298,78	3569,68	7239,97	0					
Z1	22	45	0,9	1543,26	747,43	1714,73	0						
Z02	22	500	0,99	18862,03	2687,69	19052,56	0						

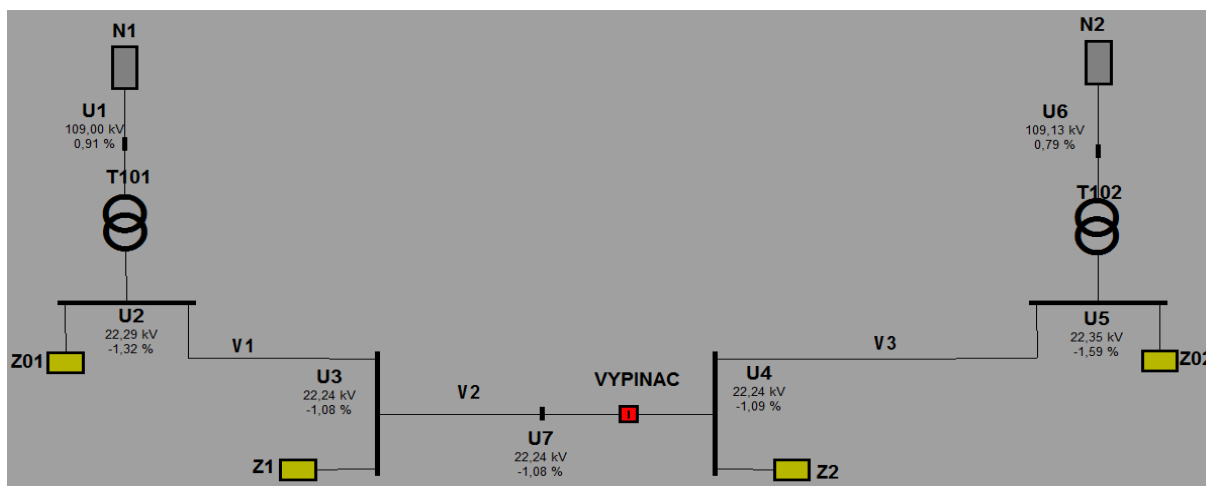
Tabulka 14-2: Tabulka parametrů všech prvků

14.3 Příloha 3: Parametry prvků sítě s větším zatížením

Nap. uzel	Název	U _{vnt} [kV]	U _{prv} [kV]	I _{zkr} [kA]	S _{zkr} [MVA]	R/X	R ₀ /R ₁ [-]	X ₀ /X ₁ [-]	Maxim. Sk	Zap. prim.	Zap. sekun.	H. úhel	Blok. tr.
	N1	110	110	20	3810,512	0	1	1	NE				
	N2	110	110	20	3810,512	0	1	1	NE				
Trafo	Název	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	St [MVA]	P _k [kW]	U _k [%]	i ₀ [%]	P ₀ [kW]	Zap. prim.	Zap. sekun.	H. úhel	Blok. tr.	
	T101	110	23	63	359	16,8	0,28	41,58	YN	yn	1	NE	
	T102	110	23	63	176	17,5	0,39	23	YN	yn	1	NE	
		Reg. odb.	Počet. odb.	Krok [%]	I _{n1} [A]	I _{n2} [A]	X _{n1} [Ohm]	R _{n1} [Ohm]	X _{n2} [Ohm]	R _{n2} [Ohm]	R ₀ /R ₁ [-]	X ₀ /X ₁ [-]	
	T101	ANO	8	2	331	1581	0	0	0	0	1	1	
	T102	ANO	8	2	331	1581	0	0	0	0	1	1	
Vedení	Název	Druh	Typ	R/km	X/km	B/km	Délka [km]	I _{max} [A]	R ₀ /R ₁ [-]	X ₀ /X ₁ [-]			
	V1	kabel-22	AXEKVCEY	0,13	0,127	94	4	506	1	1			
	V2	kabel-22	AXEKVCEY	0,13	0,127	94	0,6	506	1	1			
	V3	kabel-22	AXEKVCEY	0,13	0,127	94	1,9	506	1	1			
Zátěž	Název	U [kV]	I [A]	cos φ	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]	Q _k [kVAr]					
	Z01	22	750	0,98	28007,3	5687,1	28578,8	0					
	Z2	22	300	0,93	10631,3	4201,8	11431,5	0					
	Z1	22	500	0,9	17147,3	8304,8	19052,6	0					
	Z02	22	700	0,99	26406,9	3762,8	26673,6	0					

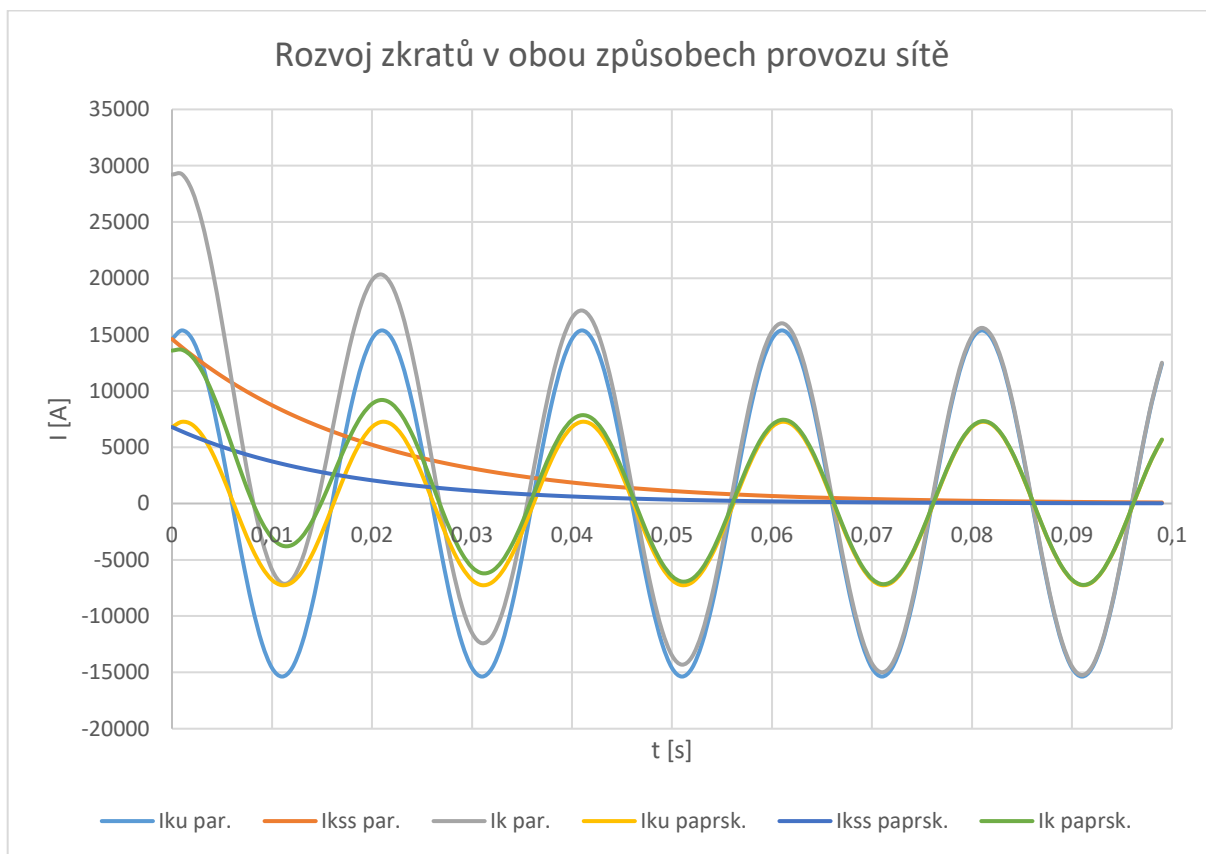
Tabulka 14-3: Tabulka parametrů všech prvků sítě s větším zatížením

14.4 Příloha 4: Schéma paprskové sítě



Obrázek 14-1: Modelové schéma sítě s transformátory pracujícími odděleně

14.5 Příloha 5: Porovnání zkratů



Obrázek 14-2: Porovnání zkratů v obou způsobech provozu