

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Model nesymetrické zátěže**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladislavovi Sítařovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav ŠACH**  
Osobní číslo: **E10B0252P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Model nesymetrické zátěže**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište problematiku nesymetrické zátěže, její vliv na napájecí síť a vytvořte modely této zátěže v simulačním systému DYNAST.
2. Pro konkrétní případ jednoduchého venkovního vedení vypočtete jeho pasivní parametry a vytvořte model v simulačním systému DYNAST.
3. Proveďte názorné simulace pro zjišťování vlivu nesymetrického zatížení na napájecí vedení pro nesymetrii způsobenou velikostí a fázovým natočením odebíraných proudů.
4. Zpracujte simulačním výpočtem a graficky zobrazte problematiku ztrát elektrické energie pro nesymetrické zatížení v porovnání se symetrickým.
5. Zhodnoťte působení nesymetrické zátěže a popište možné varianty pro snížení vznikajících nepříznivých vlivů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Kersting W. H.: Distribution system modeling and analysis. Boca Raton, CRC Press, 2007.
2. Mayer D.: Elektrodynamika v energetice. BEN, Praha, 2005.
3. Hodinka M. a kol.: Přenos a rozvod elektrické energie. SNTL, Praha, 1989.
4. Schejbal K., Mertlová J.: Elektroenergetika II, 1. + 2. část. ZČU, Plzeň. 1998.
5. Mann H., Ševčenko M.: Snadné počítačové modelování dynamických soustav. ČVUT, Praha, 2008.

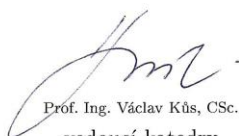
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladislav Sifař  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

V této práci je řešen problém nesymetrické zátěže. Nesymetrické zátěže a k nim napájecí vedení je navrženo v systému DYNAST. Pomocí simulací v systému DYNAST je zkoumáno, jak různé velikosti nesymetrických zátěží ovlivňují ztráty napájecí soustavy a napěťové a proudové poměry. Pro srovnání jsou provedeny simulace s vedením, které neuvažuje vzájemné parametry a poté s vedením, které vzájemné parametry uvažuje.

## **Klíčová slova**

Napájecí vedení, napětí, proud, ztráty, nesymetrická zátěž

## **Abstract**

In this thesis it is solved the problem of unbalanced load. Unbalanced load and their supply lines are modelled in the DYNAST system. Using simulation in DYNAST is examined, how different sizes of unbalanced loads affect the power system losses and voltage and current ratios. For comparison is performed simulation with power line, which does not consider the mutual parameters, and then with power line, which consider mutual parameters.

## **Key words**

Supply lines, voltage, current, power losses, unbalanced load

## OBSAH

SEZNAM ZKRATEK .....	3
ÚVOD.....	7
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	8
1.1 SYMETRICKÁ SOUSTAV .....	8
1.2 NESYMETRICKÁ SOUSTAVA.....	9
1.3 TYPY NESYMETRIE .....	10
1.4 VZNIK NESYMETRIE.....	10
1.4.1 Připojení zátěže.....	11
1.4.2 Poruchové stavy.....	11
1.5 DŮSLEDKY NESYMETRIE .....	11
1.5.1 Přenosová soustava.....	11
1.5.2 Indukční stroje .....	12
1.5.3 Synchronní generátory .....	12
1.5.4 Transformátory .....	13
1.6 MATEMATICKÝ ZÁPIS PRO VYČÍSLENÍ NESYMETRIE .....	13
1.6.1 Vlivy souměrných složek v elektrizační soustavě.....	14
2 VÝPOČET PARAMETRŮ VEDENÍ.....	16
2.1 VEDENÍ BEZ VZÁJEMNÝCH PARAMETRŮ .....	16
2.1.1 Odpor vedení .....	16
2.1.2 Indukčnost vedení .....	17
2.1.3 Kapacita vedení.....	18
2.1.4 Svod vedení.....	18
2.2 VEDENÍ SE VZÁJEMNÝMI PARAMETRY .....	19
2.2.1 Vzájemná indukčnost .....	19
2.2.2 Vzájemná kapacita .....	19
2.3 MODEL VEDENÍ V PROGRAMU DYNAST .....	21
2.3.1 Steinmetzův článek .....	21
3 SIMULACE NESYMETRICKÉHO ZATÍŽENÍ .....	23
3.1 VEDENÍ BEZ VZÁJEMNÝCH PARAMETRŮ .....	23
3.1.1 R – L zátěž zapojená do hvězdy.....	23
3.1.2 Zátěž s proudovým zdrojem .....	26
3.1.3 Kontrolní výpočet ztrát.....	26
3.2 VEDENÍ SE VZÁJEMNÝMI PARAMETRY .....	27
3.2.1 R – L zátěž zapojená do hvězdy,.....	28
3.2.2 Zátěž s proudovým zdrojem .....	30
3.3 POROVNÁNÍ ZTRÁT NA VEDENÍ.....	30
3.3.1 Změna odporu fáze U .....	31
3.3.2 Změna indukčnosti fáze U .....	32
3.3.3 Zachování velikosti impedance zátěže při změnách odporu a indukčnosti .....	32
3.3.4 Zátěž s proudovým zdrojem .....	33
4 OMEZENÍ VLIVŮ NESYMETRICKÉ ZÁTĚŽE .....	34
4.1 SCOTTŮV TRANSFORMÁTOR .....	34
4.2 SYMETRIZAČNÍ STEINMETZŮV OBVOD.....	35
4.2.1 Odvození symetrizačního (Steinmetzova) obvodu .....	35
4.3 ELEKTRONICKÉ OMEZENÍ NESYMETRIE.....	37
4.3.1 Statický kondenzátor.....	37



---

4.3.2 UPFC .....	38
ZÁVĚR .....	39
SEZNAM LITERATURY .....	41
SEZNAM PŘÍLOH .....	43
PŘÍLOHY .....	44

## SEZNAM ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
$u_u(t)$	Okamžitá hodnota napětí fáze U	V
$u_v(t)$	Okamžitá hodnota napětí fáze V	V
$u_w(t)$	Okamžitá hodnota napětí fáze W	V
$\mathbf{U}_u$	Fázor napětí fáze U	V
$\mathbf{U}_v$	Fázor napětí fáze V	V
$\mathbf{U}_w$	Fázor napětí fáze W	V
$a^2$	Operátor natočení	-
$a$	Operátor natočení	-
$\rho$	Činitel nesymetrie	-
$\eta$	Činitel nevyváženosti	-
$S$	Průřez	$\text{mm}^2$
$U_n$	Jmenovité napětí	kV
$R$	Odpor	$\Omega$
$R_k$	Odpor na kilometr	$\Omega/\text{km}$
$L$	Indukčnost	mH
$L_k$	Indukčnost na kilometr	mH/km
$C_p$	Kapacita	nF
$C_{pk}$	Kapacita na kilometr	nF/km
$l$	Délka	km
$r$	Poloměr	mm
$r_{Al}$	Poloměr hliníkové části AlFe lana	mm
$r_{Fe}$	Poloměr železné části AlFe lana	mm
$R_{ss}$	Stejnoseměrný odpor	$\Omega$

$R_{ssAl}$	Stejnoseměrný odpor hliníkové části AlFe lana	$\Omega$
$R_{ssFe}$	Stejnoseměrný odpor železné části AlFe lana	$\Omega$
$k$	Koeficient respektující skinefekt	-
$a_{UV}$	Vzdálenost mezi fází U a V	m
$a_{UW}$	Vzdálenost mezi fází U a W	m
$a_{VW}$	Vzdálenost mezi fází V a W	m
$a_s$	Střední vzdálenost mezi fázemi	m
$d$	Průměr	mm
$r_e$	Efektivní poloměr	mm
$h_U$	Závěsná výška vodiče fáze U nad zemí	m
$h_V$	Závěsná výška vodiče fáze V nad zemí	m
$h_W$	Závěsná výška vodiče fáze W nad zemí	m
$h_s$	Střední závěsná výška fází nad zemí	m
$L_{UVk}$	Vzájemná indukčnost mezi fází U a V na kilometr	mH/km
$L_{UWk}$	Vzájemná indukčnost mezi fází U a W na kilometr	mH/km
$L_{VWk}$	Vzájemná indukčnost mezi fází V a W na kilometr	mH/km
$L_{UV}$	Vzájemná indukčnost mezi fází U a V	mH
$L_{UW}$	Vzájemná indukčnost mezi fází U a W	mH
$L_{VW}$	Vzájemná indukčnost mezi fází V a W	mH
$\rho_z$	Měrný odpor půdy	$\Omega m$
$C_{UVk}$	Vzájemná kapacita mezi fází U a V na kilometr	nF/km
$C_{UWk}$	Vzájemná kapacita mezi fází U a W na kilometr	nF/km
$C_{VWk}$	Vzájemná kapacita mezi fází V a W na kilometr	nF/km
$C_{UV}$	Vzájemná kapacita mezi fází U a V	nF
$C_{UW}$	Vzájemná kapacita mezi fází U a W	nF

$C_{VW}$	Vzájemná kapacita mezi fází V a W	nF
$\delta_{UV}$	Potenciálový součinitel fáze U a V	km/ $\mu$ F
$\delta_{UW}$	Potenciálový součinitel fáze U a W	km/ $\mu$ F
$\delta_{VW}$	Potenciálový součinitel fáze V a W	km/ $\mu$ F
$\delta_{UU}$	Vlastní potenciálový součinitel fáze U	km/ $\mu$ F
$\delta_{VV}$	Vlastní potenciálový součinitel fáze V	km/ $\mu$ F
$\delta_{WW}$	Vlastní potenciálový součinitel fáze W	km/ $\mu$ F
D	Determinant	-
$Z_k$	Impedance na kilometr	$\Omega$ /km
Z	Impedance	$\Omega$
$Y_k$	Admitance na kilometr	S/km
Y	Admitance	S
$R_u$	Odpor zátěže fáze U	$\Omega$
$R_v$	Odpor zátěže fáze V	$\Omega$
$R_w$	Odpor zátěže fáze W	$\Omega$
$L_u$	Indukčnost zátěže fáze U	H
$L_v$	Indukčnost zátěže fáze V	H
$L_w$	indukčnost zátěže fáze W	H
$U_U$	Napětí fáze U	V
$U_V$	Napětí fáze V	V
$U_W$	Napětí fáze W	V
$I_U$	Proud fáze U	A
$I_V$	Proud fáze V	A
$I_W$	Proud fáze W	A
$P_U$	Ztráty ve fázi U	kW

---

$P_V$	Ztráty ve fázi V	kW
$P_W$	Ztráty ve fázi W	kW
$P$	Ztráty na vedení	kW
$\phi_{Uu}$	Fázový posuv napětí ve fázi U	°
$\phi_{Uv}$	Fázový posuv napětí ve fázi V	°
$\phi_{Uw}$	Fázový posuv napětí ve fázi W	°
$\phi_{Iu}$	Fázový posuv proudu ve fázi U	°
$\phi_{Iv}$	Fázový posuv proudu ve fázi V	°
$\phi_{Iw}$	Fázový posuv proudu ve fázi W	°
$\phi_{izd}$	fázový posuv proudového zdroje	°
$f$	frekvence	Hz

## Úvod

Cílem práce je navrhnout a namodelovat několik nesymetrických třífázových zátěží v systému DYNAST. K zátěžím navrhnout jednoduché vedení a simulacemi zjistit, jak různé nesymetrické zátěže ovlivňují vedení, z kterého jsou napájeny. Zejména jak různé velikosti nesymetrických zátěží ovlivňují ztráty na vedení. Pro srovnání budou provedeny simulace s vedením, které neuvažuje vzájemné parametry a poté s vedením, které vzájemné parametry uvažuje. Výsledky budou zpracovány formou tabulek a grafů.

Nesymetrické zátěže a s nimi ruku v ruce jdoucí nesymetrické napětí a proudy jsou závažným problémem kvality elektrické energie. Ovlivňují poměry na vedení, ztráty na vedení a také jsou negativně ovlivňovány další zařízení, které jsou k nesymetrickému vedení připojeny. V této práci se budu snažit tyto jevy ověřit pomocí simulací v systému DYNAST.

## 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

### 1.1 SYMETRICKÁ SOUSTAV

Třífázová soustava je nazývána symetrickou, pokud třífázové napětí a proudy mají stejnou amplitudu a jsou navzájem fázově posunuty o  $120^\circ$  (Obr. 1.1). V symetrické soustavě je součet všech proudů v daném okamžiku roven nule.[1]

Pro okamžité hodnoty:

$$u_U(t) = \sqrt{2}U_U \sin \omega t [V] \quad (1.1 a)$$

$$u_V(t) = \sqrt{2}U_V \sin(\omega t - 120^\circ)[V] \quad (1.1 b)$$

$$u_W(t) = \sqrt{2}U_W \sin(\omega t + 120^\circ)[V] \quad (1.1 c)$$

$$U_U = U_V = U_W \quad (1.1 d)$$

Pro fázory:

$$\mathbf{U}_U = U [V] \quad (1.2 a)$$

$$\mathbf{U}_V = aU [V] \quad (1.2 b)$$

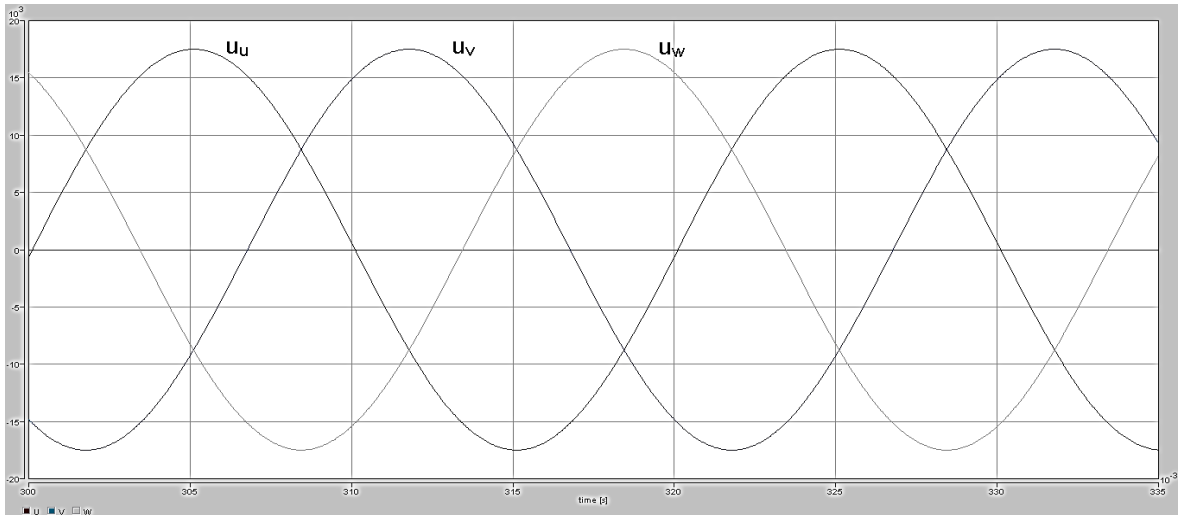
$$\mathbf{U}_W = a^2U [V] \quad (1.2 c)$$

Kde  $a$  je operátor natočení, platí:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.3 a)$$

$$a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.3 b)$$

$$1 + a^2 + a = 0 \quad (1.3 c)$$



Obr. 1.1: Třífázová soustava

Třífázová soustava se nazývá vyvážená, pokud platí:

$$u_U(t) + u_V(t) + u_W(t) = 0 \quad (1.4)$$

Pro fázory:

$$\mathbf{U}_U + \mathbf{U}_V + \mathbf{U}_W = 0 \quad (1.5)$$

Soustavy, pro které tyto rovnice neplatí, se nazývají nevyvážené. Pokud je soustava symetrická, znamená to, že je i vyvážená. Pokud je soustava vyvážená, nemusí být nutně symetrická.[2]

## 1.2 NESYMETRICKÁ SOUSTAVA

Pokud není splněna alespoň jedna z podmínek symetrické soustavy (stejná amplituda a vzájemný fázový posuv  $120^\circ$ ) je soustava nazývána nesymetrickou. V nesymetrické soustavě nulovým vodičem protéká proud. Pokud nulový vodič není připojen nebo je přerušen, dochází k přepětí nebo podpětí v jednotlivých fázích soustavy (Obr. 1.2). [1]

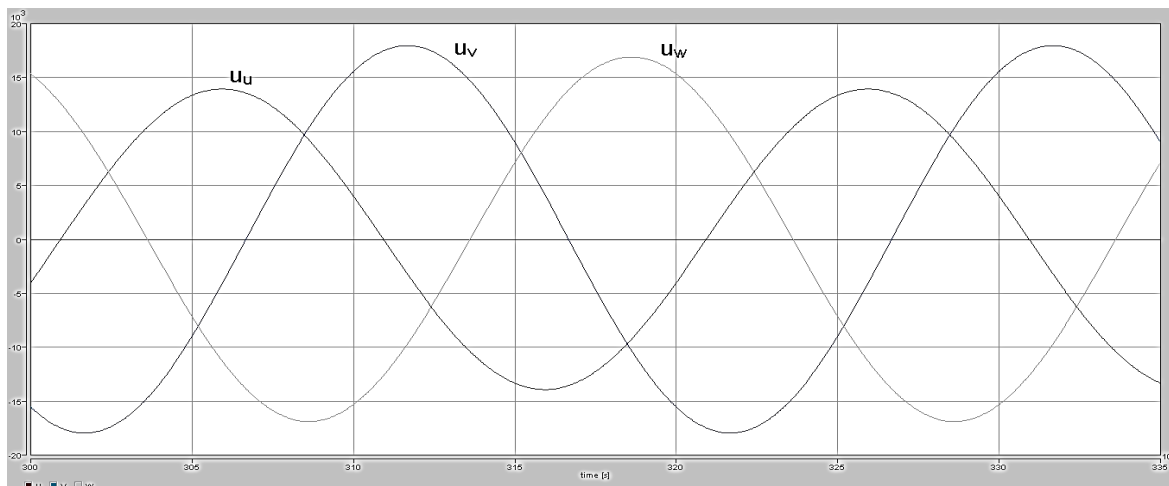
$$u_U(t) = \sqrt{2}U_U \sin(\omega t + \varphi_u) [V] \quad (1.6 a)$$

$$u_V(t) = \sqrt{2}U_V \sin(\omega t + \varphi_v) [V] \quad (1.6 b)$$

$$u_W(t) = \sqrt{2}U_W \sin(\omega t + \varphi_w) [V] \quad (1.6 c)$$

$$u_U(t) + u_V(t) + u_W(t) \neq 0 \quad (1.6 d)$$





Obr. 1.2: Nesymetrická soustava

### 1.3 TYPY NESYMETRIE

Jak je uvedeno v [3], existuje více typů nesymetrie. Některé jsou uvedeny v Příloze 1. Níže je popis jednotlivých nesymetrií.

T1 – podpětí v jedné fázi

T2 – podpětí ve dvou fázích

T3 – podpětí ve všech třech fázích

T4 – přepětí v jedné fázi

T5 – přepětí ve dvou fázích

T6 – přepětí ve všech třech fázích

T7 – jiné fázové posunutí jedné fáze než je  $120^\circ$

T8 – jiné fázové posunutí dvou fází

### 1.4 VZNIK NESYMETRIE

Napětí pocházející ze synchronních a asynchronních generátorů jsou z principu jejich činnosti symetrická. Z tohoto důvodu elektrárny (používající k výrobě elektrické energie turbogenerátory, hydrogenerátory a asynchronní generátory) nepřispívají k nesymetrii.

Situace je jiná u odběratelů. Třífázové rozvody dodávají energii velkému množství zákazníků, mezi nimi je většina, kteří mají jednofázové nebo dvoufázové odběry. Provoz

těchto odběrů vnáší do distribuční sítě značnou nevyváženost. Nerovnoměrné zatížení jednotlivých fází dává za vznik nesymetrickým proudům, které vyvolají nesymetrická napětí v jednotlivých fázích [4].

#### **1.4.1 PŘIPOJENÍ ZÁTĚŽE**

Na úrovni vysokého a velmi vysokého napětí jsou zátěže většinou třífázové symetrické, ale například střídavá vlaková trakce nebo obloukové pece jsou zátěže nesymetrické. Nízkonapěťové zátěže jsou převážně jednofázové, proto je těžké zajistit symetrii mezi fázemi. U sítí, které napájí takové zátěže, jsou odběry rozděleny do jednotlivých fází trojfázového systému (například jedna fáze na jedno patro domu).[4]

#### **1.4.2 PORUCHOVÉ STAVY**

Dalším faktorem, který způsobuje nesymetrii systému, jsou neobvyklé stavy. Takové stavy jsou například zkrat mezi fází a zemí, mezi fázemi, přerušení vodiče anebo zemní spojení (u sítí provozovaných s izolovaným nebo neúčinně uzemněným uzlem) [4]. Při těchto poruchách reagují ochrany a síť vypnou, jen u zemního spojení je možno síť dále provozovat do vyhledání poruchy. Při dokonalém zemním spojení klesne napětí postižené fáze na nulu a napětí uzlu transformátoru stoupne na hodnotu záporného napětí postižené fáze. To znamená, že při zemním spojení stoupne napětí nepostižených fází proti zemi na sdruženou hodnotu.

### **1.5 DŮSLEDKY NESYMETRIE**

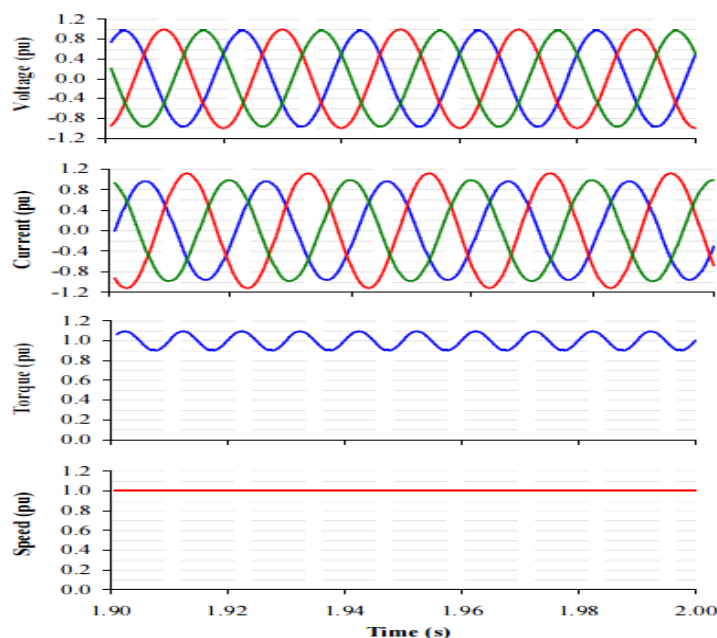
Důsledky a ovlivnění funkce zařízení při napájení nesymetrickým průběhem proudu a napětí se u každého zařízení může lišit. Níže jsou popsány hlavní problémy daných zařízení.

#### **1.5.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA**

Při nesymetrii netečou ve fázích stejné proudy, toto může vést až k nevyužití přenosové kapacity vedení, protože jedna fáze může dosahovat teplotního limitu, zatímco v ostatních dvou fázích může protékat nižší proud. Z tohoto důvodu bude i přenesený výkon nižší. Dále nesymetrie má vliv na kvalitu dodávané energie. Dochází v některých fázích k přepětí nebo podpětí. [6]

### 1.5.2 INDUKČNÍ STROJE

Přivedení nesymetrického napětí do asynchronního motoru s kotvou nakrátko má za následek vytvoření zpětného napětí. Zpětné napětí vytvoří ve vzduchové mezeře tok, který se otáčí opačným směrem, než je směr otáčení motoru. To má za následek vznik proudů ve vinutí [7]. Tyto proudy způsobují oteplení a tím pádem zkracují životnost motoru. Obr. 1.3 ukazuje časový vývoj sdružených napětí, proudů momentu a rychlosti při práci motoru pod nesymetrickým napětím (v tomto případě se jedná o 2% podpětí v jedné fázi). Je vidět, jak je moment motoru zvlněn [3]. Moment asynchronního motoru při napájení nesymetrickým napětím bude snížen. V případě velké nesymetrie by moment stroje nemusel stačit pro dané použití. Navíc dochází k vibracím stroje, což způsobuje rychlejší opotřebení mechanických částí např. ložisek [7].



Obr. 1.3: Časový vývoj napětí mezi fázemi, proudů, momentu a rychlosti, je-li je indukční motor napájen nesymetrickým napětím. Převzato z [3]

### 1.5.3 SYNCHRONNÍ GENERÁTORY

Při nesymetrickém zatížení existují ve vinutí statoru kromě proudů sousledných i proudy zpětné složkové soustavy. Tyto proudy zpětné soustavy způsobí vznik magnetického pole, které se otáčí stejnou rychlostí ale v opačném smyslu než magnetické pole rotoru. To znamená, že se vůči rotoru točí dvojnásobnou úhlovou rychlostí. Vzniklé magnetické pole indukuje v rotoru stroje proudy, které mají dvojnásobný kmitočet než má elektrizační soustava.

Vznik zpětného magnetického pole a indukce proudů, které mají dvojnásobný kmitočet, má nepříznivé účinky na synchronní generátor. Mezi ně patří především brzdový točivý moment, vibrace, zvýšený hluk a nadměrné oteplování. Z uvedených nepříznivých účinků se nejvíce projevuje nadměrné oteplování stroje, zejména rotoru [8].

#### 1.5.4 TRANSFORMÁTORY

Třífázové transformátory jsou netočivé elektrické stroje, proto se budou chovat stejně pro souslednou i zpětnou složku. Pro netočivou složku se budou chovat jinak, bude záležet na typu spojení a na konstrukci magnetického obvodu – plášťový, jádrový typ.

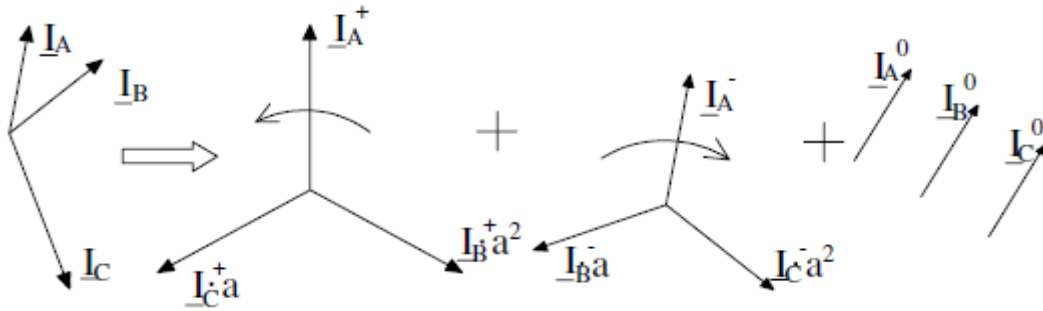
Vzniká tzv. jednosměrná magnetizace, je to situace, kdy máme ve všech sloupcích transformátoru stejná magnetická napětí. Tyto napětí vybudí magnetický tok, který se musí uzavírat mimo vlastní magnetický obvod. Uzavírá se nádobou transformátoru a stahovací konstrukcí, kde způsobuje ztráty, které jsou nebezpečné hlavně kvůli místním přehřátím. Tento problém se týká jádrových typů transformátorů. U plášťových transformátorů se tento tok uzavře pláštěm. [9]

Nesymetrie způsobuje větší ztráty v transformátorech, z důvodu změny šířky hysterezní smyčky. Ztráty v železe jsou úměrné právě šířce hysterezní smyčky, proto dojde k jejich zvýšení. [6]

#### 1.6 MATAMEMATICKÝ ZÁPIS PRO VYČÍSLENÍ NESYMETRIE

Pro vyčíslení nesymetrie napětí nebo proudu se používá tzv. Stokvis-Fortescue teorém. Každý nesymetrický třífázový systém může být rozložen na tři symetrické systémy, sousledný, zpětný a nulový (Obr. 1.4). Sousledný systém má fázory posunuté o  $120^\circ$  proti směru hodinových ručiček. Fázory zpětného systému jsou posunuty o  $120^\circ$  po směru hodinových ručiček. V případě nulového systému není žádná rotace mezi fázory. Převod fázových veličin nesouměrné soustavy na souměrné složky a naopak se provádí následovně [5]:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}^+ \\ \underline{I}^- \\ \underline{I}^0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \underline{I}^+ \\ \underline{I}^- \\ \underline{I}^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{pmatrix}$$



Obr. 1.4: Rozklad třífázového nesymetrického systému na symetrické složky. Převzato z [5]

Kde  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  jsou fázové proudy.  $I^+$ ,  $I^-$ ,  $I^0$  jsou sousledné, zpětné a netočivé symetrické systémy. Tyto vztahy platí i pro napětí.

Tyto symetrické systémy nejsou jen teoretické, ale mají reálný význam. Sousledná složka je vytvářena synchronními a asynchronními generátory, zatímco zpětná a nulová složka se objeví v místě nesymetrie. Každá z nich může být samostatně měřena.

### 1.6.1 VLIVY SOUMĚRNÝCH SLOŽEK V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ

Zpětná složka proudů může způsobovat přehřívání rotorů synchronních generátorů, zvlnění u usměrňovačů nebo vznik brzdného momentu u motorů.

Nulová složka proudů způsobuje nadměrné ztráty v neutrálních vodičích. Dále způsobuje tzv. jednosměrnou magnetizaci jádra transformátoru, při níž se magnetický tok uzavírá přes nádobu transformátoru a způsobuje v ní ztráty vířivými proudy a její oteplení. V nesymetrických elektrických systémech ztráty rostou a přenosová kapacita klesá. [5]

Pro posouzení stupně nesymetrie třífázové soustavy se zavádí činitel nesymetrie. Je definován jako poměr zpětné složky k sousledné složce.

$$\rho = \frac{I^-}{I^+} \quad (1.7)$$

Pro symetrickou soustavu  $\rho = 0$ .

Pro posouzení stupně nevyváženosti se zavádí činitel nevyváženosti. Je definován jako poměr nulové složky k sousledné složce.

$$\eta = \frac{I^0}{I^+} \quad (1.8)$$

U vyvážené soustavy je  $\eta = 0$ .

Při normálním chodu přenosové soustavy je požadováno, aby hodnota těchto činitelů nepřekročila několik procent [2].

## 2 VÝPOČET PARAMETRŮ VEDENÍ

### 2.1 VEDENÍ BEZ VZÁJEMNÝCH PARAMETRŮ

Uvažuji vedení o napětí 22 kV a délce 10 km. Vodiče jsou 120 mm<sup>2</sup> AlFe 6. Zvolil jsem příhradový stožár 22 kV, jak je uvedeno na straně 12 v [13]. Pro zjednodušení uvažuji, že vodiče jsou od sebe stejně vzdáleny, a že mají stejnou vzdálenost od země. Vedení je dokonale transponováno, proto neuvažuji vliv vzájemné indukčnosti. Dále také neuvažuji vzájemné kapacity mezi vodiči.

S [mm <sup>2</sup> ]	U <sub>n</sub> [kV]	R při 20°C [Ω]	L <sub>c</sub> [mH]	C <sub>p</sub> [nF]	l [km]
120	22	2,3	11,8	98	10

Tabulka 2.1: Vypočtené a volené parametry vedení

#### 2.1.1 ODPOR VEDENÍ

Hodnoty pro výpočet odporu jsem čerpal z [12].

Matematický průřez lana: 143,48 mm<sup>2</sup>

Průřez duše Fe: 20,91 mm<sup>2</sup>

Průřez pláště Al: 122,57 mm<sup>2</sup>

Poloměr železné části lana:

$$r_{Fe} = \sqrt{\frac{S_{Fe}}{\pi}} = \sqrt{\frac{20,91}{\pi}} = 2,5799 \text{ mm} \quad (2.1)$$

Poloměr hliníkové části lana:

$$r_{Al} = \sqrt{\frac{S_{Al}}{\pi}} = \sqrt{\frac{122,57}{\pi}} = 6,246 \text{ mm} \quad (2.2)$$

Stejnoseměrný odpor železné a hliníkové části lana:

$$R_{SS} = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega] \quad (2.3)$$

$$R_{Fess} = 0,130 \cdot \frac{1000}{20,91} = 6,21 \Omega/km$$

$$R_{Alss} = 0,02941 \cdot \frac{1000}{122,57} = 0,239 \Omega/km$$

Odpory hliníku a železa jsou k sobě paralelně, proto celkový stejnosměrný odpor lana je dán:

$$R = \frac{R_{Fess} \cdot R_{Alss}}{R_{Fess} + R_{Alss}} = \frac{6,21 \cdot 0,239}{6,21 + 0,239} = 0,230143 \Omega \quad (2.4)$$

Dle [14] je celkový odpor lana na kilometr při uvažování skinefektu:

$$R_k = R \cdot k [\Omega/km] \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} k &= 1 + 0,375 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{(r_{Al} - r_{Fe})f}{r_{Al}R} \right]^2 = \\ &= 1 + 0,375 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{(6,246 - 2,5799)50}{6,246 \cdot 0,230143} \right]^2 = \\ &= 1,000000006098 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dosazením rovnice 2.4 a 2.6 do rovnice 2.5 získáme odpor vedení na jeden kilometr délky, při uvažování skinefektu.

$$R_k = 0,230143 \cdot 1,000000006098 = 0,230 \Omega/km$$

### 2.1.2 INDUKČNOST VEDENÍ

Výpočet střední vzdálenosti:

$$a_{UV} = \sqrt{1,1^2 + 2^2} = 2,3 \text{ m} \quad (2.7 \text{ a})$$

$$a_{UW} = \sqrt{2,2^2 + 0,3^2} = 2,2 \text{ m} \quad (2.7 \text{ b})$$

$$a_{VW} = \sqrt{1,1^2 + 2,3^2} = 2,5 \text{ m} \quad (2.7 \text{ c})$$

$$a_s = \sqrt[3]{a_{UV} \cdot a_{UW} \cdot a_{VW}} [\text{m}] \quad (2.8)$$

$$a_s = \sqrt[3]{2,3 \cdot 2,2 \cdot 2,5} = 2,3 \text{ m}$$

Poloměr vodiče:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{15,65}{2} = 7,825 \text{ mm} \quad (2.9)$$

( $d$  voleno z [12])

Výpočet efektivního poloměru:

$$r_e = k \cdot r = 0,809 \cdot 7,825 = 6,33 \text{ mm} \quad (2.10)$$



(Konstanta  $k$  volena z tabulky [12])

$$L_{ck} = 0,46 \cdot \log \frac{a_s}{r_e} [mH/km] \quad (2.11)$$

Dosažením rovnic 2.8 a 2.10 do rovnice 2.11 získáme indukčnost vedení na jeden kilometr délky.

$$L_{ck} = 0,46 \cdot \log \frac{2300}{6,33} = 1,18 mH/km$$

### 2.1.3 KAPACITA VEDENÍ

Výpočet střední závěsné výšky:

$$h_s = \sqrt[3]{h_U \cdot h_V \cdot h_W} [m] \quad (2.12)$$

$$h_s = \sqrt[3]{10,69 \cdot 11,79 \cdot 12,89} = 11,76 m$$

S respektováním vlivu země je provozní kapacita podle [12]:

$$C_{pk} = \frac{0,0242}{\log \left( \frac{2 \cdot h_s}{r} \cdot \frac{a_s}{\sqrt{4 \cdot h_s + a_s}} \right)} [nF/km] \quad (2.13)$$

Dosažením rovnic 2.8 a 2.12 do rovnice 2.13, získáme kapacitu vedení na jeden kilometr délky.

$$C_{pk} = \frac{0,0242}{\log \left( \frac{2 \cdot 11,76}{0,007825} \cdot \frac{2,3}{\sqrt{4 \cdot 11,76 + 2,3}} \right)} = 9,8 nF/km$$

### 2.1.4 SVOD VEDENÍ

Svod (činná složka příčné admitance) se často zanedbává kvůli své velikosti a také proto, že má velké rozmezí hodnot, ve kterých se může za provozu pohybovat. Při přesných výpočtech se samozřejmě uvažuje, ale pak je nutné provést výpočet s možnými krajními hodnotami svodu kvůli posouzení, jak moc jsou výsledné hodnoty jeho velikostí omezeny [12]. Z tohoto důvodu jsem svod také zanedbal.

## 2.2 VEDENÍ SE VZÁJEMNÝMI PARAMETRY

V této kapitole jsou vypočítány vzájemné parametry mezi vodiči a to vzájemná indukčnost a vzájemná kapacita. Odpor, indukčnost a kapacitu vedení uvažují stejnou jako v předešlé kapitole. Svod zanedbávám.

S [mm <sup>2</sup> ]	U <sub>n</sub> [kV]	R při 20°C [Ω]	L [mH]	C <sub>p</sub> [nF]	l [km]
120	22	2,3	11,8	98	10
L <sub>UV</sub> [mH]	L <sub>UW</sub> [mH]	L <sub>VW</sub> [mH]	C <sub>UV</sub> [nF]	C <sub>UW</sub> [nF]	C <sub>VW</sub> [nF]
1,09	1,1	1,08	1,7774	1,8735	1,7334

Tabulka 2.2: Vypočtené a volené parametry vedení

### 2.2.1 VZÁJEMNÁ INDUKČNOST

Vzájemnou indukčnost jsem vypočetl podle [12]:

$$L_{UVk} = 0,46 \log \frac{0,795 \cdot 100 \sqrt{\rho_z}}{a_{UV}} \quad (2.14 \text{ a})$$

$$L_{UWk} = 0,46 \log \frac{0,795 \cdot 100 \sqrt{\rho_z}}{a_{UW}} \quad (2.14 \text{ b})$$

$$L_{VWk} = 0,46 \log \frac{0,795 \cdot 100 \sqrt{\rho_z}}{a_{VW}} \quad (2.14 \text{ c})$$

$$L_{UVk} = 0,46 \log \frac{79,5 \sqrt{50}}{2,3} = 1,09 \text{ mH/km}$$

$$L_{UWk} = 0,46 \log \frac{79,5 \sqrt{50}}{2,2} = 1,1 \text{ mH/km}$$

$$L_{VWk} = 0,46 \log \frac{79,5 \sqrt{50}}{2,5} = 1,08 \text{ mH/km}$$

### 2.2.2 VZÁJEMNÁ KAPACITA

Vzájemnou kapacitu jsem vypočetl podle [10]

Výpočet potenciálových součinitelů:

$$\delta_{UU} = \frac{\log \frac{2h_U}{r}}{0,0242} [\text{km}/\mu\text{F}] \quad (2.15 \text{ a})$$

$$\delta_{VV} = \frac{\log \frac{2h_V}{r}}{0,0242} [km/\mu F] \quad (2.15 b)$$

$$\delta_{WW} = \frac{\log \frac{2h_W}{r}}{0,0242} [km/\mu F] \quad (2.15 c)$$

$$\delta_{UV} = \frac{\log \frac{\sqrt{4h_U h_V + a_{UV}^2}}{a_{UV}}}{0,0242} [km/\mu F] \quad (2.15 d)$$

$$\delta_{UW} = \frac{\log \frac{\sqrt{4h_U h_W + a_{UW}^2}}{a_{UW}}}{0,0242} [km/\mu F] \quad (2.15 e)$$

$$\delta_{VW} = \frac{\log \frac{\sqrt{4h_V h_W + a_{VW}^2}}{a_{VW}}}{0,0242} [km/\mu F] \quad (2.15 f)$$

$$\delta_{UU} = \frac{\log \frac{2 \cdot 10,69}{0,007825}}{0,0242} = 142,0051 \text{ km}/\mu F$$

$$\delta_{VV} = \frac{\log \frac{2 \cdot 11,79}{0,007825}}{0,0242} = 143,763 \text{ km}/\mu F$$

$$\delta_{WW} = \frac{\log \frac{2 \cdot 12,89}{0,007825}}{0,0242} = 145,36 \text{ km}/\mu F$$

$$\delta_{UV} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot 10,69 \cdot 11,79 + 2,3^2}}{2,3}}{0,0242} = 40,984 \text{ km}/\mu F$$

$$\delta_{UW} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot 10,69 \cdot 12,89 + 2,2^2}}{2,2}}{0,0242} = 42,567 \text{ km}/\mu F$$

$$\delta_{VW} = \frac{\log \frac{\sqrt{4 \cdot 11,79 \cdot 12,89 + 2,5^2}}{2,5}}{0,0242} = 41,1651 \text{ km}/\mu F$$

Výpočet determinantu, viz matice v [10]:

$$D^{-1} = \delta_{UU}\delta_{VV}\delta_{WW} + 2\delta_{UV}\delta_{UW}\delta_{VW} - \delta_{UV}^2\delta_{VV} - \delta_{UV}^2\delta_{UU} - \delta_{UV}^2\delta_{WW} [-] \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned}
D^{-1} &= 142,0051 \cdot 143,763 \cdot 145,36 + 2 \cdot 40,984 \cdot \\
&\quad \cdot 42,567 \cdot 41,1651 - 42,567^2 \cdot 143,763 - \\
&\quad - 41,1651^2 \cdot 142,0051 - 40,984^2 \cdot 145,36 = \\
&= 4,227 \cdot 10^{-7}
\end{aligned}$$

Vzájemné kapacity na kilometr délky:

$$C_{UVk} = D^{-1} (\delta_{UV} \delta_{WW} - \delta_{UW} \delta_{VW}) [\mu F / km] \quad (2.17 a)$$

$$C_{UWk} = D^{-1} (\delta_{UW} \delta_{VV} - \delta_{UV} \delta_{VW}) [\mu F / km] \quad (2.17 b)$$

$$C_{VWk} = D^{-1} (\delta_{UU} \delta_{VW} - \delta_{UV} \delta_{UW}) [\mu F / km] \quad (2.17 c)$$

$$\begin{aligned}
C_{UVk} &= 4,227 \cdot 10^{-7} (40,984 \cdot 145,36 - 42,57 \cdot \\
&\quad \cdot 41,165) = 1,7774 \text{ nF} / km
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{UWk} &= 4,227 \cdot 10^{-7} (42,567 \cdot 143,76 - 40,984 \cdot \\
&\quad \cdot 41,165) = 1,8735 \text{ nF} / km
\end{aligned}$$

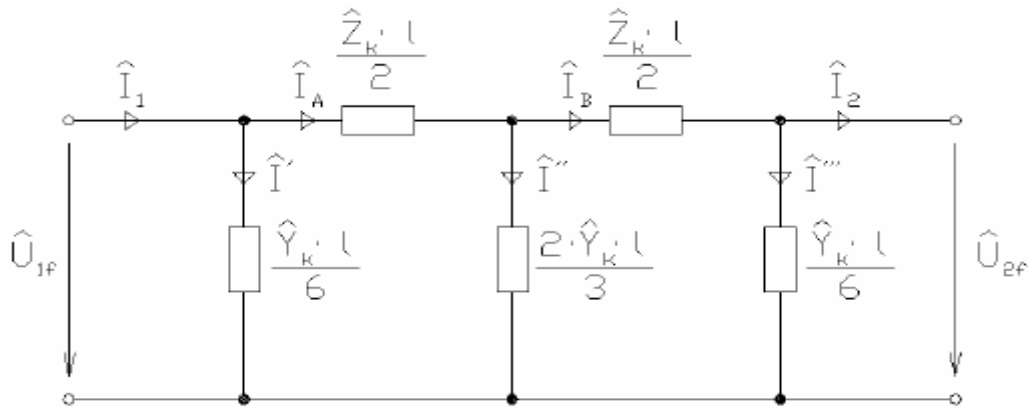
$$\begin{aligned}
C_{VWk} &= 4,227 \cdot 10^{-7} (142,01 \cdot 41,165 - 40,984 \cdot \\
&\quad \cdot 42,567) = 1,7334 \text{ nF} / km
\end{aligned}$$

## 2.3 MODEL VEDENÍ V PROGRAMU DYNAST

Pro zjednodušené vedení i pro vedení, které respektuje vzájemné parametry a vzdálenost každé fáze od země i mezi fázemi jsem v programu DYNAST sestavil model. Model je sestaven jako Steinmetzův článek.

### 2.3.1 STEINMETZŮV ČLÁNEK

Jedná se o spojení článků  $\Pi$  a  $T$ . Samotná náhrada vedení  $\Pi$  nebo  $T$  článkem jsou dva krajní případy téhož fyzikálního stavu, jejich spojením se tedy nejvíce přiblížíme fyzikální skutečnosti. Takže Steinmetzův článek dává přesnější výsledky než  $\Pi$  článek nebo  $T$  článek a lze ho použít i pro větší délky vedení [10].



Obr. 2.1: Steinmetzův článek. Převzato z [18]

Pro vedení bez vzájemných parametrů:

Impedance na kilometr:

$$\mathbf{Z}_k = R_k + jX_{Lk} = R_k + j(2\pi 50 L_k) [\Omega] \quad (2.16)$$

$$\mathbf{Z}_k = 0,23 + j0,371 = 0,439e^{j57,8^\circ} \Omega$$

Celková impedance vedení:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_k \cdot l [\Omega] \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= 0,439e^{j57,8^\circ} \cdot 10 = 4,39e^{j57,8^\circ} = \\ &= 2,3 + j3,71\Omega \end{aligned}$$

Admittance na kilometr:

$$\mathbf{Y}_k = G + jX_C = G - j\frac{1}{2\pi 50 C_k} [S] \quad (2.18)$$

$$\mathbf{Y}_k = 0 - j324806 = -324806e^{-j90^\circ} S$$

Celková admittance vedení:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_k \cdot l [S] \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= -324806e^{-j90^\circ} \cdot 10 = -3248060e^{-j90^\circ} = \\ &= -j3248060S \end{aligned}$$

### 3 SIMULACE NESYMETRICKÉHO ZATÍŽENÍ

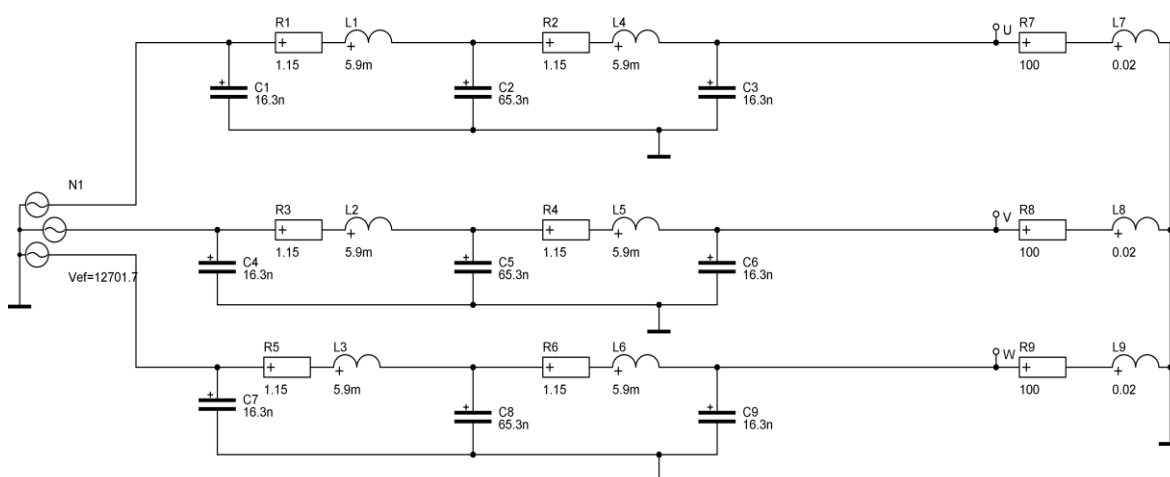
V simulačním systému DYNAST jsem provedl několik simulací pro různé typy a hodnoty zatížení vedení.

#### 3.1 VEDENÍ BEZ VZÁJEMNÝCH PARAMETRŮ

Uvažuji dokonale transponované vedení, kde se neprojeví vzájemná indukčnost, a proto neuvádím v tabulkách a grafech hodnoty napětí a proudů ostatních fází, jsou pořád stejné a to:

$U_V$ [V]	$\Phi_{UV}$ [°]	$I_V$ [A]	$\Phi_{IV}$ [°]	$P_V$ [kW]
12374,37	121,95	123,53	125,55	35,081
$U_W$ [V]	$\Phi_{UW}$ [°]	$I_W$ [A]	$\Phi_{IW}$ [°]	$P_W$ [kW]
12374,37	241,98	123,53	245,58	35,081

Tabulka 3.1: Přehled fázových hodnot a ztrát fázé V aW



Obr. 3.1: Vedení bez vzájemných parametrů

##### 3.1.1 R – L ZÁTĚŽ ZAPOJENÁ DO HVĚZDY

Zvolil jsem si zátěž zapojenou do hvězdy s uzemněným středem. Velikost zátěže jsem si zvolil  $R = 100 \Omega$  a  $L = 0,02$  H.

Impedance jedné větve zátěže:

$$Z = R + j\omega L [\Omega] \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} Z &= 100 + j6,283185\Omega = \\ &= 100,1971977 \cdot e^{j3,5953^\circ} \Omega \end{aligned}$$

Zátěž jsem vždy měnil v jedné fázi vedení a to ve fázi U. Nejdříve jsem nechal konstantní indukčnost a měnil jsem odpor zátěže a to po 20% až do  $\pm 80\%$ . Pro tyto hodnoty jsem odečetl efektivní hodnoty napětí a proudů, fázový posun napětí a proudů a ztráty na vedení. Zjištěné hodnoty jsou zpracovány formou tabulky.

$R_u[\Omega]$	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$U_u[V]$	10876,7	11819,2	12133,9	12285,9	12374,3	12430,9	12473,3	12501,6	12529,9
$\Phi_{Uu}[^\circ]$	6,64	4,36	3,13	2,43	1,99	1,66	1,46	1,27	1,14
$I_u[A]$	519,02	291,89	201,17	153,12	123,53	103,49	89,01	78,14	69,54
$\Phi_{Iu}[^\circ]$	24,12	13,28	9,11	6,92	5,58	4,68	4,02	3,52	3,14
$P[kW]$	689,28	266,10	163,20	124,07	105,24	94,78	88,38	84,19	81,29

Tabulka 3.2: Změna  $R_u$  po 20%,  $L_u = L_v = L_w = 0,02$  H,  $R_v = R_w = 100 \Omega$

Při změnách odporu ve fázi U dochází ke změnám velikosti fázového posuvu napětí a proudů. Čím menší je zapojen odpor, tím menší je fázové napětí, ale proud velmi vzroste. Zvýšený proud výrazně zvyšuje ztráty na vedení, viz Tabulka 3.2. Nejmenší ztráty na vedení jsou při zatížení největším odporem, protože proud protékající vedením je nejmenší. Fázový posuv napětí a proudu se mění v závislosti zastoupení velikosti odporu a indukčnosti v impedanci zátěže.

Velikost a fázový posuv impedance fáze U při nejvyšší hodnotě odporu, dle rovnice 3.1:

$$\mathbf{Z}_U = 180 + j6,283185\Omega = 180,1096289 \cdot e^{j1,9992^\circ} \Omega$$

Velikost a fázový posuv impedance fáze U při nejnižší hodnotě odporu, dle rovnice 3.1:

$$\mathbf{Z}_U = 20 + j6,283185\Omega = 20,9637405 \cdot e^{j17,44059^\circ} \Omega$$

V dalším kroku jsem nechal ve všech třech fázích stejný odpor a ve fázi U jsem měnil indukčnost a to znovu po 20% do  $\pm 80\%$ . Pro tyto hodnoty jsem odečetl efektivní hodnoty napětí a proudů, fázový posun napětí a proudů a ztráty na vedení. Zjištěné hodnoty jsou zpracovány formou tabulky.

$L_u$ [H]	0,004	0,008	0,012	0,016	0,02	0,024	0,028	0,032	0,036
$U_u$ [V]	12395,5	12388,5	12384,9	12381,4	12374,3	12367,3	12367,3	12360,2	12357,4
$\Phi_{Uu}$ [°]	2,05	2,04	2,03	2,00	1,99	1,95	1,95	1,92	1,90
$I_u$ [A]	123,96	123,89	123,74	123,67	123,53	123,39	123,04	123,04	122,79
$\Phi_{Iu}$ [°]	2,78	3,48	4,18	4,88	5,58	6,26	6,97	7,66	8,35
$P$ [kW]	105,50	105,46	105,40	105,33	105,24	105,18	105,06	104,95	104,83

Tabulka 3.3: Změna  $L_u$  po 20%,  $L_v = L_w = 0,02$  H,  $R_u = R_v = R_w = 100$   $\Omega$ 

V této simulaci jsem zjistil, že při změnách indukčnosti takovéto velikosti nenastává zásadnější změna parametrů kromě fázového posuvu proudu. Hodnota proudu zůstává téměř konstantní, proto i ztráty na vedení jsou téměř konstantní.

Velikost a fázový posuv impedance fáze U při nejvyšší hodnotě indukčnosti, dle rovnice 3.1:

$$\mathbf{Z}_U = 100 + j11,30973\Omega = 100,6375178 \cdot e^{j6,453^\circ} \Omega$$

Velikost a fázový posuv impedance fáze U při nejnižší hodnotě indukčnosti, dle rovnice 3.1:

$$\mathbf{Z}_U = 100 + j1,256637\Omega = 100,0079 \cdot e^{j0,72^\circ} \Omega$$

Dále jsem provedl simulace pro zátěž, které jsem současně měnil odpor i indukčnost v jedné fázi a to tak, že jsem zachoval modul impedance stejný. Pro tyto hodnoty jsem odečetl efektivní hodnoty napětí a proudů, fázový posun napětí a proudů a ztráty na vedení. Zjištěné hodnoty jsou zpracovány formou tabulky.

Zátěž ve fázi U	R=6,283185 $\Omega$ L=0,318309886 H	R=20 $\Omega$ L=0,3125194 H	R=60 $\Omega$ L=0,255432099 H	R=71,69015572 $\Omega$ L=0,22281692 H	R=80 $\Omega$ L=0,192030273 H
$U_u$ [V]	12229,41	12201,13	12169,31	12183,45	12200,42
$\Phi_{Uu}$ [°]	-1,16	-0,86	0,19	0,55	0,85
$I_u$ [A]	122,05	121,62	121,48	121,59	121,76
$\Phi_{Iu}$ [°]	85,24	77,63	53,40	44,87	37,86
$P$ [kW]	104,32	104,16	104,01	104,09	104,20

Tabulka 3.4: Změna  $L_u$  a  $R_u$  při zachování velikosti  $Z_u$ ,  $R_v = R_w = 100$ ,  $L_v = L_w = 0,02$  H

Při těchto změnách zátěže se nijak výrazně nezvyšují ztráty na vedení. Nedochází ani k větším změnám efektivních hodnot napětí a proudu. Z hodnot fázového posuvu proudu je vidět, jak extrémně se mění. Takové změny fázového posuvu znamenají velký problém například při napájení třífázových motorů.



### 3.1.2 ZÁTĚŽ S PROUDOVÝM ZDROJEM

Pro tyto simulace jsem navrhl zátěž, která obsahuje v jedné fázi proudový zdroj. Parametry proudového zdroje jsem navrhl podle [15]. Proudový zdroj je zapojen ve fázi U. Ve fázích V a W je zapojena sériově kombinace odporu a indukčnosti o parametrech  $R = 100 \Omega$ ,  $L = 0,02 \text{ H}$ . Fázový posun proudu dodávaný proudovým zdrojem jsem měnil od  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ . Respektoval jsem fázový posun proudu na vedení, který činí  $-3,59^\circ$ .

$\Phi_{i_{zdr}} [^\circ]$	-48,59	-43,59	-33,59	-23,59	-13,59	-3,59	6,41	16,41	26,41	36,41	41,41
$U_u [\text{V}]$	12166	12178	12208	12256	12317	12389	12473	12563	12657	12752	12799
$\Phi_{U_u} [^\circ]$	0,40	0,61	1,04	1,44	1,76	2,03	2,25	2,38	2,44	2,43	2,40
$P [\text{kW}]$	105,17	105,17	105,19	105,20	105,23	105,24	105,26	105,28	105,30	105,31	105,32

Tabulka 3.5: Zátěž s proudovým zdrojem

Při této simulaci se efektivní hodnoty napětí mění v rozmezí téměř kilovoltu a fázový posuv napětí v rozmezí dvou stupňů. Ztráty ve fázi U se téměř nemění, to je dáno tím, že efektivní hodnota proud ve fázi je pevně nastavena proudovým zdrojem.

### 3.1.3 KONTROLNÍ VÝPOČET ZTRÁT

Pro kontrolu, jestli systém DYNAST pracuje správně, jsem provedl výpočet ztrát teoreticky. Výpočet je proveden pro symetrickou zátěž a krajní hodnotu ( $R = 180 \Omega$  a  $L = 0,02 \text{ H}$ ) zátěže při změnách odporu fáze U, Tabulka 3.2. Pro zjednodušení nejsou při výpočtu uvažovány kapacity vedení.

Symetrická zátěž  $R = 100 \Omega$  a  $L = 0,02 \text{ H}$

Impedance zátěže dle rovnice 3.1:

$$\begin{aligned} Z_U &= 100 + j6,283185\Omega = \\ &= 100,1971977 \cdot e^{j3,5953^\circ} \Omega \end{aligned}$$

Podélná impedance vedení fáze U podle rovnic 2.16 a 2.17:

$$\begin{aligned} Z_{U\text{vedení}} &= 0,439e^{j57,8^\circ} \cdot 10 = 4,39e^{j57,8^\circ} \\ &= 2,3 + j3,71\Omega \end{aligned}$$

Celková impedance:

$$\begin{aligned} Z &= Z_U + Z_{Uvedení} = 100 + j6,283185 + 2,3 + j3,7 \\ &= 102,3 + j9,993185 = 102,787e^{j5,6^\circ} \end{aligned}$$

Velikost proudu, který teče fází U:

$$I_U = \frac{U_{Uzdroje}}{Z} = \frac{12702}{102,787} = 123,525 \text{ A} \quad (3.2)$$

Ztráty vedení:

$$P = 3RI_U^2 = 3 \cdot 2,3 \cdot 123,525^2 = 105,28 \text{ kW} \quad (3.3)$$

Zátěž  $R_U = 180 \Omega$ ,  $L_U = 0,02 \text{ H}$ , ostatní fáze  $R = 100 \Omega$ ,  $L = 0,02 \text{ H}$

Celková impedance podle rovnic 2.16, 2.17 a 3.1:

$$\begin{aligned} Z &= Z_U + Z_{Uvedení} = 180 + j6,283185 + 2,3 + j3,7 \\ &= 182,3 + j9,993185 = 182,61e^{j3,14^\circ} \end{aligned}$$

Velikost proudu, který teče fází U podle rovnice 3.2:

$$I_U = \frac{12702}{182,61} = 69,55 \text{ A}$$

Ztráty fáze U:

$$P_U = RI_U^2 = 2,3 \cdot 69,55^2 = 11,13 \text{ kW}$$

Ztráty vedení:

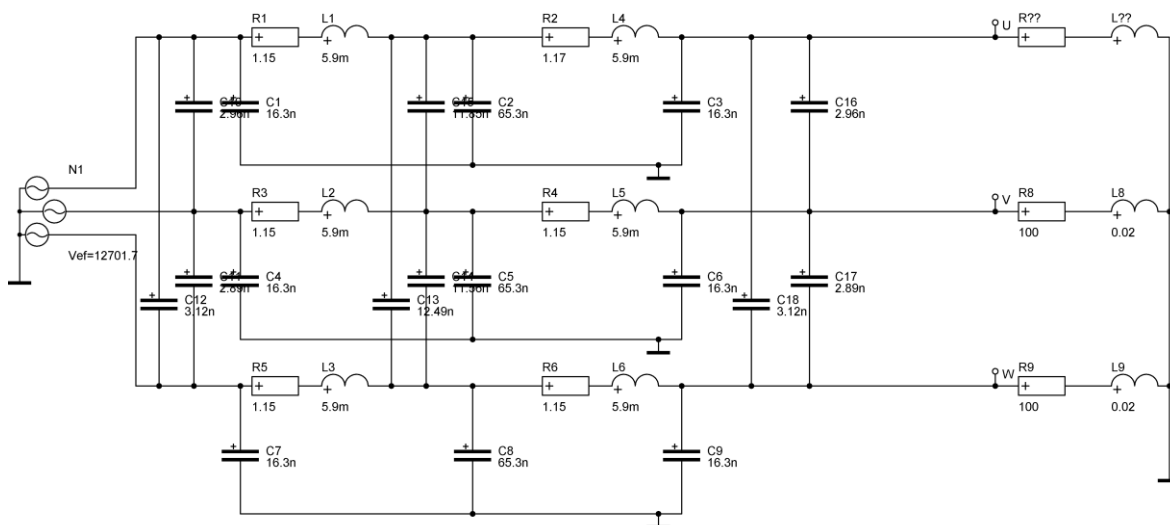
$$\begin{aligned} P &= P_U + P_V + P_W = 11,13 + 35,081 + 35,081 = \\ &= 81,292 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Ztráty vedení teoretickým výpočtem vychází téměř stejně jako ztráty vypočtené pomocí hodnot odečtených z DYNASTU. Znamená to, že simulace v programu DYNAST fungují správně.

### 3.2 VEDENÍ SE VZÁJEMNÝMI PARAMETRY

V této kapitole je uvažováno vedení se vzájemnými parametry, proto při změnách parametrů zátěže jedné fáze jsou uváděny v tabulkách hodnoty napětí, proudů a ztrát

všech fází. Vedení se vzájemnými parametry namodelované v systému DYNAST je na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Vedení se vzájemnými parametry

### 3.2.1 R – L ZÁTĚŽ ZAPOJENÁ DO HVĚZDY,

Zátěž jsem zvolil stejnou jako v kapitole 3.1.1 tedy  $R = 100 \Omega$  a  $L = 0,02 \text{ H}$ . Zátěž jsem znovu měnil ve fázi U. Nejdříve jsem nechal konstantní indukčnost a odpor jsem znovu měnil po 20% až do  $\pm 80\%$ .

$R_u[\Omega]$	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$U_u[\text{V}]$	10884,5	11823,5	12154,5	12317,1	12397,7	12474,8	12517,9	12550,4	12575,9
$U_v[\text{V}]$	13732,7	12970,5	12665,0	12507,3	12411,8	12348,2	12307,9	12268,3	12242,8
$U_w[\text{V}]$	11878,0	12048,4	12223,0	12331,2	12402,7	12452,9	12489,6	12517,9	12541,2
$I_u[\text{A}]$	519,72	292,04	201,48	153,51	123,89	103,81	89,32	78,35	69,79
$I_v[\text{A}]$	137,18	129,47	126,40	124,83	123,89	123,24	122,79	122,44	122,19
$I_w[\text{A}]$	117,38	120,28	121,99	123,06	123,81	124,28	124,65	124,94	125,16
$P_u[\text{kW}]$	622,87	196,13	93,36	54,18	35,29	24,78	18,35	14,13	11,21
$P_v[\text{kW}]$	43,29	38,54	36,75	35,84	35,29	34,93	34,70	34,51	34,36
$P_w[\text{kW}]$	31,97	33,25	34,23	34,83	35,24	35,52	35,73	35,90	36,03
$P[\text{kW}]$	698,14	267,92	164,33	124,85	105,82	95,24	88,78	84,54	81,60

Tabulka 3.6: Změna  $R_u$  po 20%,  $L_u = L_v = L_w = 0,02 \text{ H}$ ,  $R_v = R_w = 100 \Omega$

Z této simulace, která již respektuje vzájemné parametry vedení je zřejmé, jak změna zátěže jedné fáze ovlivní zbylé dvě fáze. Například při odlehčení fáze U dochází ke zvýšení napětí ve fázi V a ke snížení napětí ve fázi W oproti symetrické zátěži. Tyto změny napětí ve fázích zapříčiní změny fázových proudů, viz Tabulka 3.6. Kvůli těmto změnám proudů se mění i ztráty v jednotlivých fázích.

Při změnách odporu zátěže fáze U se samozřejmě mění i fázový posuv napětí a proudů. K největším změnám dochází ve fázi U, viz Příloha 2.

Poté jsem jako v předchozí kapitole ponechal konstantní odpor a měnil jsem indukčnost ve fázi U také po 20% do  $\pm 80\%$ .

$L_u$ [H]	0,004	0,008	0,012	0,016	0,02	0,024	0,028	0,032	0,036
$\Phi_{Uu}$ [°]	0,36	0,09	0,18	0,18	0,18	0,18	0,36	0,00	-0,18
$\Phi_{Uv}$ [°]	120,15	120,15	119,79	120,33	120,24	120,15	120,15	120,24	120,15
$\Phi_{Uw}$ [°]	240,39	240,39	240,12	240,12	240,12	239,85	239,94	240,84	240,30
$\Phi_{Iu}$ [°]	0,72	1,71	2,34	2,97	3,42	4,41	4,86	5,94	6,48
$\Phi_{Iv}$ [°]	123,84	123,84	123,48	123,57	122,94	124,38	124,11	123,57	124,20
$\Phi_{Iw}$ [°]	243,45	243,90	243,36	243,90	244,08	243,90	238,86	243,63	243,63

Tabulka 3.7: Změna  $L_u$  po 20%,  $L_v = L_w = 0,02$  H,  $R_u = R_v = R_w = 100$   $\Omega$

Při této simulaci jsem zjistil, že při změnách indukčnosti ve fázi U v těchto hodnotách nedochází k zásadním změnám velikostí napětí a proudů. Ztráty se zásadně nemění, protože se téměř nemění ani proudy v jednotlivých fázích, viz Příloha 3. Při této simulaci dochází k největším změnám fázového posuvu proudu ve fázi U, viz Tabulka 3.7.

Dále jsem provedl simulace pro zátěž, které jsem současně měnil odpor i indukčnost v jedné fázi a to tak, že jsem zachoval modul impedance stejný. Pro tyto hodnoty jsem odečetl efektivní hodnoty napětí a proudů, fázový posun napětí a proudů a ztráty na vedení. Zjištěné hodnoty jsou zpracovány formou tabulky.

Zátěž ve fázi U	$R=6,28318531$ $\Omega$ $L=0,318309886$ H	$R=20$ $\Omega$ $L=0,312519$ H	$R=60$ $\Omega$ $L=0,2554321$ H	$R=71,690156$ $\Omega$ $L=0,2228169$ H	$R=80$ $\Omega$ $L=0,192030273$ H
$U_u$ [V]	12293,05	12260,52	12235,07	12255,57	12271,13
$U_v$ [V]	12288,81	12343,96	12418,92	12430,23	12437,30
$U_w$ [V]	12940,76	12894,09	12701,76	12639,53	12590,04
$I_u$ [A]	122,68	122,33	121,91	121,98	122,33
$I_v$ [A]	122,40	123,18	123,74	123,96	123,74
$I_w$ [A]	128,91	129,12	126,71	126,15	125,65
$P_u$ [kW]	34,50	34,39	34,16	34,16	34,30
$P_v$ [kW]	34,59	34,90	35,33	35,40	35,43
$P_w$ [kW]	38,36	38,09	36,96	36,60	36,31
$P$ [kW]	107,45	107,37	106,45	106,15	106,05

Tabulka 3.8: Změna  $L_u$  a  $R_u$  při zachování velikosti  $Z_u$ .  $R_v = R_w = 100$ ,  $L_v = L_w = 0,02$  H

Při této simulaci jsem zjistil, že při malých změnách fázových napětí dochází k výraznějším změnám fázových proudů. Tyto změny velikostí fázových proudů způsobují

změny ztrát na vedení, které jsou nejvíce zřetelné ve fázi W. Dále dochází k významným změnám fázového posuvu proudu ve fázi U, což je způsobeno charakterem zátěže v této fázi, viz Příloha 4.

### 3.2.2 ZÁTĚŽ S PROUDOVÝM ZDROJEM

Proudový zdroj jsem navrhl stejný jako v kapitole 3.1.2 podle [15]. Proudový zdroj je zapojen ve fázi U. Ve fázích V a W je zapojena sériově kombinace odporu a indukčnosti o parametrech  $R = 100 \Omega$ ,  $L = 0,02 \text{ H}$ . Fázový posun proudu dodávaný proudovým zdrojem jsem také jako v kapitole 3.1.2 měnil od  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ . Respektoval jsem fázový posun proudu na vedení, který činí  $-3,59^\circ$ .

$\Phi_{\text{izd}} [^\circ]$	-48,59	-43,59	-33,59	-23,59	-13,59	-3,59	6,41	16,41	26,41	36,41	41,41
$U_u[\text{V}]$	12214	12220	12246	12287	12344	12413	12494	12583	12678	12774	12823
$U_v[\text{V}]$	12415	12427	12441	12443	12433	12410	12378	12335	12282	12222	12191
$U_w[\text{V}]$	12678	12642	12574	12509	12451	12403	12364	12338	12323	12321	12326
$I_v[\text{A}]$	123,91	124,03	124,17	124,17	124,1	123,89	123,53	123,11	122,61	121,98	121,69
$I_w[\text{A}]$	126,53	126,15	125,51	124,88	124,24	123,81	123,39	123,11	123,04	122,97	122,97
$P_u[\text{kW}]$	35,04	35,05	35,06	35,06	35,07	35,08	35,09	35,1	35,13	35,18	35,2
$P_v[\text{kW}]$	35,5	35,61	35,68	35,61	35,52	35,32	35,19	35,05	34,86	34,92	34,96
$P_w[\text{kW}]$	36,82	36,61	36,22	35,84	35,52	35,24	35,02	34,87	34,79	34,78	34,8
$P [\text{kW}]$	107,37	107,28	106,95	106,51	106,11	105,64	105,3	105,02	104,77	104,88	104,96

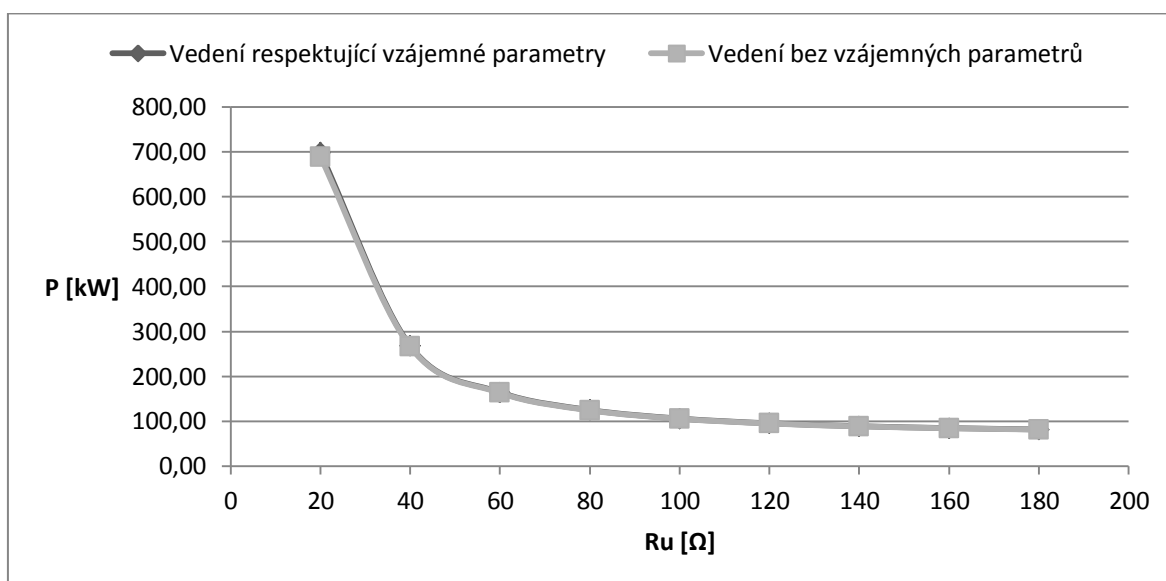
Tabulka 3.9: Zátěž s proudovým zdrojem

K největším změnám efektivních hodnot napětí dochází ve fázi U a to o zhruba 600 V. K největším změnám efektivní hodnoty proudu dochází ve fázi W, kde se tím pádem i nejvíce mění ztráty. Fázový posuv napětí a proudů se téměř nemění, viz Příloha 5.

### 3.3 POROVNÁNÍ ZTRÁT NA VEDENÍ

Grafickou formou jsem porovnal ztráty na vedení, které bylo zatíženo různými zátěžemi. Vždy jsem porovnal, jak zátěž ovlivňovala ztráty na vedení, které respektovalo vzájemné parametry mezi fázemi s vedením, u kterého jsem vzájemné parametry neuvažoval.

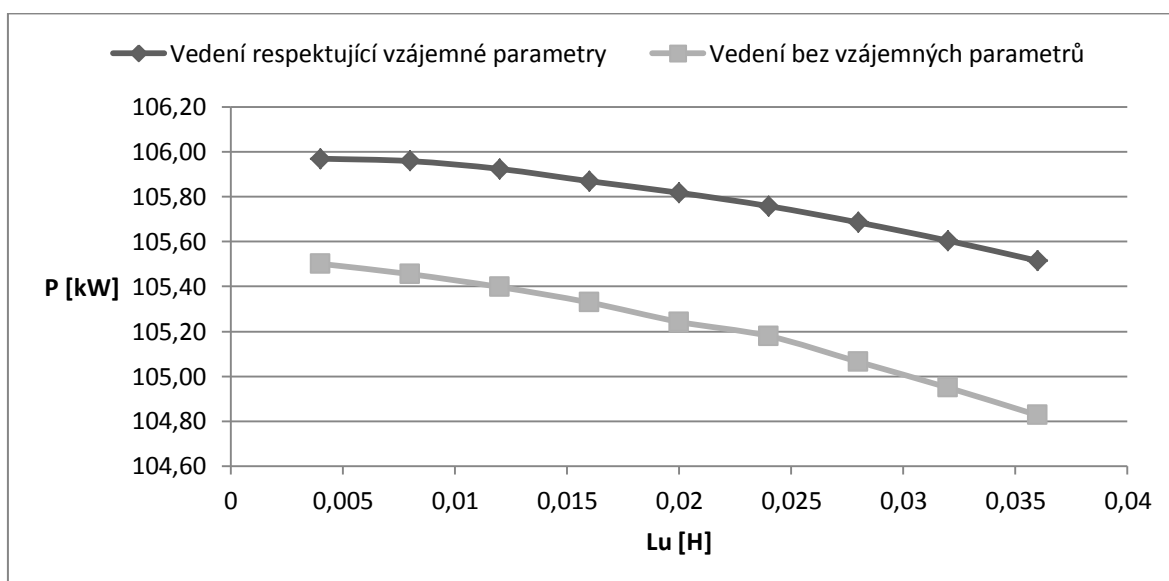
### 3.3.1 ZMĚNA ODPORU FÁZE U



Graf 3.1: Ztráty na vedení při změně odporu ve fázi U po 20%

Při nízkých hodnotách odporu teče vedením zvýšený proud, který způsobuje ztráty. Ztráty na vedení jsou výraznější u vedení, které uvažuje vzájemné parametry, protože zvýšený proud naindukuje do ostatních dvou fází napětí. Toto naindukované napětí vyvolá proudy. To znamená, že se zvýší proudy i v ostatních fázích, což vede k vyšším ztrátám. U vedení bez vzájemných parametrů jsou ztráty menší. To je dáno právě tím, že nedochází k indukovaní napětí mezi fázemi a tím pádem k ovlivnění ztrát zbylých dvou fází. Tento závěr je více zřejmý při porovnání tabulek 3.2 a 3.6.

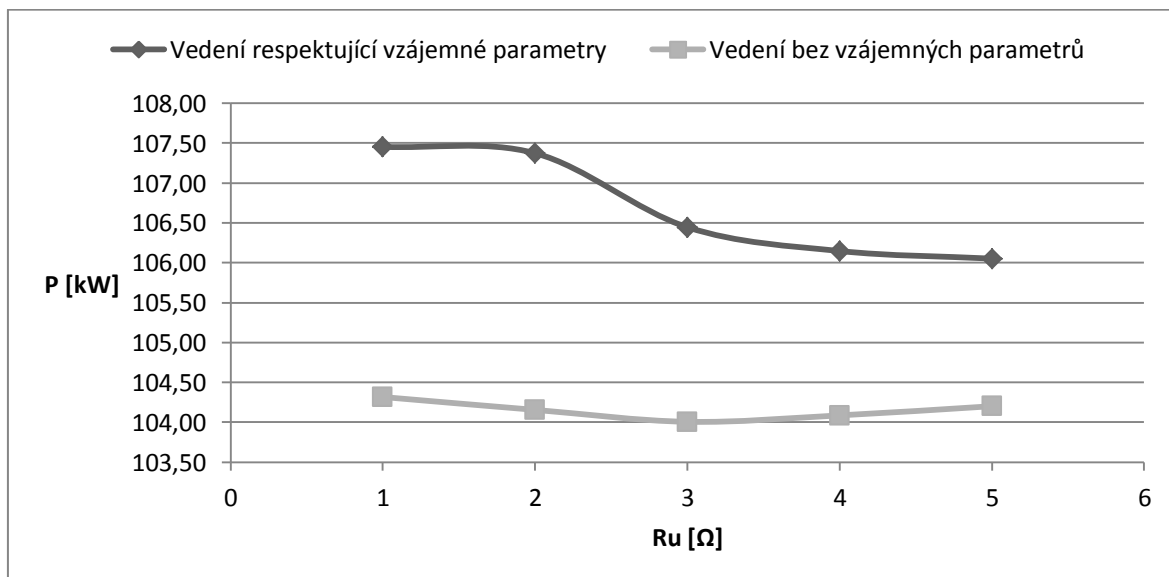
### 3.3.2 ZMĚNA INDUKČNOSTI FÁZE U



Graf 3.2: Ztráty na vedení při změně odporu ve fázi U po 20%

Podobně jako v kapitole 3.3.1 jsou ztráty vyšší u vedení, které respektuje vzájemné parametry. Z Grafu 3.2 je tento rozdíl mezi vedeními více zřejmý. Je vidět, že při vyšší indukčnosti, tzn. vyšší impedanci zátěže, jsou ztráty menší.

### 3.3.3 ZACHOVÁNÍ VELIKOSTI IMPEDANCE ZÁTĚŽE PŘI ZMĚNÁCH ODPORU A INDUKČNOSTI

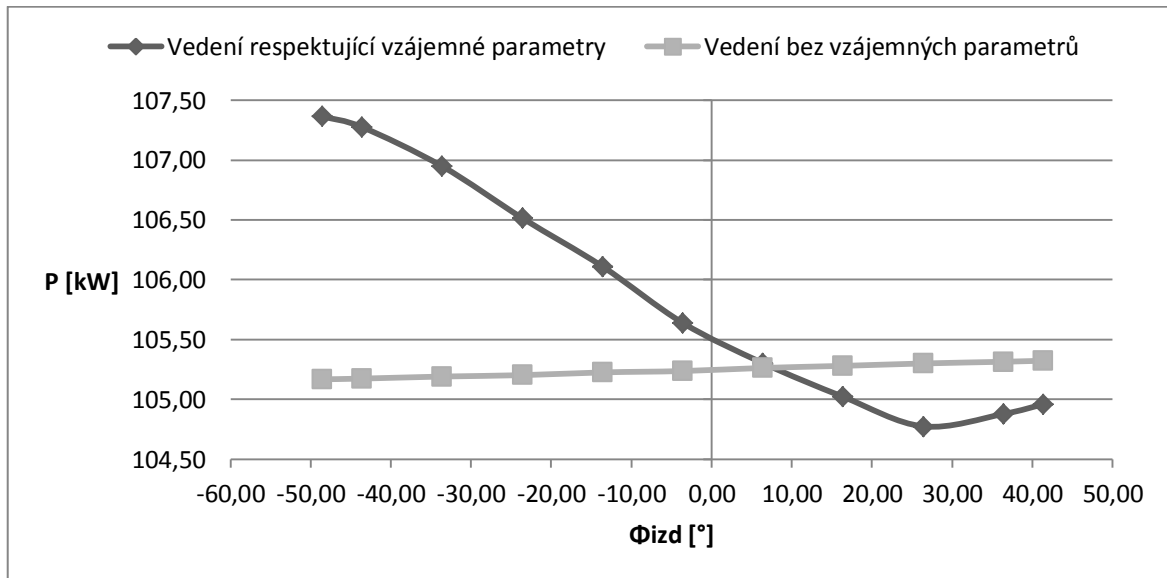


Graf 3.3: Změna Lu a Ru při zachování velikosti Zu

Body na ose x v Grafu 3.3 odpovídají sloupcům Tabulky 3.8. To znamená, že bod jedna je sloupec, ve kterém jsou hodnoty  $R = 6,28318531 \Omega$ ,  $L = 0,318309886 \text{ H}$  a bod 5 odpovídá hodnotám  $R = 80 \Omega$ ,  $L = 0,192030273 \text{ H}$ . Při této simulaci se celkové ztráty na

vedení výrazně nemění, jen dosahují o něco vyšších hodnot při větší indukčnosti a menším odporu. Výrazněji se mění ztráty v jednotlivých fázích vedení, viz Tabulka 3.8.

### 3.3.4 ZÁTĚŽ S PROUDOVÝM ZDROJEM



Graf 3.4: Zátěž s proudovým zdrojem

Při této simulaci se podle očekávání ztráty na vedení, které neuvažuje vzájemné parametry, výrazně nemění. Zajímavý je průběh ztrát u vedení, které respektuje vzájemné parametry. Při zachování amplitudy proudového zdroje, dochází k největším ztrátám při záporném fázovém posuvu.



## 4 OMEZENÍ VLIVŮ NESYMETRICKÉ ZÁTĚŽE

Pro snížení vlivu nesymetrie může být provedeno několik opatření s různým stupněm technické náročnosti. Prvně je důležité rozložení zátěží takovým způsobem, aby se systém stal více symetrický. To znamená, že se musíme snažit jednofázové zátěže zapojit rovnoměrně mezi všechny tři fáze trojfázového systému. [4]

### 4.1 SCOTTŮV TRANSFORMÁTOR

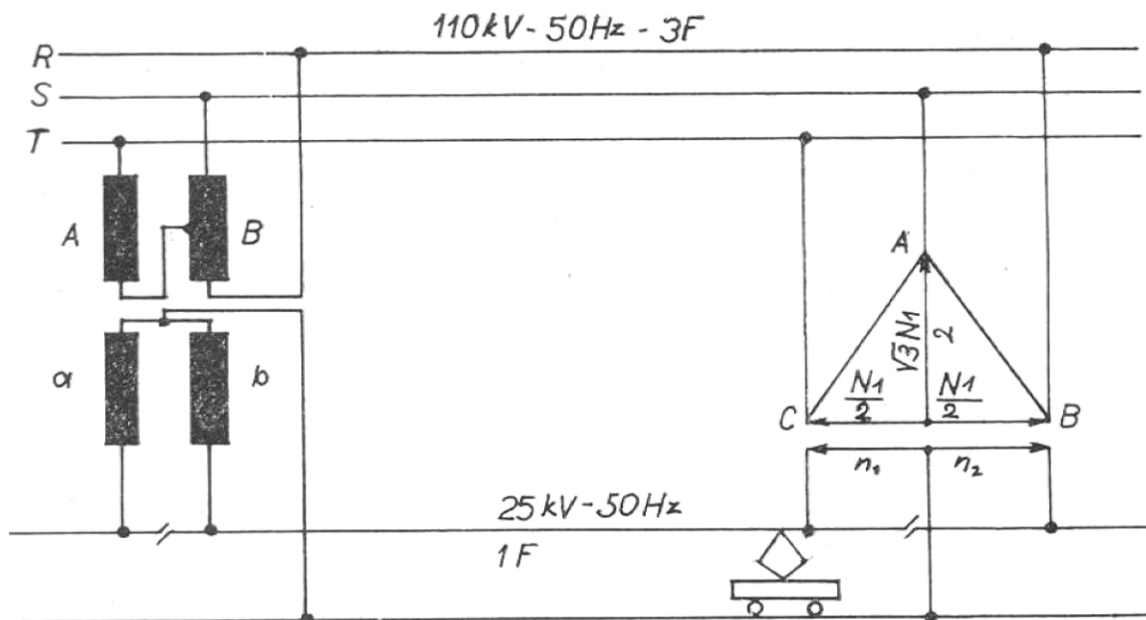
Jak je uvedeno v [11], Scottův transformátor je přímo navržen pro použití v nesymetrických soustavách. Má za úkol tyto nesymetrie kompenzovat. Výroba Scottova transformátoru je velmi ekonomicky náročná.

Scottův transformátor byl navržen, aby transformoval třífázovou soustavu na dvoufázovou soustavu a naopak. Obr. 4.1 ukazuje zapojení Scottova transformátoru, kde R, S, T jsou fáze napájecí sítě. Vstupní vinutí jsou dvě souhlasné cívky označené jako A a B. Vinutí cívky B má vyvedený střed, který tvoří nulový uzel. Vinutí cívky A je připojeno k jedné fázi napájecí soustavy a její druhý konec je spojený s nulovým uzlem. Začátek a konec cívky B je připojen na zbylé dvě fáze napájecí soustavy. Kvůli výkonovým poměrům je nutné správně nastavit poměr závitů jednotlivých cívek. Z fázového diagramu na Obr. 4.1 vyplývá, že vinutí A musí mít  $(\sqrt{3}/2)N_1$  závitů. Počet závitů vinutí A tvoří výšku rovnostranného trojúhelníka, který má délku strany odpovídající velikosti vinutí B. Vinutí B má  $N_1$  závitů, z toho plyne, že velikost  $B/2$  bude mít  $N_1/2$  závitů. Vrcholy našeho pomyslného trojúhelníka můžeme připojit k jednotlivým fázím napájecí soustavy. Budeme-li odebírat na výstupu ze Scottova transformátoru výkony, na které je navržen, tak se napěťová nesymetrie neprojeví. Primární strana Scottova transformátoru se pak z hlediska napájecí soustavy chová jako symetrická zátěž.

Na sekundární straně transformátoru se použijí vinutí se stejným počtem závitů  $n_2$ . Převod tohoto transformátoru, který je vlastně složen ze dvou jednofázových transformátorů, bude:

$$\frac{U_A}{U_a} = \frac{\sqrt{3}N_1}{2n_2} \quad (4.1)$$

$$\frac{U_B}{U_b} = \frac{N_1}{n_2} \quad (4.2)$$



Obr. 4.1: Scottův transformátor. Převzato z [11].

## 4.2 SYMETRIZAČNÍ STEINMETZŮV OBVOD

Jednofázový spotřebič lze připojit k síti pomocí Steinmetzova obvodu a tím lze dosáhnout, že se tento spotřebič vzhledem k síti chová jako trojfázový souměrný spotřebič. Předpokládejme, že jednofázový spotřebič je odpor  $R$ , pak symetrizační (Steinmetzův) obvod lze sestavit pomocí cívky a kondenzátoru, které jsou spolu se spotřebičem spojeny do trojúhelníka nebo do hvězdy. U symetrizačního obvodu je nutno dbát na sled fází, to znamená, že nelze zaměnit cívku s kondenzátorem.[2]

### 4.2.1 ODVOZENÍ SYMETRIZAČNÍHO (STEINMETZOVA) OBVODU

Větвовé proudy jsou značeny  $I_U$ ,  $I_V$  a  $I_W$ . Fázové proudy symetrizačního obvodu jsou  $I_{UV}$ ,  $I_{VW}$  a  $I_{WU}$ . Musíme stanovit parametry cívky a indukčnosti tak, aby proudy v síti tvořili trojfázovou souměrnou soustavu a aby každý z těchto proudů byl ve fázi s příslušným fázovým napětím sítě. [2]

Trojfázová síť je napětově souměrná pro fázová napětí platí rovnice 1.1, pro sdružená napětí platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{UV} &= \mathbf{U}_U - \mathbf{U}_V = \mathbf{U}_U - a^2 \mathbf{U}_U = \mathbf{U}_U (1 - a^2) \\ &= \sqrt{3} \mathbf{U}_U \cdot e^{j30^\circ} \end{aligned} \quad (4.3 \text{ a})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{VW} &= \mathbf{U}_V - \mathbf{U}_W = a^2 \mathbf{U}_U - a \mathbf{U}_U \\ &= \mathbf{U}_U (a^2 - a) = \sqrt{3} \mathbf{U}_U \cdot e^{j-90^\circ} \end{aligned} \quad (4.3 \text{ b})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{WU} &= \mathbf{U}_W - \mathbf{U}_U = a \mathbf{U}_U - \mathbf{U}_U = \mathbf{U}_U (a - 1) \\ &= \sqrt{3} \mathbf{U}_U \cdot e^{j150^\circ} \end{aligned} \quad (4.3 \text{ c})$$

Proudy ve větvích symetrizačního obvodu:

$$\mathbf{I}_{UV} = \frac{\mathbf{U}_{UV}}{R} \quad (4.4 \text{ a})$$

$$\mathbf{I}_{VW} = j\omega C \mathbf{U}_{VW} \quad (4.4 \text{ b})$$

$$\mathbf{I}_{WU} = \frac{\mathbf{U}_{WU}}{j\omega L} \quad (4.4 \text{ c})$$

Proudy ve vedení podle prvního Kirchhoffova zákona jsou:

$$\mathbf{I}_U = \mathbf{I}_{UV} - \mathbf{I}_{WU} \quad (4.5 \text{ a})$$

$$\mathbf{I}_V = \mathbf{I}_{VW} - \mathbf{I}_{UV} \quad (4.5 \text{ b})$$

$$\mathbf{I}_W = \mathbf{I}_{WU} - \mathbf{I}_{VW} \quad (4.5 \text{ c})$$

Z rovnic 4.5 vyjádříme proudy ve vedení jako funkci odpovídajícího fázového napětí:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_U &= \sqrt{3} \left[ \frac{1}{R} e^{j30^\circ} - \frac{1}{j\omega L} e^{j150^\circ} \right] \mathbf{U}_U = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \left( \frac{\sqrt{3}}{R} - \frac{1}{\omega L} \right) + j \left( \frac{1}{R} - \frac{\sqrt{3}}{\omega L} \right) \right] \mathbf{U}_U \end{aligned} \quad (4.6 \text{ a})$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_V &= \sqrt{3} \left[ \omega C - \frac{1}{R} e^{j30^\circ} \right] \mathbf{U}_U = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \left( \frac{\sqrt{3}}{R} - \omega C \right) + j \left( \sqrt{3} \omega C - \frac{1}{R} \right) \right] \mathbf{U}_U \end{aligned} \quad (4.6 \text{ b})$$

$$\mathbf{I}_W = \sqrt{3} \left[ \frac{1}{\omega L} e^{j60^\circ} + \omega C e^{j-180^\circ} \right] \mathbf{U}_U = \quad (4.6 \text{ c})$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} \left[ \left( \frac{1}{\omega L} + \omega C \right) + j\sqrt{3}(\omega C - \omega L) \right] \mathbf{U}_U$$

Aby každá dvojice napětí a proudů byla ve fázi, musí být imaginární složka rovnic 4.6 rovna nule:

$$\frac{1}{R} - \frac{\sqrt{3}}{\omega L} = 0 \rightarrow L = \sqrt{3} \frac{R}{\omega} \quad (4.7)$$

$$\sqrt{3}\omega C - \frac{1}{R} = 0 \rightarrow C = \frac{1}{\sqrt{3}\omega R} \quad (4.8)$$

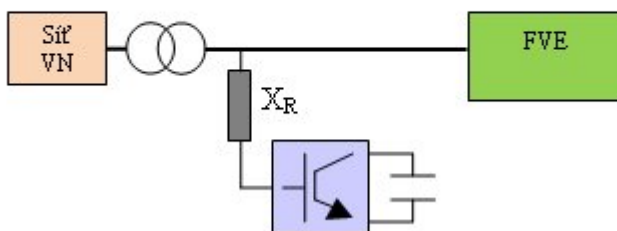
### 4.3 ELEKTRONICKÉ OMEZENÍ NESYMETRIE

Jsou to zařízení na bázi výkonové elektroniky, které spadají do zařízení označovaných jako FACTS (Flexible AC Transmission System). Obecně jsou to zařízení, které zlepšují kvalitu elektrické energie.[16]

Těchto zařízení existuje celá řada, některé se používají i dnes některé nikoliv. Vybral jsem dva příklady, které se v současné době používají a jednoduše jsem popsal princip jejich funkce.

#### 4.3.1 STATICKÝ KONDENZÁTOR

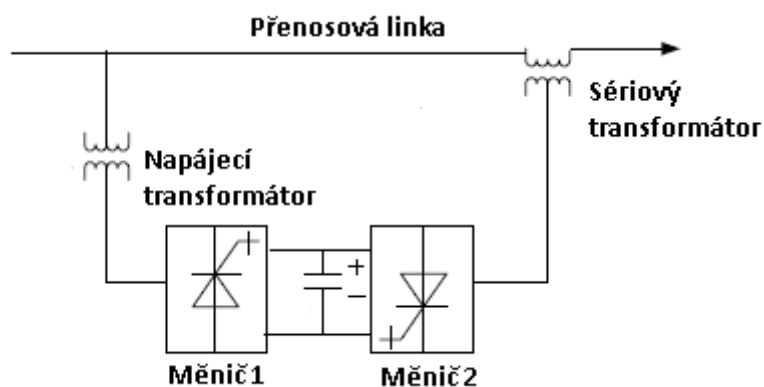
STATCON (Static Condenser) je složen z třífázového napěťového střídače, kondenzátoru a indukčnosti. Napětí na kondenzátoru střídače je udržováno na velikosti, která je vyšší než amplituda síťového napětí. Řízení tranzistorů měniče pulzně šířkovou modulací je prováděno tak, aby měnič dodával do sítě požadovaný proud (kapacitní, induktivní). Hlavními úkoly STATCON jsou kompenzace jalového výkonu, odstranění flikru, filtrace harmonických a symetrizace proudu.[16]



Obr. 4.2: Zapojení STATCON. Převzato z [16]

### 4.3.2 UPFC

UPFC (Unified Power Flow Controller) pracuje na principu vstřikování vektoru napětí v sérii s fází sítě. Tímto způsobem mění fázový posuv a velikost napětí a nabízí tak kontrolu nad jalovým a činným výkonem tekoucím přes linku. Zlepšuje stabilitu sítě.[17]



Obr. 4.3: Zapojení UPFC [17]

## ZÁVĚR

Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo zobrazení a porovnání ztrát na vedení při nesymetrické zátěži. Parametry vedení, na kterém jsem vlivy nesymetrie simuloval, jsem vypočítal podle [10], [12]. Pro toto vedení jsem navrhl v systému DYNAST model. Pro porovnání jsem provedl simulace na vedení bez vzájemných parametrů (vzájemných indukčností a vzájemných kapacit) a na vedení, které vzájemné parametry respektovalo. Zátěže těchto vedení jsem volil R-L zapojené do hvězdy a vždy jsem ve fázi U měnil parametry zátěže. Nejdříve jsem při konstantní indukčnosti měnil odpor fáze U a to po 20% do  $\pm 80\%$  od symetrického stavu. Poté jsem nastavil konstantní odpor a měnil jsem indukčnost znovu po 20% do  $\pm 80\%$ . Dále jsem provedl simulace pro konstantní velikost impedance při změnách odporu i indukčnosti. Další zátěž jsem navrhl s proudovým zdrojem podle [15]. U proudového zdroje jsem napevno nastavil amplitudu proudu, která odpovídala amplitudám ostatních fází. Fázový posuv jsem nejdříve nastavil na  $-3.59^\circ$ , což odpovídalo symetrickému zatížení. Fázový posuv jsem měnil od  $-45^\circ$  do  $+45^\circ$ .

V simulacích, kde jsem měnil odpor zátěže, jsem zjistil, že při snížení odporu zátěže (odlehčení zátěže) dojde k zvýšení proudu fází a ten vyvolá větší ztráty na vedení. Při změnách odporu zátěže se mění fázové napětí, fázové proudy a jejich fázové posuvy, zajímavé je jak se mění fázové napětí a fázový proud zátěže ve všech třech fázích při simulacích s vedením, které respektuje vzájemné parametry, viz Tabulka 3.6.

Při změnách indukčnosti jsem zjistil, že nedochází k zásadnějším změnám velikosti proudů a tím pádem se výrazně nemění ani ztráty na vedení. Největší změny poměrů na vedení jsou u fázového posuvu proudu fáze U a to jak u vedení se vzájemnými parametry tak i u vedení bez vzájemných parametrů.

Při simulacích se zachováním velikosti impedance zátěže (současná změna odporu a indukčnosti) jsem zjistil, že velmi záleží, jestli vedení respektuje vzájemné parametry či nikoliv. U vedení bez vzájemných parametrů dochází k výrazným změnám fázového posuvu proudu fáze U, ale ztráty se příliš nemění. U vedení, které respektuje vzájemné parametry, při malých změnách fázových napětí dochází k velkým změnám fázových proudů. Tyto změny fázových proudů způsobují změny ztrát v jednotlivých fázích vedení, které jsou nejvíce zřetelné ve fázi W, viz Tabulka 3.8.

Při simulacích zátěže s proudovým zdrojem se ztráty více mění u vedení se vzájemnými parametry. Nejvíce se měnily ztráty a tedy i proud ve fázi W. U vedení, které nerespektuje vzájemné parametry, se ztráty téměř nemění.

## SEZNAM LITERATURY

- [1] ADÁMEK, Milan. UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. *Třífázový střídavý proud: přednáška č.8.* 2005, 29 s. Dostupné z: [www.elektro.utb.cz/prednasky/prednaska8.pdf](http://www.elektro.utb.cz/prednasky/prednaska8.pdf)
- [2] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice.* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 278 s. ISBN 80-7300-164-0.
- [3] GUASCH-PESQUER, L.; YOUB, L.; GONZALEZ-MOLINA, F.; ZEPPA-DURIGUTTI, E.-R., "Effects of voltage unbalance on torque and current of the induction motors," *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on*, vol., no., pp.647,652, 24-26 May 2012 doi: 10.1109/OPTIM.2012.6231766 dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6231766&isnumber=6231751>
- [4] Brožura *Kvalita elektrické energie- Rušení napětí- úvod do nesymetrie*: Hungaria copper promotion centre. Dostupné z: [http://www.medportal.cz/files/file/lpg\\_cz/5\\_1\\_3.pdf](http://www.medportal.cz/files/file/lpg_cz/5_1_3.pdf)
- [5] CHINDRIS, M.; CZIKER, A.; MIRON, A.; BALAN, H.; IACOB, A.; SUDRIA, A., "Propagation of unbalance in electric power systems," *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*, vol., no., pp.1,5, 9-11 Oct. 2007 doi: 10.1109/EPQU.2007.4424221 dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4424221&isnumber=4424073>
- [6] DAVOUDI, M.G.; BASHIAN, A.; EBADI, J., "Effects of unsymmetrical power transmission system on the voltage balance and power flow capacity of the lines," *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on*, vol., no., pp.860,863, 18-25 May 2012 doi: 10.1109/EEEIC.2012.6221496 dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6221496&isnumber=6221383>
- [7] Vlivy nesymetrického napájení na trojfázové asynchronní motory nakrátko. *ElektroTrh.cz* [online]. 12. 9. 2012 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.elektrotrh.cz/pohony-menice-a-energetika/vlivy-nesymetrickeho-napajeni-na-trojfazove-asynchronni-motory-nakratko>
- [8] KUBA, Petr. *Chránění generátoru při nesymetrickém zatížení* [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8609/Kuba\\_Petr\\_Chrazeni\\_generatoru\\_pri\\_nesymetrickem\\_zatizeni.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/8609/Kuba_Petr_Chrazeni_generatoru_pri_nesymetrickem_zatizeni.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje I,II.* 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1986. skripta 240 s.
- [10] HODINKA, Miloslav, FECKO, Štefan a NĚMEČEK, František. *Přenos a rozvod elektrické energie: celost. vysokošk. učebnice elektrotechn. fakult vys. škol techn.* 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. 323 s. ISBN 80-03-00065-3
- [11] TRACHTA, Jiří. *Optimalizace provozu indukční pece ve slévárně Vsetín* [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=43117](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=43117). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] HORÁK, Karel. *Výpočet elektrických sítí.* Vyd. 1. Praha: SNTL, 1980. 307 s.



- [13] BERAN, Miloš. Přenos a rozvod elektrické energie: příklady. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1983. 165 s
- [14] MERTLOVÁ, Jiřina, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla a KOČMICH, Martin. Přenos a rozvod elektrické energie. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1995. 130 s. ISBN 80-7082-222-8.
- [15] KERSTING, William H. Distribution system modeling and analysis. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, ©2007. 421 s. The electric power engineering series. ISBN 0-8493-5806-X.
- [16] ELCOM, a.s. [online]. 2013 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/441-stelcom.html#princip>
- [17] YAO SHU-JUN; SONG XIAO-YAN; WANG YAN; YAN YU-XIN; YAN ZHI, "Research on dynamic characteristics of Unified Power Flow Controller (UPFC)," Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on , vol., no., pp.490,493, 6-9 July 2011  
doi: 10.1109/DRPT.2011.5993940  
URL:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5993940&isnumber=5993852>
- [18] GIRGA, E. Ustálený chod vedení 400 kV. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2008, 60 stran.

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 :      Základní typy nesymetrie
- Příloha 2:      Změna  $R_u$  po 20%,  $L_u = L_v = L_w = 0,02$  H,  $R_v = R_w = 100 \Omega$
- Příloha 3:      Změna  $L_u$  po 20%,  $L_v = L_w = 0,02$  H,  $R_u = R_v = R_w = 100 \Omega$
- Příloha 4:      Změna  $L_u$  a  $R_u$  při zachování velikosti  $Z_u$ ,  $R_v = R_w = 100$ ,  $L_v = L_w = 0,02$  H
- Příloha 5:      Zátěž s proudovým zdrojem

## PŘÍLOHY

Nesymetrie		
	Fázory	Časový průběh
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		
T6		
T7		
T8		

Příloha 1: Základní typy nesymetrie

$R_u[\Omega]$	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$\Phi_{uu}[\circ]$	4,5	2,52	1,35	0,18	0,18	-0,18	-0,54	-0,72	-0,9
$\Phi_{uv}[\circ]$	120,2	119,16	119,16	120,69	120,24	120,15	120,51	119,88	120,06
$\Phi_{uw}[\circ]$	234,36	237,51	239,22	239,58	240,12	239,94	240,48	240,48	240,48
$\Phi_{iu}[\circ]$	21,87	11,07	8,1	5,58	3,42	2,97	1,71	2,16	0,9
$\Phi_{iv}[\circ]$	123,39	122,94	124,11	122,94	122,94	124,02	122,58	123,21	123,3
$\Phi_{iw}[\circ]$	237,42	241,2	242,64	242,82	244,08	244,17	244,08	243,9	243,9

Příloha 2: Změna  $R_u$  po 20%,  $L_u = L_v = L_w = 0,02$  H,  $R_v = R_w = 100 \Omega$

$L_u$ [H]	0,004	0,008	0,012	0,016	0,02	0,024	0,028	0,032	0,036
$U_u$ [V]	12432,4	12426,7	12421,7	12416,8	12397,7	12406,2	12401,9	12397,7	12393,5
$U_v$ [V]	12426,7	12406,9	12409,0	12410,4	12411,8	12413,3	12414,7	12416,1	12416,8
$U_w$ [V]	12389,2	12392,0	12395,6	12399,1	12402,7	12405,5	12409,7	12412,6	12416,8
$I_u$ [A]	124,31	124,24	124,10	124,03	123,89	123,67	123,53	123,39	123,18
$I_v$ [A]	123,81	123,81	123,81	123,89	123,89	123,89	123,91	123,92	123,96
$I_w$ [A]	123,67	123,67	123,74	123,74	123,81	123,81	123,89	123,89	123,96
$P_u$ [kW]	35,55	35,50	35,44	35,37	35,29	35,20	35,10	34,99	34,88
$P_v$ [kW]	35,26	35,28	35,29	35,28	35,29	35,30	35,31	35,32	35,32
$P_w$ [kW]	35,16	35,18	35,20	35,22	35,24	35,26	35,28	35,29	35,32
$P$ [kW]	105,97	105,96	105,92	105,87	105,82	105,76	105,69	105,60	105,51

Příloha 3: Změna  $L_u$  po 20%,  $L_v = L_w = 0,02$  H,  $R_u = R_v = R_w = 100 \Omega$

Zátěž ve fázi U	R=6,28318531 L=0,318309886	R=20 L=0,312519337	R=60 L=0,255432099	R=71,69015572 L=0,22281692	R=80 L=0,192030273
$\Phi_{Uu} [^\circ]$	-3,06	-2,34	-1,98	-1,53	-1,08
$\Phi_{Uv} [^\circ]$	122,13	122,49	121,50	121,05	121,41
$\Phi_{Uw} [^\circ]$	239,94	239,58	239,67	240,21	239,40
$\Phi_{Iu} [^\circ]$	82,98	75,51	51,12	42,75	36,09
$\Phi_{Iv} [^\circ]$	126,09	125,64	125,64	124,83	124,56
$\Phi_{Iw} [^\circ]$	242,91	243,36	243,45	242,46	243,00

Příloha 4: Změna  $L_u$  a  $R_u$  při zachování velikostí  $Z_u$ .  $R_v = R_w = 100$ ,  $L_v = L_w = 0,02 H$

$\Phi_{izdr} [^\circ]$	-48,59	-43,59	-33,59	-23,59	-13,59	-3,59	6,41	16,41	26,41	36,41	41,41
$\Phi_{Uu} [^\circ]$	-1,53	-1,44	-0,9	-0,72	-0,18	0,18	0,27	0,36	0,72	0,54	0,45
$\Phi_{Uv} [^\circ]$	121,5	119,7	121,05	120,6	120,6	120,15	119,88	119,7	118,98	118,89	119,34
$\Phi_{Uw} [^\circ]$	239,13	239,22	239,58	239,85	240,12	239,94	240,3	240,66	241,11	241,56	241,29
$\Phi_{Iv} [^\circ]$	125,82	125,19	125,1	124,56	124,2	123,84	123,39	123,48	122,94	122,76	122,76
$\Phi_{Iw} [^\circ]$	243,27	243,18	243,36	243,18	243,27	243,72	244,44	243,63	244,53	244,98	245,16

Příloha 5: Zátěž s proudovým zdrojem