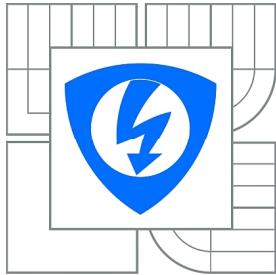


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ZMĚNY VELIKOSTI NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SÍTI NN V DŮSLEDKU ZVÝŠENÍ IMPEDANCE MEZI UZLEM ZDROJE A ZÁTĚŽE A NEVYVÁŽENÉHO ZATÍŽENÍ

VOLTAGE MAGNITUDE DEVIATIONS IN A LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK
DUE TO INCREASE IN IMPEDANCE OF Y-CONNECTED LOAD NODE TO GROUND AND
UNBALANCED LOAD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

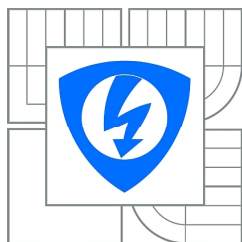
ONDŘEJ BLAŽEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Ondřej Blažek

ID: 98130

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

**Změny velikosti napětí v distribuční síti NN
v důsledku zvýšení impedance mezi uzlem zdroje a zátěže a nevyváženého
zatížení**

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis distribučních sítí NN.
2. Sestavení modelu vzorové sítě v prostředí Matlab Simulink.
3. Provedení parametrických simulací v závislosti na nevyváženosti impedance sítě, a nevyváženosti a velikosti zátěže.
4. Vyhodnocení kvality elektrické energie ve vztahu k řešenému problému a určení mezních stavů.
5. Ověření výsledků simulací a závěrů na fyzikálním modelu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

BLAŽEK, O. *Změny velikosti napětí v distribuční síti NN v důsledku zvýšení impedance mezi uzlem zdroje a zátěže a nevyváženého zatížení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 77 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Drápel, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci (bakalářskou práci)** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....

Za účinnou odbornou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování této bakalářské práce bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Drápelovi Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

**ZMĚNY VELIKOSTÍ NAPĚTÍ
V DISTRIBUČNÍ SÍTI NN V DŮSLEDKU
ZVÝŠENÍ MEZI UZLEM ZDROJE A ZÁTĚŽE
A NEVYVÁŽENÉHO ZATÍŽENÍ**

Ondřej Blažek

vedoucí: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

**VOLTAGE MAGNITUDE DEVIATIONS IN
A LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION
NETWORK DUE TO INCREASE IN
IMPEDANCE Y-CONNECTED LOAD NODE
TO GROUND AND UNBALANCED LOAD**

by
Ondřej Blažek

**Supervisor: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
Brno University of Technology, 2011**

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou nesymetrického zatížení třífázové sítě a s tím spojeného zatížení středního vodiče.

V úvodu jsou rozebrány druhy soustav, ve kterých jsou distribuční sítě realizovány, dále pak části sítí, které se podílejí na problematice, která je předmětem této práce.

Teoretická část rozebírá možné provozní stavy, které vedou k toku vyrovnávacích proudů středním vodičem, ukazuje na souvislosti mezi velikostí vyrovnávacího proudu a způsobem zatížení sítě. Dále jsou zde naznačena možná rizika, která mohou tyto situace představovat pro provoz sítě z hlediska funkce i bezpečnosti.

Praktická část se zabývá simulacemi na matematickém modelu vytvořeném v programu MATLAB. Jsou zde provedeny simulace, na základě kterých je popsáno chování sítě pro dané případy navozených nepříznivých faktorů.

V závěru práce jsou shrnuty nejpodstatnější výsledky a poznatky, které simulace přinesly.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Střední vodič; nesymetrické výkonové zatížení; proudová nesymetrie; napěťová nesymetrie; vyrovnávací proudy; MATLAB SIMULINK

ABSTRACT:

This work deals with the issue of an unbalanced power load of a three-phase main load and the associated network load of a PEN conductor.

The introduction discusses the various types of systems where the distribution networks are implemented. Followed by the description of network segments causing issues discussed in this paper.

The theoretical part discusses the possible operating conditions which lead to balancing the flow of neutral current, also shows the relation of the size of countervailing power charges and the form of the network load. There are also hints of possible risks that the mentioned situations may cause to the network operation in terms of function and safety.

The practical part deals with the mathematical simulation model created in MATLAB. There are simulations based on which there is a description of the network behavior for the cases of induced adverse factors.

The conclusion summarizes the most important results and findings produced by the simulations.

KEY WORDS:

PEN conductor; unbalanced power loads; current unbalance; voltage unbalance; balancing currents; Matlab Simulink

OBSAH:

OBSAH:	8
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM GRAFŮ	12
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	14
1 ÚVOD	16
2 CÍLE PRÁCE	17
3 VÝROBA A DISTRIBUCE ELEKTRICKÉ ENERGIE	18
3.1 VÝROBA	18
3.2 PŘENOS, DISTRIBUCE	18
4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SÍTÍ NN A POJMY	19
4.1 VODIČE POUŽÍVANÉ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH NN A JEJICH ZNAČENÍ	19
4.1.1 FÁZOVÉ VODIČE	19
4.1.2 PRACOVNÍ VODIČE N, PEN.....	19
4.2 UVAŽOVANÝ DRUH SÍTĚ	20
4.2.1 DRUHY SÍTÍ UŽÍVANÝCH PRO DISTRIBUCI VŠEOBECNĚ	20
4.2.2 POPIS SYSTÉMU V RÁMCI TÉTO BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	20
4.3 POUŽÍVANÁ NAPĚTÍ	21
5 KVALITA DODÁVANÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE	22
5.1 VELIKOST NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	22
5.2 DOČASNÁ PŘEPĚTÍ O SÍTOVÉM KMITOČTU MEZI ŽIVÝMI VODIČI A ZEMÍ	22
5.3 NESYMETRIE NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	23
6 ZÁTĚŽE PROVOZOVANÉ NA SÍTÍCH	24
6.1 LINEÁRNÍ ZÁTĚŽ	24
6.2 NELINEÁRNÍ ZÁTĚŽ	25
7 PŘÍČINY VZNIKU VYROVNÁVACÍCH PROUDŮ VE STŘEDNÍM VODIČI	26
7.1 NESYMETRIE NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	27
7.2 NEROVNOMĚRNÉ ROZLOŽENÍ ZÁTĚŽÍ NA SÍTI (PROUDOVÁ NESYMETRIE)	28
7.2.1 PŘÍPAD 1	28
7.2.2 PŘÍPAD 2	29
7.3 RŮZNÉ ÚČINÍKY ZÁTĚŽÍ	30
7.3.1 PŘÍPAD 1	30
7.3.2 PŘÍPAD 2	31
7.4 SHRNUÍ POZOROVÁNÍ	31
8 MATLAB - SIMULINK	32

8.1 BLOKY POUŽITÉ PRO SESTAVENÍ SÍTĚ	32
8.1.1 ZDROJ	32
8.1.2 VEDENÍ	32
8.1.3 ZÁTĚŽE	33
8.1.4 MĚŘENÍ	33
8.2 ZADÁVÁNÍ PARAMETRŮ A ZÁZNAM HODNOT	33
9 VÝCHOZÍ STAVY SIMULACÍ A OZNAČENÍ	34
9.1 VÝCHOZÍ NASTAVENÍ	34
9.1.1 NAPÁJECÍ NAPĚTÍ ZDROJE	34
9.1.2 PARAMETRY VEDENÍ	34
9.1.3 ÚČINÍK A VÝKONY ZÁTĚŽÍ	36
10 SIMULACE NA MODELU MATLAB - SIMULINK	37
10.1 SIMULACE V RÁMCI TĚTO PRÁCE	37
10.2 VLIV ZMĚNY IMPEDANCE STŘEDNÍHO VODIČE NA PARAMETRY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	38
10.2.1 VÝCHOZÍ NASTAVENÍ MODELU	38
10.2.2 PROUDOVÁ NESYMETRIE PRO TUTO SIMULACI	38
10.2.3 ZAVEDENÁ OZNAČENÍ A VYJÁDŘENÍ PRO TUTO SIMULACI	39
10.2.4 ZMĚNA IMPEDANCE STŘEDNÍHO VODIČE	39
10.2.5 KONEČNÝ ČINNÝ ODPOR STŘEDNÍHO VODIČE	39
10.2.6 SIMULACE Č.1, VÝCHOZÍ PROUDOVÁ NESYMETRIE 20%	40
10.2.7 SIMULACE Č.2, VÝCHOZÍ PROUDOVÁ NESYMETRIE 50%	43
10.2.8 SIMULACE Č.3, VÝCHOZÍ PROUDOVÁ NESYMETRIE 80%	46
10.2.9 SIMULACE Č.4, VÝCHOZÍ PROUDOVÁ NESYMETRIE 100%	49
10.2.10 VYHODNOCENÍ SIMULACÍ	51
10.2.11 PŘEKROČENÍ POVOLENÝCH LIMITŮ PRO NAPĚTÍ	51
10.2.12 POPIS CHOVÁNÍ SÍTĚ	52
10.2.13 ZHODNOCENÍ Z HLEDISKA MOŽNÉHO VZNIKU ŠKOD	53
10.3 VLIV PROUDOVÉ NESYMETRIE NA VYROVNÁVACÍ PROUD STŘEDNÍM VODIČEM A ZMĚNY NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ	54
10.3.1 VÝCHOZÍ NASTAVENÍ MODELU	54
10.3.2 PRŮBĚH A CÍLE SIMULACE	54
10.3.3 GRAFY	55
10.3.4 POPIS CHOVÁNÍ SÍTĚ	57
10.4 VLIV ZMĚNY ÚČINÍKU ZÁTĚŽÍ NA PARAMETRY NAPÁJENÍ	58
10.4.1 VÝCHOZÍ NASTAVENÍ MODELU	58
10.4.2 VYJÁDŘENÍ ZMĚNY ÚČINÍKŮ ZÁTĚŽÍ	58
10.4.3 GRAFY	59
10.4.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE	61
10.4.5 ZÁVĚR Z VÝSLEDKŮ SIMULACE	61
10.5 ZKRATOVÝ VÝKON SÍTĚ	62
10.5.1 VÝCHOZÍ NASTAVENÍ MODELU	62
10.5.2 PROUDOVÁ NESYMETRIE PRO TUTO SIMULACI	62
10.5.3 ZAVEDENÁ OZNAČENÍ A VYJÁDŘENÍ PRO TUTO SIMULACI	63
10.5.4 MĚŘÍTKO AKTUÁLNÍHO VÝKONU A ZKRATOVÉHO VÝKONU SÍTĚ	63
10.5.5 NASTAVENÍ SIMULACE	65
10.5.6 VYJÁDŘENÍ ZMĚNY ZATÍŽENÍ	65

Obsah:

10.5.7 SIMULACE Č.1, VÝCHOZÍ PROUDOVÁ NESYMETRIE 20%	66
10.5.8 SIMULACE Č.2, VÝCHOZÍ PROUDOVÁ NESYMETRIE 50%	68
10.5.9 SIMULACE Č.3, VÝCHOZÍ PROUDOVÁ NESYMETRIE 80%	70
10.5.10 POPIS CHOVÁNÍ SÍTĚ	72
11 ZÁVĚR	73
11.1 POROVNÁNÍ OKOLNOSTÍ VZNIKU MEZNÍCH STAVŮ	73
11.2 EFEKTIVNÍ HODNOTA FÁZOVÝCH NAPĚTÍ	74
11.3 ČINTEL NESYMETRIE NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	74
11.4 ÚBYTEK NAPĚTÍ NA STŘEDNÍM VODIČI	74
11.5 PŘÍNOS TÉTO PRÁCE.....	75
12 POUŽITÁ LITERATURA.....	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr.: 4-1 Grafické znázornění fázových a sdružených napětí</i>	<i>21</i>
<i>Obr.: 6-1 V-A charakteristika lineární zátěže [2]</i>	<i>24</i>
<i>Obr.: 6-2 Příklad k třífázovému zdroji připojené třífázové zátěže zapojené do hvězdy.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr.: 6-3 Fázorové diagramy napětí a proudu čistě ohmické lineární zátěže.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr.: 6-4 V-A charakteristika nelineární zátěže [2]</i>	<i>25</i>
<i>Obr.: 7-1 Fázorové diagramy pro síť s nesymetrickým napájecím napětím.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr.: 7-2 Fázorové diagramy pro síť s nerovnoměrně rozloženou zátěží - 1. případ</i>	<i>28</i>
<i>Obr.: 7-3 Fázorové diagramy pro síť s nerovnoměrně rozloženou zátěží - 2. případ</i>	<i>29</i>
<i>Obr.: 7-4 Fázorové diagramy pro síť s různými účinitky zátěží - 1. případ.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr.: 7-5 Fázorové diagramy pro síť s různými účinitky zátěží - 2. případ.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr.: 8-1 Blok zdroje</i>	<i>32</i>
<i>Obr.: 8-2 Bloky R-L článků vedení.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr.: 8-3 Bloky R-L článků zátěží.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr.: 8-4 Nastavení parametrů zátěže ve fázi L_1</i>	<i>33</i>
<i>Obr.: 10-1 Fázorové diagramy pro změnu účinitku zátěže na fázi L_2.....</i>	<i>60</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf: 10-1 Průběh napětí v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 20%</i>	40
<i>Graf: 10-2 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 20%</i>	41
<i>Graf: 10-3 Skutečná nap. a proud. nesymetrie pro výchozí proudovou nesymetrii 20%</i>	41
<i>Graf: 10-4 Skutečná nap. a proud. nevyváženost pro výchozí proudovou nesymetrii 20%</i>	42
<i>Graf: 10-5 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 20%</i>	42
<i>Graf: 10-6 Průběh napětí v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 50%</i>	43
<i>Graf: 10-7 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 50%</i>	44
<i>Graf: 10-8 Skutečná nap. a proud. nesymetrie pro výchozí proudovou nesymetrii 50%</i>	44
<i>Graf: 10-9 Skutečná nap. a proud. nevyváženost pro výchozí proudovou nesymetrii 50%</i>	45
<i>Graf: 10-10 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 50%</i>	45
<i>Graf: 10-11 Průběh napětí v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 80%</i>	46
<i>Graf: 10-12 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 80%</i>	47
<i>Graf: 10-13 Skutečná nap. a proud. nesymetrie pro výchozí proudovou nesymetrii 80%</i>	47
<i>Graf: 10-14 Skutečná nap. a proud. nevyváženost pro výchozí proudovou nesymetrii 80%</i> ...	48
<i>Graf: 10-15 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 80%</i>	48
<i>Graf: 10-16 Průběh napětí v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 100%</i>	49
<i>Graf: 10-17 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 100%</i>	50
<i>Graf: 10-18 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 100%</i>	50
<i>Graf: 10-19 Napětí na zátěžích a středním vodiči pro rostoucí proudovou nesymetrii</i>	55
<i>Graf: 10-20 Proudů zátěžemi a středním vodičem pro rostoucí proudovou nesymetrii</i>	55
<i>Graf: 10-21 Závislost fáze vyrovnávacího proudu na rozložení zátěží</i>	56
<i>Graf: 10-22 Napětí na zátěžích v závislosti na účinníku sítě</i>	59
<i>Graf: 10-23 Velikost proudu středním vodičem v závislosti na účinníku sítě</i>	59
<i>Graf: 10-24 Napětí na zátěžích v závislosti na účinníku sítě (zvýšený výkon)</i>	60
<i>Graf: 10-25 Závislost fázových napětí a napětí na středním vodiči na M_{sk} pro $\rho_I=20%$</i>	66
<i>Graf: 10-26 Závislost proudů fázemi a středním vodičem na M_{sk} pro $\rho_I=20%$</i>	66
<i>Graf: 10-27 Závislost výkonů na M_{sk} pro $\rho_I=20%$</i>	67
<i>Graf: 10-28 Závislost činitelů nesymetrie a napětí na M_{sk} pro $\rho_I=20%$</i>	67
<i>Graf: 10-29 Závislost fázových napětí a napětí na středním vodiči na M_{sk} pro $\rho_I=50%$</i>	68
<i>Graf: 10-30 Závislost proudů fázemi a středním vodičem na M_{sk} pro $\rho_I=50%$</i>	68
<i>Graf: 10-31 Závislost výkonů na M_{sk} pro $\rho_I=50%$</i>	69
<i>Graf: 10-32 Závislost činitelů nesymetrie a napětí na M_{sk} pro $\rho_I=50%$</i>	69
<i>Graf: 10-33 Závislost fázových napětí a napětí na středním vodiči na M_{sk} pro $\rho_I=80%$</i>	70
<i>Graf: 10-34 Závislost proudů fázemi a středním vodičem na M_{sk} pro $\rho_I=80%$</i>	70
<i>Graf: 10-35 Závislost výkonů na M_{sk} pro $\rho_I=80%$</i>	71
<i>Graf: 10-36 Závislost činitelů nesymetrie a napětí na M_{sk} pro $\rho_I=80%$</i>	71

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 10-1 Výchozí parametry pro simulaci změny impedance středního vodiče</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 10-2 Přehled nastavení výkonových poměrů pro dosažení žádané ρ_1.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab.: 10-3 Shrnutí získaných údajů pro část 0 (výchozí proudová nesymetrie 20%).....</i>	<i>51</i>
<i>Tab.: 10-4 Shrnutí získaných údajů pro část 10.2.7 (výchozí proudová nesymetrie 50%).....</i>	<i>51</i>
<i>Tab.: 10-5 Shrnutí získaných údajů pro část 10.2.8 (výchozí proudová nesymetrie 80%).....</i>	<i>51</i>
<i>Tab.: 10-6 Shrnutí získaných údajů pro část 10.2.9 (výchozí proudová nesymetrie 100%)....</i>	<i>52</i>
<i>Tab.: 10-7 Porovnání vlivu změny impedance středního vodiče v závislosti na ρ_1.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 10-8 Výchozí parametry pro simulaci změny výkonové nesymetrie.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 10-9 Výchozí parametry pro simulaci změny účinníků zátěží.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 10-10 Výchozí parametry pro simulaci</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 10-11 Přehled nastavení výchozích poměrů výkonů zátěží pro dosažení žádané ρ_1.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab.: 10-12 Shrnutí získaných údajů pro část 10.5.7 (výchozí proudová nesymetrie 20%)... </i>	<i>72</i>
<i>Tab.: 10-13 Shrnutí získaných údajů pro část 10.5.8 (výchozí proudová nesymetrie 50%)....</i>	<i>72</i>
<i>Tab.: 10-14 Shrnutí získaných údajů pro část 10.5.9 (výchozí proudová nesymetrie 80%)....</i>	<i>72</i>
<i>Tab.: 11-1 Poměrové ukazatele v závislosti na zhoršení sledovaných parametrů mimo mez..</i>	<i>73</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

U_S	sousledná složka napětí
U_Z	zpětná složka napětí
U_N	netočivá složka napětí
U_f	fázové napětí
U_s	sdružené napětí
U_n	jmenovité napětí
$U_{Z1,2,3n}$	fázové napětí použité pro výpočet výkonů zátěží
U_{ndov}	dovolené meze napětí dovolené meze napětí $\pm 10\%$
$I_{Z\check{c}}$	činný proud zátěží
I_{Zj}	jalový proud zátěží
I_Z	komplexní proud zátěží
I_{kf1}	proud při jednofázovém zkratu
I_{kf2}	proud při dvoufázovém zkratu
I_{kf3}	proud při třífázovém zkratu
I_{PEN}	proud středním vodičem (vyrovnávací)
P_Z	činný výkon zátěže
Q_Z	jalový výkon zátěže
S_Z	zdánlivý výkon zátěže
ρ_u	činitel nesymetrie napájecího napětí (v místě odběru)
ρ_I	činitel proudové nesymetrie (v místě odběru)
f_n	fundamentální frekvence sítě (50Hz)
$\cos\varphi_Z$	účinník zátěže obecně
$\cos\varphi_{Z1}$	účinník zátěže připojené na fázi L_1
$\cos\varphi_{Z2}$	účinník zátěže připojené na fázi L_2
$\cos\varphi_{Z3}$	účinník zátěže připojené na fázi L_3
$\cos\varphi_s$	celkový účinník sítě
S_{k1}	zkratový výkon při jednofázovém zkratu
S_{k2}	zkratový výkon při dvoufázovém zkratu
S_{k3}	zkratový výkon při třífázovém zkratu
S_{zc}	celkový výkon dodávaný zdrojem do sítě
R_{PEN}	činný odpor středního vodiče
R_{PEN-0}	činný odpor středního vodiče ve výchozím stavu
R_{PEN-F}	činný odpor středního vodiče reprezentující poruchu
R_{PEN-E}	konečná hodnota činného odporu středního vodiče

Seznam symbolů a zkratk

Z_{Sk1}	impedance při jednofázovém zkratu
Z_{Sk2}	impedance při dvoufázovém zkratu
Z_{Sk3}	impedance při třífázovém zkratu
L_F	indukčnost fázového vodiče
L_{PEN}	indukčnost středního vodiče
Z_F	impedance fázového vodiče
Z_{PEN}	impedance středního vodiče
Z_Z	impedance zátěže
R_Z	činný odpor zátěže
X_Z	reaktance zátěže
L_Z	indukčnost zátěže
X_{PEN}	reaktance středního vodiče
M_{Z-PEN}	parametr vyjadřující změnu impedance středního vodiče
M_{Sk}	měřítko vyjádření změny zatížení sítě

1 ÚVOD

Elektrina je dnes nedílnou součástí lidstva skýtající mnoho směrů využití od těžkého průmyslu až po zařízení miniaturních rozměrů. Zasahuje do oblasti výroby, zábavy, vzdělávání, gastronomie, dopravy a lékařství, vzhledem k nasazení je nedílnou součástí našich životů. Žádný vynález neprošel v rozmezí relativně krátkého času takovým rozvojem. Od počátků využití v telegrafii přes první vynálezy světelných zdrojů a točivých strojů až po dnešní výpočetní techniku neuplynulo ani 200let. Složitost těchto systémů se však nadále zvyšuje, což přináší nároky na kvalitu elektrické energie a spolehlivost distribučních sítí, které energii přenášejí. V nejdrtivější většině jsou na sítích provozovány jednofázové spotřebiče, určené pro napájení fázovým napětím, tedy napětím, které změníme mezi fázovou a nulovou svorkou, která je spojena s uzlem zdroje. Připojování spotřebičů je nahodilé a stěží předvídatelné, což předpokládá provedení vhodných opatření pro eliminaci možných kritických stavů způsobených tímto provozem. Dimenzování středních vodičů, které jsou těmito stavy často nadměrně namáhány, je nutné přikládat vysokou pozornost, neboť selhání této části obvodu může mít až fatální následky. Správnost při rozhodování o způsobu provedení rozvodů je závislá na znalostech chování sítě v různých provozních stavech, které mohou nastat při jejím provozování a na možných následcích, které může mít za vinu právě nevhodně dimenzovaná síť.

2 CÍLE PRÁCE

Tato práce se zabývá vlivy různých zatížení na celkové chování sítě. Pomocí parametrických simulací budou objasněny změny kvality napájecího napětí v místě odběru v závislosti na různých změnách charakteru, velikosti a rozložení zátěží, na změnách poměru zatížení sítě a zkratového výkonu sítě, a na změnách impedance středního vodiče. Budou vytyčeny kritické body, při kterých se síť stává neschopnou bezpečného provozu vlivem vzniku vysokých dotykových napětí, popřípadě svými parametry nevyhovuje napájení spotřebičů, které mají pro svůj provoz pevně určeny napájecí podmínky. V práci budeme pracovat pouze s lineárními zátěžemi, které při svém provozu nevytváří vyšší harmonické složky proudu, tedy i harmonické zkreslení napětí. Veškeré simulace budou provedeny na matematickém modelu v programu MATLAB za použitý grafické nadstavby SIMULINK a podpůrných knihoven SimPower.

3 VÝROBA A DISTRIBUCE ELEKTRICKÉ ENERGIE

3.1 Výroba

Výroba elektrické energie probíhá v k tomu určených zařízeních, tedy elektrárnách. Jedná se o méně či více složité technické celky schopné přeměny různých zdrojů energie (síla vodních toků, solární zdroje, fosilní nebo jaderné palivo) právě v elektrickou. Elektrárny pracující v základním energetickém režimu jsou v dnešní době především tepelné, měnící energii skrytou v jádru nebo fosilních palivech na energii tepelnou, využívanou pro vývin páry, která je dále prostřednictvím parních turbín měněna v energii kinetickou. Kinetická energie je dále prostřednictvím synchronních rychloběžných generátorů měněna na energii elektrickou, která je ze všech forem energie nejsnadněji transportovatelná na velké vzdálenosti.

3.2 Přenos, distribuce

Přenos energie je pojem shrnující pod sebou systém dopravy a úpravy elektrické energie s cílem dosažení nejekonomičtějšího provozu a eliminace vlivů snižujících kvalitu elektrické energie u odběratele. Spojuje pod sebou zařízení pro přenos elektrické energie mezi elektrárnami a uživatelem, zároveň umožňuje propojení více elektráren do jednoho celku, což zvyšuje celkovou stabilitu tohoto systému a odolnost vůči změnám zatížení v síti. Pro maximální efektivitu přenosu je energie transformována na různé napěťové hladiny (22, 35, 110, 220, 400kV), v místě, kde je elektrická energie spotřebována, je napětí upraveno na konečnou hodnotu dle druhu odběratele 0,4, 6 a 22kV. Dopravu elektrické energie ke konečným uživatelům obstarávají distribuční sítě.

4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SÍTÍ NN A POJMY

V rámci této bakalářské práce budou použity některé parametry a výrazy, kterými lze charakterizovat provozní stav nebo chování sítě NN. Popis chování třífázových systémů nebo závislosti na určitých vlastnostech je nutné charakterizovat pro možnost porovnání a vyjádření závislostí jedním číslem nebo poměrem.

4.1 Vodiče používané v distribučních sítích NN a jejich značení

Distribuční sítě NN jsou provedené jako čtyřvodičové, z toho tři vodiče jsou určeny jako fázové s barevným odlišením hnědá, šedá a černá, případně ve starším provedení je rozlišení provedeno barvou hnědou a zbylé dva fázové vodiče mají černou izolaci. Zbylý vodič je odlišen zeleno-žlutou barvou a slouží jako vodič sdružující v sobě funkci ochranného a středního vodiče.

4.1.1 Fázové vodiče

Jedná se o živé vodiče, mezi nimiž změříme v ideálním případě sdružené napětí $U_s = 400\text{V}$. Mezi fází a uzlem spojeným se zemí pak změříme fázové napětí $U_f = 230\text{V}$. Jednotlivé fáze reprezentuje písemné označení U, V, W (dle starého značení R, S, T).

4.1.2 Pracovní vodiče N, PEN

V elektroinstalacích NN se vyskytuje střední vodič čistě jako pracovní pro vedení vyrovnávacích proudů, značený je písmenem "N", nebo jako vodič se sdruženou funkcí pracovního a ochranného vodiče, ten je značený jako vodič "PEN". V případě distribučního rozvodu je z trafostanice rozvod proveden čtyřvodičově, tedy 3/PEN AC 400/230V / TN-C se třemi fázovými vodiči a vodičem PEN, kdy v určených úsecích je pomocně přizemňován (v případě sloupového rozvodu je uzemněn svodem připojeným k zemniči, v případě kabelového rozvodu je přizemnění provedeno v určených odbočkových skříních). Rozvody NN v domech, kancelářských budovách i průmyslových provozech v současnosti bývají provedeny v síti 3/N/PE AC 400/230V 50Hz / TN-S, z části však stále podle neplatné normy ČSN 34 1010 v síti TN-C.

4.2 Uvažovaný druh sítě

4.2.1 Druhy sítí užívaných pro distribuci všeobecně

Zpravidla se vyskytují systémy TT a TN, systém IT se v rozvodech NN pro ČR nevyskytuje. První zmíněná síť TT se již v dnešních distribučních rozvodech až na výjimky (může se vyskytovat i dnes v případech, kdy představuje jediné funkční řešení z hlediska ochrany před úrazem elektrickým proudem) nepoužívá. Jedná se o síť, jejíž zdroj má vyvedený uzel (vinutí strany NN transformátoru zapojeno do hvězdy), tento je přímo v transformátorové stanici připojen na potenciál země (uzemnění středního uzlu vinutí). U spotřebiče jsou všechny neživé části pospojovány a též uvedeny na potenciál země prostřednictvím uzemnění. V případě vzniklé poruchy (například probití izolace) se cesta poruchového proudu mezi uzlem zdroje a zátěží uzavírá přes zem. Distribuční rozvod je v tomto případě proveden čtyřvodičově, kdy první tři vodiče jsou fázové a čtvrtý je pracovní, sloužící pro vyrovnání potenciálu mezi uzlem zátěží a uzlem zdroje. Vzhledem k tomu že v bezporuchovém stavu neprocházely smyčkou **střed vinutí transformátoru - zem - uzel zátěží** žádné proudy, případné poškození zemniče nebo pospojování se žádným způsobem neprojeví, bylo tedy možné ověřit stav systému pouze za pomoci měření.

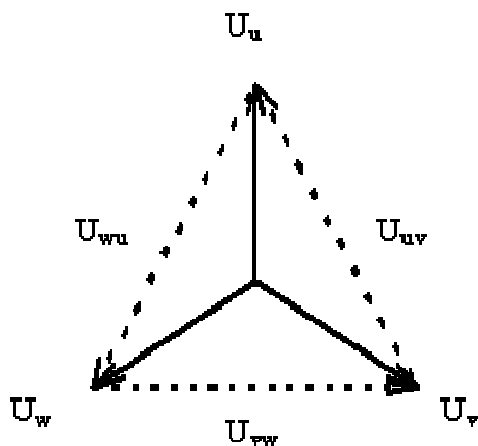
Postupem času se přešlo na systém TN-C, kdy byla do čtvrtého vodiče distribučního vedení sloučena funkce vodiče pracovního a ochranného, vodič se označuje jako „PEN“ vodič. Cesta poruchového proudu je uzavírána právě vodičem PEN, kterým protéká v bezporuchovém stavu převážná složka vyrovnávacích proudů, zbytek protéká ke střednímu uzlu zdroje prostřednictvím uzemňovacího systému (zemnič) a země. V případě přerušení, popřípadě změny impedance tohoto vodiče se tato událost projeví změnou parametrů sítě (napájecí napětí, snížení výkonových možností sítě), čímž upozorní na možné nebezpečí ze strany bezpečnosti sítě. Možným nebezpečím ze strany sítě se rozumí například nárůst impedance vodiče PEN se současným poklesem při zkratu vyvolaného zkratového proudu I_k . To může mít za následek výrazně delší vypínací časy pro nadproudové jistící prvky, popřípadě nemusí k vypnutí poruchy dojít vůbec. Tento systém se dále vyskytuje v modifikacích TN-S, kdy vodič PEN je rozdělen (místo rozdělení se označuje jako TN-C-S) do dvou samostatných vodičů N a PE, tyto vodiče se za místem rozdělení nesmí opětovně spojit.

4.2.2 Popis systému v rámci této bakalářské práce

Pro potřeby této bakalářské práce je síť sestavena v systému TN-C. Ve skutečnosti je k impedanci vodiče PEN nutno počítat s paralelním propojením uzlu zdroje a zátěží pomocí země a zemničů, neboť jak již bylo zmíněno, uzel vinutí NN strany distribučního transformátoru je v trafostanici uzemněn, dále je v délce své trasy v určitých úsecích přizemňován vodič PEN, u odběratele je pak provedeno spojení PEN vodiče v objektu odběratele se zemničem objektu. S těmito odlišnostmi je nutné počítat při vyhodnocování výsledků získaných simulacemi na našem modelu, neboť v rámci této práce byly pro zjednodušení některé faktory eliminovány.

4.3 Používaná napětí

Jmenovité napětí a druhy sítí jsou v ČR stanoveny normami ČSN 33 0120 a ČSN EN 61 293 a to pro fázové hodnoty napětí (rozumí se hodnota mezi libovolným fázovým a středním vodičem) $U_n=230V$ a pro sdružené hodnoty napětí (rozumí se napětí mezi libovolnými dvěma fázemi) $U_n=400V$, frekvence napětí základní harmonické $f_n = 50Hz$. Graficky jsou zmíněná napětí popsána *Obr.: 4-1*, kde indexy u, v, w jsou označením jednotlivých fází, v případě že je v indexu uvedeno pouze označení příslušné fáze, jedná se o fázové napětí.



Obr.: 4-1 Grafické znázornění fázových a sdružených napětí

5 KVALITA DODÁVANÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE

Výstupními hodnotami simulací budou parametry napájecího napětí. Kvalita elektrické energie je v dnešní době velmi sledovanou záležitostí. Odlišnosti od předepsaných parametrů, které jsou klasifikovány především normou ČSN EN 50 160, mohou vést ke snížení výkonu, životnosti nebo nekorektnímu chování provozovaných zařízení. Tato práce zkoumá pouze některé stavy, které mohou při provozování sítě nastat, z hlediska kvality napájecího napětí budeme tedy zkoumat následující parametry určené ČSN EN 50 160:

5.1 Velikost napájecího napětí

[7] Normalizované napětí U_n pro veřejnou síť nízkého napětí je:

- a) *pro čtyřvodičové trojfázové soustavy $U_n = 230V$, a to mezi jednotlivými fázemi a uzlem.*
- b) *Odchylka od napájecího napětí nemá přesáhnout $\pm 10\%$*

pozn.: Při analyzování elektrické sítě se pro parametr velikosti napájecího napětí sleduje delší časový interval. V rámci této práce však budeme za nevyhovující stav z hlediska velikosti napájecího napětí považovat okamžik, kdy fázové napětí libovolné fáze vybočí z mezí $U_{L1,2,3} = U_n \pm 10\%$.

5.2 Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí.

[7] Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu se obecně objevují během poruch ve veřejné distribuční síti nebo v instalaci uživatele sítě a zmizí jakmile je porucha odstraněna. Za těchto okolností mohou tato napětí dosáhnout sdruženého napětí až do max. 440V v sítích 230/400V v důsledku posunutí uzlového bodu třífázového systému, skutečná hodnota závisí na stupni nesouměrnosti zátěže a zbývající impedanci mezi vodičem s poruchou a zemí.

pozn.: V rámci této práce budou simulovány stavy sítě, při kterých se bude zhoršovat impedance středního vodiče (PEN), přičemž vstupními parametry simulace budou různé stupně nesymetrie fázových proudů. Zpravidla bývá porucha typu „dočasné přepětí“ odpojena ochranami do 5s od vzniku, v případě této simulace však k odpojení poruchy nedojde, bude zkoumán další vliv zhoršování impedance středního vodiče na vznik těchto přepětí.

5.3 Nesymetrie napájecího napětí

[7] Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním intervalu 95% desetiminutových středních hodnot zpětné složky (základní) napájecího napětí v rozsahu 0 až 2% sousledné složky. Nesymetrie napájecího napětí se vypočítá dle vztahu 5-1.

$$\rho_u = \frac{U_z}{U_s} \cdot 100\% \quad 5-1$$

kde:

ρ_u Činitel nesymetrie napájecího napětí
 U_z Amplituda zpětné složky napětí
 U_s Amplituda sousledné složky napětí

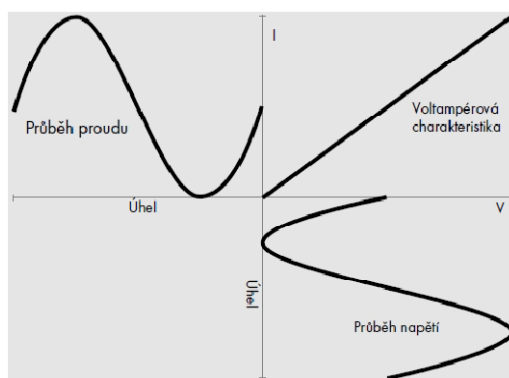
pozn.: V rámci této práce je za nevyhovující stav (vzhledem k tomu že se mění vždy pouze jeden parametr sítě, k dynamickým změnám zátěže a jiných parametrů během simulací docházet nebude) považován okamžik, kdy je překročen rozsah 0-2% podílu zpětné složky ze složky sousledné.

6 ZÁTĚŽE PROVOZOVANÉ NA SÍTÍCH

Na síti, se kterou se reálně setkáváme, je provozována celá řada zařízení, která jsou charakterizována různými V-A charakteristikami, účinníky a výkony. Tyto zátěže jsou připojeny na různých částech vedení v různých vzdálenostech od zdroje, v těchto jednotlivých místech se jedná dále o odlišné parametry charakterizující střední vodič. V případě této práce se nám jedná o změny parametrů napájecích podmínek v místě připojení zátěže v závislosti na změnách parametrů sítě nebo zátěží projevujících se pouze v jednom místě. Síť je napájena třífázovým zdrojem, jehož svorkové napětí se vlivem zatížení nemění, dále se jedná o dostatečně tvrdý zdroj, zkratový výkon sítě je tedy dán pouze samotným vedením. Druhy zátěží lze rozdělit následovně:

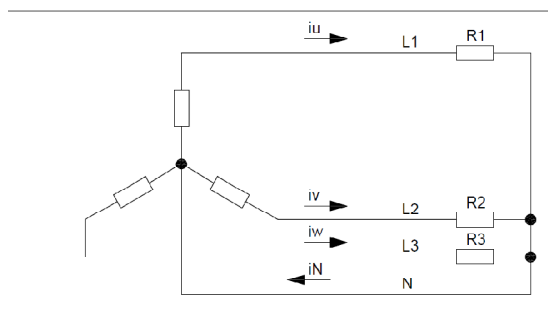
6.1 Lineární zátěž

Voltampérovou charakteristikou lineární zátěže je přímka (Obr.: 6-1). Se vzrůstajícím přiloženým napětím lineárně vzrůstá proud, jehož průběh je tvarem a fází totožný s napětím, které tok proudů způsobuje. Velikost protékajícího proudu závisí na sklonu V-A charakteristiky. Mezi zástupce lineární zátěže lze řadit například obyčejné žárovky.

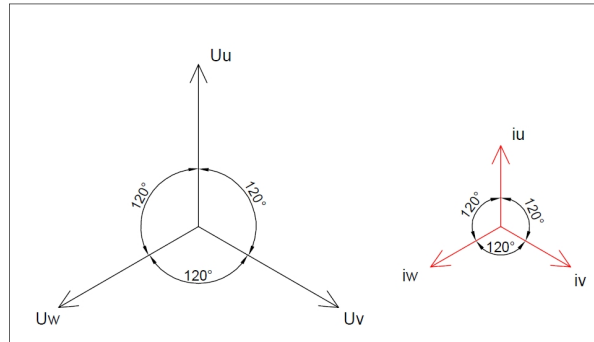


Obr.: 6-1 V-A charakteristika lineární zátěže [2]

V případě, že je do obvodu střídavého napětí společně s činnou připojena induktivní nebo kapacitní zátěž, bude docházet mezi napětím a proudem ke vzájemným fázovým posunům, v případě indukce bude fázor napětí předbíhat proud, v případě kapacity bude situace opačná. Vzájemný fázový posun mezi proudem a napětím bude záležet na vzájemném poměru činné a jalové složky impedance, obvykle vyjádřeným jako účinník zátěže $\cos\varphi_z$.



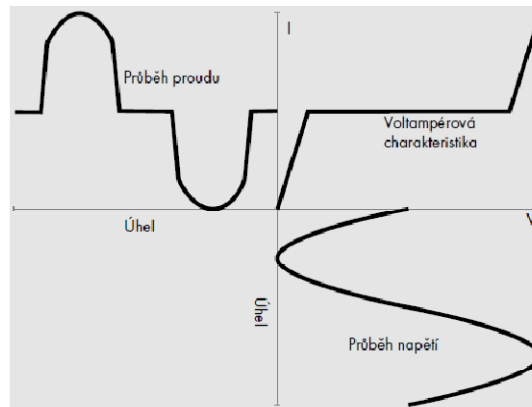
Obr.: 6-2 Příklad k třífázovému zdroji připojené třífázové zátěže zapojené do hvězdy



Obr.: 6-3 Fázorové diagramy napětí a proudů čistě ohmické lineární zátěže

6.2 Nelineární zátěž

V případě nelineární zátěže je tvar V-A charakteristiky nápadně složitější než u charakteristiky lineární zátěže (Obr.: 6-4). Vzhledem k různým sklonům charakteristiky není průběh proudu stejný jako u napětí, nýbrž nese určité zkreslení. Tvar V-A charakteristiky závisí na napěťové závislosti použitých součástek a na dějích, které v zátěži probíhají. Tvar sinusoidy proudu se dá Fourierovou transformací rozložit na řadu sinusovek o různých amplitudách, jejichž frekvence je celým násobkem fundamentální frekvence (v našich sítích 50Hz). Součtem okamžitých hodnot těchto sinusovek lze následně původní průběh proudu rekonstruovat. Mluvíme tedy o výskytu vyšších harmonických, kdy procentní podíl jejich součtu vzhledem k základní harmonické je ukazatelem činitele THD (total harmonic distortion), tedy činitele celkového harmonického zkreslení.



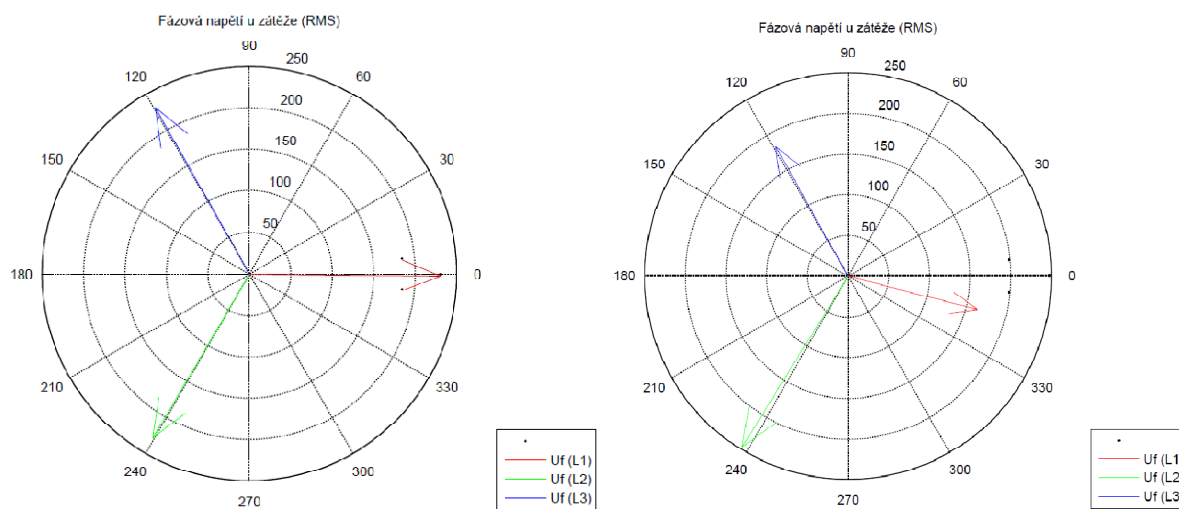
Obr.: 6-4 V-A charakteristika nelineární zátěže [2]

7 PŘÍČINY VZNIKU VYROVNÁVACÍCH PROUDŮ VE STŘEDNÍM VODIČI

Dnes prakticky nelze považovat síť za třífázovou. Způsobem užívání připomíná tři jednofázové sítě, kdy za určitých podmínek mohou středním vodičem téci proudy, které mohou být násobky proudů fázových. Střední vodič zastává v energetice funkci vyrovnávacího propojení mezi uzlem třífázového zdroje a uzlem zátěží. Jestliže jsou dodrženy podmínky rovnoměrného zatížení, neprotéká středním vodičem prakticky žádný vyrovnávací proud, na impedanci středního vodiče nevzniká žádný úbytek napětí, potenciál uzlu zátěží vůči zemi je tedy také nulový. V dnešní době jednofázových spotřebičů s větším či menším příkonem se prakticky nedá zabránit nahodilému připojování těchto spotřebičů do sítě za účelem eliminace nebo alespoň snížení vzniklé proudové nesymetrie, setkáváme se tak s případy enormního přetěžování středních vodičů. Nepříznivé situaci dále nahrává skutečnost, kdy střední vodiče sjednocené s vodiči fázovými v jednom kabelu mají podstatně nižší průřez nežli právě vodiče fázové. K situacím kdy je vodič přetížen může docházet nahodile, což znesnadňuje odhalení vyhřátých spojů, nebo případů kdy k vyhřívání spojů právě dochází. Dále je tu otázka bezpečnosti elektrických rozvodů, neboť stále ještě v mnoha případech (v případě distribučních rozvodů NN ve městech a obcích) je do jednoho vodiče sloučená funkce co by středního vodiče „N“ a vodiče ochranného, tedy vodiče „PE“, jedná se tedy o vodiče PEN. Jak bude podrobněji zmíněno v pokračování této práce, přerušení vodiče dle aktuální konfigurace sítě má větší nebo menší vliv na vznik potenciálu mezi uzlem zátěží a zemí, což může v jistých případech vést k případům vážných poranění až usmrcení. V první řadě je tedy nutné ujasnit si, za jakých okolností dochází ke vzniku vyrovnávacích proudů středním vodičem a úbytkům napětí na středním vodiči.

7.1 Nesymetrie napájecího napětí

Jedná se o stav, kdy fázový posun mezi fázory napětí není 120° , nebo fázová napětí všech tří fází se liší. Tento stav může nastat vlivem nerovnoměrného zatížení vedení, nedokonalých spojů na vedení, poruch jako je například zkrat. Příkon zátěže je odvozený od její vnitřní impedance, která zátěž charakterizuje mimo jiné i z hlediska příkonu, který je vztažen pro práci při určeném jmenovitém napětí. Kolísáním napájecího napětí se samozřejmě mění i skutečný příkon, tedy i proud protékající tímto spotřebičem. Vlivem proudů, které nemají stejnou velikost, popřípadě není vzájemný fázový posun mezi proudy 120° , není vektorový součet těchto proudů roven nule, středním vodičem tedy začne protékat vyrovnávací proud.



Obr.: 7-1 Fázorové diagramy pro síť s nesymetrickým napájecím napětím

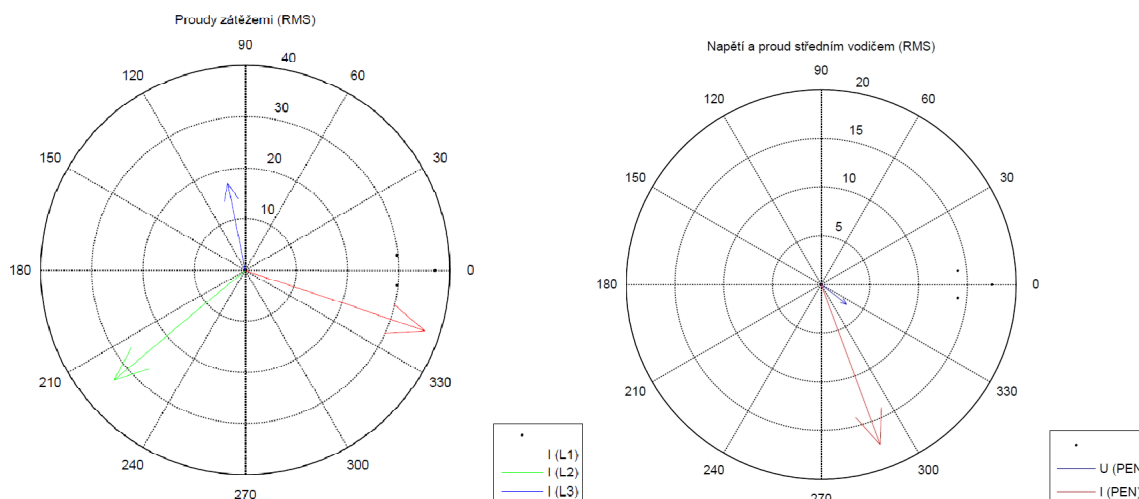
Na fázorovém diagramu vlevo Obr.: 7-1 je patrná napěťová nesymetrie, fázory napětí na fázorovém diagramu vpravo Obr.: 7-1 je patrná značná rozdílnost ve velikosti napětí a jejich vzájemném fázovém posunu.

7.2 Nerovnoměrné rozložení zátěží na síti (proudová nesymetrie)

Jedná se o nejčastější příčinu vzniku vysokých proudů středním vodičem. V dnešní době je na sítích provozována celá řada jednofázových spotřebičů s různými charakteristickými odběry, které síť zatěžují nejen jalovým výkonem, dále však svou nelinearitou. Připojování těchto spotřebičů do sítě bývá nahodilé, spotřebiče jsou mezi fázemi rozloženy nelineárně, častým jevem bývá zatížení domovní přípojky, kdy je zatížena pouze jedna fáze, v tomto případě proudy procházející fázovými vodiči se proudem procházejícím středním vodičem rovnají.

7.2.1 Příklad 1.

Fázorové diagramy pro síť zatíženou odběry $S_1=9kVA$, $S_2=8kVA$, $S_3=4kVA$, účinník všech zátěží $\cos\varphi_{Z1,2,3}=0,95$.

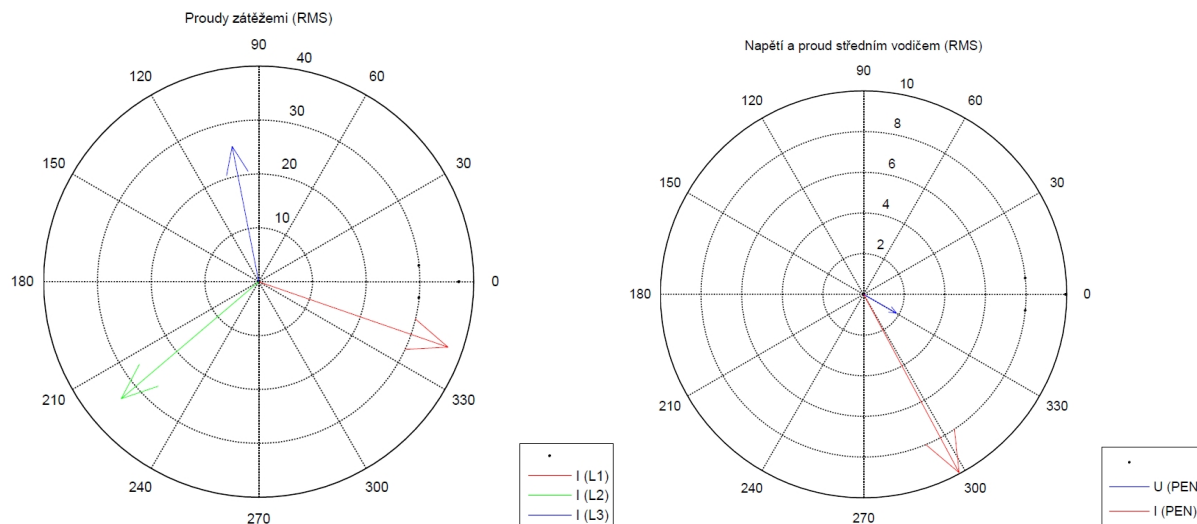


Obr.: 7-2 Fázorové diagramy pro síť s nerovnoměrně rozloženou zátěží - 1. případ

Na Obr.: 7-2 vlevo je zobrazen fázorový diagram proudů procházejících zátěžemi na fázích L_1 , L_2 , a L_3 . Na velikosti fázorů jsou patrné zadané výkonové rozdíly pro zátěže v jednotlivých fázích, na úhlu mezi fázory je patrné, že se jedná o zátěže se stejným účinníkem. Na fázorovém diagramu vpravo Obr.: 7-2 je zobrazen fázorový diagram napětí a proudu středním vodičem.

7.2.2 Příklad 2.

Nyní zkusíme zmírnit nesymetrii zatížení tím, že stávající výkon připojený na fázi L_3 zvýšíme o 2kVA. Rozložení zátěží bude nyní následující: $S_1=9kVA$, $S_2=8kVA$, $S_3=6kVA$, účinník všech zátěží zůstane stejný, tedy $\cos\varphi_{1,2,3}=0,95$.



Obr.: 7-3 Fázorové diagramy pro síť s nerovnoměrně rozloženou zátěží - 2. případ

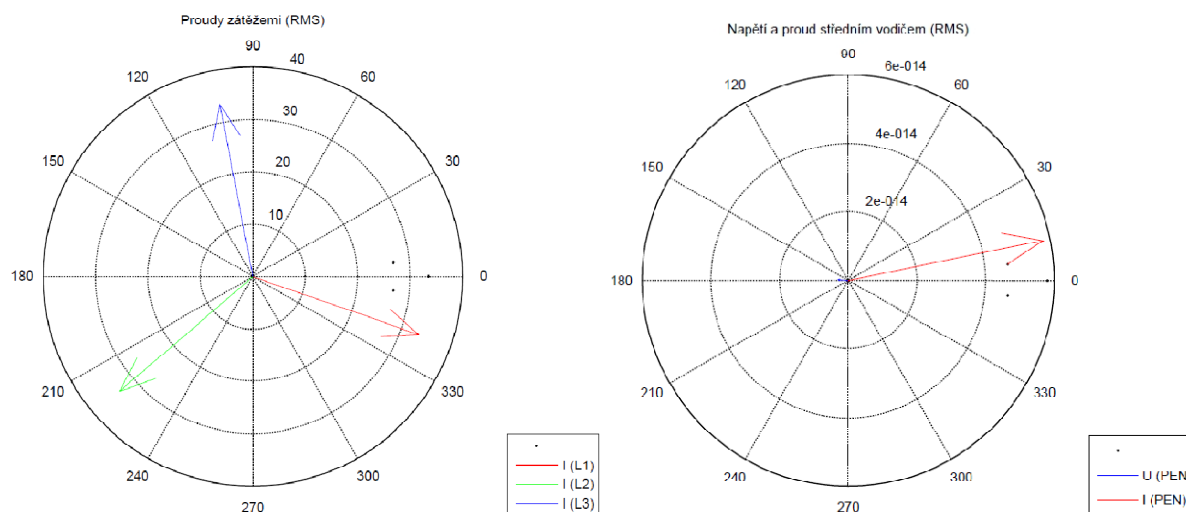
Na fázorovém diagramu proudu Obr.: 7-3 vlevo je nyní patrné, že fázory proudů mají podobnou velikost, což svědčí o symetričtějším výkonovém zatížení sítě, tato změna se oproti předchozímu případu kladně projevila na zatížení středního vodiče, u kterého poklesl jím protékající vyrovnávací proud se současným poklesem úbytku napětí na něm. Pro porovnání, úbytek napětí na středním vodiči v předchozím případě byl: $\Delta U_{PEN}=3,3V$ (RMS), přičemž jím protékal proud $I_{PEN}=17,53A$ (RMS), úbytek napětí na středním vodiči zvýšením zátěže S_3 poklesl na hodnotu: $\Delta U_{PEN}=1,9V$ (RMS) a proud středním vodičem na hodnotu: $I_{PEN}=9,95A$ (RMS). Z uvedeného případu je patrné, jak velký vliv má nesymetrické zatížení na napětí a proud středním vodičem, pro tento případ je nutné podotknout, že model byl napájen ideálním zdrojem a všechny fázové vodiče měly stejné parametry, které se vlivem zatížení nemění, což ve skutečnosti nebývá možné dodržet.

7.3 Různé účinnky zátěží

Další případ nesymetrie může vzniknout v případě, kdy bude síť zatížena odběry se stejným zdánlivým výkonem avšak s odlišnými účinnky, které způsobí fázové posuny proudů, které protékají zátěžemi. V tomto případě se opět fázorový součet proudů nebude rovnat nule a středním vodičem bude protékat vyrovnávací proud.

7.3.1 Případ 1.

Pro demonstraci tohoto případu bude síť zatížena stejnými zdánlivými výkony, u kterých budeme měnit pouze účinnky. Nastavení parametrů na modelu je tedy: $S_1 = S_2 = S_3 = 8kVA$, s účinnky odběru $\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3 = 0,95$, tedy účinnky, na které by každé zařízení mělo být přibližně kompenzováno. Účinnost odběru se může snadno změnit například zničením kompenzačních kondenzátorů, připojením nekompenzovaného zařízení nebo při práci transformátorů naprázdno apod.

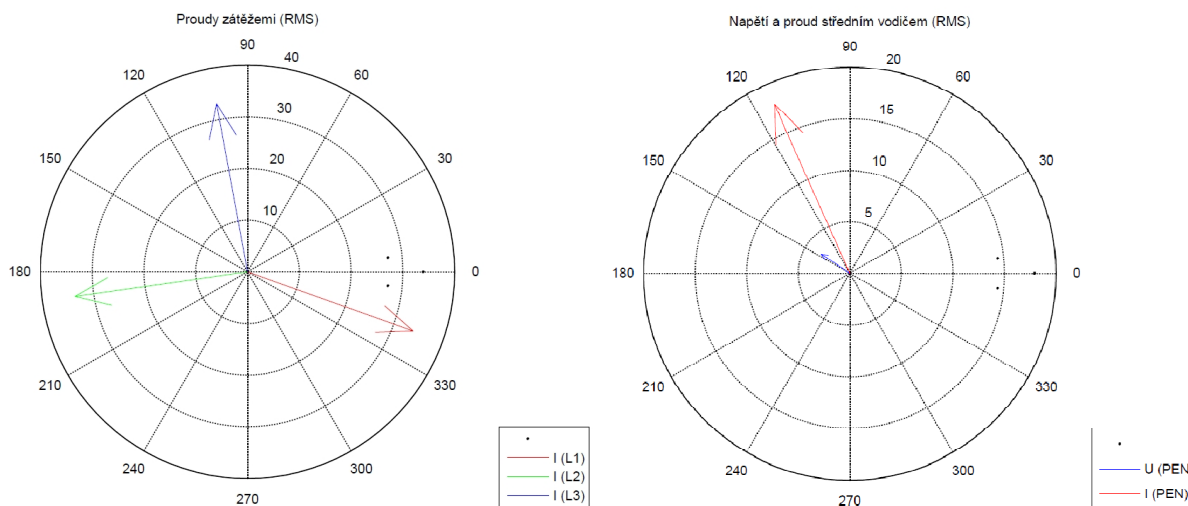


Obr.: 7-4 Fázorové diagramy pro síť s různými účinnky zátěží - 1. případ

Na fázorovém diagramu proudů Obr.: 7-4 vlevo jsou patrné proudy zátěžemi se stejným vzájemným fázovým posunem mezi jednotlivými fázory a se stejnou velikostí těchto fázorů, na Obr.: 7-4 vpravo je pak fázorový digram proudu středním vodičem a napětím na středním vodiči. Velikosti těchto fázorů jsou zanedbatelné. Jelikož je účinnost odběrů $\cos\varphi_{1,2,3} < 1$, dále pak charakter vedení je induktivního charakteru, je na fázorovém diagramu patrné natočení všech tří fázorů proudu o určitý úhel φ , který se zpožďuje za fázorem napájecího napětí, který je pro fázi L_1 položen na ose x .

7.3.2 Příklad 2.

Nyní změním konfiguraci zátěží tak, že účinník zátěže na druhé fázi snížíme na $\cos\varphi_{Z2}=0,6$, přičemž zdánlivé výkony zůstanou nezměněny, tedy $S_1 = S_2 = S_3 = 8 \text{ kVA}$.



Obr.: 7-5 Fázorové diagramy pro síť s různými účinníky zátěží - 2. případ

Na fázorovém diagramu Obr.: 7-5 vlevo je patrné, že velikosti fázorů proudů zůstaly téměř stejné (velikost protékajícího proudu se mírně změnila s poklesem napájecích napětí u zátěží vlivem úbytků na vedení). Na fázorovém diagramu Obr.: 7-5 vpravo je patrný nárůst vyrovnávacího proudu středním vodičem. Tato skutečnost nastala vlivem fázového posunu mezi proudy jednotlivými fázemi, i když velikosti fázorů jsou přibližně stejné (z hlediska výkonového zatížení je systém zatížen rovnoměrně), středním vodičem protéká vyrovnávací proud.

7.4 Shrnutí pozorování

Jak je patrné z předešlých ukázkových případů, na velikost vyrovnávacího proudu středním vodičem, tedy i na úbytek napětí na středním vodiči, změnám úbytků na fázových vodičích a s tím spojených změn velikostí proudů které zátěžemi protékají, má vliv mnoho faktorů od nesymetrie napájecího napětí, přes nerovnoměrné výkonové zatížení až po rozdílné účinníky zátěží. Velikost proudu středním vodičem I_{PEN} vychází ze součtu fázorů proudů viz.(7-1) jednotlivými fázemi, neboť se všechny sbíhají v uzlu jednofázových zátěží, který je například v domovních elektroinstalacích znám jako N, popřípadě PEN můstek, ten je dále propojen přes impedanci vedení s uzlem třífázového zdroje. Jestliže se změní vzájemná velikost fázových proudů nebo fázový posun mezi těmito proudy, začne protékat středním vodičem vyrovnávací proud, jehož velikost je závislá na této nerovnoměrnosti. V následujících částech této práce bude vyšetřen vliv těchto faktorů na kvalitu napájecího napětí a velikost vyrovnávacích proudů středním vodičem, které mohou být příčinou dalšího zhoršování parametrů středního vodiče mezi uzlem zdroje a zátěží až ke stavu úplného přerušení.

$$\overline{I_{PEN}} = \overline{I_{L1}} + \overline{I_{L2}} + \overline{I_{L3}} = \mathbf{0} \quad (7-1)$$

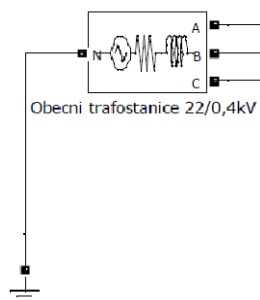
8 MATLAB - SIMULINK

Veškeré stavy sítě, které jsou řešeny v rámci této bakalářské práce, jsou simulovány na matematickém modelu sítě. Síť byla sestavena v grafické nadstavbě výpočetního programu MATLAB, v Simulinku. Jedná se prostředí, kde se prostřednictvím matematických bloků dá realizovat celá řada systémů, pro potřeby této práce byla využita knihovna Simpower, která obsahuje bloky vedení, zdroje, zátěží a nástrojů pro sledování elektrických veličin v obvodu.

8.1 Bloky použité pro sestavení sítě

8.1.1 Zdroj

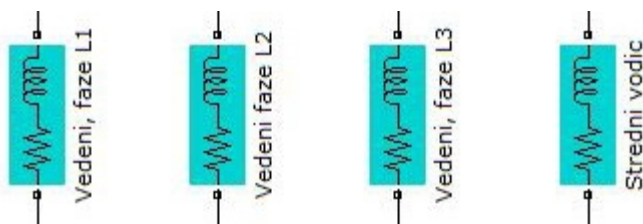
Pro napájení modelu sítě je použit třífázový zdroj (viz. *Obr.: 8-1*) se svorkovým sdruženým napětím $U_s=400V$, frekvencí $f_I=50Hz$. Zkratový výkon zdroje je volen dostatečně vysoký, aby jediný faktor, který ovlivňuje zkratový výkon sítě, byla impedance vedení. Dále je svorkové napětí a fázový posun mezi proudem a napětím neměnný, tedy nezávislý na druhu a velikosti zátěže.



Obr.: 8-1 Blok zdroje

8.1.2 Vedení

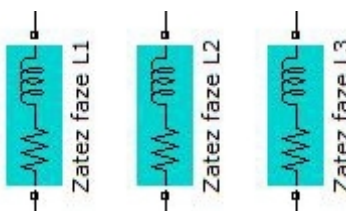
Vedení je realizováno sériovým R-L článkem (viz. *Obr.: 8-2*), u vedení nebudeme uvažovat kapacitu ani svod. Činný odpor a indukčnost vedení je zadávána prostřednictvím programu, který je napsán v M-filu. Střední vodič je realizován v modelu obdobným způsobem jako vodiče fázové s tím rozdílem, že k R-L článku, který zastupuje vedení je sériově zařazen další člen s činným odporem označený „RPENfault“. Změnou hodnot tohoto odporu bude simulováno zhoršení impedance středního vodiče vlivem přechodových odporů.



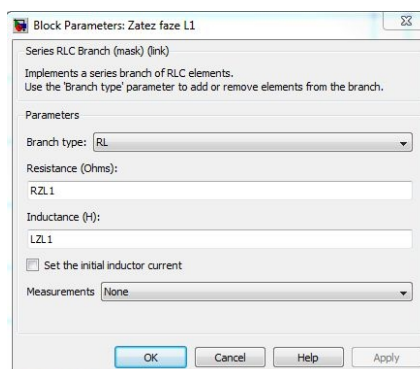
Obr.: 8-2 Bloky R-L článků vedení

8.1.3 Zátěže

Vedení a zdroj je zatěžován třemi jednofázovými zátěžemi zapojenými do uzlu. Tento uzel je spojen s uzlem zdroje prostřednictvím středního vodiče (viz. 8.1.2). Každá ze zátěží je realizována sériovým R-L článkem (Obr.: 8-3), pro účinník budeme uvažovat pouze induktivní charaktery odběrů, budeme pracovat pouze s lineárními zátěžemi. Nastavení činného odporu a indukčnosti je zastoupeno proměnnými (Obr.: 8-4), které jsou plněny programem napsaným v M-file. Hodnota těchto proměnných se pak mění dle prováděné simulace.



Obr.: 8-3 Bloky R-L článků zátěží



Obr.: 8-4 Nastavení parametrů zátěže ve fázi L_1

8.1.4 Měření

Aby bylo možné vyhodnotit chování sítě při daných simulacích, je nutné sledovat parametry sítě, jako jsou: proudy zátěžemi a středním vodičem, napětí na zátěžích a středním vodiči, fázové posuny proudů a napětí. Dále jsou použity bloky, které počítají fázi a amplitudu pro souměrné složky, ze kterých je následně počítán činitel proudové a napětíové nesymetrie. Pro získávání těchto hodnot jsou použity bloky měření z knihovny Simpower.

8.2 Zadávání parametrů a záznam hodnot

Pro provádění simulací je nutné vhodným způsobem měnit různé parametry sítě a zátěží tak, aby bylo možné získat žádaný výsledek. V simulacích jednotlivých případů se vždy pouze jedna proměnná (impedance středního vodiče, proudová nesymetrie, účinníky, výkony zátěží) mění, zatímco zbylé proměnné jsou nastaveny tak, aby konfigurace sítě byla výchozí. Toto zadávání veškerých parametrů je prováděno ze souboru M-File, který je uzpůsoben pro danou simulaci. Chování sítě v závislosti na změně parametrů se vyšetřuje v rámci cyklu, kdy v každém kroku cyklu je hodnota parametru, v závislosti na jehož změně se simulace provádí, změněna. Veškeré parametry sítě jsou pak zapisovány do matice, která je následně vložena do tabulkového procesoru, kde jsou z hodnot sestaveny grafy, provedena porovnání a vyvozeny závěry.

9 VÝCHOZÍ STAVY SIMULACÍ A OZNAČENÍ

Při simulacích bude zkoumán vliv zvyšování impedance středního vodiče, proudové nesymetrie a změn účinníků zátěží na změnu parametrů napájecího napětí v místě odběru. Pro možnost srovnání hodnot získaných simulacemi při různých stavech sítě je nutné určit výchozí provozní stav sítě, tedy stav, kdy je síť zatížena symetricky a impedance středního vodiče není poznamenána jakýmkoliv zhoršením. Dále je třeba určit si parametry, které budou mít na chování modelu vliv a mechanismy, kterými budeme některé změny v síti charakterizovat.

9.1 Výchozí nastavení

Pro všechny simulace budou společné výchozí parametry, ze kterých budou výsledky pro možnost porovnání vycházet, vyjma parametrů, které se budou v rámci dané simulace záměrně měnit. Z těchto hodnot však budou i tyto změny vycházet.

9.1.1 Napájecí napětí zdroje

Použitý zdroj, který napájí síť, je zdrojem ideálním. Velikost, fáze ani frekvence svorkového napětí se vlivem zatížení sítě nemění. Zkratový výkon zdroje je dostatečně veliký, tedy jím není ovlivněn zkratový výkon sítě. Hodnota fázového napětí mezi libovolnou fázovou svorkou a svorkou středu vinutí je $U_f = 230,9V$, hodnota sdruženého napětí mezi libovolnými fázovými svorkami je $U_s = 400V$.

9.1.2 Parametry vedení

Vedení představuje propojení mezi zdrojem a odběrem. V případě našeho modelu jsou vlastnosti fázových vodičů a středního vodiče reprezentovány impedancemi, jejichž hodnota je zvolena dle ČSN EN 61000-3-3. V této normě jsou tyto impedance označeny jako vztažné, vycházející ze statistiky měření. Pro náš případ tedy budeme uvažovat následující:

Impedance fázových vodičů:

$$Z_F = (0,24 + j0,15)\Omega$$

Impedance středního vodiče:

$$Z_{PEN} = (0,16 + j0,1)\Omega$$

V prostředí Simulink programu Matlab je vedení realizováno sériovým R-L článkem, pro který je nutno zadat hodnotu činného odporu a hodnotu indukčnosti vedení. Ze zadané impedance tyto parametry vypočítáme dle rovnice (9-1) a zadáním reálné složky impedance.

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (9-1)$$

Výchozí stavy simulací a označení

Zadaní impedance fázových vodičů je:

$$Z_F = (0,24 + j0,15)\Omega$$

Hodnota činného odporu pro zadání do modelu je:

$$R_F = 0,24\Omega$$

Frekvence napájecího napětí:

$$f_n = 50\text{Hz}$$

Ze zadané impedance je induktivní reaktance:

$$X_{LF} = 0,15 \Omega$$

Indukčnost pro zadání do modelu vypočteme ze vztahu (9-1):

$$L_F = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,15}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 4,7747 \cdot 10^{-4} H$$

Obdobně vypočítáme zadávané parametry pro střední vodič:

Zadání impedance středního vodiče je:

$$Z_{PEN} = (0,16 + j0,1)\Omega$$

Hodnota činného odporu pro zadání do modelu je:

$$R_{PEN} = 0,16\Omega$$

Frekvence napájecího napětí:

$$f_n = 50\text{Hz}$$

Ze zadané impedance je induktivní reaktance:

$$X_{PEN} = 0,1 \Omega$$

Indukčnost pro zadání do modelu vypočteme ze vztahu (9-1):

$$L_{PEN} = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,1}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,183 \cdot 10^{-4} H$$

9.1.3 Účinník a výkony zátěží

V rámci této bakalářské práce budeme pracovat s lineárními zátěžemi s induktivním charakterem, které by měly být kompenzovány na účinník $\cos\varphi = 0,95$, což bude výchozí stav při simulaci. Činná složka výkonu zátěží bude zadána pevně, jalová složka bude dopočítávána v závislosti na požadované změně účinníku dle vzorce (9-2). Výchozí hodnota zdánlivého výkonu je zvolena $S_{1,2,3} = 6kVA$. Pro výpočet složek proudů je třeba určit vztažné fázové napětí, při kterém zátěž bude dosahovat určený činný a jalový výkon, tedy jmenovité napětí zátěže $U_{Z1,2,3n} = 230V$. Pro potřeby nastavení sériových R-L článků, které představují zátěže, je nutno vypočítat hodnotu činného odporu a indukčnosti, tento výpočet se provádí z proudů a vztažného napětí dle rovnice (9-6).

Jalový výkon zátěže se dle zadaného účinníku vypočítá:

$$Q_Z = P_Z \cdot \tan\varphi \quad (9-2)$$

Činná složka proudu zátěží:

$$I_{Z\check{c}} = \frac{P_Z}{U_{Zn}} \quad (9-3)$$

Jalová složka proudu zátěží:

$$I_{Zj} = \frac{Q_Z}{U_{Zn}} \quad (9-4)$$

Celkový proud zátěží se vyjádří:

$$\bar{I}_Z = I_{Z\check{c}} - jI_{Zj} \quad (9-5)$$

Impedance zátěží:

$$\bar{Z}_Z = \frac{U_{Zn}}{\bar{I}_Z} \quad (9-6)$$

Z rovnice (9-6) se vyjádří činná a imaginární složka:

$$R_Z = \operatorname{Re}\{\bar{Z}_Z\}$$

$$X_Z = \operatorname{Im}\{\bar{Z}_Z\}$$

Indukčnost zadávaná do modelu se vypočte ze vztahu:

$$L_Z = \frac{X_Z}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (9-7)$$

10 SIMULACE NA MODELU MATLAB - SIMULINK

10.1 Simulace v rámci této práce

V rámci této práce budou provedeny simulace, kdy budou sledovány velikosti fázových napětí na konci vedení, činitel napěťové nesymetrie a velikost napětí mezi uzlem zdroje a uzlem zátěží, tedy napětí na středním vodiči. Rozměr všech těchto parametrů bude vyjádřen v závislosti na daném poměru dvou hodnot, kterým lze vyjádřit chování i pro jiné sítě po dosažení hodnot konkrétního případu. Provedeny budou tyto simulace:

- a) Vliv změny impedance středního vodiče na parametry napájecího napětí
 - pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I=20\%$
 - pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I=50\%$
 - pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I=80\%$
 - pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I=100\%$

- b) Vliv proudové nesymetrie na vyrovnávací proud středním vodičem a na parametry napájecího napětí
 - pro výchozí výkon $S_{Z1,2,3}=6kVA$

- c) Vliv změny účinníku zátěží na parametry napájení
 - pro výchozí výkon $S_{Z1,2,3}=6kVA$

- d) Vliv poměru aktuálního a zkratového výkonu na parametry napájecího napětí
 - pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I=20\%$
 - pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I=50\%$
 - pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I=80\%$

10.2 Vliv změny impedance středního vodiče na parametry napájecího napětí

V tomto bodě se budeme zabývat změnami parametrů napájecího napětí v závislosti na zhoršování činné složky impedance středního vodiče R_{PEN-F} . Zhoršování této složky bude simulováno sériovým vřazováním činných odporů, jejichž velikost bude s počtem kroků simulace vzrůstat exponenciálně, tento postup je volen z důvodu vystižení všech změn, které v síti nastanou. Zpočátku je třeba volit jemnější krok narůstání činného odporu, později se projeví vliv na parametry sítě po větších skocích.

10.2.1 Výchozí nastavení modelu

Výchozím nastavením se rozumí stav sítě při bezporuchovém provozu, jak je uvedeno v části 9 této bakalářské práce. Prvky modelu, které se během simulace nebudou měnit, budou nastaveny následovně:

Tab. 10-1 Výchozí parametry pro simulaci změny impedance středního vodiče

Název veličiny:	Označení:	Hodnota:	Jednotka:
Účinník zátěže Z_1	$\cos\varphi_{Z1}$	0,95	-
Účinník zátěže Z_2	$\cos\varphi_{Z2}$	0,95	-
Účinník zátěže Z_3	$\cos\varphi_{Z3}$	0,95	-
Napětí pro výpočet výkonů zátěží $Z_{1,2,3}$	$U_{Z1,2,3n}$	230	V
Činný odpor fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$R_{F1,2,3}$	0,24	Ω
Indukčnosti fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$L_{F1,2,3}$	$4,7747 \cdot 10^{-4}$	H
Činný odpor středního vodiče SV	R_{PEN0}	0,16	Ω
Indukčnost středního vodiče SV	L_{PEN}	$3,183 \cdot 10^{-4}$	H

10.2.2 Proudová nesymetrie pro tuto simulaci

Jak je uvedeno v části 7.4 této práce, proud středním vodičem začíná protékat až v případě, kdy vznikne v obvodu proudová nesymetrie. V rámci této simulace by bylo nesmyslné vytvořit v modelu takové podmínky, kdy je proudová nesymetrie nulová, tedy situace, kdy středním vodičem nebude protékat žádný vyrovnávací proud, na fázových vedeních tedy budou vznikat rovnoměrné úbytky napětí pro všechny tři fáze a na žádné fázi nedojde v místě odběru k přepětím. Z tohoto důvodu bude simulace provedena pro čtyři vstupní hodnoty proudové nesymetrie, pro které bylo pokusnou metodou zvoleno výkonové rozložení zátěží dle Tab. 10-2.

Tab. 10-2 Přehled nastavení výkonových poměrů pro dosažení žádané ρ_I

Č. sim.:	ρ_I	S_{Z1}	$\cos\varphi_{Z1}$	S_{Z2}	$\cos\varphi_{Z2}$	S_{Z3}	$\cos\varphi_{Z3}$
	[%]	[kVA]	-	[kVA]	-	[kVA]	-
1	20	6	0,95	3	0,95	6	0,95
2	50	6	0,95	3,5	0,95	0,3	0,95
3	80	6	0,95	0,55	0,95	0,35	0,95
4	100	6	0,95	0	0,95	0	0,95

10.2.3 Zavedená označení a vyjádření pro tuto simulaci

Pro vyjádření změny parametrů v průběhu simulace a určení potřebných mezí, ve kterých simulace bude probíhat je nutno určit následující:

10.2.4 Změna impedance středního vodiče

Změnou impedance středního vodiče se v této práci rozumí zvýšení činné složky impedance středního vodiče oproti výchozímu stavu. Tato změna je vyjádřena poměrem činné složky impedance středního vodiče ve výchozím stavu (R_{PEN-0}) a činné složky impedance středního vodiče po zhoršení (R_{PEN-F}), jak je uvedeno v rovnici (10-1). Definiční obor hodnot bude v intervalu (1:0). Vyjádřením této změny je tedy měřítko M_{Z-PEN} .

$$M_{Z-PEN} = \frac{R_{PEN-0}}{R_{PEN-F}} ; (1:0) \quad (10-1)$$

kde:

M_{Z-PEN}	Měřítko vyjadřující stav středního vodiče
R_{PEN-0}	Činná složka impedance středního vodiče ve výchozím stavu
R_{PEN-F}	Činná složka impedance středního vodiče po změně

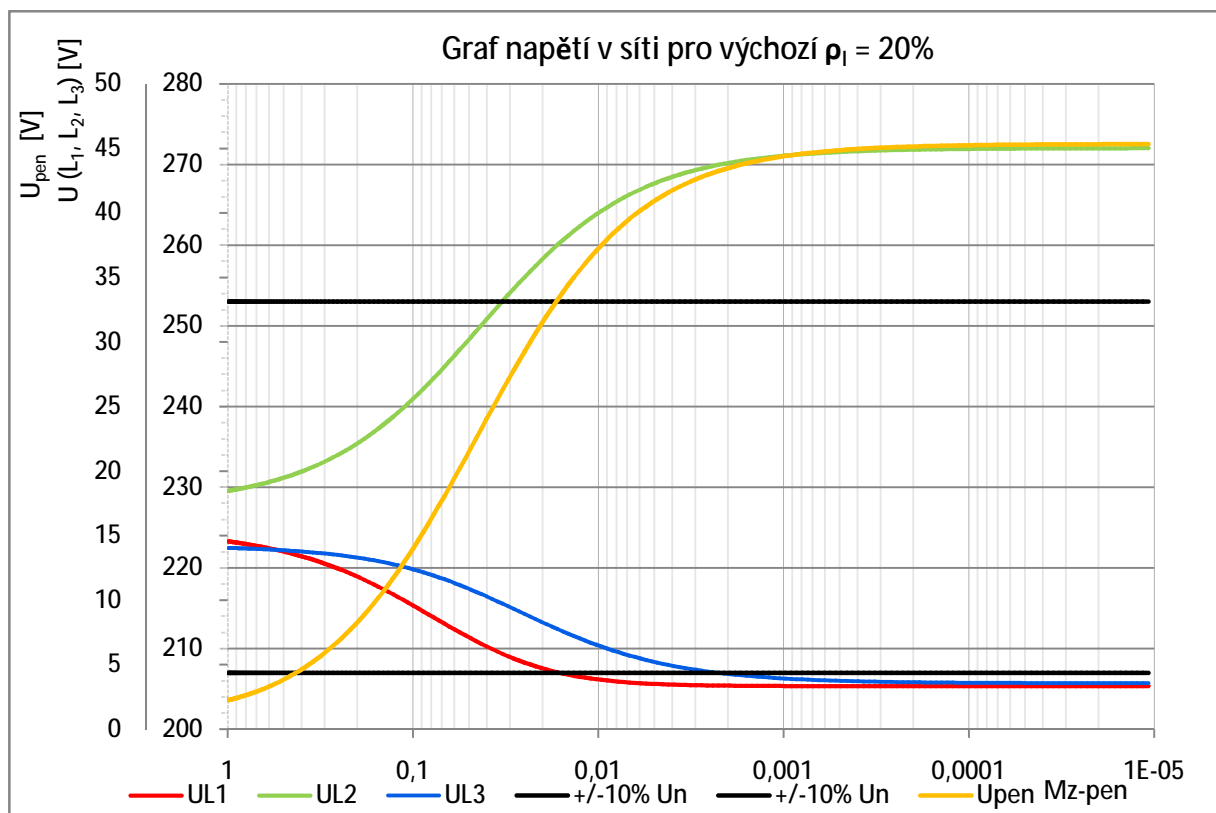
10.2.5 Konečný činný odpor středního vodiče

Pro průběh simulace je nutné určit konečnou hodnotu činné složky impedance středního vodiče, ke které tato hodnota na konci simulace dojde. Nelze vytvořit takovou posloupnost hodnot, kdy by konečným číslem činné složky impedance byla nekonečně velká hodnota. Za konečnou hodnotu tedy lze považovat takovou, od které již v simulovaném obvodu nedojde k další změně parametrů. Z předběžných simulací vyplynulo, že ke změnám parametrů v obvodu dochází, jestliže je činná složka impedance středního vodiče měněna v rozsahu šesti řádů, za konečnou hodnotu lze s jistotou prohlásit $R_{PEN-E} = 10k\Omega$.

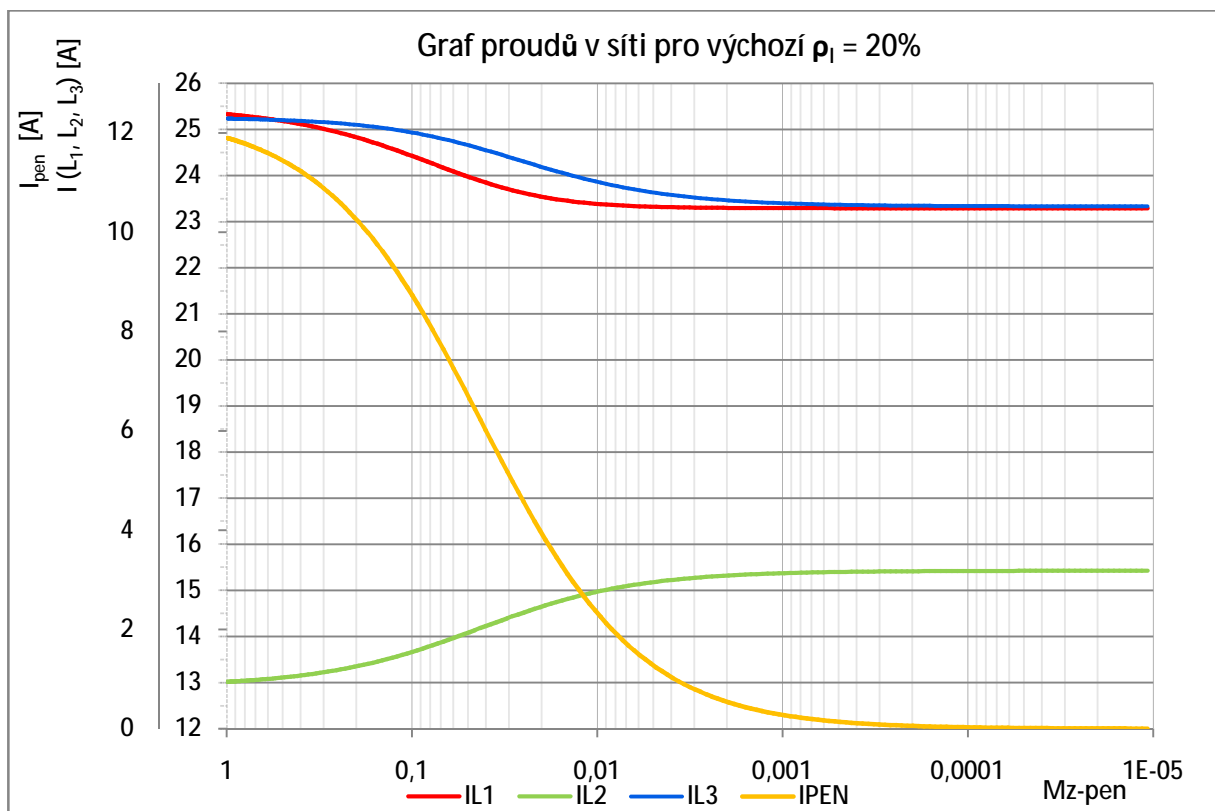
10.2.6 Simulace č.1, výchozí proudová nesymetrie 20%

Byla provedena simulace na modelu, kde výchozí hodnoty pro stav považovaný za bezporuchový byly nastaveny dle *Tab. 10-1*, pro dosažení požadované výchozí proudové nesymetrie bylo nastaveno rozložení výkonů zátěží na fázích dle prvního řádku *Tab. 10-2*.

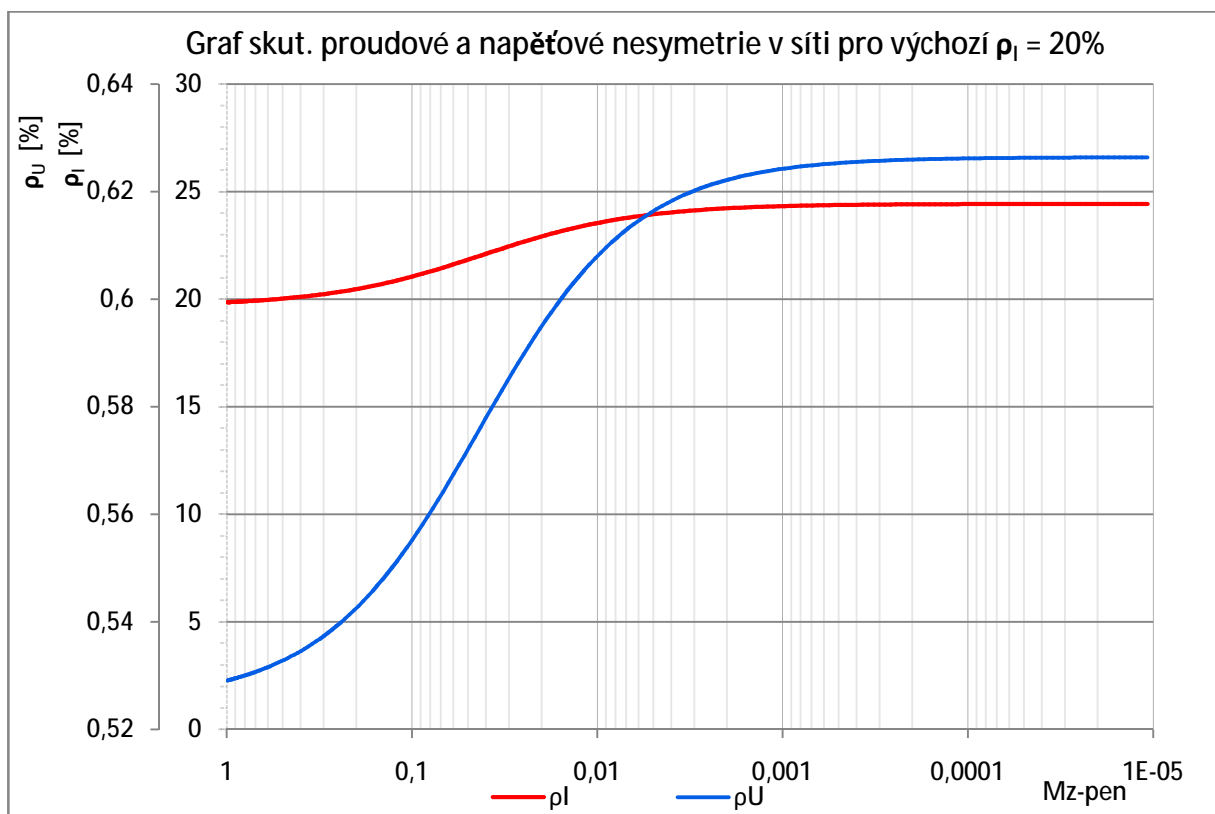
10.2.6.1 Část grafů pro výchozí proudovou nesymetrii 20%



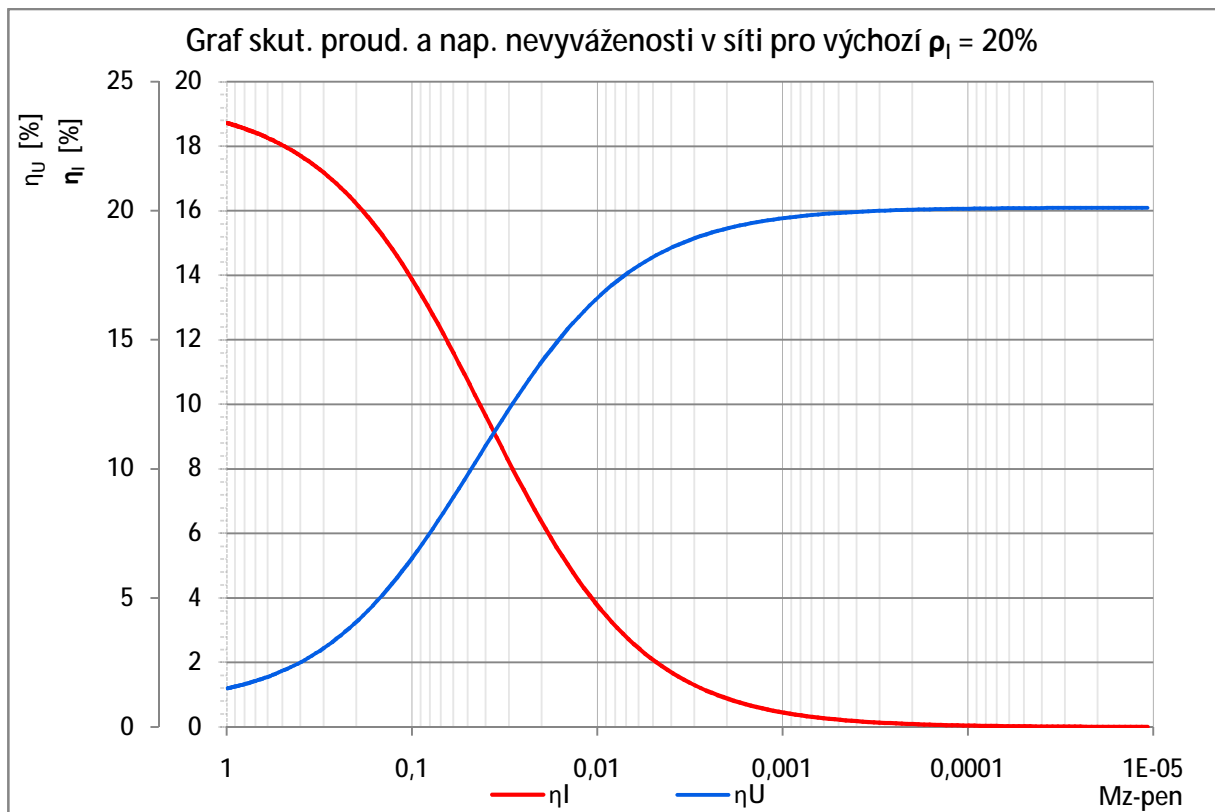
Graf: 10-1 Průběh napětí v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 20%



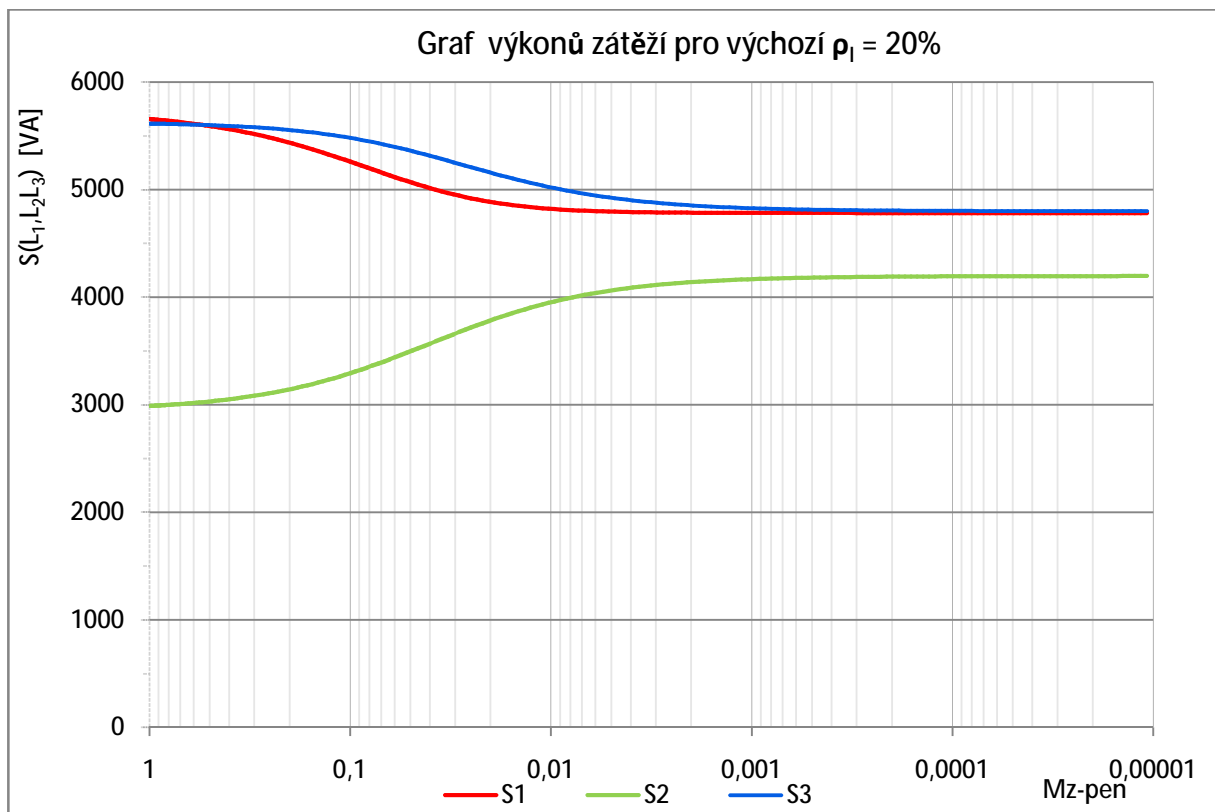
Graf: 10-2 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 20%



Graf: 10-3 Skutečná nap. a proud. nesymetrie pro výchozí proudovou nesymetrii 20%



Graf: 10-4 Skutečná nap. a proud. nevyváženost pro výchozí proudovou nesymetrii 20%

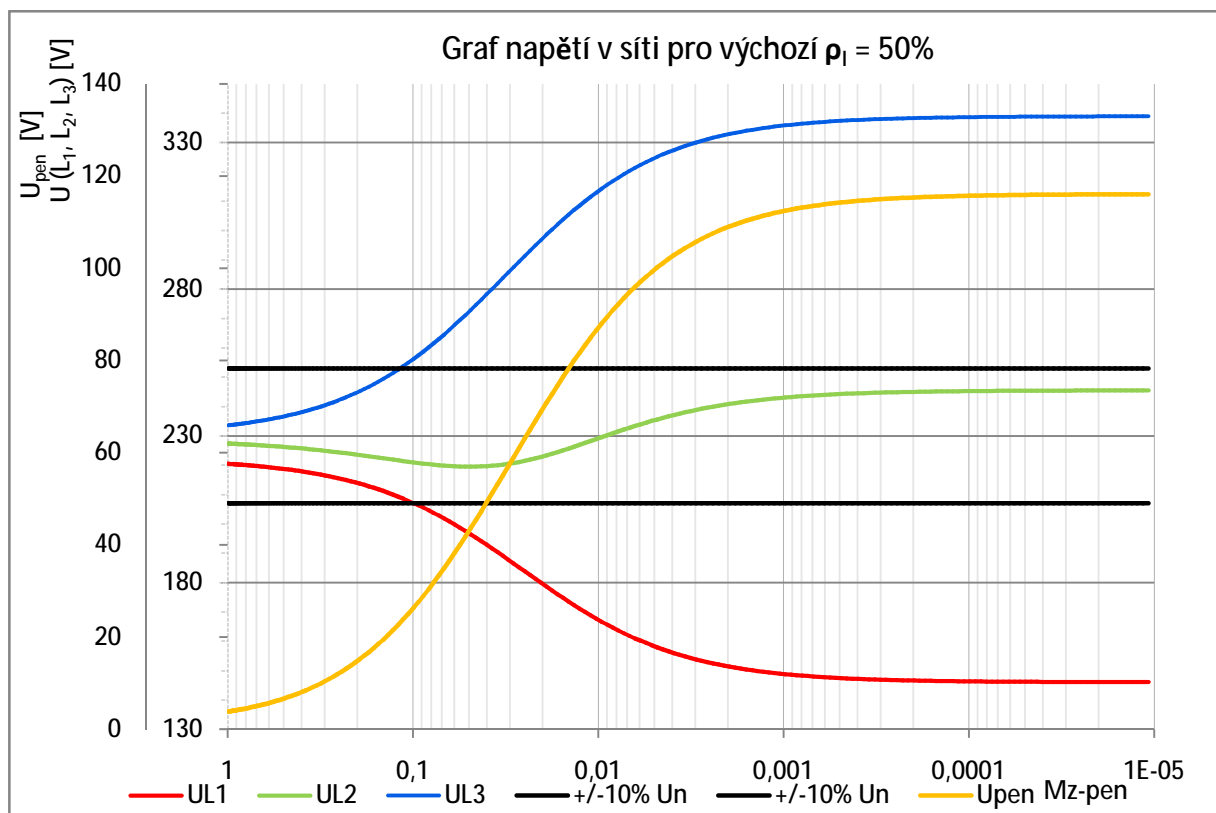


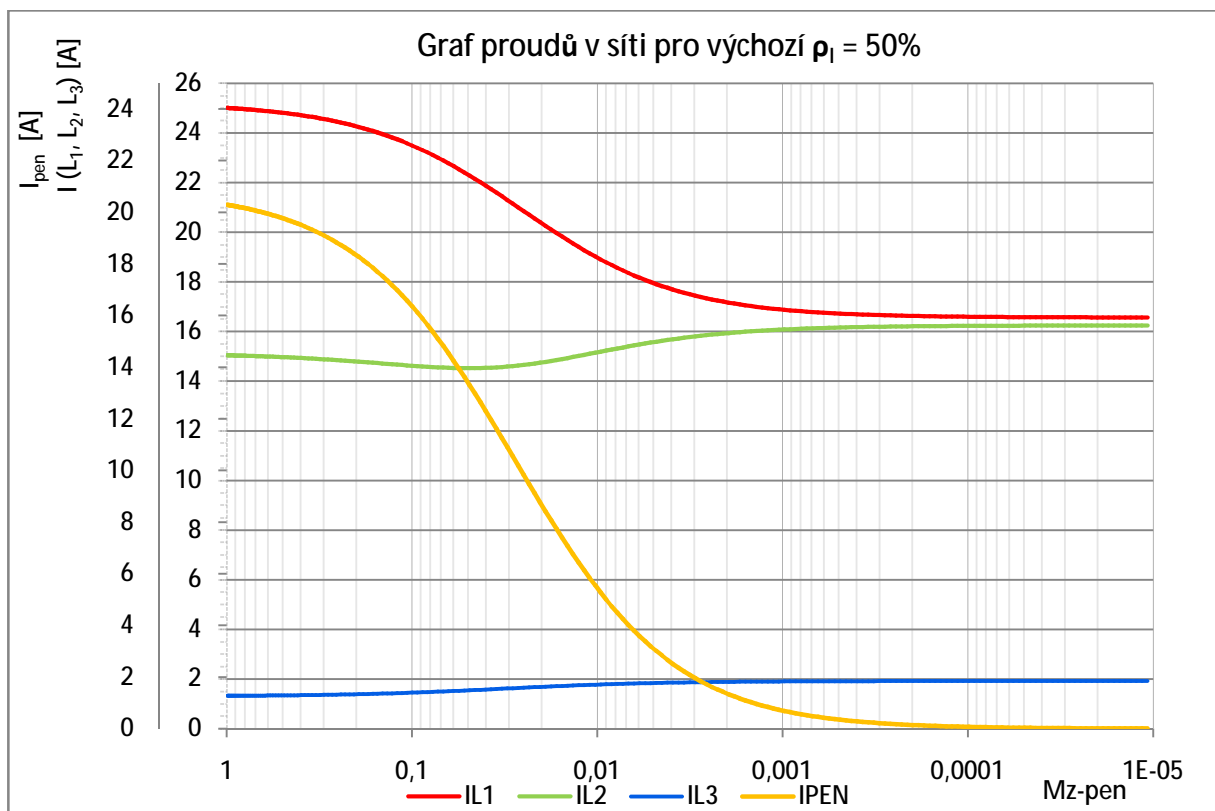
Graf: 10-5 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 20%

10.2.7 Simulace č.2, výchozí proudová nesymetrie 50%

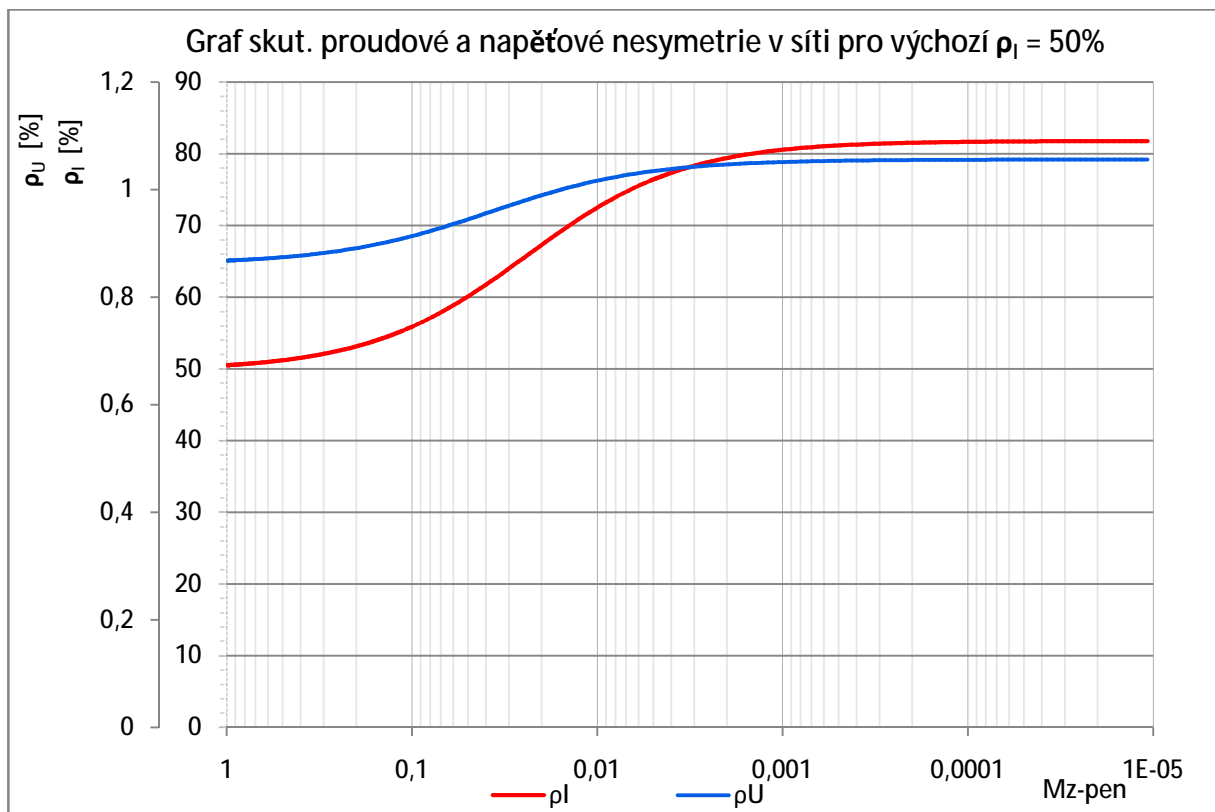
Byla provedena simulace na modelu, kde výchozí hodnoty pro stav považovaný za bezporuchový byly nastaveny dle *Tab. 10-1*, pro dosažení požadované výchozí proudové nesymetrie bylo nastaveno rozložení výkonů zátěží na fázích dle druhého řádku *Tab. 10-2*.

10.2.7.1 Část grafů pro výchozí proudovou nesymetrii 50%

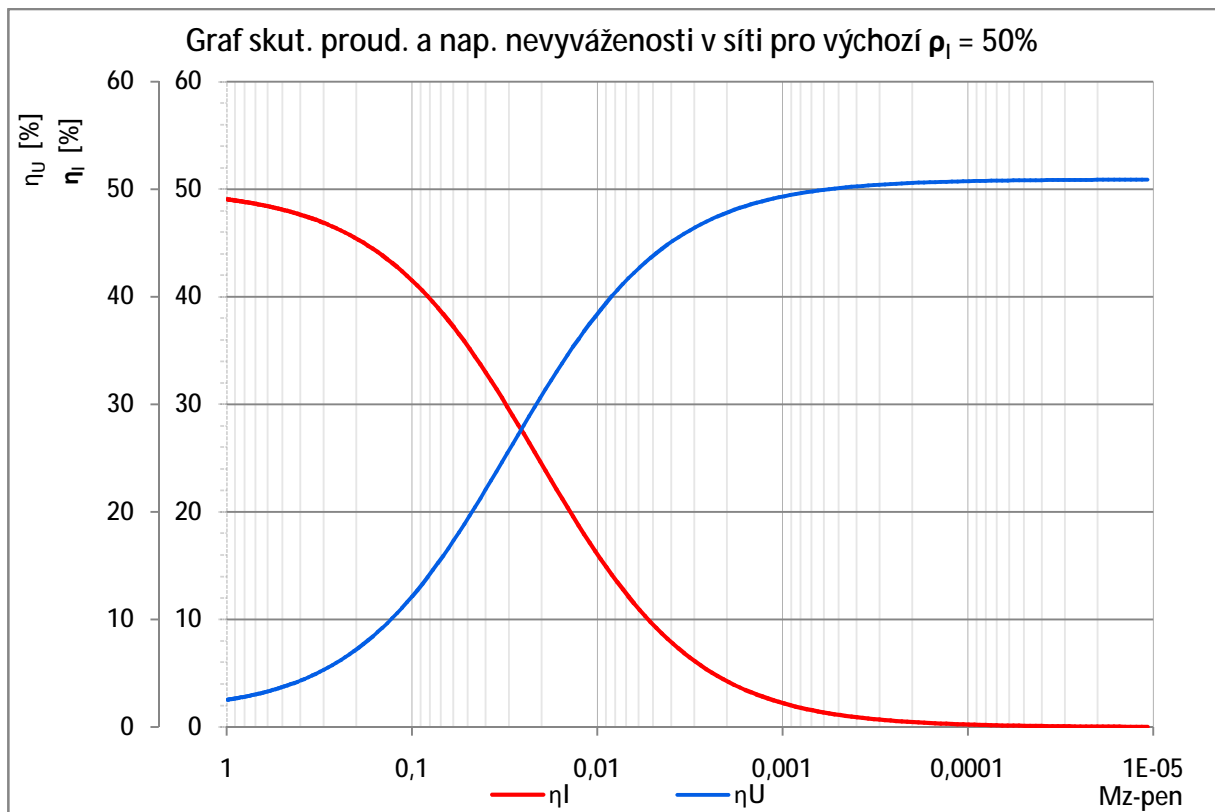




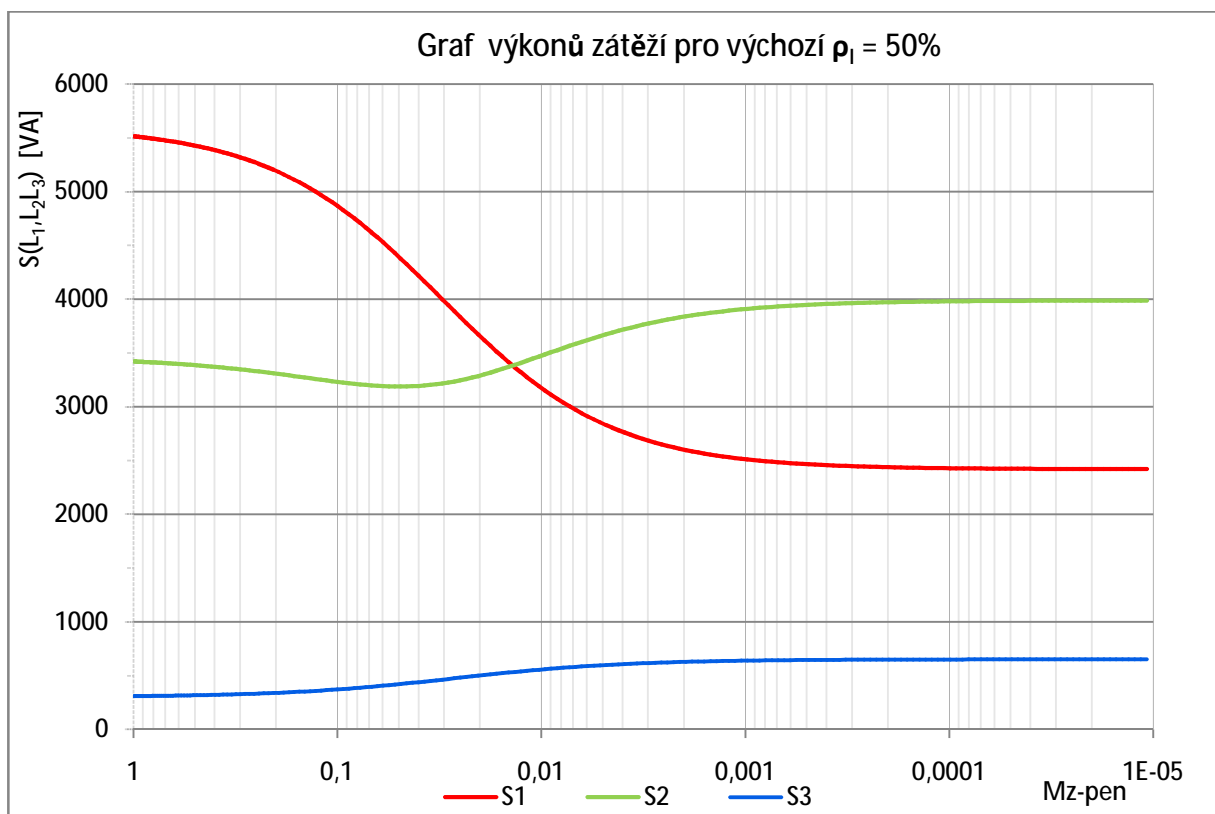
Graf: 10-7 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 50%



Graf: 10-8 Skutečná nap. a proud. nesymetrie pro výchozí proudovou nesymetrii 50%



Graf: 10-9 Skutečná nap. a proud. nevyváženost pro výchozí proudovou nesymetrii 50%

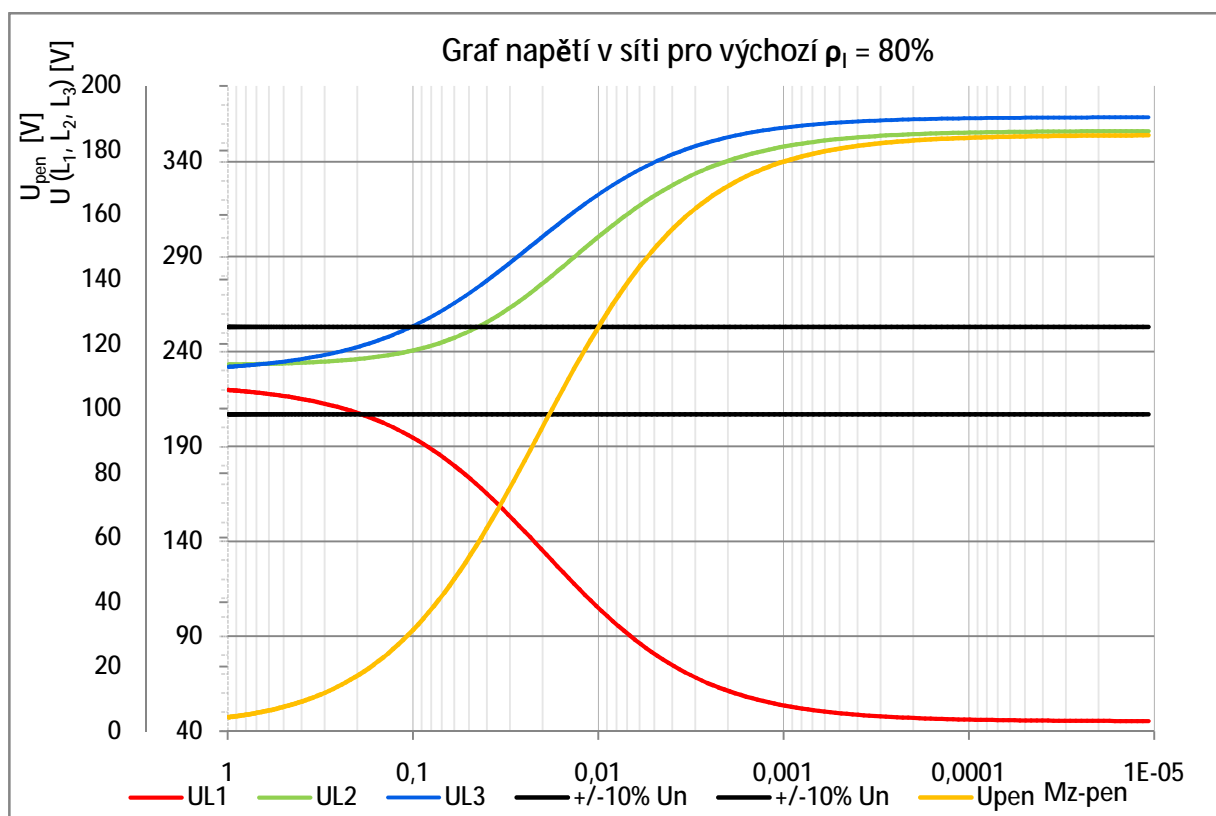


Graf: 10-10 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 50%

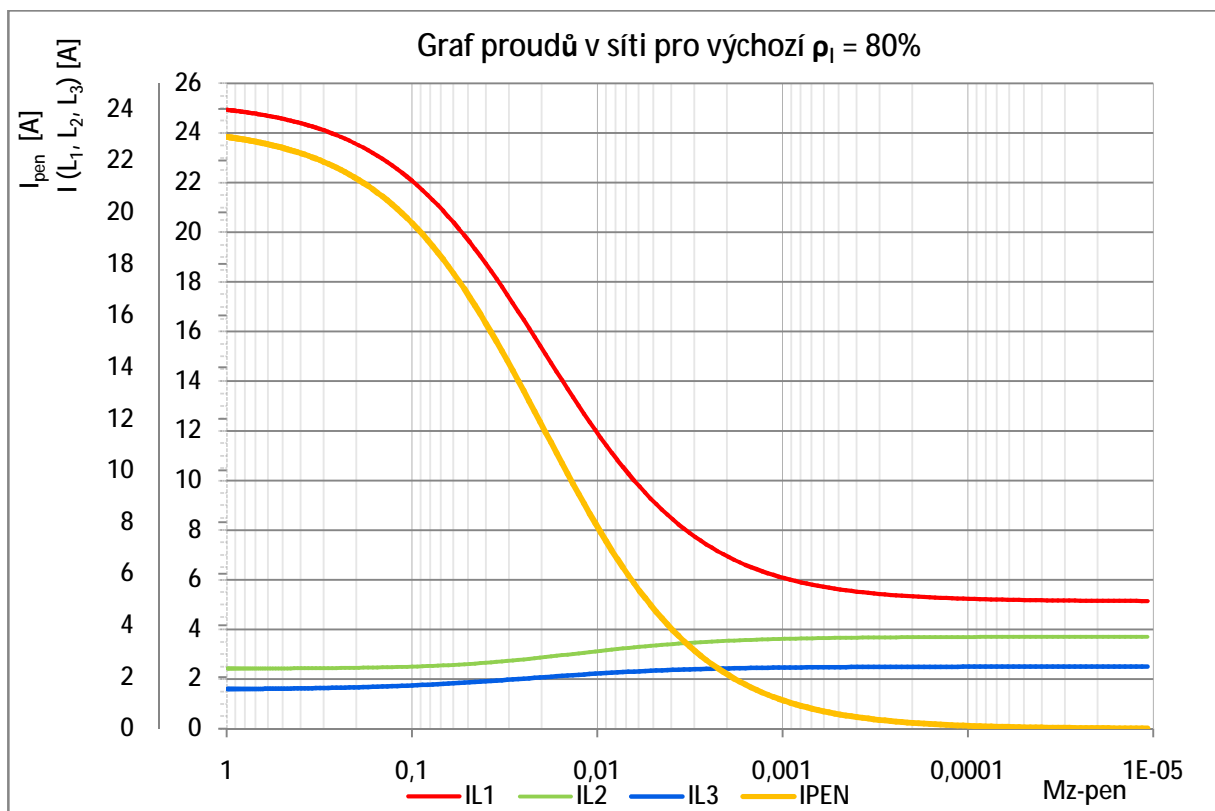
10.2.8 Simulace č.3, výchozí proudová nesymetrie 80%

Byla provedena simulace na modelu, kde výchozí hodnoty pro stav považovaný za bezporuchový byly nastaveny dle *Tab. 10-1*. Pro dosažení požadované výchozí proudové nesymetrie bylo nastaveno rozložení výkonů zátěží na fázích dle třetího řádku *Tab. 10-2*.

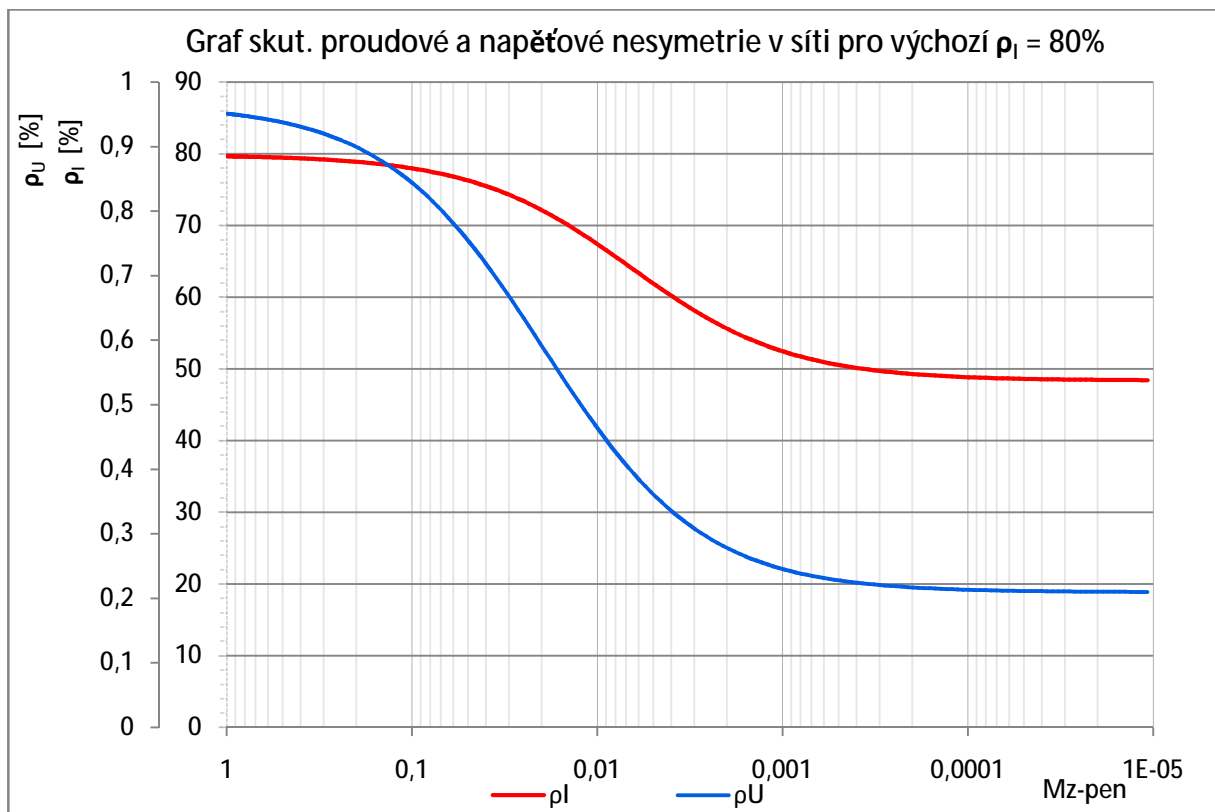
10.2.8.1 Část grafů pro výchozí proudovou nesymetrii 80%



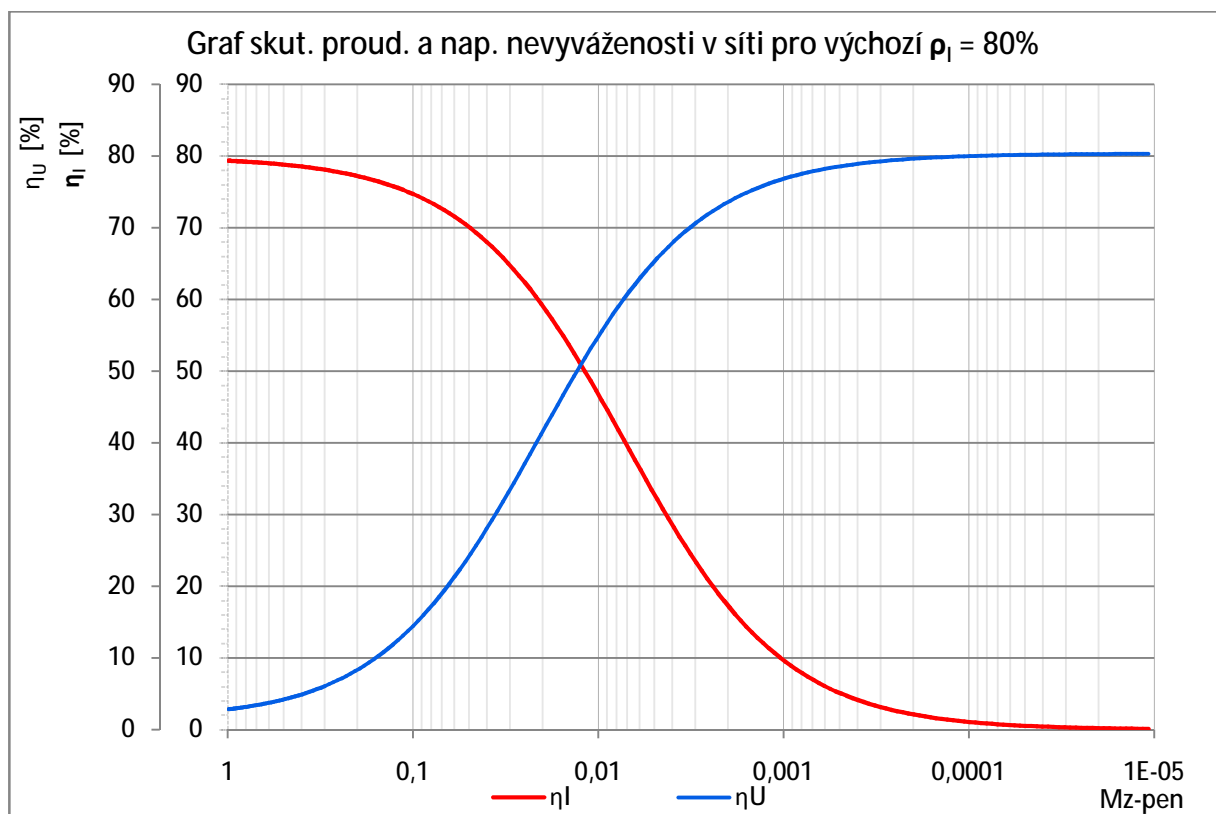
Graf: 10-11 Průběh napětí v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 80%



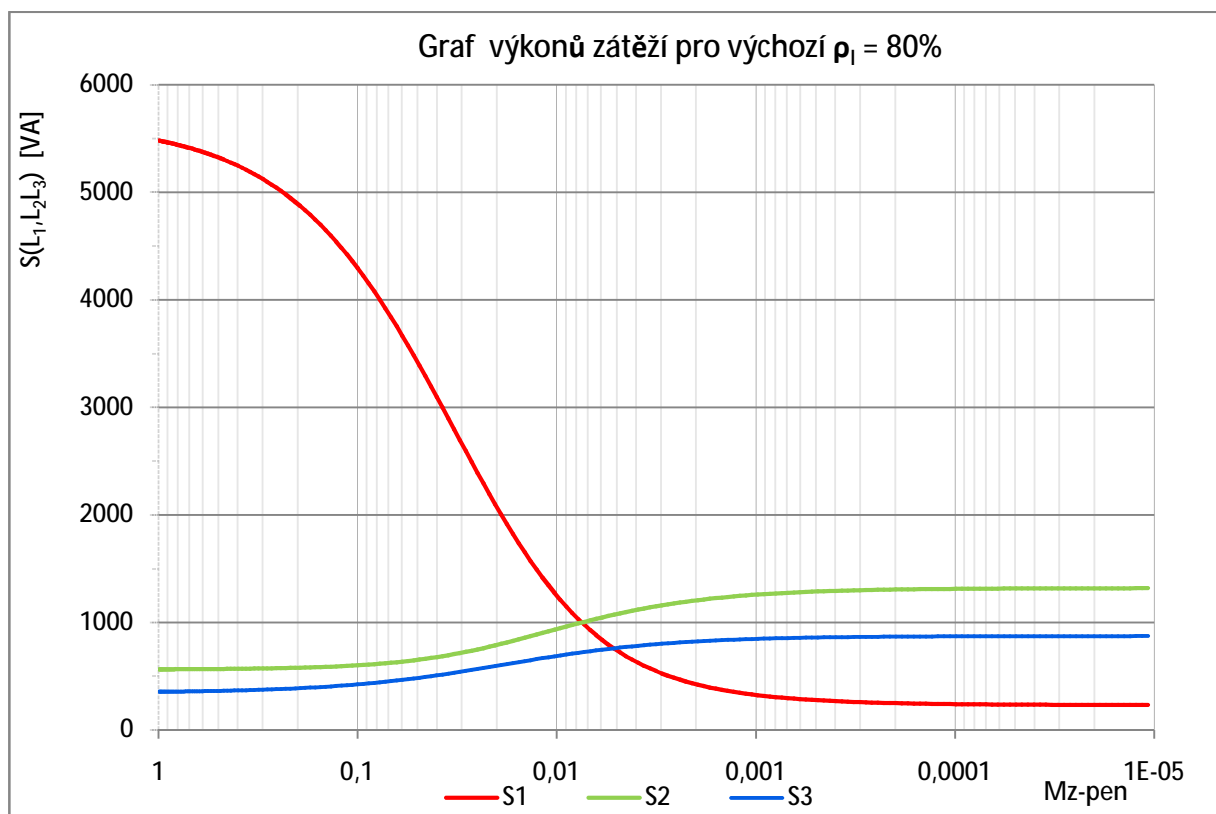
Graf: 10-12 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 80%



Graf: 10-13 Skutečná nap. a proud. nesymetrie pro výchozí proudovou nesymetrii 80%



Graf: 10-14 Skutečná nap. a proud. nevyváženost pro výchozí proudovou nesymetrii 80%

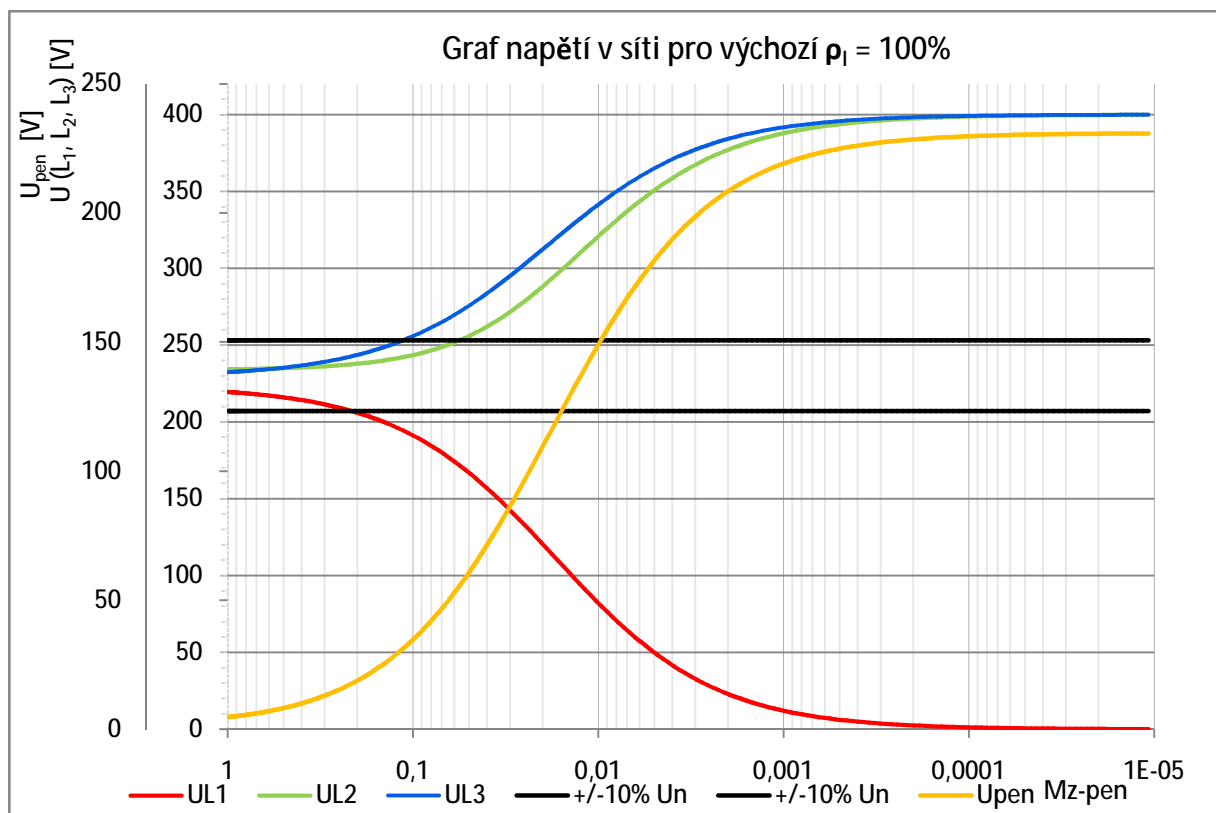


Graf: 10-15 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 80%

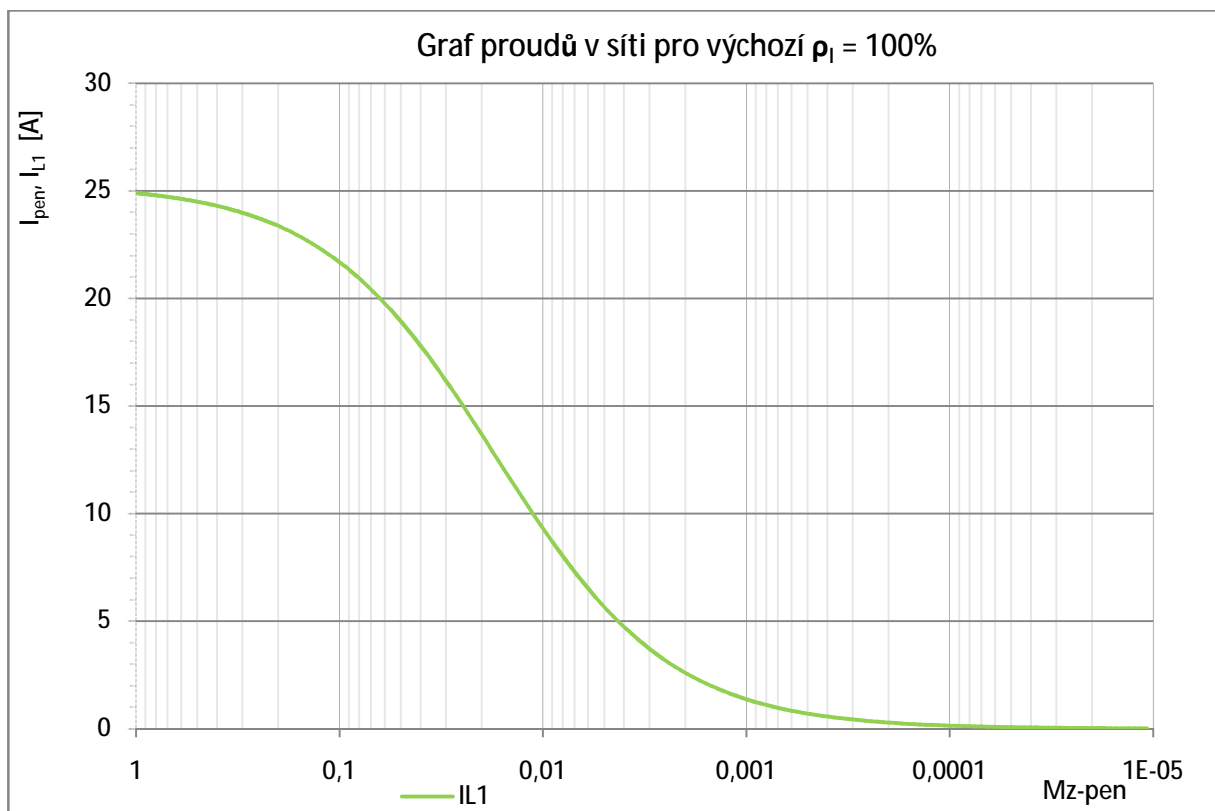
10.2.9 Simulace č.4, výchozí proudová nesymetrie 100%

Byla provedena simulace na modelu, kde výchozí hodnoty pro stav považovaný za bezporuchový byly nastaveny dle *Tab. 10-1*. Pro dosažení požadované výchozí proudové nesymetrie bylo nastaveno rozložení výkonů zátěží na fázích dle čtvrtého řádku *Tab. 10-2*.

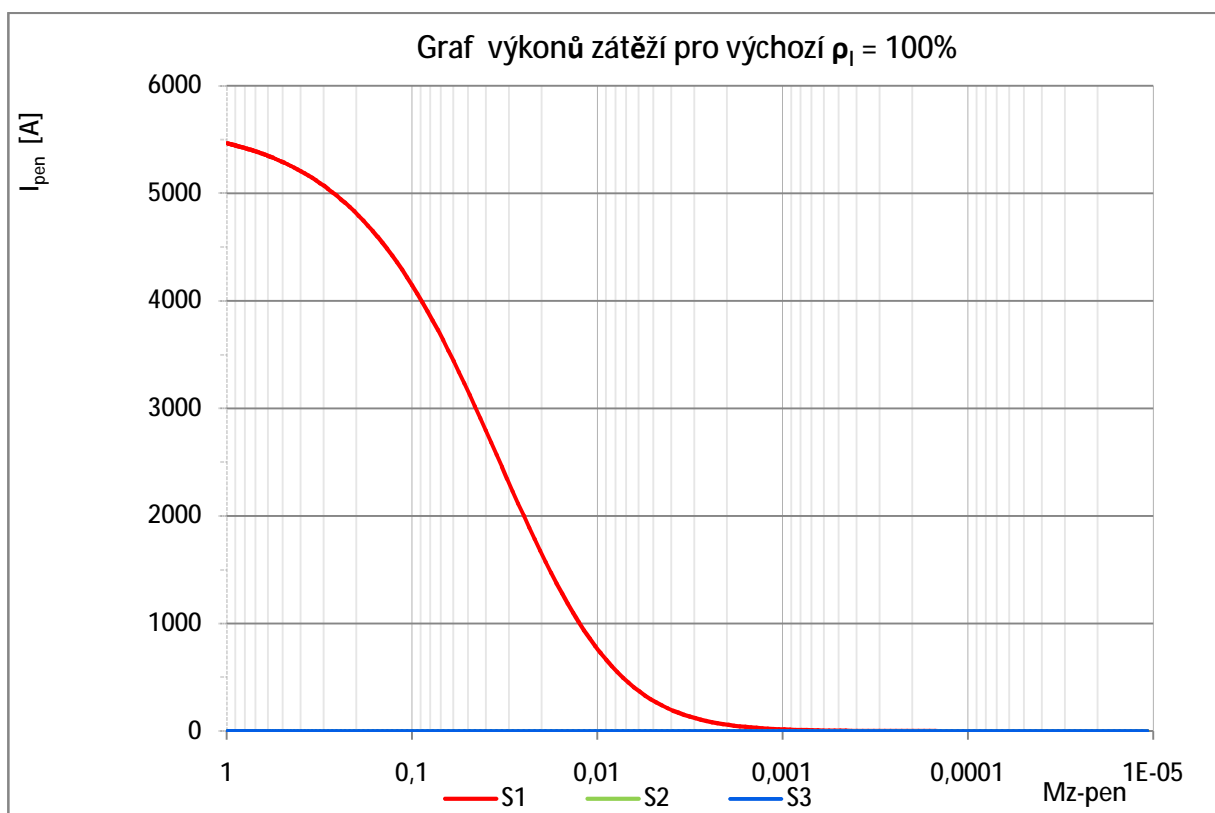
10.2.9.1 Část grafů pro výchozí proudovou nesymetrii 100%



Graf: 10-16 Průběh napětí v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 100%



Graf: 10-17 Průběh proudů v síti pro výchozí proudovou nesymetrii 100%



Graf: 10-18 Skutečné výkony zátěží pro výchozí proudovou nesymetrii 100%

10.2.10 Vyhodnocení simulací

Byla provedena simulace sítě, pro kterou se v jednotlivých krocích simulace zhoršovala činná složka impedance středního vodiče R_{PEN} . Aby se zhoršení R_{PEN} projevilo na parametrech sítě, byla prostřednictvím výkonového rozložení zátěže mezi fázemi nastavena výchozí proudová nesymetrie 20, 50, 80 a 100%. Pro jednotlivé výchozí nesymetrie byl vytvořen soubor grafů popisujících chování sítě v průběhu zhoršování impedance středního vodiče, mezní stavy byly zapsány do tabulky *Tab.: 10-3*, *Tab.: 10-4*, *Tab.: 10-5*, *Tab.: 10-6*.

10.2.11 Překročení povolených limitů pro napětí

Průběhy hodnot fázových napětí na zátěžích a napětí na středním vodiči je patrné pro každou výchozí proudovou nesymetrii z *Graf: 10-1*, *Graf: 10-6*, *Graf: 10-11* a *Graf: 10-16*, kde jsou v podobě vodorovných černých přímků vymezeny možné meze velikosti napájecího napětí $U_{ndov} = U_n \pm 10\% (U_n)$. Oranžová křivka vyznačuje průběh napětí mezi uzlem zátěží a zdroje v průběhu simulace. V tabulce jsou vypsány povolené mezní stavy, měřítko pro změnu činného odporu středního vodiče M_{Z-PEN} , celkový činný odpor vodiče a vyjádření násobku původní hodnoty činného odporu středního vodiče v okamžiku kdy došlo k překročení daného mezního stavu.

Tab.: 10-3 Shrnutí získaných údajů pro část 0 (výchozí proudová nesymetrie 20%)

Vyjádření meze:	Popis:	M_{Z-PEN}	R_{PEN}	k	Fáze:	
					Ozn.:	Výkon:
-	-	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[VA]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	0,015498	10,324	64,5	L1	6000
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	0,032731	4,89	30,6	L2	3000
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	-	-	-	-	-
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesym. mimo dov. mez	-	-	-	-	-

Tab.: 10-4 Shrnutí získaných údajů pro část 10.2.7 (výchozí proudová nesymetrie 50%)

Vyjádření meze:	Popis:	M_{Z-PEN}	R_{PEN}	k	Fáze:	
					Ozn.:	Výkon:
-	-	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[VA]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	0,093693	1,71	10,67	L1	6000
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	0,113146	1,414	8,83	L3	300
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	0,037439	4,274	26,7	-	-
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesym. mimo dov. mez	-	-	-	-	-

Tab.: 10-5 Shrnutí získaných údajů pro část 10.2.8 (výchozí proudová nesymetrie 80%)

Vyjádření meze:	Popis:	M_{Z-PEN}	R_{PEN}	k	Fáze:	
					Ozn.:	Výkon:
-	-	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[VA]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	0,183	0,873	5,46	L1	6000
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	0,0998	1,6	10	L3	350
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	0,0522	3,1	19,4	-	-
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesym. mimo dov. mez	-	-	-	-	-

Tab.: 10-6 Shrnutí získaných údajů pro část 10.2.9 (výchozí proudová nesymetrie 100%)

Vyjádření meze:	Popis:	M_{Z-PEN}	R_{PEN}	k	Fáze:	
					Ozn.:	Výkon:
-	-	[-]	[Ω]	[-]	[-]	[VA]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	0,205	0,825	5	L1	6000
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	0,1132	1,41	8,8	L3	0
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	0,0636	2,51	15,7	-	-
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesym. mimo dov. mez	-	-	-	-	-

pozn.: koeficient „k“ v tabulce vyjadřuje k-násobek původní velikosti činného odporu středního vodiče

Ve sloupci „fáze“ je uvedena pro případ podpětí a přepětí fáze, ve které k této události došlo, dále pak na této fázi připojený zdánlivý výkon

Z tabulek je zřejmý přímý vliv změny impedance středního vodiče v závislosti na tom, jak je provedeno rozložení zátěže na síti. Vliv této změny je tím vyšší, čím vyšší bude nerovnováha zatížení jednotlivých fází. Z hlediska posouzení vlivu nerovnoměrnosti zatížení jsou v tabulce Tab.: 10-7 seřazeny jednotlivé případy, kdy došlo na jedné z fází ke stavu, který lze klasifikovat jako přepětí nebo podpětí mimo povolené meze, v závislosti na počátečním rozložení zatížení.

Tab.: 10-7 Porovnání vlivu změny impedance středního vodiče v závislosti na ρ_I

Překročená mez:	k - násobek původní činné složky impedance středního vodiče			
	$\rho_I = 20\%$	$\rho_I = 50\%$	$\rho_I = 80\%$	$\rho_I = 100\%$
$U_n < 207V$	64,5	10,67	5,46	5
$U_n > 253V$	30,6	8,83	10	8,8
$U_{dot} > 50V$	-	26,7	19,4	15,7

Je zřejmé, že na dobře provedeném rozložení zátěží na fázích závisí následky zhoršování impedance středního vodiče. Jestliže je síť poměrně vyrovnaně zatížena, přepětí se na jedné ze zátěží projeví až při 30-ti násobku původní hodnoty R_{PEN} , avšak v porovnání s případem kdy rozložení zátěží na síti zdaleka rovnoměrné není, bude ke vzniku nežádoucího stavu postačovat již 10-ti násobné zvýšení hodnoty R_{PEN} .

10.2.12 Popis chování sítě

Z grafů Graf: 10-3, Graf: 10-8 a Graf: 10-13 je zřejmé, že vlivem změny poměrů v síti dochází zároveň ke změně proudové nesymetrie která má v případech simulace č.1 a 2. stoupající tendenci a v případě simulace č.3 klesající. Výchozí proudová nesymetrie, na základě které jsou simulace spouštěny, je tedy pouze ukazatel výchozího stavu, který vyjadřuje nerovnoměrnost výkonového rozložení. Skutečná proudová nesymetrie však vypovídá o aktuálním rozložení proudů, které zátěžemi protékají. Z grafů Graf: 10-2, Graf: 10-7 a Graf: 10-12 lze sledovat, jak se chová proudové rozložení v síti pro všechny provedené simulace. Ze všech grafů je patrná snaha sítě vyrovnat proudy jednotlivými zátěžemi tak, aby byli všechny svou velikostí stejné, o čemž svědčí směr křivek vyjadřujících velikosti proudů jednotlivými zátěžemi (všechny křivky se sbíhají do jednoho bodu). Vzhledem k uspořádání sítě, kdy se parametry středního vodiče

zhoršují, lze mluvit o fázových hodnotách napětí v místě odběru, které měříme mezi fázovými svorkami a uzlem zátěží, jako o úbytcích na zátěžích. Zhoršováním parametrů středního vodiče dochází k nejvyššímu zvyšování napětí na těch zátěžích, které mají nejnižší výkon, tedy nejvyšší impedanci, vzniká na nich tedy největší úbytek. Současně se zvýšením napětí dochází k protékání těchto zátěží většími proudy, což může představovat značné snížení životnosti zařízení až zničení. Současně na zátěžích, které v obvodu mají nejvyšší výkon, tedy nejnižší impedanci, vznikají nižší úbytky napětí v závislosti na rostoucí impedanci středního vodiče, což znamená snížení jejich výkonu v důsledku podpětí.

10.2.13 Zhodnocení z hlediska možného vzniku škod

Jak je patrné z provedených simulací, změna impedance středního vodiče má vliv na fázová napětí v místě odběru, jehož uzel zátěží spojuje s uzlem zdroje a na vznik dotykových napětí, pokud je rozvod proveden v soustavě TN-C, tedy střední vodič zároveň plní funkci vodiče ochranného. Na uzel zátěží jsou tedy připojené dotyku přístupné neživé části, které mají vůči zemi potenciál uzlu zátěží. Jestliže dojde vzhledem k rozložení zátěží na síti ke zhoršení impedance středního vodiče, popřípadě k přerušení, může dojít k nekorektní funkci zařízení vlivem podpětí, poškození nebo zničení vlivem přepětí nebo k poranění osob vlivem vysokého dotykového napětí na přístupných neživých částech zařízení, které jsou pospojovány a připojeny na svorku PEN. K přerušení vodiče však nemusí dojít pouze vlivem poruchy ale i neopatrností, kdy při práci na elektrickém zařízení dojde k přerušení středního vodiče vlivem nepozornosti.

10.3 Vliv proudové nesymetrie na vyrovnávací proud středním vodičem a změny napájecího napětí

Ke zhoršení parametrů středního vodiče, jak bylo popsáno v části 10, dochází v nejvíce případech vlivem přetížení středního vodiče nadproudy, které způsobují vyhřívání spojů, následně pak zvyšování přechodových odporů, popřípadě změnu parametrů středního vodiče vlivem oteplení vodiče. Při budování starších distribučních sítí se často počítalo s rovnoměrným zatížením sítě, tedy s minimálními vyrovnávacími proudy středním vodičem, průřezy středních vodičů tedy v rámci úsporných opatření byly voleny nižší nežli průřezy vodičů fázových. Jestliže tato síť bude zatěžována nerovnoměrně, může docházet k průtoku nadměrných proudů, což může způsobit vážná poškození tohoto vedení. V rámci této simulace budeme simulovat vliv nerovnoměrného zatížení sítě na velikost proudu protékajícího středním vodičem a dopad na kvalitu napájecího napětí, především však budeme na výsledky této simulace pohlížet jako na příčinu poruch středního vodiče.

10.3.1 Výchozí nastavení modelu

Výchozím nastavením se rozumí stav sítě při bezporuchovém provozu, jak je uvedeno v části 9 této bakalářské práce. Prvky modelu, které se během simulace nebudou měnit, budou nastaveny následovně dle tabulky Tab. 10-8.

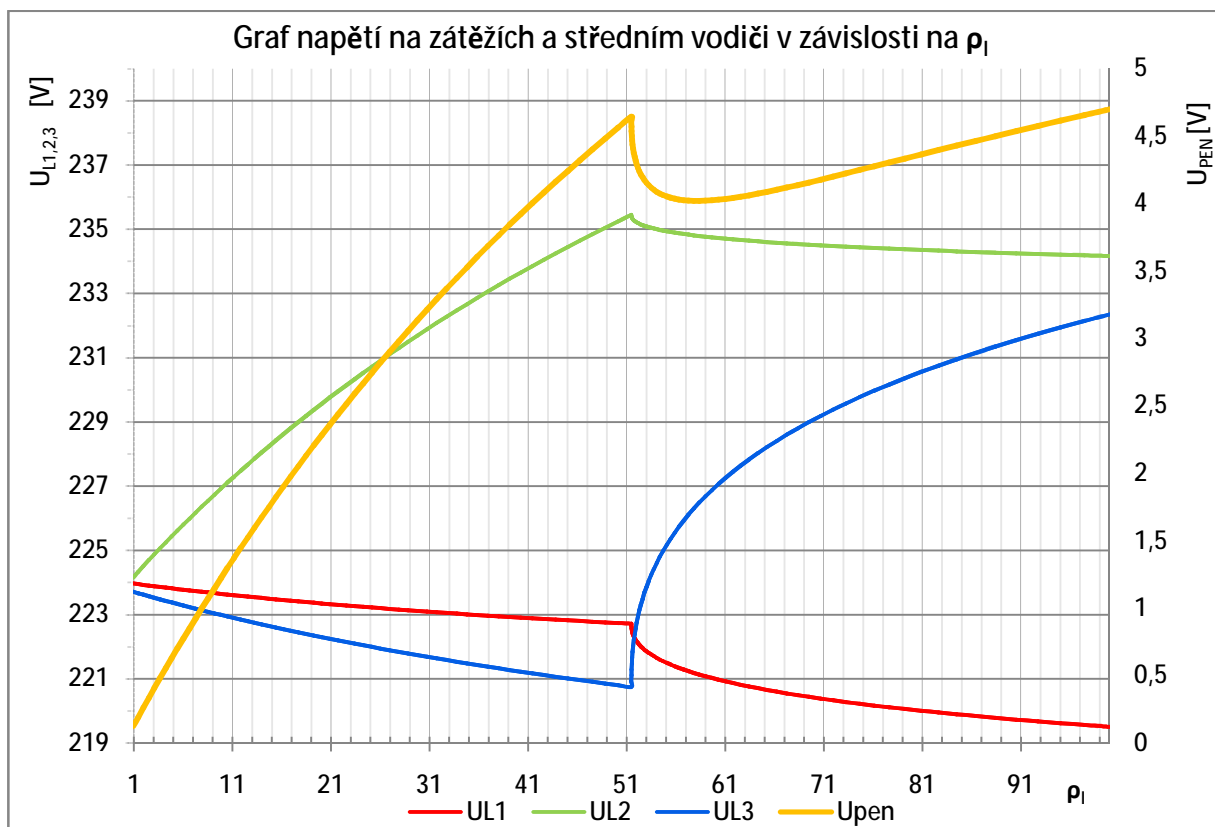
Tab. 10-8 Výchozí parametry pro simulaci změny výkonové nesymetrie

Název veličiny:	Označení:	Hodnota:	Jednotka:
Účinník zátěže Z_1	$\cos\varphi_{Z1}$	0,95	-
Účinník zátěže Z_2	$\cos\varphi_{Z2}$	0,95	-
Účinník zátěže Z_3	$\cos\varphi_{Z3}$	0,95	-
Zdánlivý výkon zátěže Z_1	S_{Z1}	6	kVA
Napětí pro výpočet výkonů zátěží $Z_{1,2,3}$	$U_{Z1,2,3n}$	230	V
Činný odpor fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$R_{F1,2,3}$	0,24	Ω
Indukčnosti fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$L_{F1,2,3}$	$4,7747 \cdot 10^{-4}$	H
Činný odpor středního vodiče SV	R_{PEN}	0,16	Ω
Indukčnost středního vodiče SV	L_{PEN}	$3,183 \cdot 10^{-4}$	H

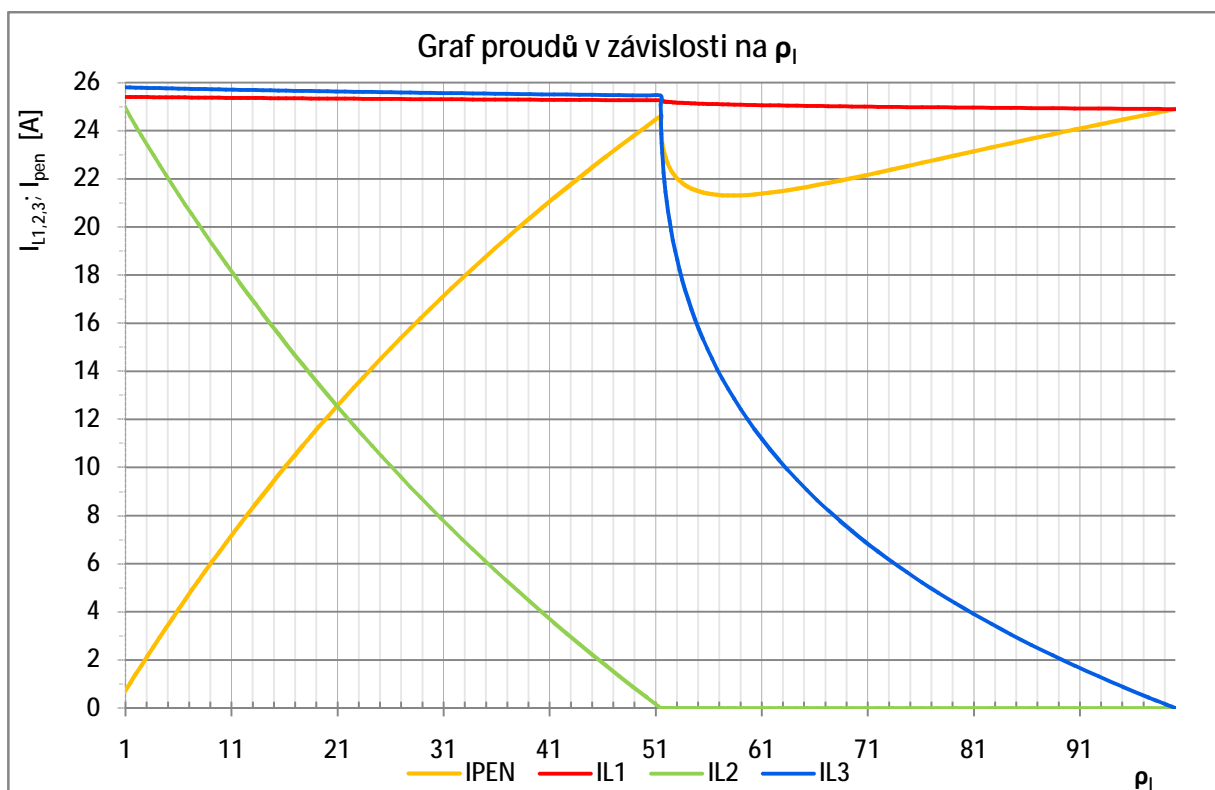
10.3.2 Průběh a cíle simulace

Předmětem této simulace bude zvyšování proudové nesymetrie, která vzniká v důsledku zvyšující se nerovnoměrnosti velikosti zátěží, které jsou sítí napájeny. Průběh simulace je realizován postupným snižováním zdánlivých výkonů zátěží na fázích L_2 a L_3 , tedy výkony S_{Z2} a S_{Z3} z výchozích výkonů 6kVA (kdy je síť symetricky zatížena) až na hodnotu blízkou nule (v rámci modelu nelze zadávat pro výkony nulové hodnoty). Jestliže je síť v posledním kroku simulace zatížena pouze jednofázovou zátěží, považujeme tento stav zatížení za plnou nesymetrii ($\rho=100\%$). Současně se snižováním zátěží bude sledována velikost vyrovnávacích proudů středním vodičem a úbytek na něm.

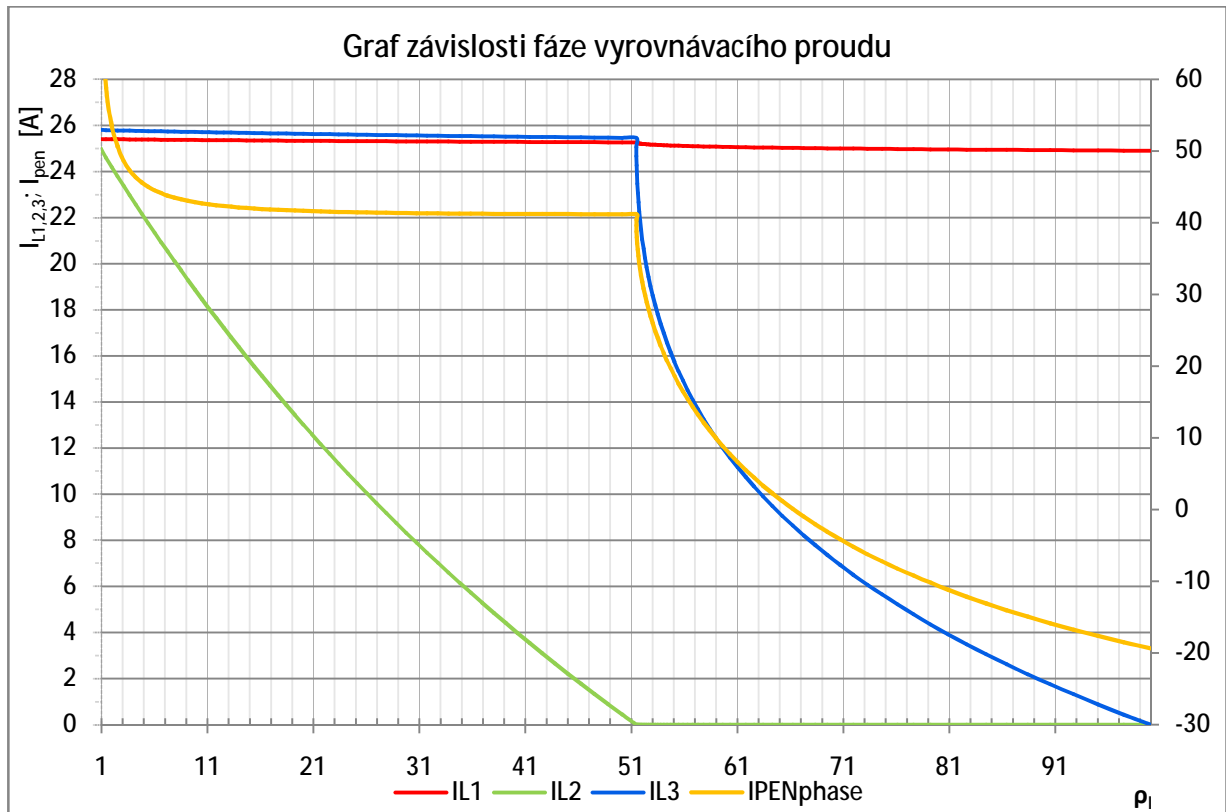
10.3.3 Grafy



Graf: 10-19 Napětí na zátěžích a středním vodiči pro rostoucí proudovou nesymetrii



Graf: 10-20 Proudů zátěžemi a středním vodičem pro rostoucí proudovou nesymetrii



Graf: 10-21 Závislost fáze vyrovnávacího proudu na rozložení zátěží

10.3.4 Popis chování sítě

Účelem této simulace je popis chování sítě v případě nesymetrického zatěžování a vlivu na velikost proudu středním vodičem. Jelikož zátěže jsou voleny poměrně malé, tedy $S_{Z1,2,3}=6kVA$ maximálně, nedochází na vodičích vedení k velkým úbytkům napětí a následným fázovým posunům proudů. Z *Graf: 10-20* je patrné, jak se v průběhu simulace měnilo výkonové rozložení na síti. Na křivkách proudů ve fázi L_1 a L_2 jsou patrné drobné odlišnosti v jejich velikosti, i když se jedná do bodu činitele proudové nesymetrie $\rho_I=51\%$ o stejně velké zátěže na těchto fázích. Toto je způsobeno fázovým posunem napětí vlivem induktivní reaktance vedení. Proud středním vodičem na tomto grafu roste společně s klesajícím výkonem S_{Z2} , další pokles proudu středním vodičem je způsoben, jestliže bude snižována zátěž S_{Z3} , i když proudová nesymetrie stále narůstá. V tomto případě je nutné sledovat dále fázové posuny fázorů jednotlivých proudů, neboť velikost proudu středním vodičem vychází z fázorového součtu proudu všemi fázemi. Velikost zátěží v simulaci je v průběhu dopočítávána ze zadávaného zdánlivého výkonu tak, aby její účinník byl stále $\cos\varphi_{Z1,2,3}=0,95$. Tento případ je tedy simulací připojování různých zařízení s různými zdánlivými výkony, avšak se stejným účinníkem. V grafu *Graf: 10-21* je zobrazena závislost fáze vyrovnávacího proudu na změně rozložení zátěží. Je patrné, že změna zatížení jedné fáze má vliv pouze na velikost proudu, avšak změna ve dvou fázích vyvolá se změnou velikosti tohoto fázoru i změnu jeho fáze.

10.4 Vliv změny účinníku zátěží na parametry napájení

Jak bylo naznačeno v rozboru, na velikost proudu středním vodičem má velký vliv účinník zátěží, tedy úhel fázorů jednotlivých proudů. Jestliže není vzájemný úhel mezi fázory proudů 120° , začne protékat středním vodičem vyrovnávací proud, přičemž na vedení bude vytvářet různé úbytky.

10.4.1 Výchozí nastavení modelu

Výchozím nastavením se rozumí stav sítě při bezporuchovém provozu, jak je uvedeno v části 9 této bakalářské práce. Prvky modelu, které se během simulace nebudou měnit, budou nastaveny následovně dle tabulky *Tab. 10-9*:

Tab. 10-9 Výchozí parametry pro simulaci změny účinníků zátěží

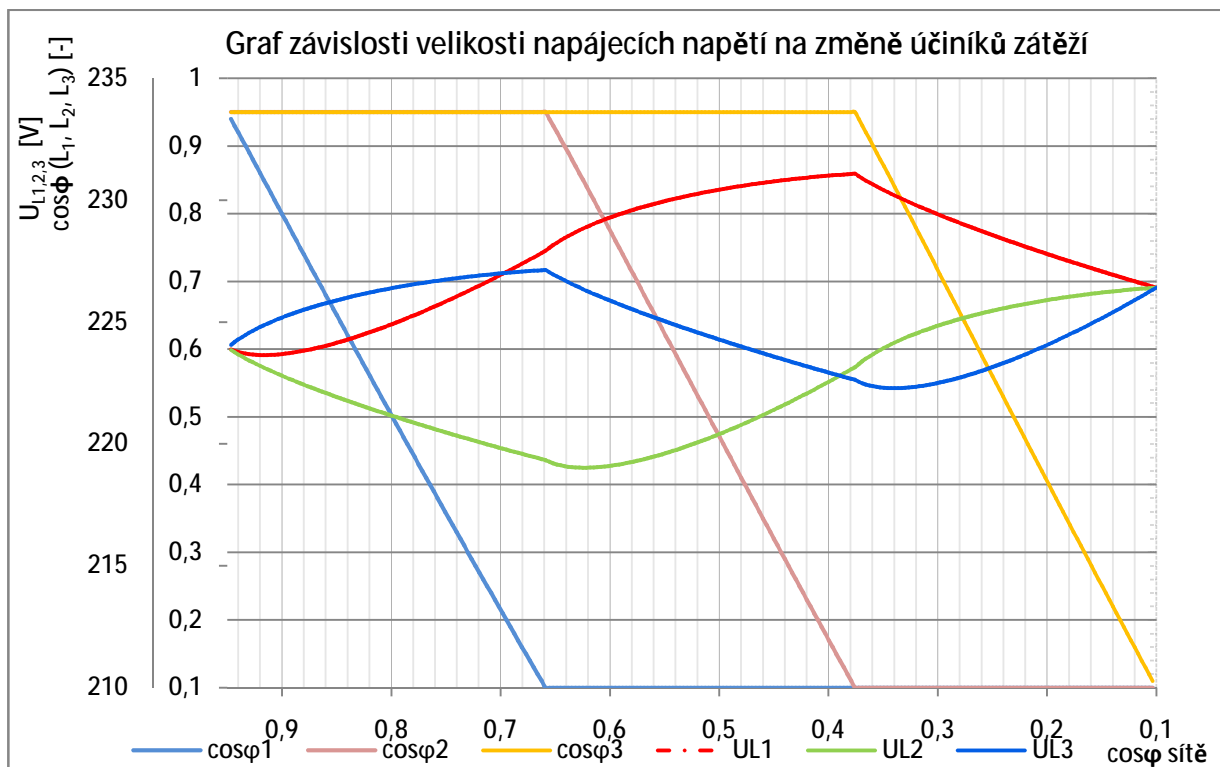
Název veličiny:	Označení:	Hodnota:	Jednotka:
Zdánlivý výkon zátěže Z_1	S_1	6	kVA
Zdánlivý výkon zátěže Z_2	S_2	6	kVA
Zdánlivý výkon zátěže Z_3	S_3	6	kVA
Výchozí účinníky zátěží $Z_{1,2,3}$	$\cos\varphi_{Z1,2,3}$	0,95	-
Napětí pro výpočet výkonů zátěží $Z_{1,2,3}$	$U_{Z1,2,3n}$	230	V
Činný odpor fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$R_{F1,2,3}$	0,24	Ω
Indukčnosti fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$L_{F1,2,3}$	$4,7747 \cdot 10^{-4}$	H
Činný odpor středního vodiče SV	R_{PEN}	0,16	Ω
Indukčnost středního vodiče SV	L_{PEN}	$3,183 \cdot 10^{-4}$	H

10.4.2 Vyjádření změny účinníků zátěží

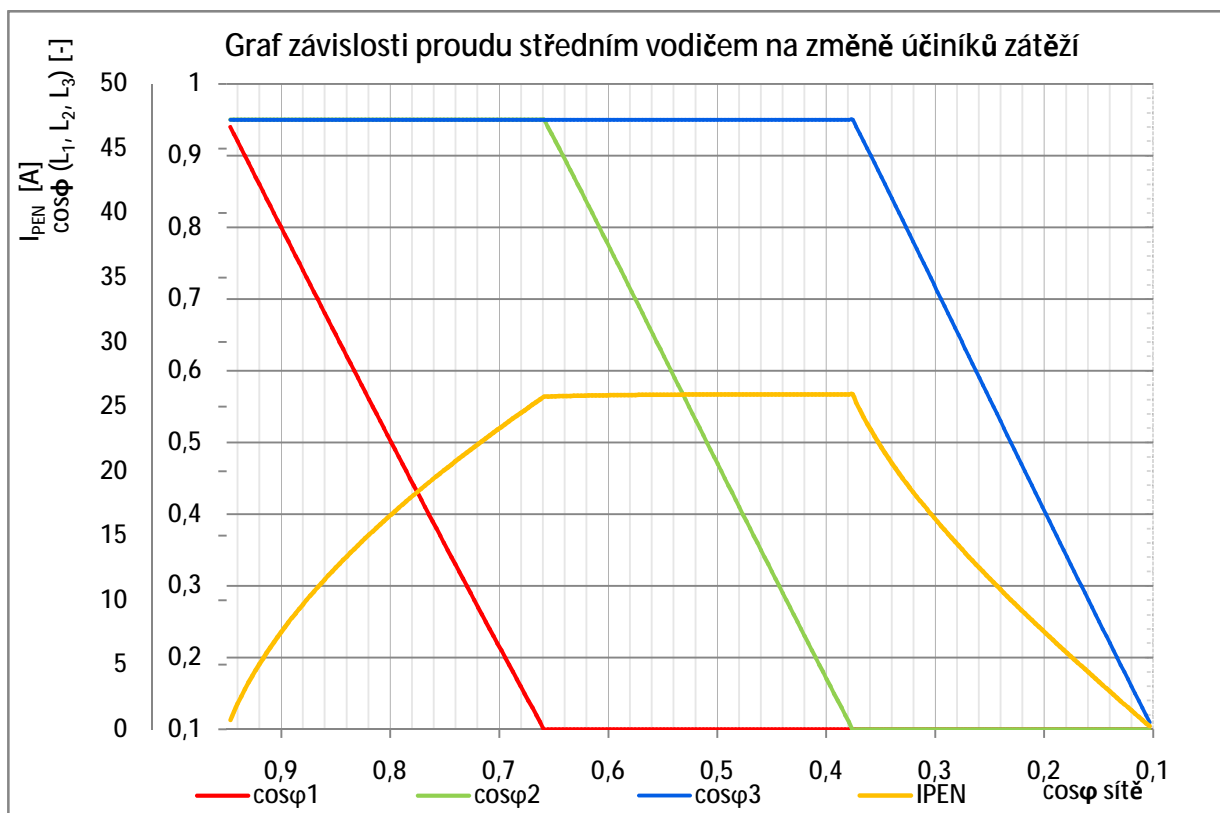
Změna účinníku sítě bude vyjádřena celkovým účinníkem sítě, který se vypočítá z celkového připojeného zdánlivého a činného výkonu dle rovnice 10-2. Výchozím účinníkem bude pro všechny zátěže $\cos\varphi_{1,2,3} = 0,95$.

$$\cos\varphi_s = \frac{P_{Z1} + P_{Z2} + P_{Z3}}{S_{Z1} + S_{Z2} + S_{Z3}} \quad 10-2$$

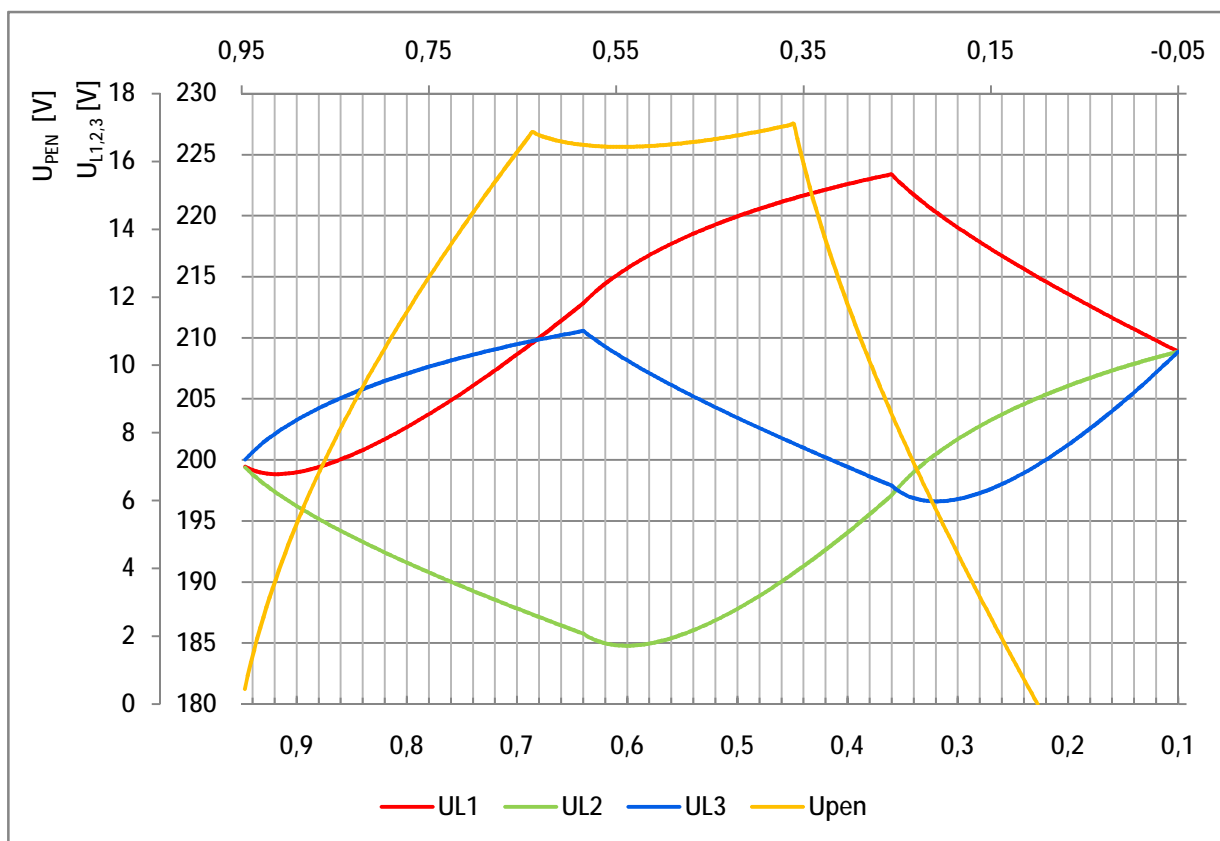
10.4.3 Grafy



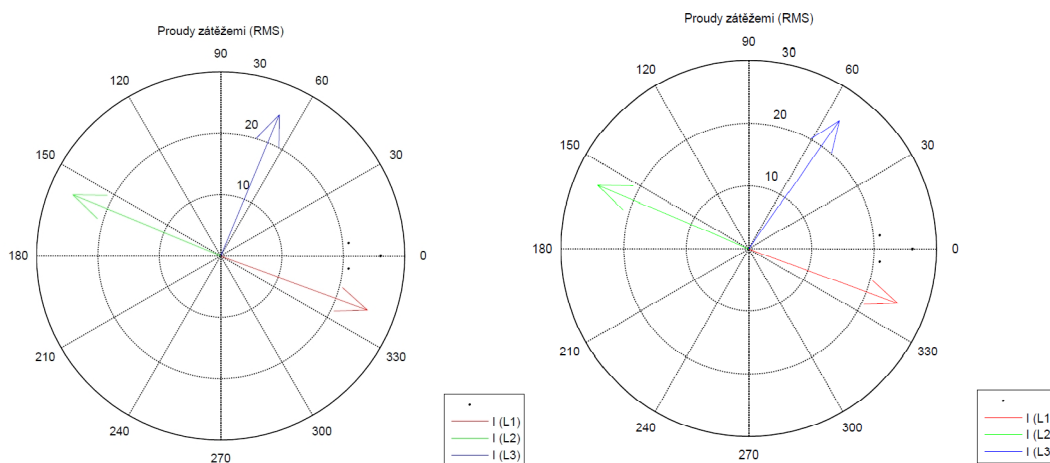
Graf: 10-22 Napětí na zátěžích v závislosti na účinníku sítě



Graf: 10-23 Velikost proudu středním vodičem v závislosti na účinníku sítě



Graf: 10-24 Napětí na zátěžích v závislosti na účinníku sítě (zvýšený výkon)



Obr.: 10-1 Fázorové diagramy pro změnu účinníku zátěže na fázi L₂.

10.4.4 Zhodnocení výsledků simulace

Jak bylo řečeno v části 7.3 této práce, k toku vyrovnávacího proudu středním vodičem má vliv, jestliže účinnky zátěží jsou různé. Z *Graf: 10-23* je patrný průběh změn účinnků zátěží během simulace. Účinnky byly měněny postupně u všech tří zátěží v rozmezí $\cos\varphi_{Z1,2,3}=0,95-0,1$ induktivního charakteru. Vyrovnávací proud narůstal v oblasti změny účinnku zátěže na fázi L_1 , změna účinnku zátěže připojené na fázi L_2 neměla na velikost vyrovnávacího proudu vliv, ke snížení vyrovnávacího proudu docházelo opětovně v oblasti, kdy se zhoršoval účinník zátěže připojené na fázi L_3 .

Jak bylo popsáno, v případě kdy se měnil účinník zátěže na fázi L_2 , neměnila se velikost vyrovnávacího proudu středním vodičem. Důvod tohoto stavu je popsán fázorovými diagramy na *Obr.: 10-1*. Na fázorovém diagramu vlevo je účinník $\cos\varphi_{Z2}=0,6$ na obrázku vpravo je účinník $\cos\varphi_{Z2}=0,4$. Jelikož fázory proudů zátěžemi Z_1 a Z_2 jsou orientovány proti sobě, při fázorovém součtu v uzlu zátěží dojde k jejich odečtení, rovnice fázorového součtu těchto proudů bude rovna pouze proudu fází L_2 , přičemž s měnícím se účinníkem $\cos\varphi_{Z2}=0,6$ se bude měnit pouze fázový posun tohoto proudu.

V *Graf: 10-24* jsou zobrazeny průběhy napětí na zátěžích a středním vodiči se stejným průběhem změny účinnku jako v předchozích případech, avšak se zvýšenými výkony připojenými do sítě. V oblasti mezi účinníkem sítě $\cos\varphi_S=0,65$ a $0,35$ je oproti předchozímu případu patrná prohlubeň. Tato změna tvaru křivky je zapříčiněna zvýšeným úbytkem na síti v důsledku vzájemného fázového posunu mezi úhlem impedance zátěže a sítě.

10.4.5 Závěr z výsledků simulace

Jestliže budeme měnit pouze účinník zátěží, bude se společně s účinníky měnit pouze fázový posun proudů. V případě že účinnky nebudou stejné, nebudou úhly mezi jednotlivými fázory stejné a středním vodičem bude protékat vyrovnávací proud. Jestliže však bude výkon zátěží dostatečně velký, bude mít účinník vliv na velikost úbytku napětí na vedení, která se bude odvíjet od vzájemného úhlu a velikosti impedance zátěže a vedení.

10.5 Zkratový výkon sítě

Třífázový zkratový výkon sítě je maximální výkon, který je schopen zdroj dodat do sítě s ohledem na její impedanci. Tento maximální výkon je dán vnitřní impedancí zdroje a impedancí vedení, dále pak na výkonech, které jsou v síti připojeny. Maximální výkon je do sítě dodáván při dokonalém třífázovém zkratu.

10.5.1 Výchozí nastavení modelu

Parametry sítě, které se nebudou v průběhu simulací měnit, jsou nastaveny dle tabulky: *Tab. 10-10*.

Tab. 10-10 Výchozí parametry pro simulaci

Název veličiny:	Označení:	Hodnota:	Jednotka:
Účinník zátěží $Z_{1,2,3}$	$\cos\varphi_{Z1,2,3}$	1	-
Činný odpor fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$R_{F1,2,3}$	0,24	Ω
Indukčnost fázových vodičů $FV_{1,2,3}$	$L_{F1,2,3}$	$4,7747 \cdot 10^{-4}$	H
Činný odpor středního vodiče SV	R_{PEN0}	0,16	Ω
Indukčnost středního vodiče SV	L_{PEN}	$3,183 \cdot 10^{-4}$	H

10.5.2 Proudová nesymetrie pro tuto simulaci

Tato simulace byla provedena pro tři výchozí nesymetrie, aby bylo možno posoudit vliv nerovnoměrného zatížení na možné využití výkonu sítě a vliv nerovnoměrného zatížení na parametry napájecího napětí. Výkony jsou při každém kroku simulace nastaveny v podílech výkonu S_1 . Výkon zátěží S_2 a S_3 je nastaven vydělením výkonu S_1 daným koeficientem.

Tab. 10-11 Přehled nastavení výchozích poměrů výkonů zátěží pro dosažení žádané ρ_1

Č. sim.:	ρ_1	S_{Z1}	k_{sz2}	k_{sz3}
	[%]	[kVA]	-	-
1	20	6	0,5	1
2	50	6	1,714	20
3	80	6	10,91	17,14

10.5.3 Zavedená označení a vyjádření pro tuto simulaci

Pro vyjádření změny parametrů v průběhu simulace a určení potřebných mezí, ve kterých simulace bude probíhat je nutno určit následující:

10.5.4 Měřítka aktuálního výkonu a zkratového výkonu sítě

Při simulaci budeme dávat do poměru zkratový zdánlivý výkon sítě a celkový zdánlivý výkon připojených zátěží. Pro tuto simulaci je nutné vypočítat zdánlivý zkratový výkon, tím se rozumí maximální výkon, který bude do sítě dodáván zdrojem v případě zkratu. Celou situaci zjednodušíme faktem, kdy uvažujeme pouze jednu napěťovou hladinu a ideální zdroj bez vnitřní impedance. Smyčka, kterou prochází zkratový proud je tvořena transformátorem (v našem případě ideální zdroj, který nebudeme nahrazovat impedancí), impedancí fázových vodičů $Z_{L1,2,3}$, popřípadě impedancí středního vodiče Z_{PEN} . Pro výpočet jsou použity tyto vstupní parametry:

Hodnota sdruženého napětí zdroje:

$$U_S = 400V$$

Z toho vypočtená hodnota fázového napětí:

$$U_f = \frac{U_S}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94V$$

Impedance fázového vodiče mezi zdrojem a odběrem:

$$Z_F = (0,24 + j0,15)\Omega$$

Impedance středního vodiče mezi zdrojem a odběrem:

$$Z_{PEN} = (0,16 + j0,1)\Omega$$

10.5.4.1 Jednofázový zkratový výkon

Celková impedance sítě při jednofázovém zkratu:

$$Z_{Sk1} = Z_F + Z_{PEN} = (0,24 + j0,15) + (0,16 + j0,1) = (0,4 + j0,25)\Omega$$

Maximální možný proud protékající při jednofázovém zkratu:

$$I_{kf1} = \frac{U_f}{Z_{Sk1}} = \frac{230,94}{(0,4 + j0,25)} = (415,173 - j259,483)A = 489,592 \angle - 32^\circ A$$

Z toho vypočítaný zkratový výkon při jednofázovém zkratu:

$$S_{k1} = |U_f| \cdot |I_k| = 230,94.489,592 = 113,066\text{kVA}$$

10.5.4.2 Dvoufázový zkratový výkon

Celková impedance sítě při dvoufázovém zkratu:

$$Z_{Sk2} = 2 \cdot Z_F = 2 \cdot (0,24 + j0,15) = (0,48 + j0,3)\Omega$$

Maximální možný proud protékající při dvoufázovém zkratu:

$$I_{kf2} = \frac{U_s}{Z_{Sk2}} = \frac{400}{(0,48 + j0,3)} = (599,25 - j374,53)\text{A} = 706,67 \angle -32^\circ \text{A}$$

Z toho vypočítaný zkratový výkon při dvoufázovém zkratu:

$$S_{k2} = |U_s| \cdot |I_{kf2}| = 400 \cdot 706,67 = 282,67\text{kVA}$$

10.5.4.3 Třífázový zkratový výkon

Maximální výkon sítě se projeví při třífázovém zkratu. Pro zjednodušení lze uvažovat, že třífázový zkrat pro naši síť je ideální spojení fázových vodičů na konci vedení. Impedance vedení budou tedy zapojeny do hvězdy a na každé impedanci fázového vedení se vytvoří fázové napětí $U_{\Delta ZF} = 230,9\text{V}$, jestliže uvažujeme ideální zdroj, jehož svorkové napětí společně se zatížením nepoklesne.

Proud fázovým vodičem vedení bude tedy:

$$I_{kf3} = \frac{\Delta U_{Zf}}{Z_F} = \frac{230,9}{(0,24 + j0,15)} = (691,84 - j432,4)\text{A} = 815,85 \angle -32^\circ \text{A}$$

Z toho vypočítaný maximální zkratový výkon sítě:

$$S_{k3} = 3 \cdot U_f \cdot |I_{kf3}| = 3 \cdot 230,9 \cdot 815,85 = 565,139\text{kVA}$$

Pozn: Vypočítané hodnoty výkonů byly potvrzeny i simulací v programu MATLAB, kdy u odběru byl spojen fázový vodič s vodičem středním (výkon jednofázového zkratu), dále byly spojeny dvě fáze (dvoufázový zkrat) a nakonec všechny tři fáze na konci vedení (třífázový zkrat). Při těchto spojeních byla měřena absolutní hodnota proudu obvodem a napětí na zdroji. Vzhledem k tomu že byl volen ideální zdroj, napájecí napětí při tomto stavu nepokleslo.

10.5.5 Nastavení simulace

Budou provedeny tři simulace pro výchozí proudovou nesymetrii $\rho_I = 20, 50$ a 80% . Pro zadání požadované nesymetrie byly pokusně nalezeny poměry výkonů S_1, S_2 a S_3 , tak jak je uvedeno v *Tab. 10-11*. Pro výpočet daných výkonů pak byly zadány ty impedance, kterými pravděpodobně budou proudy jednotlivých výkonů protékat. Například pro proudovou nesymetrii 20% byly výkony S_{z1} a S_{z3} stejné a výkon S_{z2} oproti těmto výkonům poloviční. Pro výpočet výkonů S_{z1} a S_{z3} byla zadána impedance rovna Z_{sk2} a pro výkon S_{z2} impedance rovna Z_{sk1} . V každém kroku byl zvýšen výkon S_{z1} o $1000VA$ a zbylé výkony dopočítány dle poměrů. Pro regulaci výkonů v modelu byla měněna hodnota činných odporů $R_{z1,2,3}$ připojených k fázovým vodičům na konci vedení. Hodnoty těchto odporů byly dopočítávány na základě uvažované impedance smyčky a požadovaného odporu smyčky pro dosažení výkonu dle vztahu (10-4).

$$R_{poz.} = \frac{U_f^2}{S_{zx}} \quad 10-3$$

10.5.6 Vyjádření změny zatížení

V průběhu této simulace je postupně zvyšován výkon jednotlivých fází snižováním činných omezovacích odporů vřazených mezi fázový a střední vodič, důsledkem čehož je zvyšován výkon dodávaný zdrojem do sítě. Jestliže celkový výkon dodávaný do sítě dosáhne zkratového výkonu sítě, bude hodnota poměru 1. Výpočet je prováděn dle rovnice (10-4).

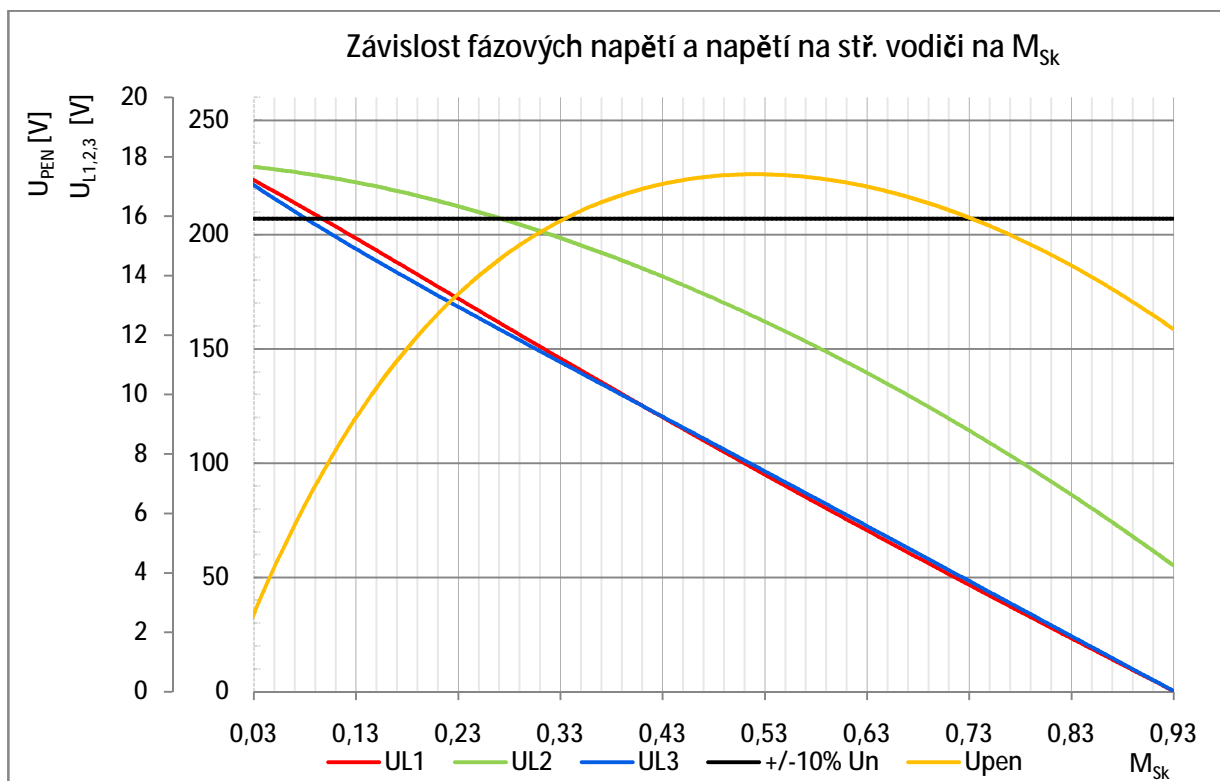
$$M_{Sk} = \frac{S_{zc}}{S_k} \quad (10-4)$$

kde:

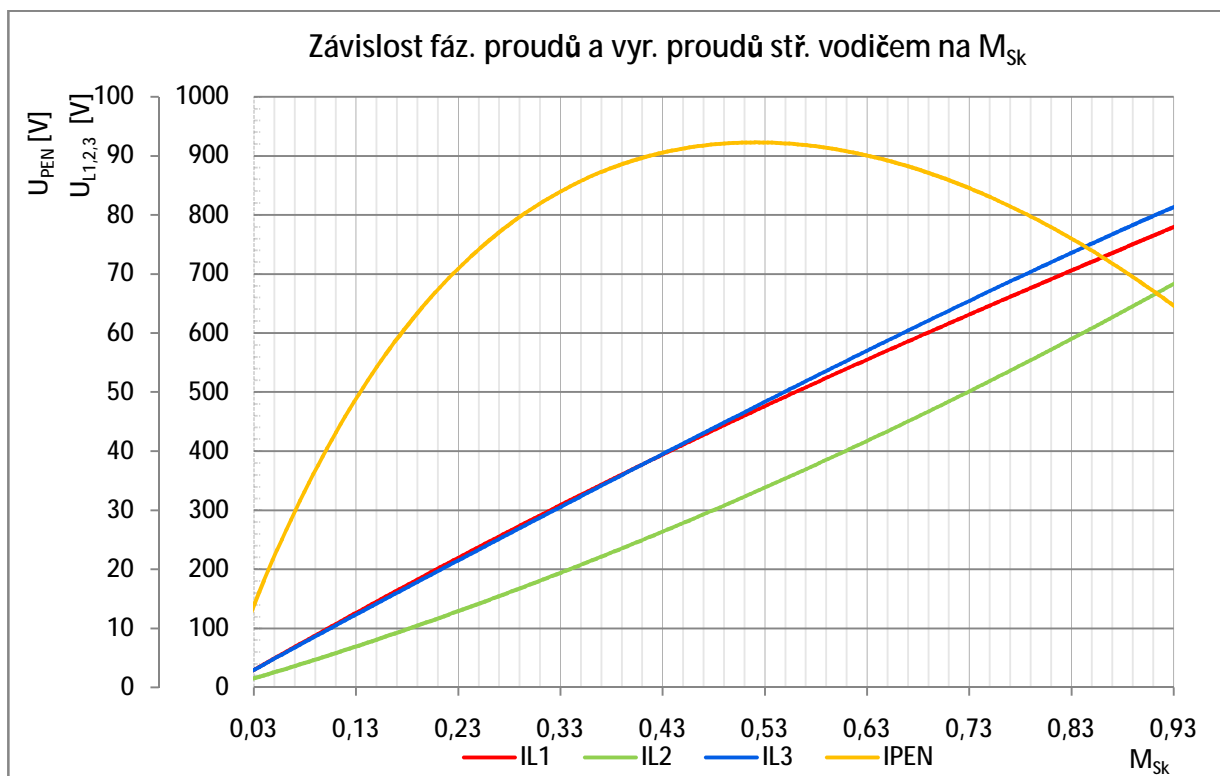
M_{Sk}	měřítko změny výkonu dodávaného do sítě
S_{zc}	výkon dodávaný do sítě v daném kroku simulace
S_{k3}	maximální výkon sítě (třífázový zkrat)

10.5.7 Simulace č.1, výchozí proudová nesymetrie 20%

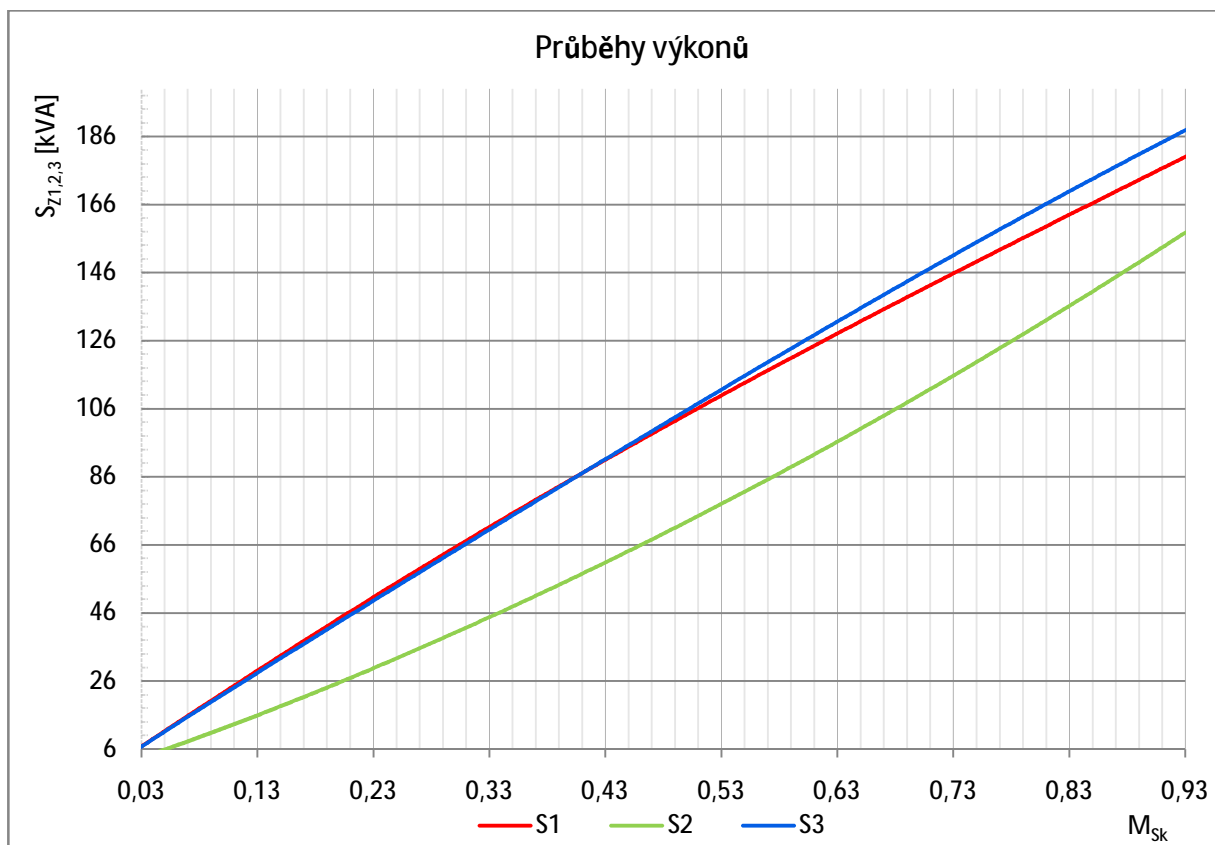
10.5.7.1 Grafy pro tuto simulaci



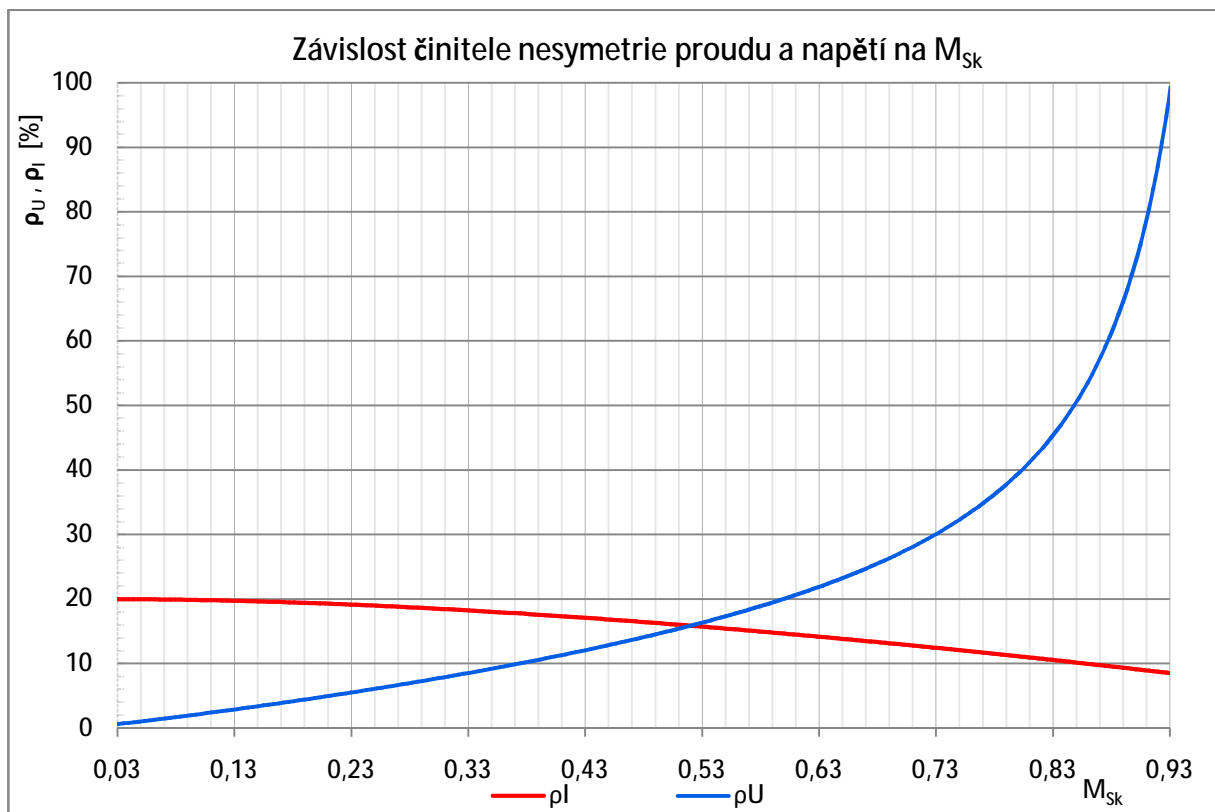
Graf: 10-25 Závislost fázových napětí a napětí na středním vodiči na M_{sk} pro $\rho_I=20\%$



Graf: 10-26 Závislost proudů fázemi a středním vodičem na M_{sk} pro $\rho_I=20\%$



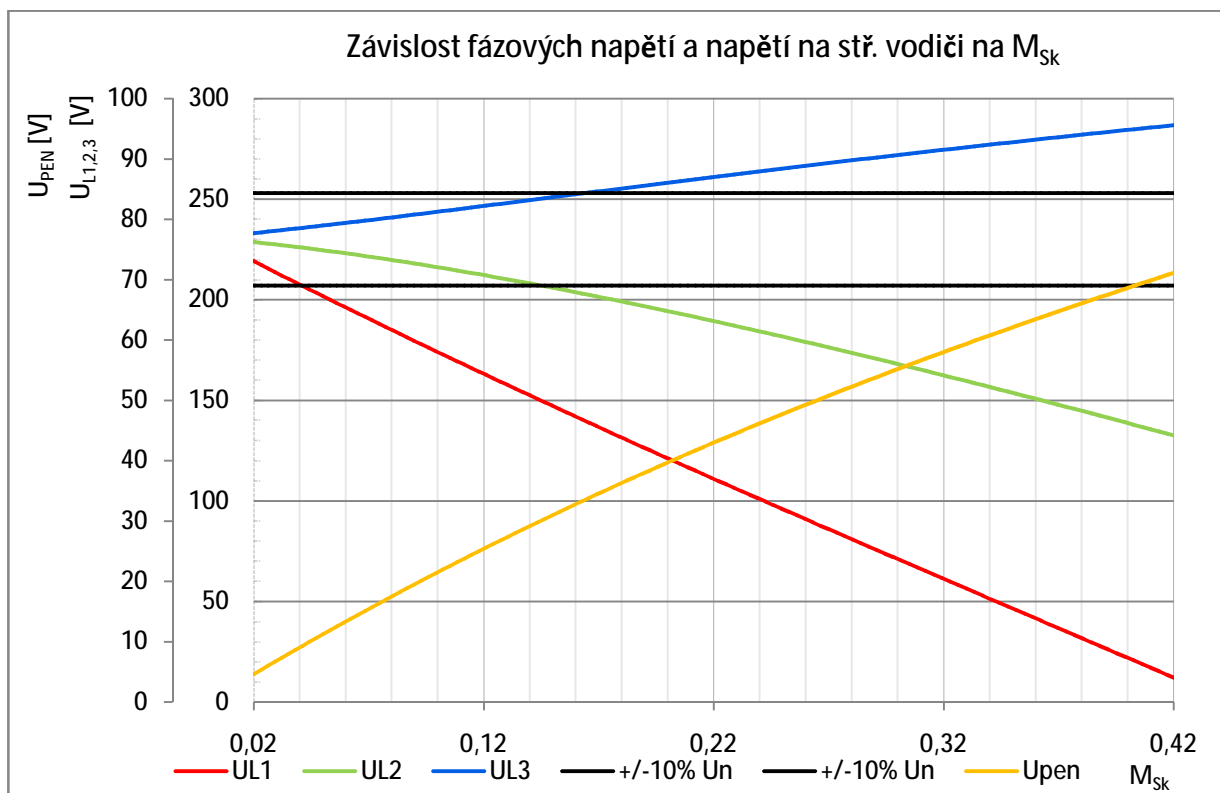
Graf: 10-27 Závislost výkonů na M_{sk} pro $\rho_I=20\%$



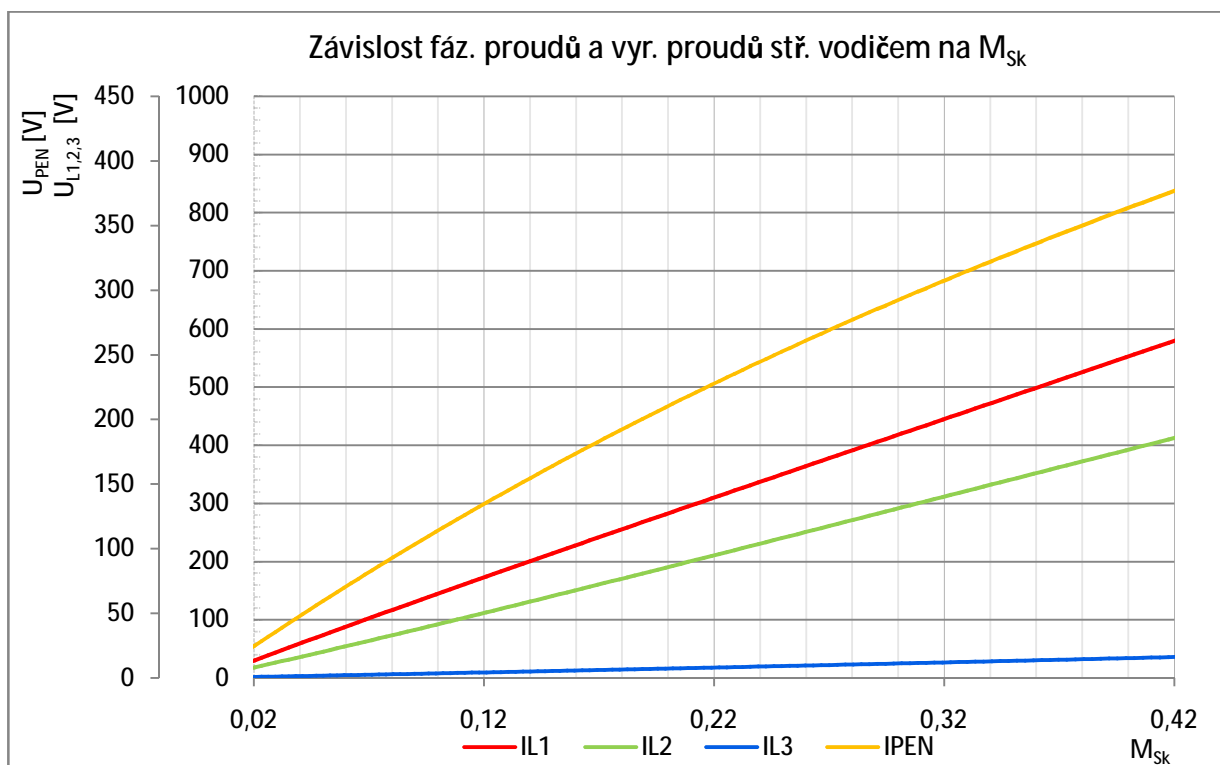
Graf: 10-28 Závislost činitelů nesymetrie a napětí na M_{sk} pro $\rho_I=20\%$

10.5.8 Simulace č.2, výchozí proudová nesymetrie 50%

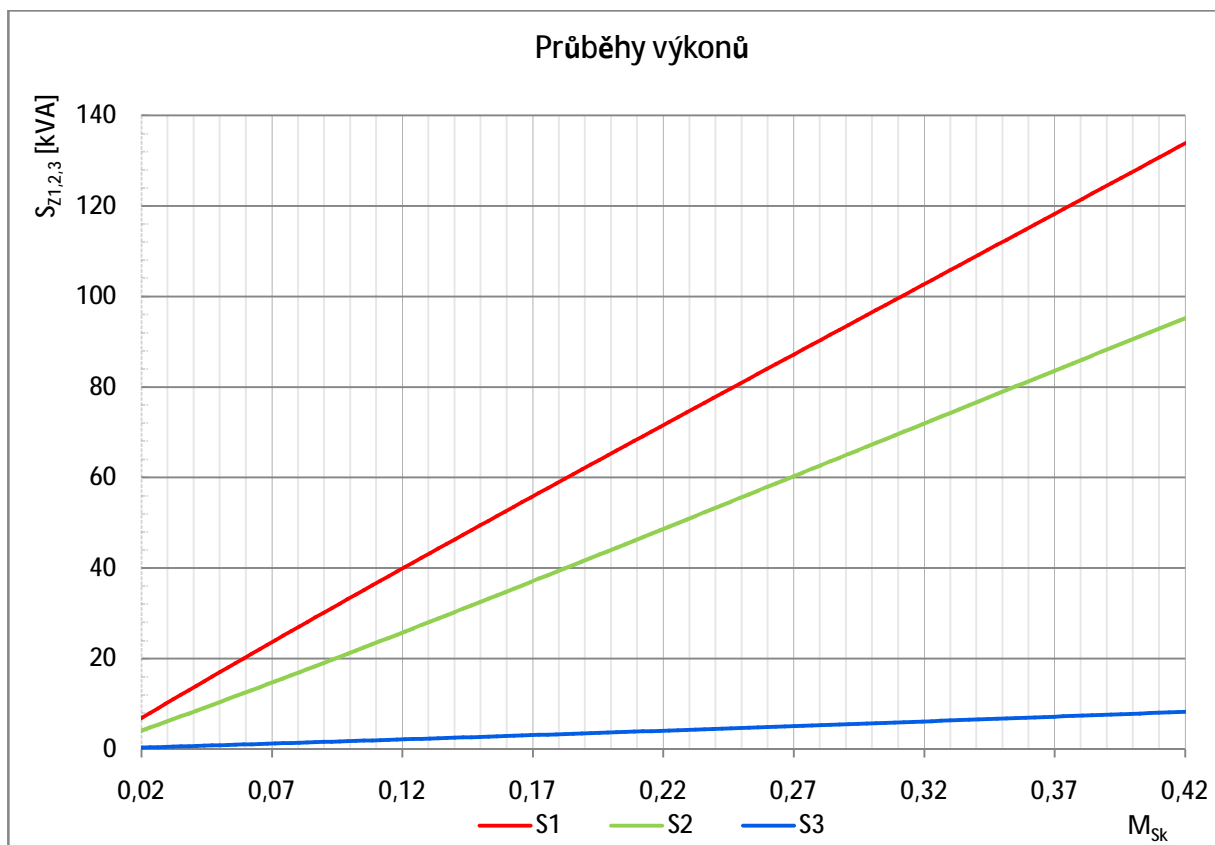
10.5.8.1 Grafy pro tuto simulaci



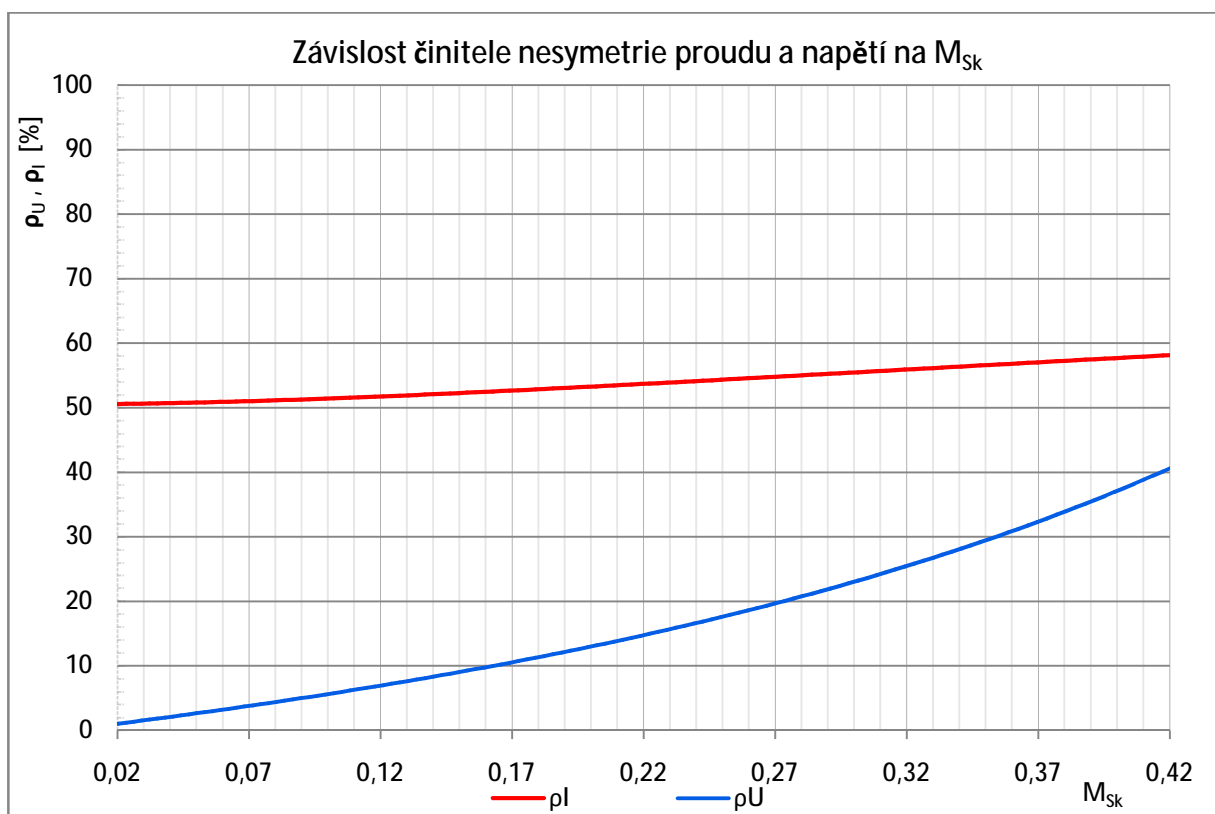
Graf: 10-29 Závislost fázových napětí a napětí na středním vodiči na M_{sk} pro $\rho_I=50\%$



Graf: 10-30 Závislost proudů fázemi a středním vodičem na M_{sk} pro $\rho_I=50\%$



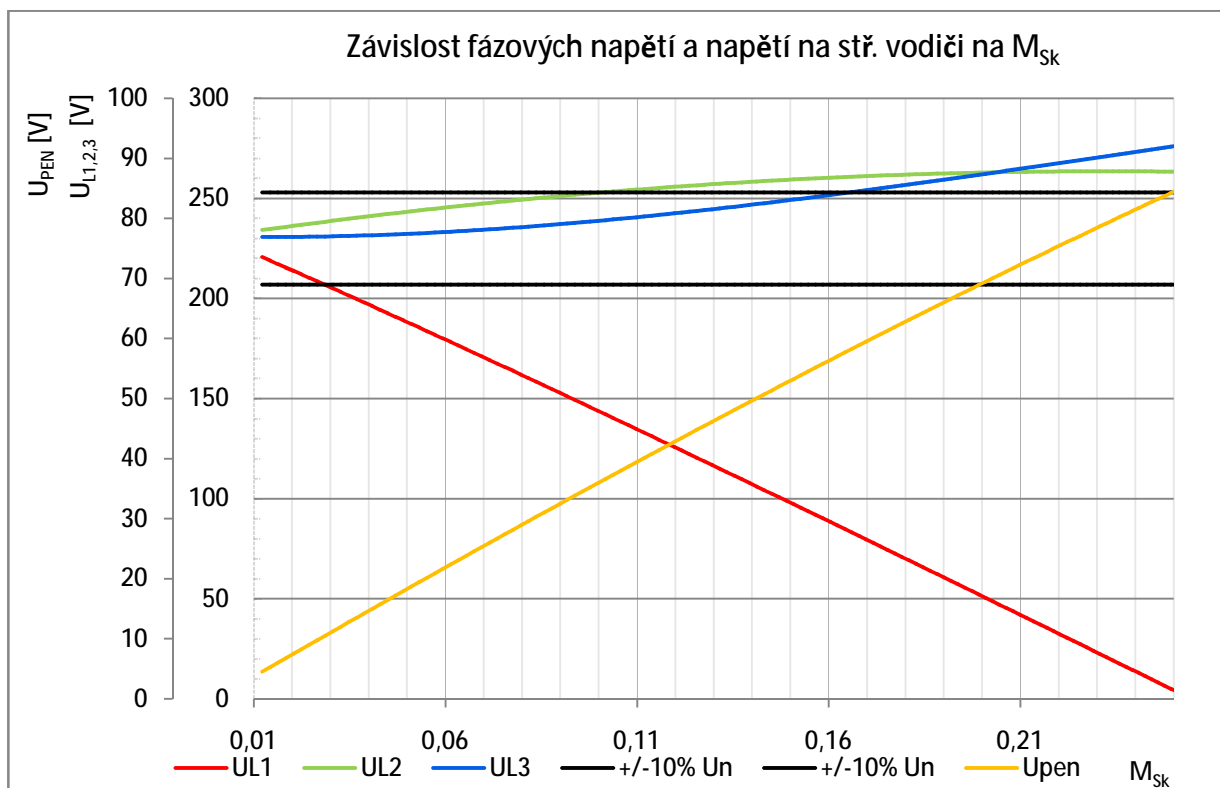
Graf: 10-31 Závislost výkonů na M_{sk} pro $\rho_I=50\%$



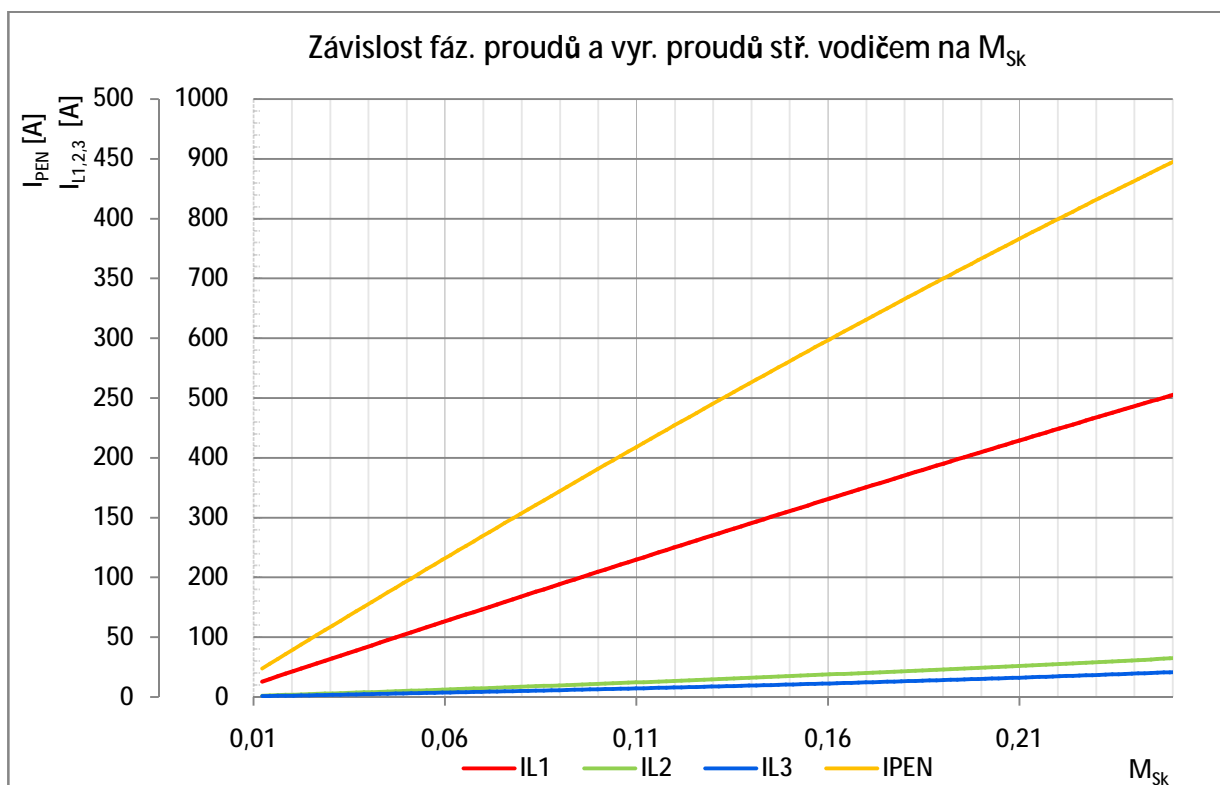
Graf: 10-32 Závislost činitelů nesymetrie a napětí na M_{sk} pro $\rho_I=50\%$

10.5.9 Simulace č.3, výchozí proudová nesymetrie 80%

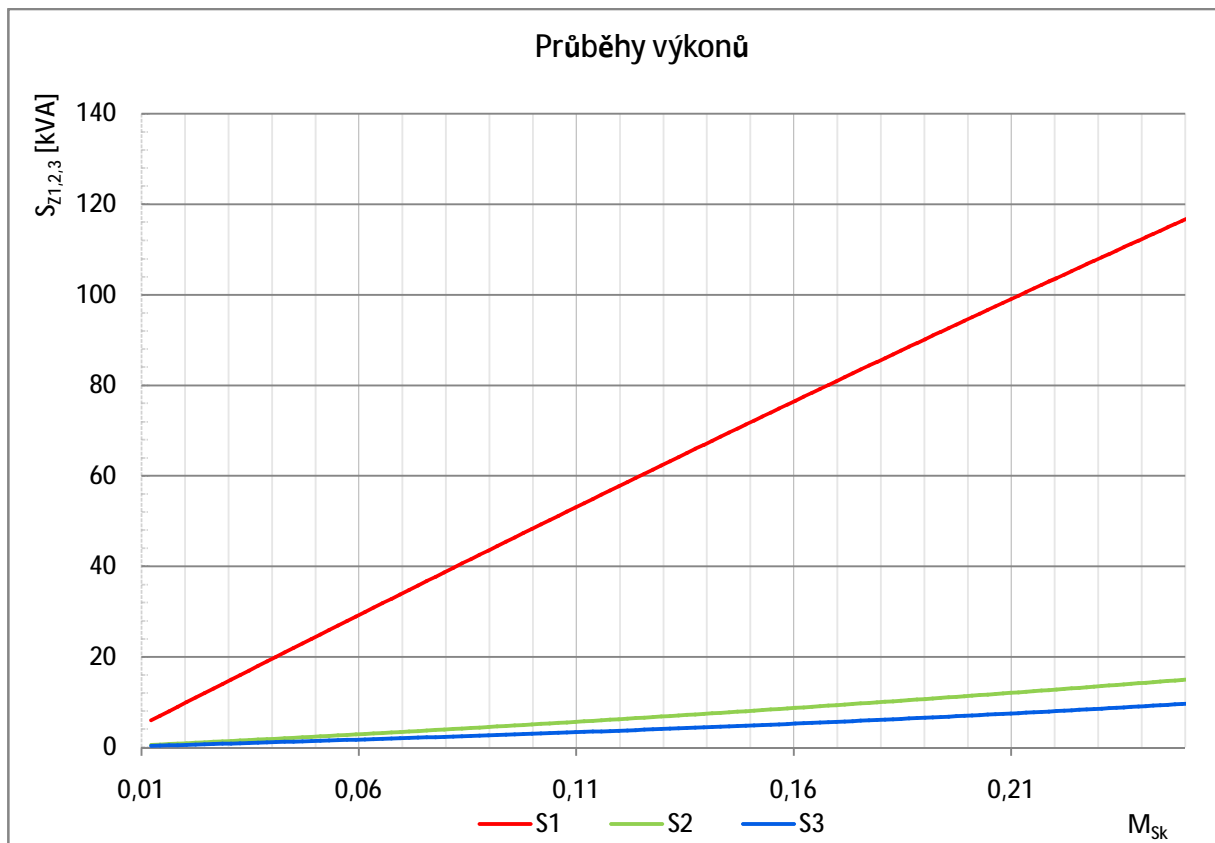
10.5.9.1 Grafy pro tuto simulaci



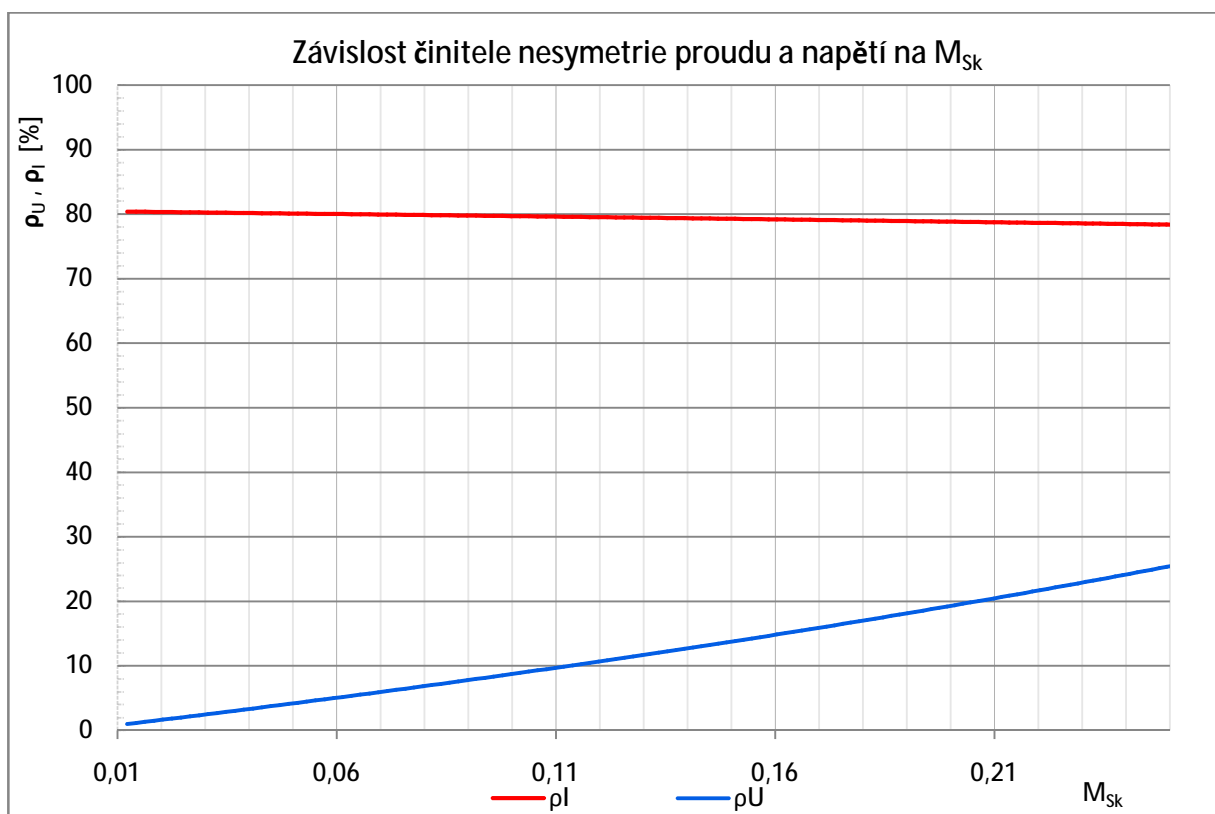
Graf: 10-33 Závislost fázových napětí a napětí na středním vodiči na M_{sk} pro $\rho_I=80\%$



Graf: 10-34 Závislost proudů fázemi a středním vodičem na M_{sk} pro $\rho_I=80\%$



Graf: 10-35 Závislost výkonů na M_{sk} pro $\rho_I=80\%$



Graf: 10-36 Závislost činitelů nesymetrie a napětí na M_{sk} pro $\rho_I=80\%$

10.5.10 Popis chování sítě

Simulace byly provedeny pro výchozí proudové nesymetrie 20, 50 a 80%. První z hlavních faktů je patrný z grafů *Graf: 10-25*, *Graf: 10-29*, *Graf: 10-33*, na kterých jsou zobrazeny závislosti velikostí napájecích napětí v místě odběru (na konci vedení) na M_{Sk} . Porovnáním těchto grafů zjistíme, že čím větší bude proudová nesymetrie vlivem nerovnoměrného rozložení zátěží, tím menší výkon můžeme na síti provozovat, aby velikost napájecího napětí nevybočila z povolených mezí $\pm 10\%$. Podobné je to pro napětí na středním vodiči PEN, čím větší bude nesymetrie, tím menším výkonem můžeme zatížit síť, aby napětí na středním vodiči nestouplo nad hranici dovoleného dotykového napětí 50V. Mezní hodnoty, při kterých došlo ke zhoršení daných parametrů napájecího napětí pod nebo nad dovolenou mez, jsou vypsány v tabulkách *Tab.: 10-12*, *Tab.: 10-13* a *Tab.: 10-14*.

Tab.: 10-12 Shrnutí získaných údajů pro část 10.5.7 (výchozí proudová nesymetrie 20%)

Vyjádření meze:	Popis:	M_{Sk}	S_C	Fáze:	
				Ozn.:	Výkon:
-	-	[-]	[kVA]	[-]	[kVA]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	0,0841	47,5	L ₃	18,548
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	-	-	-	-
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	-	-	-	-
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesym. mimo dov. mez	0,09289	52,48	-	-

Tab.: 10-13 Shrnutí získaných údajů pro část 10.5.8 (výchozí proudová nesymetrie 50%)

Vyjádření meze:	Popis:	M_{Sk}	S_C	Fáze:	
				Ozn.:	Výkon:
-	-	[-]	[kVA]	[-]	[kVA]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	0,0412	23,252	L ₁	14
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	0,1659	93,76	L ₃	3,2
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	0,267	150,67	-	-
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesym. mimo dov. mez	0,0382	21,57	-	-

Tab.: 10-14 Shrnutí získaných údajů pro část 10.5.9 (výchozí proudová nesymetrie 80%)

Vyjádření meze:	Popis:	M_{Sk}	S_C	Fáze:	
				Ozn.:	Výkon:
-	-	[-]	[kVA]	[-]	[kVA]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	0,0286	16,17	L ₁	14
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	0,1018	57,55	L ₂	5,2
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	0,1412	79,82	-	-
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesym. mimo dov. mez	0,0245	13,85	-	-

Z hodnot uvedených v tabulkách je patrné, že čím vyšší bude proudová nesymetrie v důsledku nerovnoměrného rozložení zátěží na síti, tím menší bude možný celkový výkon, kterým lze síť zatížit, aniž by došlo ke zhoršení některého z parametrů, které klasifikují napájecí napětí z hlediska kvality el. energie. Zatímco v případě 20% proudové nesymetrie lze konkrétní síť zatížit až do celkového výkonu 47,5kVA (při tomto výkonu dochází na zátěži fáze L₃ k podpětí), při 50% proudové nesymetrii lze síť zatížit na necelou půlku, tedy na 21,57kVA.

11 ZÁVĚR

Simulacemi, které byly provedeny v rámci této práce, byly zjištěny souvislosti mezi účinníkem, velikostí zátěží, impedancí středního vodiče, poměrem zatížení sítě vzhledem k maximálnímu (zkratovému) výkonu sítě a kvalitou napájecího napětí v místě napájení.

11.1 Porovnání okolností vzniku mezních stavů

Elektrická energie je výrobek jako každý jiný, ten by měl být dodáván v patřičné kvalitě. Tato kvalita je klasifikována ukazateli a mezními hodnotami těchto ukazatelů, ve kterých by se měli pohybovat. Rozumí se především velikost fázových napájecích napětí a činitel napěťové nesymetrie. Z hlediska bezpečnosti je pak nutné dále sledovat velikosti dotykových napětí. Ze simulací, provedených na matematických modelech vyplývá, že na zhoršení kvality napájecího napětí má největší vliv proudová nesymetrie, způsobená nerovnoměrným zatížením sítě. Čím větší bude tato nesymetrie, tím více bude využíván střední vodič, na kterém současně vznikají větší úbytky napětí a následné ztráty. Tepelné účinky těchto ztrát pak mohou znamenat zhoršování parametrů středního vodiče, což má na kvalitu elektrické energie v místě odběru též velký vliv. Ze simulací provedených pro změnu impedance středního vodiče M_{Z-PEN} a pro změnu zatěžujícího výkonu M_{Sk} pro různé proudové nesymetrie byla sestavena následující tabulka závislostí mezních stavů napájecího napětí na těchto poměrových ukazatelích.

Tab.: 11-1 Poměrové ukazatele v závislosti na zhoršení sledovaných parametrů mimo mez

Vyjádření meze:	Popis:		$\rho_I=20\%$	$\rho_I=50\%$	$\rho_I=80\%$
-	-		[-]	[-]	[-]
$U_n < 207V$	Podpětí mimo dovolenou mez	M_{Z-PEN}	0,015498	0,093693	0,183
		M_{Sk}	0,0841	0,0412	0,0286
$U_n > 253V$	Přepětí mimo dovolenou mez	M_{Z-PEN}	0,032731	0,113146	0,0998
		M_{Sk}	-	0,1659	0,1018
$U_{dot} > 50V$	Vysoké dotykové napětí	M_{Z-PEN}	-	0,037439	0,0522
		M_{Sk}	-	0,267	0,1412
$\rho_U > 2\%$	Napěťová nesymetrie mimo dovolenou mez	M_{Z-PEN}	-	-	-
		M_{Sk}	0,09289	0,0382	0,0245

11.2 Efektivní hodnota fázových napětí

Dle provedených simulací ovlivňuje velikost napájecího napětí v nejvyšší možné míře právě nárůst impedance středního vodiče, resp. činné složky této impedance vlivem poruch. Uzel zátěží již se zhoršujícími se parametry středního vodiče není na potenciálu země a uzlu vinutí zdroje, ale stává se z něj plovoucí bod, jehož poloha, v závislosti na rozložení zátěží na síti, vůči středu vinutí zdroje mění svou polohu. Tento fakt má za následek změnu proudových poměrů v síti ve smyslu vyrovnání rozdílu proudů jednotlivými fázemi, aby jejich velikosti byly co nejvíce rovnocenné. Tato snaha sítě přináší vzrůst napětí na zátěži s nejnižším výkonem a zároveň pokles napětí na zátěži s nejvyšším výkonem. Je mnoho způsobů, jak může ke zhoršení impedance středního vodiče dojít, ať už to je nedostatečná údržba sítí a rozvodů, nevhodně dimenzované vedení nebo přetěžování středních vodičů nevhodně rozloženou zátěží mezi fázemi. Jestliže dojde ke značnějšímu nárůstu impedance středního vodiče, může již poměrně běžná nesymetrie zatížení sítě způsobit na fázích, na kterých je připojen nejnižší výkon, nežádoucí stavy v podobě přepětí a podpětí. Dle výsledků shrnutých v části 10.2.10 vznikne přepětí na fázi, na které je připojena nejmenší zátěž, jestliže se odpor středního vodiče zvýší zhruba na 30-ti násobek původní činné složky středního vodiče při proudové nesymetrii 20%. Jestliže však proudová nesymetrie zatížení vzroste na 50%, postačí ke vzniku obdobné situace již pouhý 8-mi násobek.

11.3 Činitel nesymetrie napájecího napětí

Jak je patrné z části 10.5, aby vznikla napěťová nesymetrie je nutné, aby byla síť zatížena dostatečně vysokým výkonem, díky čemuž bude impedancemi vedení procházet dostatečně vysoký proud. Tento proud bude způsobovat na vedení úbytek napětí, který se od napětí na začátku vedení odečítá. Čím větší bude tento úbytek, tím víc (velikostí a fázovým posunem) bude napětí na konci vedení ovlivněno tímto úbytkem. Činitel nesymetrie napětí tedy vyjadřuje míru odchýlení úhlu mezi fázory napětí od úhlu 120°. Ze simulace v části 10.5 této práce vyplývá, že čím vyšší bude proudová nesymetrie, tím menší odebíraný výkon postačí právě ke vzniku napěťové nesymetrie.

11.4 Úbytek napětí na středním vodiči

Střední vodič je propojení mezi uzlem zdroje a jednofázových zátěží připojených do třífázové sítě. Dle ČSN 33 2000-4-41 jsou dovolené meze dotykových napětí pro prostředí normální a nebezpečné krátkodobě 50V a trvale 25V. Ze simulací vychází skutečnost, že ke zvýšení dotykového napětí nad povolenou mez by za normálních podmínek (u středního vodiče nejsou zhoršeny parametry) nedocházelo, avšak z měření v části 10.2 je patrné, že jakékoliv zhoršení parametrů středního vodiče může vést k nepříznivým situacím. Závažnost následků, plynoucích ze zvýšení impedance středního vodiče závisí především na nesymetričnosti zatížení sítě. Při simulaci sítě zatěžované zkratovými výkony byly pro tuto síť určeny mezní hodnoty vyrovnávacího proudu středním vodičem, pro maximální dotykové napětí 50V vyrovnávací proud středním vodičem nesmí přesáhnout 262A.

11.5 Přínos této práce

Předmětem této práce bylo nasimulovat různé provozní stavy třífázové sítě, která je nesymetricky zatížená, nebo se u ní zhoršují parametry středního vodiče. Celý model je sestaven na základě využití ideálního zdroje, který vzhledem ke svému stálému svorkovému napětí přinesl do výpočtů mnoho zjednodušení. Není uvažována přítomnost dalšího propojení středu vinutí transformátoru a zátěží prostřednictvím země (uzemnění uzlů v místech zdroje a odběru) Práce především poukazuje na souvislosti mezi různými faktory, které ovlivňují provozní stav sítě, na základě výstupů z matematického modelu demonstruje možná nebezpečí vyplývající z nevhodně provedených návrhů sítí, nebo nerozváženého připojování velkých zátěží nerovnoměrně na síť. Svými závěry ukazuje na možný vznik nebezpečí při provozování sítě.

12 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DRÁPELA, Jiří. *Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť*. Brno, 2001. 232 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] DRIESEN, Johan, CRAENENBROECK, Thierry. *Rušení napětí, úvod do nesymetrie*. Kvalita elektrické energie, dostupné z WWW:
http://www.medportal.cz/files/file/lpq_cz/5_1_3.pdf>.
- [3] BLAŽEK, Vladimír. *Distribuce elektrické energie*, VUT Brno, skripta
- [4] TOMAN, Petr. *Teorie souměrných složek*, VUT Brno, prezentace
- [5] ČSN 33 2000-4-41 ed.2. *Elektrické instalace nízkého napětí, část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti*. [s.l.] : Český normalizační institut, 2007. 48 s.
- [6] ČSN EN 61 000-3-3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3: Meze - oddíl 3: Omezování kolísání napětí a blikání v rozvodných sítích nízkého napětí pro zařízení se jmenovitým proudem $\leq 16A$* . [s.l.] : Český normalizační institut, 1997. 19 s.
- [7] ČSN EN 50 160 ed.2. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. [s.l.] : Český normalizační institut, 2008. 16 s.