

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra elektrických pohonů a trakce**



**ASYNCHRONNÍ GENERÁTOR  
V OSTROVNÍM PROVOZU**

**Bakalářská práce**

květen 2024

Daniel Rejman



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rejman** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **507449**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Asynchronní generátor v ostrovním provozu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Induction Generator in Island Mode Operation**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte práci asynchronního generátoru v ostrovním provozu.
2. Popište proces samobuzení generátoru v ostrovním provozu.
3. Vytvořte model asynchronního generátoru v ostrovním provozu.
4. Pomocí modelu zanalyzujte vybraný provozní stav a výsledky zhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Simoes, M. G., Farret, F. A., Modelling and Analysis with Induction Generators, Third Edition. CRC Press, Boca Raton, USA, 2015.
- [2] Boldea, I., Nasar, S. A., The Induction Machines Design Handbook, Second Edition. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, CRC Press, Boca Raton, USA, 2010.
- [3] Ahmed, T., Nishida, K., Nakaoka, M., A novel stand-alone induction generator system for AC and DC power applications. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, Oct. 2005, Hong Kong, China.
- [4] Jayaramaiah, G. V., Fernandes, B. G., Novel Voltage Controller for Stand-alone Induction Generator using PWM-VSI. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Dec. 2006, Tampa, USA.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Kobrle, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce**

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Pavel Kobrle, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze 24. května 2024

.....

## Poděkování

Obrovské poděkování patří mému vedoucímu práce Ing. Pavlovi Kobrlemu, Ph.D. za jeho trpělivost, cenné rady a velké množství času, které mi při řešení této práce věnoval. Další dík patří autoru knihy „Modeling and Analysis with Induction Generators“ Prof. M. Godoy Simõesovi za jeho čas a snahu odpovědět na mé emaily s dotazy týkajícími se tématu mojí práce. Nakonec bych chtěl z celého svého srdce poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě při studiu podporují.

# Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o asynchronním generátoru pracujícím v ostrovním režimu.

Cílem práce je popsat specifika práce asynchronního generátoru v ostrovní síti a poukázat na některé metody určení velikosti kapacity budicího zařízení, možnosti regulace spotřeby elektrické energie, popsat generátor matematickým modelem a představit výsledky simulací.

V bakalářské práci je velmi stručně popsána ostrovní síť se souvisejícími normami, je diskutována problematika magnetizační charakteristiky stroje klíčová pro vlastnosti budicího zařízení a jsou v ní uvedeny i praktické příklady, kde je možné se s tímto provozem asynchronního generátoru setkat. Nastíněné jsou i určité metody kompenzace změn jalového výkonu v ostrovní síti a možnosti regulace výkonu v případě proměnné zátěže. Teoretická část je doplněna matematickým modelem třífázového asynchronního generátoru, který je zaveden ve dvouosém systému  $d-q$ . Model je realizován v Simulinku. Pomocí modelu jsou ukázány běžné stavy a přechodné děje, konkrétně spuštění se samobuzením, chod naprázdno, chod při zatížení různými typy zátěže  $RL$  a přetížení.

**Klíčová slova:** ostrovní síť, asynchronní generátor, samobuzení, šuntovací zátěž

# Abstract

The bachelor thesis focuses on an asynchronous generator operating in island mode. The aim of this thesis is to describe the specifics of the asynchronous generator's operation in an island grid and highlight some methods for determining the excitation device size, power consumption regulation possibilities, describe a mathematical model of the generator and present the simulation results.

The thesis briefly describes island grid and related standards, discusses the magnetization characteristics crucial for the excitation device properties, and provides practical examples of where the asynchronous generator can be found in this operation. There are also methods for compensating reactive power changes in island grid and power regulation options for variable loads.

The theoretical part includes a mathematical model of a three-phase asynchronous generator in a  $d-q$  coordinate system, implemented in Simulink. The model demonstrates typical operating conditions and transient events, such as self-excitation startup, no-load operation, operation under various  $RL$  loads and overload situations.

**Keywords:** island grid, asynchronous generator, self-excitation, shunt load

# Obsah

ÚVOD .....	1
<b>1 ASYNCHRONNÍ GENERÁTOR V OSTROVNÍM PROVOZU .....</b>	<b>2</b>
1.1 OSTROVNÍ PROVOZ.....	2
1.1.1 Norma EN60034-1.....	2
1.1.2 Norma EN50160.....	3
1.2 ASYNCHRONNÍ STROJ.....	3
1.2.1 Náhradní schéma asynchronního stroje.....	4
1.2.2 Statická momentová charakteristika asynchronního stroje.....	4
1.2.3 Asynchronní generátor.....	5
1.2.4 Asynchronní generátor v ostrovním provozu.....	6
<b>2 PROCES SAMOBUZENÍ GENERÁTORU V OP .....</b>	<b>8</b>
2.1 SAMOBUZENÍ.....	8
2.2 URČENÍ VELIKOSTI KAPACITY BUDICÍHO ZAŘÍZENÍ.....	10
2.3 ZAPOJENÍ KONDENZÁTORŮ DO HVĚZDY A DO TROJÚHELNÍKA .....	15
2.4 VLIV ZÁTĚŽE NA PROVOZ SEIG V OP .....	15
2.4.1 Odporová zátěž $R$ .....	15
2.4.2 Induktivní zátěž $L$ .....	17
2.4.3 Odporově induktivní zátěž $RL$ .....	17
2.4.4 Asynchronní motor jako zátěž.....	18
2.4.5 Jednofázová zátěž na třífázovém SEIG.....	19
2.4.6 Realizace jednofázové zátěže SEIG v praxi .....	20
2.5 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU.....	22
2.5.1 Spínané kapacity.....	22
2.5.2 Kapacity zapojené do série se zátěží.....	22
2.5.3 SVC (Static Var Compensator).....	24
2.5.4 STATCOM (Static Synchronous Compensator).....	24
2.5.5 VSI (Voltage Source Inverter).....	25
2.6 ELEKTRONICKÉ REGULÁTORY ŠUNTOVACÍ ELEKTRICKÉ ZÁTĚŽE.....	26
2.6.1 Regulátor s triaky.....	26
2.6.2 Napěťový střídač (VSI) se šuntovací zátěží.....	27
2.7 SHRNUÍ.....	28
<b>3 MODEL SEIG.....</b>	<b>29</b>
3.1 ROVNICE MATEMATICKÉHO MODELU .....	29
3.2 REALIZACE ROVNIC V PROGRAMU SIMULINK .....	32



<b>4</b>	<b>SIMULACE SEIG .....</b>	<b>37</b>
4.1	SIMULACE STAVU NAPRÁZDNO.....	37
4.2	SIMULACE STAVU S ELEKTRICKOU ZÁTĚŽÍ .....	41
4.3	SIMULACE PŘETÍŽENÍ .....	45
4.4	EXPERIMENT – ZATÍŽENÍ S UVÁŽENÍM EFEKTIVNÍ KAPACITY.....	47
4.5	EXPERIMENT – ČISTĚ ODPOROVÁ ZÁTĚŽ.....	51
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>55</b>

# Úvod

Asynchronní stroje jsou střídavé točivé stroje, které se hojně používají již přes sto let. Nejčastěji se s těmito stroji můžeme setkat v režimu motoru. Je to z důvodu jejich jednoduché konstrukce a nízké pořizovací ceny ve srovnání s ostatními motory. Jejich údržba je snadná a stroje jsou spolehlivé. Asynchronní stroj ale dokáže pracovat i v dalších režimech, jako je režim brzda a režim generátor.

V režimu generátoru však tento stroj už není tak známý jako v režimu motoru. Jeho nevýhodou je spotřeba jalového výkonu, který tento stroj pro správnou funkci potřebuje. Při práci stroje na tvrdé síti dochází k zatěžování sítě spotřebou jalového výkonu, nicméně tento výkon je v tvrdé síti dostupný. V ostrovní síti je situace komplikovanější, neboť jalový výkon je potřeba stroji dodat jiným způsobem.

K vytvoření jalového výkonu v ostrovní síti je možné použít pasivní budič v podobě kondenzátorů. Pomocí nich se stroj sám nabudí a začne pracovat. K tomu je ovšem nutné využít zbytkového napětí v rotoru stroje. Bez něj se stroj správně nenabudí. V současné době je však možné využít i výkonových měničů. Výkonové měniče se navíc nevyužívají pouze k regulaci jalového výkonu, ale mohou být také využity, v případě asynchronního generátoru, k regulaci činného výkonu, tedy elektrické zátěže.

Další zajímavostí je vazba mezi otáčkami, frekvencí a elektrickou zátěží generátoru. Navíc změny frekvence jsou pevně spjaty se změnou napětí na svorkách stroje. Změny napětí mají zase vazbu na změnu spotřeby jalového výkonu. Z toho plyne, že tento stroj provozovaný v ostrovní síti nebude jednoduché uřídit. V tvrdé síti je frekvence daná, ale v ostrovní síti si frekvenci definuje asynchronní generátor sám. Výjimkou je spolupráce s výkonovými měniči, které mohou stroji jeho frekvenci stanovit. Určení frekvence ale není tak jednoduché. Musí se brát ohled na elektrické spotřebiče, které jsou z generátoru napájené. Nelze tak libovolně vytvořit nějakou ostrovní síť. Ostrovní síť musí splňovat podobně přísné normy, jaké je nutné splnit ve tvrdé síti. Cílem je vytvořit spolehlivou síť a přitom nezničit spotřebiče, které jsou k této síti připojené.

Typicky je možné se s tímto strojem setkat v odlehlých lokalitách, kam není přivedena tvrdá síť. Snazší je případ, kdy má spotřebič čistě činný charakter, příkladem může být topení nebo osvětlení. Problém nastává, pokud k tomuto generátoru připojíme induktivní nebo odporově induktivní zátěž. Induktivní zátěž však potřebuje ke své správné činnosti také jalový výkon, stejně jako generátor. To může představovat další problém v ostrovním provozu tohoto stroje, pokud nejsou k dispozici žádné regulátory ani výkonová elektronika.

Dalšími typickými aplikacemi jsou malé vodní elektrárny a větrné elektrárny. Tam se ale nejedná o pouhé spojení generátoru s pasivním budičem. V takovém případě už použití generátoru vyžaduje sofistikovanější možnosti regulace.

# 1 Asynchronní generátor v ostrovním provozu

## 1.1 Ostrovní provoz

Ostrovním provozem se rozumí část sítě, která je izolovaná od okolní soustavy. Obvykle se skládá z několika zdrojů a zátěže. Na rozdíl od tvrdé sítě však neobsahuje značný počet elektrických generátorů, a proto má ostrovní síť významně menší zkratový výkon. Slabinou ostrovního provozu může být časté kolísání napětí a frekvence. Kolísání těchto dvou veličin je potřeba kontrolovat z důvodu provozu elektrických zařízení v této síti, aby nedošlo k jejich poškození nebo nesprávné funkci. Pokud bychom uvažili jako zátěž asynchronní motor, mohlo by při poklesu napětí dojít ke zvýšené spotřebě elektrického proudu  $I$  a jalového výkonu  $Q$ , naopak při vyšším napětí by mohlo dojít k poškození stroje. [1]

Vyšší napětí mohou poškodit zařízení, ale nízké frekvence jsou též nevhodné pro provoz zařízení, zejména těch, které využívají elektromagnetickou indukci, jak je patrné z následujícího odvození. Rovnici pro indukované napětí (1) lze upravit do tvaru (2). Vezmeme-li v úvahu harmonický průběh napětí (3) a dosadíme ho do rovnice (2), získáme rovnici (4). Z rovnice (4) plyne, že s klesající frekvencí v síti se zvyšuje magnetický tok při konstantní velikosti napětí. Vlivem vyššího toku dojde k dřívější saturaci elektrických motorů, to může zapříčinit, že magnetický tok začne procházet dalšími částmi stroje, jako jsou např. kostra, patky stroje, atd. Stroj tomu není přizpůsoben, a může tak dojít k nadměrnému oteplení stroje. Dále s klesající frekvencí dochází i ke snížení celkové reaktance stroje, a tak začíná převažovat činný odpor, což způsobí další nechtěné ztráty. [2]

$$u_i = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\phi(t) = \int u_i dt \quad (2)$$

$$u(t) = U_{\max} \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$\phi(t) \approx -\frac{U_{\max}}{\omega} \cos(\omega t) \quad (4)$$

Na provoz ostrovní sítě, stejně jako na provoz tvrdé sítě, se vztahují určité normy, aby se dodržel požadovaný rozsah napětí a frekvence. Mezi tyto normy patří např. EN60034-1 a EN50160. Tyto normy určují limity provozu ostrovní sítě. [1], [2]

### 1.1.1 Norma EN60034-1

Podstatou této normy je určení limitů napětí a frekvence pro střídavé točivé elektrické stroje a maximální bezpečné rychlosti pro třífázové točivé stroje (Tab. 1). Norma rozlišuje motory a generátory. Asynchronní stroj je ale výjimkou, protože se v malých elektrárnách konstrukčně motor a generátor neliší. Norma uvádí, že navržené motory by měly vydržet převýšení

maximální rychlosti o 20 % pro dvoupólové stroje, o 25 % pro čtyřpólové a stroje s vyšším počtem pólů. [1], [2]

*Tab. 1 Maximální bezpečné provozní otáčky ( $ot \cdot min^{-1}$ ) pro třífázové jednootáčkové asynchronní motory nakrátko do napětí 1 kV [1]*

Velikost kostry (mm)	2 póly	4 póly	6 pólů
≤100	5200	3600	2400
112	5200	3600	2400
132	4500	2700	2400
160	4500	2700	2400
180	4500	2700	2400
200	4500	2300	1800
225	3600	2300	1800
250	3600	2300	1800
280	3600	2300	1800
315	3600	2300	1800

### 1.1.2 Norma EN50160

Tato norma určuje limity pro napětí a frekvenci v ostrovní síti. Podmínky pro splnění normy nejsou pro ostrovní síť tak přísné jako v případě tvrdé sítě. Norma uvádí, že průměrná hodnota frekvence, která je měřena s periodou  $T = 10$  s, by se měla pohybovat v rozmezí  $50 \text{ Hz} \pm 2 \%$  za 95 % doby trvání jednoho týdne a  $50 \text{ Hz} \pm 15 \%$  za celkovou dobu trvání provozu. Dále je v normě určen limit velikosti efektivní hodnoty napětí, která je měřena za periodu  $T = 10$  min. Efektivní hodnota napětí  $U_f$  musí být v intervalu  $\pm 10 \%$  jmenovité hodnoty napětí za 95 % doby trvání jednoho týdne. Pro střední hodnotu napětí  $U_{AV}$  v daných intervalech  $T = 10$  min platí, že navíc nesmí dojít k převýšení nad 10 % a poklesu pod 15 %. [1], [2]

## 1.2 Asynchronní stroj

Asynchronní stroj je točivý elektrický stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce a může fungovat v režimu motoru, generátoru nebo brzdy. V případě, že stroj pracuje v motorickém režimu, tak dochází k přeměně elektrické energie na mechanickou. Statorové vinutí se připojí k elektrické síti, vinutím statoru začne procházet střídavý elektrický proud, který vytvoří točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole statorového vinutí, které se otáčí synchronní rychlostí  $n_s$  (5), do rotoru podle indukčního zákona indukuje napětí  $u_i$ . Pokud je vinutí v rotoru uzavřené (např. provedení s klecí nakrátko), vznikne v rotoru střídavý elektrický proud, který vytvoří magnetické točivé pole rotoru. Magnetická točivá pole spolu vzájemně interagují, přičemž dochází ke vzniku momentu a k roztočení rotoru stroje. Rotor stroje se otáčí rychlostí  $n$  (6), tedy rychlost rotoru není synchronní. [3]

$$n_s = 60 \frac{f_1}{p_p} \quad (5)$$

$$n = n_s(1 - s) = 60 \frac{f_1}{p_p}(1 - s) \quad (6)$$

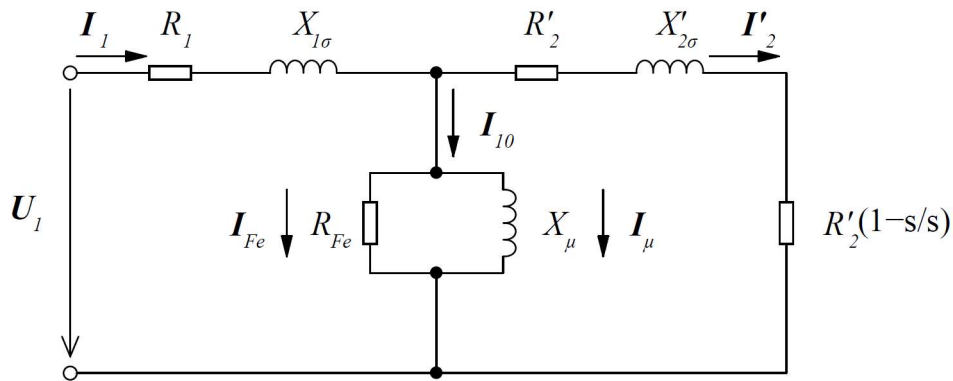
### 1.2.1 Náhradní schéma asynchronního stroje

Asynchronní stroj s kotvou nakrátko lze překreslit do náhradního schématu (Obr. 1), kde jsou rotorové veličiny přepočítané na stator.  $U_1$  představuje napětí na statoru,  $I_1$  je proud statorovým vinutím,  $R_1$  odpor vinutí statoru,  $X_{1\sigma}$  rozptylová reaktance statoru,  $R_{Fe}$  odpor respektující ztráty v železe,  $X_\mu$  magnetizační reaktance,  $R'_2$  odpor vinutí rotoru přepočítaný na stator,  $R'_2(1-s/s)$  respektuje mechanickou zátěž (vnitřní mechanický výkon) a platí (7),  $X'_{2\sigma}$  je rozptylová reaktance rotoru přepočítaná na stator,  $I'_2$  proud rotorovým vinutím přepočítaný na stator,  $I_{10}$  proud naprázdno,  $I_\mu$  magnetizační proud,  $I_{Fe}$  fiktivní proud způsobující ztráty v železe a skluz  $s$ . Skluz představuje vzájemnou rychlost mezi točivým magnetickým polem a mechanickou rychlostí rotoru (8). Frekvence v rotoru  $f_2$  (9) je dána součinem skluzu se synchronní frekvencí  $f_1$ . [3]

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (7)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (8)$$

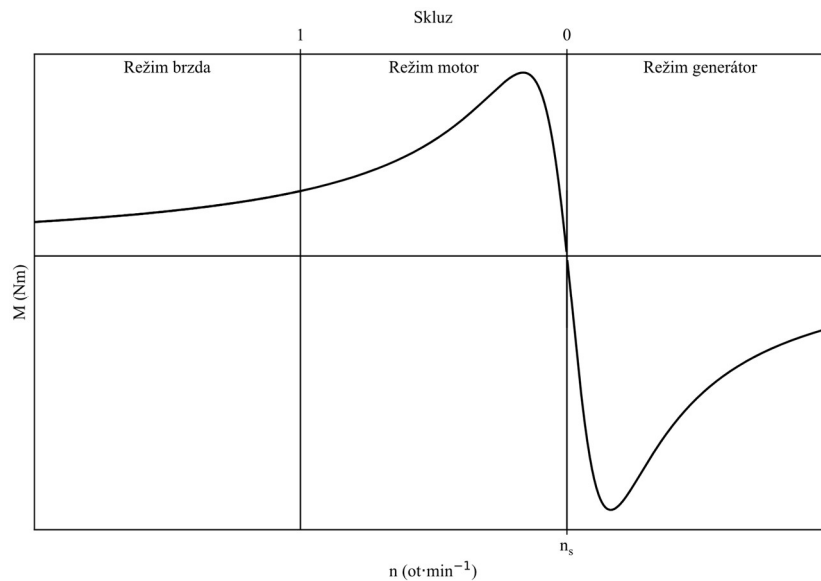
$$f_2 = s f_1 \quad (9)$$



Obr. 1 Náhradní schéma asynchronního stroje [3]

### 1.2.2 Statická momentová charakteristika asynchronního stroje

Momentová charakteristika (Obr. 2) je závislost mechanického momentu  $M$  stroje na otáčkách  $n$  (skluzu  $s$ ). Moment stroje se mění s kvadrátem napětí  $U$ . Charakteristika má tři části, které reprezentují jednotlivé provozní režimy asynchronního stroje, kterými jsou motor, brzda a generátor. Oblast motoru je v intervalu  $0 \leq n < n_s$ , ve které je rychlost menší než synchronní  $n_s$  a skluz je kladný. Oblast brzdy se nachází v intervalu  $-\infty < n < 0$ , ve které je skluz vyšší než 1. Nakonec oblast generátoru, která je v intervalu  $n_s \leq n < \infty$ , ve kterém je rychlost rotoru vyšší než synchronní rychlost točivého magnetického pole  $n_s$  a skluz je záporný. [3]



Obr. 2 Statická momentová charakteristika asynchronního stroje [3]

### 1.2.3 Asynchronní generátor

Jedná se o provozní režim asynchronního stroje, ve kterém je záporný skluz, který se s elektrickou zátěží zvyšuje. Konstrukčně je shodný s asynchronním motorem. K provozu asynchronního stroje jako generátoru je potřeba vnějšího zdroje, který vytvoří požadované magnetické pole. Vnější zdroj může být tvrdá síť anebo budič připojený ke satorovému vinutí. V režimu generátoru lze provozovat asynchronní stroj s rotorem nakrátko i s vinutým rotorem (Tab. 2). Asynchronní generátor může dodávat pouze činný výkon  $P_{el}$  v závislosti na rotorové (skluzové) frekvenci v nadsynchronních otáčkách. Nejvyššího činného výkonu lze dosáhnout v blízkosti synchronních otáček při co nejnižší skluzové frekvenci. K tomu je potřeba vhodně navržený mechanický zdroj. Příkladem použití asynchronního generátoru s vinutým rotorem by mohla být přečerpávací vodní elektrárna. [4], [5]

Tab. 2 Možnosti provozu jednotlivých konstrukčních typů asynchronního stroje v generátorickém režimu [4]

Typ stroje	Rychlost		Připojení na tvrdou síť	Ostrovní provoz	Frekvence		Napětí	
	Konstantní	Proměnná			Konstantní	Proměnná	Konstantní	Proměnné
Vinutý	×	✓	✓	×	✓	×	✓	×
Nakrátko	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Nepraktické ×				Možné ✓			

Asynchronní generátory se začaly uplatňovat v obnovitelných zdrojích elektrické energie, jako jsou např. malé vodní a větrné elektrárny do 500 kVA. Výhodou nad synchronními generátory jsou mj. nižší pořizovací cena, rozměry stroje, bezkartáčová konstrukce (klec nakrátko), snazší údržba atd. Asynchronní generátor je možné provozovat v ostrovním režimu, kde je velmi populární v systémech do 15 kW spolu s externím budičem, kde nejsou příliš přísné požadavky na konstantní napětí a frekvenci. V ostrovním provozu se vyskytuje tam, kde není možný přístup k tvrdé síti nebo v NN aplikacích. Mnoho ostrovních provozů (např. malých vodních a větrných elektráren) obsahuje výkonovou elektroniku, kvůli regulaci napětí a frekvence. K jeho provozu je nutný vnější zdroj mechanické energie, který stroj dostane do

nadsynchronních otáček. Dokáže tedy dodávat činný výkon  $P$ , ale jalový výkon  $Q$  stále odebírání. Ten je nutný pro magnetizaci stroje. Jejich účinnost se pohybuje okolo 75 % při plné zátěži a okolo 60 % při lehké zátěži. [6], [7]

Příkladem využití asynchronního generátoru provozovaného v ostrovním režimu je např. experimentální využití mořských vln pro generaci elektrické energie na východním pobřeží v Koreji. Oceány tvoří 70 % povrchu Země a energie, která je obsažená ve vodních vlnách, může mít vysoký potenciál pro generování elektrické energie. Příkladem je 60 kW prototyp elektrárny na moři jménem CHUJEON A, který je vyvíjen „*Korea Ocean Research and Development Institute*“. Elektrárna je vysoká 18,6 m s vnějším průměrem 13 m. Je ukotvená ke dnu mělkého moře. Skládá se ze vzduchové komory, z Wellových nízkotlakých větrných turbín a z ostrovně pracujícího asynchronního generátoru. Tento projekt zkoumá výšky vln v oblasti, rychlost větru a směr ve vzduchové komoře elektrárny, rychlost větrné turbíny, výstupní elektrický výkon, atd. Proud vzduchu ve vzduchové komoře vzniká díky rozdílu tlaku. [7]

Dalším příkladem použití asynchronního generátoru v ostrovním provozu jsou malé vodní elektrárny dle [2], které nemají regulaci turbíny a využívají šuntovací<sup>1</sup> elektrickou zátěž, aby bylo možné řídit frekvenci v této síti.

#### 1.2.4 Asynchronní generátor v ostrovním provozu

Asynchronnímu generátoru s rotorem nakrátko provozovanému v ostrovním provozu s externím budičem se říká samobuzený asynchronní generátor (Self-Excited Induction Generator – SEIG). Při jeho provozu jsou proměnné napětí, frekvence i výkon. Stroj tedy není jednoduché regulovat. Dále je v ostrovním provozu (OP) nevyhnutelné použití vnějšího budičového zařízení připojeného ke statoru stroje, které dodá potřebný jalový výkon pro nabuzení generátoru. [3], [4]

Při spouštění asynchronního generátoru je potřeba dosáhnout takové rychlosti, aby remanentní magnetismus v rotoru indukoval napětí do statorového vinutí. Je tedy potřeba mít vnější poháněcí mechanismus, aby bylo rotorem dostatečně rychle otáčeno. V případě připojeného budičového zařízení nebo i zátěže, začne statorovým vinutím protékat proud. To znamená, že i ve stavu naprázdno je zde stále přítomný proud ve statorovém vinutí. Jedná se o proces samobuzení, který byl popsán už v roce 1930. [3], [4]

Výstupní napětí a frekvence generátoru jsou dány rychlostí poháněcího stroje, parametry generátoru, velikostí kapacity budiče, charakterem a parametry elektrické zátěže. Se změnou elektrické zátěže se mění  $s \neq 0$ . Frekvence napětí statoru  $f_1$  se mění podle rovnice (10), která udává vztah mezi rychlostí stroje  $n$ , jeho počtem pólových dvojic  $p_p$  a zátěží  $s$ . Pokud je stroj v chodu naprázdno, tak platí rovnice (11). Výstupní napětí generátoru a frekvence jsou v případě SEIG úzce spjaté. [2], [4]

---

<sup>1</sup> Pojmem „šuntovací“ zátěž je myšlena elektrická zátěž, na které dochází k mrhání elektrické energie.

$$f_1 = \frac{np_p}{60(1 + |s|)} \quad (10)$$

$$f_1 = \frac{np_p}{60} \quad (11)$$

Ilustrujme změnu frekvence na příkladu podle [4]. Jedná se o asynchronní stroj se dvěma póly, jmenovitým výkonem  $P_n = 7,36$  kW a jmenovitým napětím  $U_{1n} = 300$  V ve spojení do hvězdy. Připojením činné zátěže  $R = 40 \Omega$ , kleslo výstupní napětí ze 171,4 V na 166,74 V. Zvolená frekvence byla 58,33 Hz. Pro udržení zvolené frekvence bylo potřeba zvýšit otáčky hnacího zařízení z  $3500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  na  $3540,75 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Výstupní výkon generátoru byl po připnutí zátěže  $P = 2,181$  kW, což je menší než jmenovitý výkon stroje. Z toho plyne, že v tomto případě se změnou zátěže došlo ke změně otáček  $n$ , aby byla dosažena pokud možno stejná frekvence  $f_1$ . Pokud se změnou zátěže nedojde ke změně otáček, tak klesne frekvence i indukované napětí.

Na změnu frekvence asynchronního generátoru má také vliv pohybová rovnice (12). Jedná se o rozdíl mechanického momentu hnacího zařízení  $M_{\text{mech}}$  a momentu elektrické zátěže  $M_{\text{el}}$ . Pohybovou rovnici je možné přepsat do tvaru (13), ve kterém platí  $P = M \cdot \Omega$ . Z upravené pohybové rovnice plyne, že frekvence v síti závisí nepřímo úměrně na momentu setrvačnosti soustavy  $J$ . Ve tvrdé síti je celkový moment setrvačnosti reprezentován všemi připojenými generátory a frekvence nekolísá tak značně, jako je tomu v ostrovním provozu, kde je generátorů znatelně méně. Pokud platí nerovnost  $P_{\text{mech}} \neq P_{\text{el}}$ , tak se mění okamžitá rychlost rotoru. Se zvyšujícím se odběrem  $P_{\text{el}}$  se ale změny frekvence většinou pohybují v rozmezí 5 %, což je způsobeno strmostí momentové charakteristiky v pracovní oblasti. Pokud tedy máme stav  $P_{\text{mech}} = P_{\text{el}}$ , tak je vše v pořádku a otáčky  $n$  jsou konstantní. Pokud však dojde ke stavu, ve kterém platí  $P_{\text{el}} < P_{\text{mech}}$ , tak dojde k urychlování stroje, otáčky se zvyšují a s nimi i frekvence, což způsobí nárůst napětí. Otáčky se budou zvyšovat až do ustáleného stavu, tedy  $P_{\text{mech}} = P_{\text{el}}$ . Opačně, pokud nastane situace  $P_{\text{mech}} < P_{\text{el}}$ , tak dojde k poklesu otáček a frekvence, což způsobí i pokles napětí. Otáčky se budou snižovat, dokud nenastane ustálený stav  $P_{\text{mech}} = P_{\text{el}}$ . Pokud by došlo k přetížení stroje a napětí kleslo pod určitou hranici, tak se sníží jalový výkon a může dojít k demagnetizaci stroje. To by způsobilo pokles napětí v ostrovním provozu na nulu. Pro obnovení rovnosti mezi spotřebovaným elektrickým výkonem  $P_{\text{el}}$  a dodaným mechanickým výkonem  $P_{\text{mech}}$  je možné použít regulátor turbíny. [2], [3]

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_{\text{mech}} - M_{\text{el}} \quad (12)$$

$$J\Omega \frac{d\Omega}{dt} = P_{\text{mech}} - P_{\text{el}} \quad (13)$$

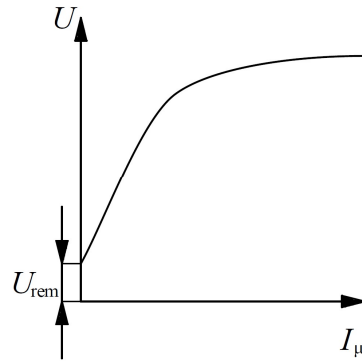


## 2 Proces samobuzení generátoru v OP

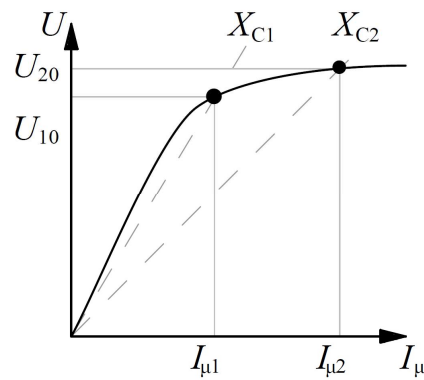
Asynchronní generátor potřebuje zdroj jalového výkonu, aby dokázal správně fungovat. Tento zdroj je potřeba k vybuzení magnetického pole. V tvrdé síti si jalový výkon odebere ze sítě, ale v OP je potřeba vnějšího zdroje jalového výkonu. Velikost kapacity budicího zařízení závisí na okamžité hodnotě proudu zátěže a na magnetizační křivce stroje. Asynchronní generátor tedy může dodávat činný výkon, ale jalový výkon, bez ohledu na pracovní režim stroje, odebírá stále. [7]

### 2.1 Samobuzení

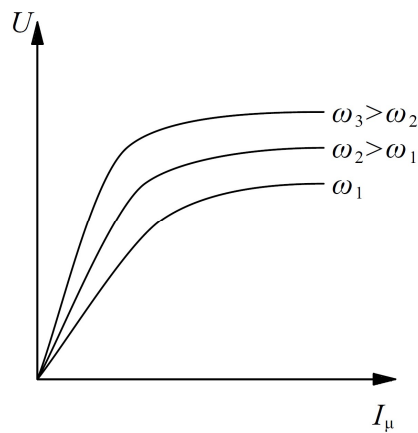
Pro nabuzení asynchronního generátoru je nejprve nutné znát průběh jeho magnetizační křivky. Magnetizační křivku je možné proměřit v motorickém režimu stroje v chodu naprázdno jako závislost napětí statoru  $U_1$  na magnetizačním proudu  $I_\mu$ . Magnetizační charakteristika souvisí s kvalitou provedení asynchronního stroje. Charakteristika nevychází z nuly kvůli zbytkovému magnetizmu (Obr. 3), který je pro samobuzení klíčový. Vzhledem k zjednodušení je ale možné se v literatuře většinou setkat s magnetizační charakteristikou posunutou do počátku (Obr. 4), protože remanentní magnetizmus bývá velmi malý. Pokud známe průběh magnetizační charakteristiky, potom můžeme najít budicí zařízení s vhodnou velikostí kapacity  $C$ . Se změnou kapacity se mění sklon přímky (Obr. 4) kapacitní reaktance  $X_C$  (14) podle vztahu (15). Pokud uvažujeme konstantní frekvenci, tak se sklon přímky mění pouze v závislosti na kapacitě. S klesající kapacitou se podíl (14) zvětšuje a směrnice přímky roste. Rostoucí směrnici přímky odpovídá průsečík s  $X_{C1}$  (Obr. 4). V opačném případě, pokud se kapacita zvyšuje, podíl (14) se snižuje a směrnice přímky klesá. Poklesu směrnice přímky odpovídá na (Obr. 4) kapacitní reaktance  $X_{C2}$ . Průsečík magnetizační křivky a přímky  $X_C$  udává napětí naprázdno a velikost magnetizačního proudu, který stroj potřebuje, aby tohoto napětí dosáhl. Je vhodné zvolit takovou velikost kapacity, aby stroj pracoval při jmenovitém napětí. Vzhledem k velikosti kapacity jsou možné dva extrémy. Příliš velkou kapacitou můžeme stroj poškodit velkým proudem. Naopak, pokud bude kapacita natolik malá, že bude tvořit směrnici přímky k magnetizační charakteristice, tak stroj bude pracovat nestabilně, jelikož možných průsečíků bude nekonečně mnoho. V případě, že by byla kapacita extrémně malá, k průsečíku s magnetizační charakteristikou by nedošlo a stroj by se nenabudil. Se zvyšující se rychlostí generátoru se zvyšuje frekvence indukovaného napětí v ostrovním provozu při konstantní zátěži, to způsobí posun magnetizační charakteristiky směrem nahoru (Obr. 5) a zmenšení směrnice přímky  $X_C$ , tím se posune jejich vzájemný průsečík, napětí na svorkách generátoru se zvýší a odebíraný magnetizační proud se sníží. [4], [7]



Obr. 3 Magnetizační charakteristika s uvažáním remanentního magnetizmu [7]



Obr. 4 Magnetizační charakteristika posunutá do počátku souřadnic spolu s průsečíky  $X_c$  [7]



Obr. 5 Posuv magnetizační charakteristiky v závislosti na změně frekvence [2]

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (14)$$

$$U_1 = X_C I_\mu \quad (15)$$

Proces samobuzení začíná remanentním napětím v rotoru, bez kterého se generátor nenabudí. Otáčením rotoru se indukuje díky remanentnímu magnetizmu do statorového vinutí

napětí, které se současně objeví i na svorkách budicího zařízení. Napětí na budicím zařízení vytvoří kapacitní proud  $I_C$ , díky kterému se zesílí magnetické pole stroje a dojde ke zvýšení napětí. Takto proces pokračuje až do nasycení stroje. Jedná se v podstatě o  $L-C$  obvod, ve kterém dojde k oscilaci, která je ukončena nasycením stroje. Napětí narůstá až do průsečíku magnetizační charakteristiky s  $X_C$  charakteristikou. [7], [8]

V případě ztráty zbytkového magnetizmu stroje je zbytkový magnetizmus potřeba obnovit. Jedním z možných způsobů je nechat stroj běžet v motorickém chodu naprázdno ve vysokých otáčkách. Dalším způsobem je pustit proudový impuls do statorového vinutí. [7]

## 2.2 Určení velikosti kapacity budicího zařízení

Volba vnějšího budiče s určitou kapacitou závisí na parametrech stroje. Mezi tyto parametry patří magnetizační charakteristika, rychlost rotoru, impedance zátěže, atd. Určení správné velikosti kapacity je klíčové pro správnou funkci SEIG. [9]

Jeden ze způsobů byl již zmíněn. Kapacitu budicího zařízení je možné určit z průsečíku magnetizační charakteristiky, měřené při konstantní velikosti otáček bez zátěže, a průběhu kapacitní reaktance. Je vhodné zvolit takovou velikost kapacity, aby bylo na svorkách generátoru jeho jmenovité napětí. Napětí odpovídá magnetizační proud, který musí budicí zařízení stroji dodat. Je ovšem důležité dávat pozor, aby magnetizační proud nebyl vyšší, než je jmenovitý proud stroje, který nesmí být překročen, jinak by mohlo dojít k jeho poškození. Budicí zařízení vytvoří jalový výkon o velikosti (16). Volbou vhodné rychlosti poháněcího zařízení a velikostí kapacity budicího zařízení se zaručí správné samobuzení stroje. Magnetizační charakteristika, jak již bylo zmíněno, se posouvá v závislosti na otáčkách stroje, tedy se změnou frekvence. V případě, že by pracovní bod, tedy průsečík obou charakteristik, odpovídal příliš velkému magnetizačnímu proudu, bylo by možné vhodnou změnou otáček nastavit jiný průsečík s menší velikostí magnetizačního proudu. [3]

$$Q = U_1 I_C = U_1^2 \omega C \quad (16)$$

Pokud máme k dispozici naměřené hodnoty magnetizační charakteristiky pro stroj (Tab. 3), které jsou v Tab. 4, je možné z naměřeného magnetizačního proudu  $I_\mu$  a napětí na statoru stroje  $U_1$  dle [7] určit koeficienty  $K_1$ ,  $K_2$  a  $K_3$  do odvozené prokladové rovnice (17). Kde  $F$  je poměrná frekvence, která se rovná podílu  $F = f / f_b$ , kde  $f$  je skutečná frekvence a  $f_b$  je základní vztažná frekvence. V případě chodu naprázdno je poměr roven jedné. Pokud bychom měli k dispozici zmíněné koeficienty, které pro tento konkrétní stroj jsou  $K_1 = 425,05$ ,  $K_2 = -4,0455$  a  $K_3 = 398,33$ , bylo by možné v závislosti na magnetizačním proudu dopočítat napětí na statoru stroje  $U_1$  (Tab. 5). Poté by bylo možné vypočítat magnetizační reaktanci  $X_\mu$  (Tab. 5) podle (18). Z magnetizační reaktance můžeme ze vztahu (19) dopočítat vzájemnou indukčnost  $M$  (Tab. 5). Tím získáme aproximační funkci, která je potřeba pro simulaci modelu (Obr. 6). K průběhu magnetizační charakteristiky následně najdeme průsečík s průběhem kapacitní reaktance  $X_C$ . Vhodnou velikost kapacity zvolíme tak, aby směrnice přímky protнула magnetizační charakteristiku (Obr. 7). Průsečíku potom odpovídá magnetizační proud  $I_\mu = I_C$ , který protéká státorem stroje ve stavu naprázdno, a napětí na statoru  $U_1$ . Parametry jsem pro možnost

uskutečnění experimentální simulace našel v bloku asynchronního motoru knihovny Simscape programu Simulink (Tab. 6). Velikost kapacity jsem zvolil  $C = 5 \mu\text{F}$ . Průběh okamžité hodnoty napětí a proudu v závislosti na čase lze vidět v simulaci (Obr. 8). Výsledky modelu se ale neshodují s odpovídajícím napětím a proudem v magnetizační charakteristice, je zde určitá nuance. Výše uvedený postup je z [7], vyjma simulace a hledání průsečíku, to jsem provedl nezávisle na zdroji. Z průběhů napětí a proudu vidíme, že při této malé velikosti kapacity budiče došlo k nabuzení stroje až v čase  $t = 150 \text{ s}$ .

$$U_1 = I_\mu F \left( K_1 e^{K_2 I_\mu^2} + K_3 \right) \quad (17)$$

$$X_\mu = F \left( K_1 e^{K_2 I_\mu^2} + K_3 \right) \quad (18)$$

$$X_\mu = \omega M \quad (19)$$

Tab. 3 Štítkové hodnoty stroje [7]

Štítkové hodnoty	
Výkon	10 hp
$\Delta/Y$	220 / 380 V
$\Delta/Y$	26 / 15 A
Frekvence	60 Hz
Otáčky	1765 ot·min <sup>-1</sup>

Tab. 4 Naměřené hodnoty [7]

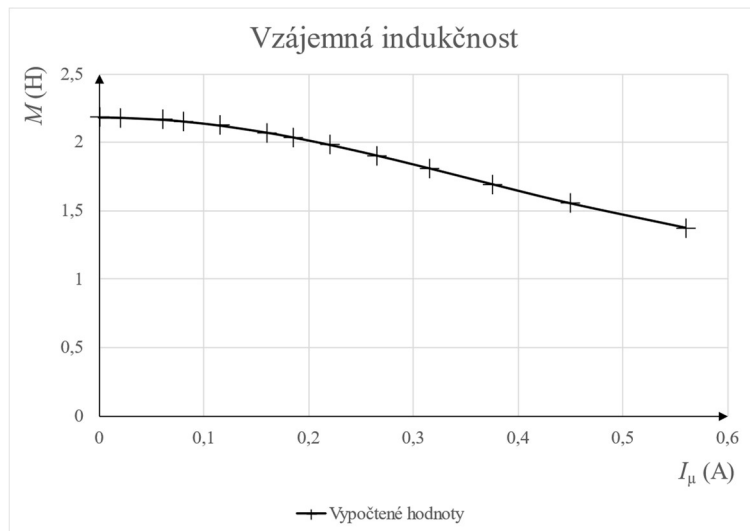
Naměřené hodnoty	
$I_\mu$ (A)	$U_1$ (V)
0	0
0,02	15
0,06	45
0,08	65
0,115	90
0,16	115
0,185	140
0,22	165
0,265	190
0,315	215
0,375	240
0,45	265
0,56	290

Tab. 5 Vypočtené hodnoty [7]

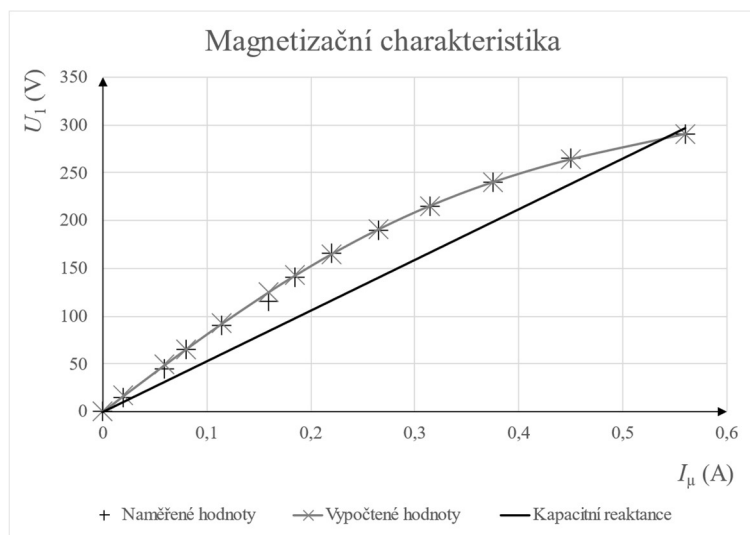
Vypočtené hodnoty			
	$U_1$ (V)	$X_\mu$ ( $\Omega$ )	$M$ (H)
0	0	823,38	2,18
0,02	16,45	822,69	2,18
0,06	49,03	817,23	2,17
0,08	65	812,52	2,16
0,115	92,14	801,24	2,13
0,16	125,05	781,56	2,07
0,185	142,16	768,42	2,04
0,22	164,51	747,8	1,98
0,265	190,34	718,26	1,91
0,315	215,10	682,85	1,81
0,375	239,61	638,97	1,69
0,45	263,56	585,68	1,55
0,56	290	517,86	1,37

Tab. 6 Parametry z bloku asynchronního stroje v Matlabu

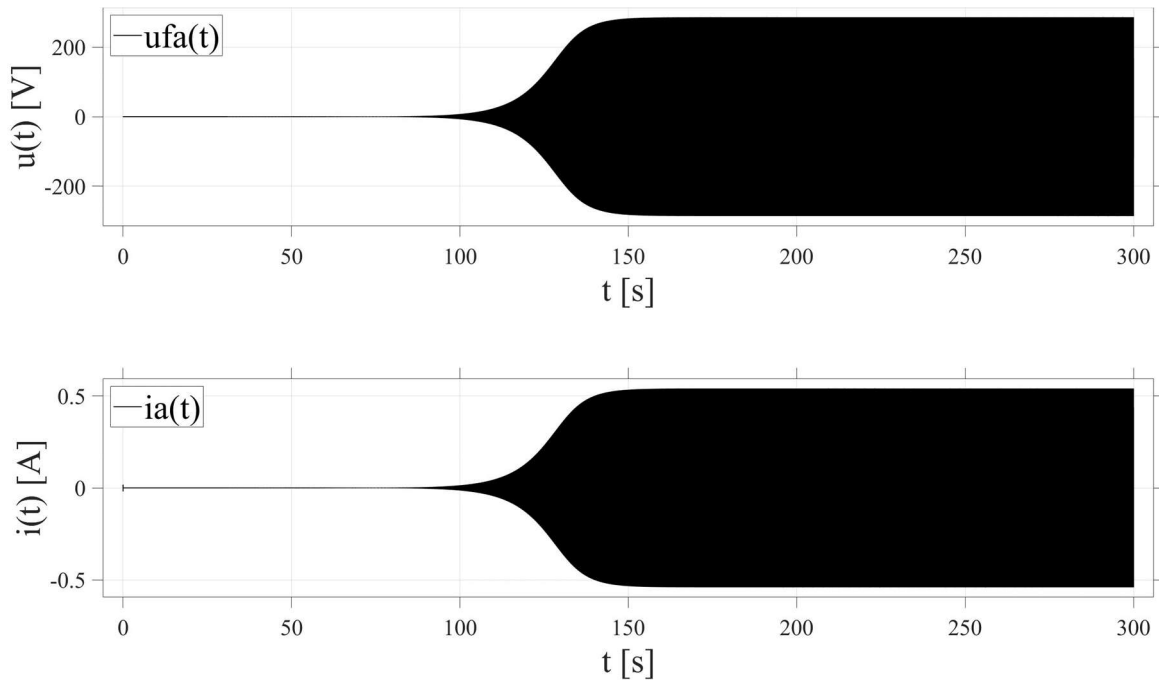
Matlab parametry	
$R_1$ ( $\Omega$ )	0,6837
$R'_2$ ( $\Omega$ )	0,451
$L_1$ (H)	0,004152
$L'_2$ (H)	0,004152
$M$ (H)	0,1486



Obr. 6 Průběh vzájemné indukčnosti [7]



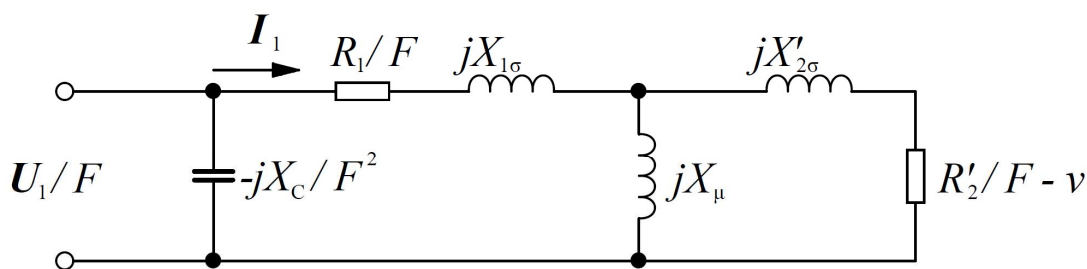
Obr. 7 Průběh magnetizační charakteristiky a průsečík s kapacitní reaktancí [7]



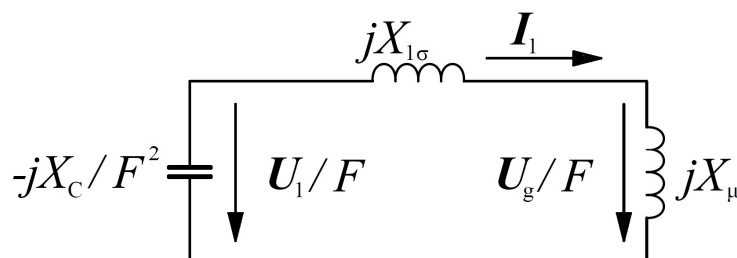
Obr. 8 Průběh fázového napětí a proudu – grafická metoda

Velikost kapacity budicího zařízení je ale možné zjistit i početně. Jedním ze způsobů je početní metoda, která uvažuje asynchronní generátor naprázdno v ostrovním režimu. Tato metoda vychází z rezonančního  $L$ - $C$  obvodu, který tvoří stroj spolu s vnějším budičem, a magnetizační křivky stroje. Magnetizační křivka stroje je potřebná k určení magnetizační reaktance stroje  $X_\mu$ . Metody výpočtu kapacity většinou vychází z ustáleného stavu, kterému odpovídá schéma na Obr. 1. Tato metoda výpočtu také využívá pro odvození náhradní schéma ustáleného stavu asynchronního stroje, ale na rozdíl od Obr. 1 je Obr. 9 v poměrných jednotkách a jsou zanedbány ztráty v železe. Dále je zde navíc kondenzátor, který reprezentuje budič, jedná se tak o náhradní schéma pro SEIG. Při odvození je uvažován asynchronní stroj s klecí nakrátko. Poměrná frekvence se zavádí kvůli reaktancím, které jsou uvedeny ve frekvenci  $f_b$ . Rotorové napětí  $U'_2$  je nulové. Jedná se tak o náhradní schéma SEIG, ve kterém  $v = n / n_s$  je poměrná rychlost vyjadřující poměr skutečné rychlosti  $n$  a synchronní rychlosti  $n_s$  při jmenovité frekvenci. Vynásobením všech prvků stroje a napětí náhradního schématu poměrnou frekvencí  $1 / F$  obdržíme náhradní schéma, které je vztažené k základní frekvenci  $f_b$ . Pokud tedy uvažujeme chod naprázdno, je skluz  $s \approx 0$  a poměrná frekvence  $F \approx v$ , můžeme potom zjednodušit náhradní schéma. Je možné zanedbat část rotoru přepočítaného na stator a ztráty ve vinutí na statoru  $R_1$ , tím vznikne schéma na Obr. 10. Napětí  $U_g$  v náhradním schématu reprezentuje indukované napětí. Výsledným zapojením je rezonanční  $L$ - $C$  obvod a platí rovnost reaktancí (20). Magnetizační reaktance  $X_\mu$  je proměnná a závislá na magnetickém toku ve vzduchové mezeře stroje, který závisí na napětí ve vzduchové mezeře vztaženému k poměrné frekvenci  $U_g / F$ . Indukované napětí se dále aproximuje a pomocí dalších úprav se dostaneme k finální podobě rovnic. Pro známé statorové napětí  $U_1$  a  $F (\approx v)$  je možné určit magnetizační reaktanci stroje. Určení magnetizační reaktance stroje je tedy experimentální. Velikost kapacity

C je možné určit ze vztahu (20) dosazením za kapacitní reaktanci  $X_C$  a úpravou na vztah (21). S vyšší kapacitou je možné dosáhnout ustáleného stavu SEIG dříve. [9]



Obr. 9 Upravené náhradní schéma asynchronního stroje pro SEIG [9]



Obr. 10 Zjednodušené náhradní schéma SEIG [9]

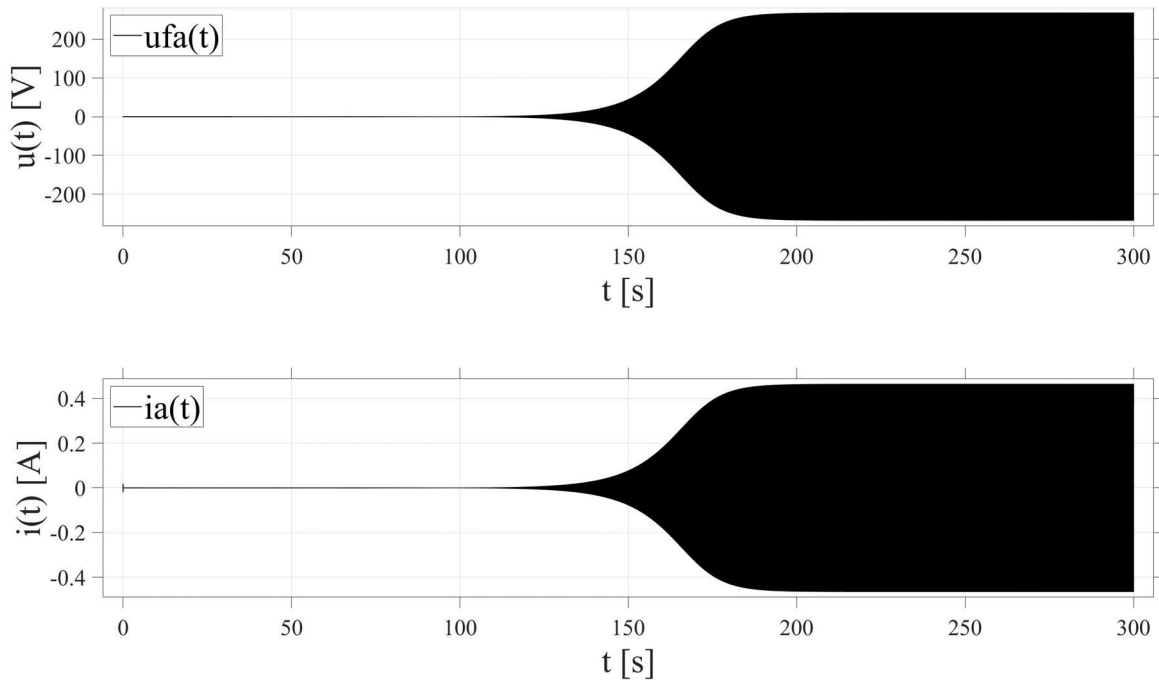
$$\frac{X_C}{F^2} = (X_{1\sigma} + X_{\mu}) \quad (20)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_b F^2 (X_{1\sigma} + X_{\mu})} \quad (21)$$

Uvedený postup výpočtu platí pouze pro chod naprázdno, který byl experimentálně ověřen a porovnám se skutečností. Naměřené a vypočtené hodnoty se téměř shodovaly. Způsob podobného výpočtu pro zatížení, se dle [9] ještě zkoumá. Dále se v [9] uvádějí další možnosti výpočtu, které nejsou zdaleka tak jednoduché, jako je právě tento způsob, který se úspěšně vyhnul použití komplexních čísel a optimalizačním metodám.

Pro zajímavost ještě můžeme (21) použít pro výpočet kapacity pro stroj s parametry v Tab. 3. Vypočtená velikost budící kapacity je  $C = 4,6 \mu F$  (22). Pro zajímavost jsem opět provedl simulaci pro daný stroj, tentokrát ale s vypočtenou kapacitou. Z Obr. 11 vidíme, že došlo k úspěšnému nabuzení, metoda výpočtu byla funkční. K nabuzení došlo vlivem menší kapacity později než v případě minulém, průběhy se ustálily okolo času  $t = 200$  s.

$$C = \frac{1}{2\pi 60(1,56 + 56)} = 4,6 \mu F \quad (22)$$



Obr. 11 Průběh fázového napětí a proudu – početní metoda

### 2.3 Zapojení kondenzátorů do hvězdy a do trojúhelníka

Kondenzátory je možné spojovat do hvězdy i trojúhelníka ve třífázové soustavě. V případě spojení do trojúhelníka je napětí na kondenzátorech sdružené. To umožní získat vyšší jalový výkon při menší velikosti kapacity než v případě spojení do hvězdy. Ve hvězdě je napětí na kondenzátorech fázové. S větší kapacitou je možné získat vyšší jalový výkon, a tedy vyšší napětí na svorkách generátoru. V případě spojení kondenzátorů do hvězdy je potřeba třikrát větší kapacita než v případě spojení do trojúhelníka (23), ve kterém platí rovnost  $U_s = U_f$ , což vychází z rovnosti mezi těmito dvěma variantami spojení (24). [10]

$$\omega 3C_{\Delta} = \omega C_Y \quad (23)$$

$$\omega C_Y \left( \frac{U_s}{\sqrt{3}} \right)^2 = \omega C_{\Delta} U_s^2 \quad (24)$$

### 2.4 Vliv zátěže na provoz SEIG v OP

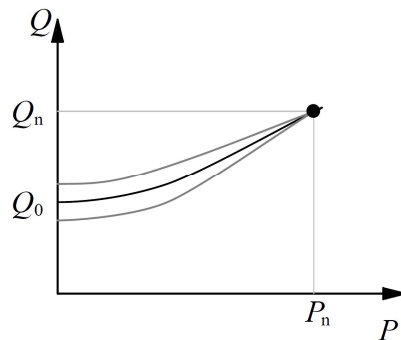
Se změnou zátěže je spjata změna výstupního napětí a frekvence SEIG. Jalový výkon, který dodává budicí zařízení, je dle vztahu (16) závislý na kvadrátu napětí. To znamená, že se změnami zátěže dochází ke značné změně jalového výkonu. To platí i opačně, tedy při změně jalového výkonu se změní napětí. Budicí zařízení musí být stále přítomné. Musí být připojené ke svorkám stroje. [3]

#### 2.4.1 Odporová zátěž R

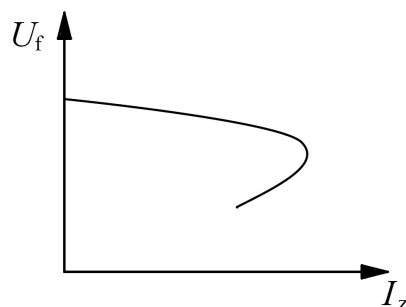
Se změnou velikosti činné zátěže se mění elektrický výkon, který je potřeba zátěži dodat. Tyto změny mají za následek změnu napětí. S vyšší spotřebou činného výkonu dojde ke



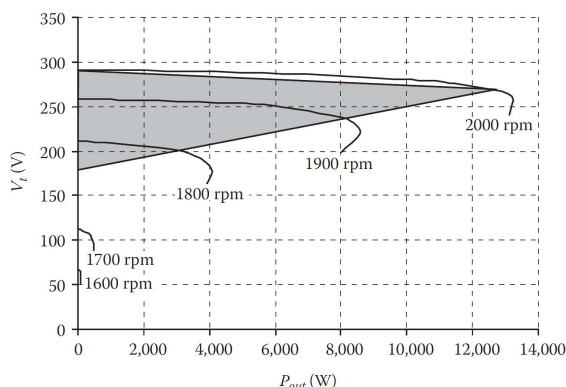
kolísání frekvence a napětí dle vztahu (13). Dále dojde ke zvýšení odběru jalového výkonu. Uvedený graf (Obr. 12) je pro asynchronní generátor pracující ve tvrdé síti, ale totéž platí i pro SEIG.  $P_N$  a  $Q_N$  jsou jmenovité výkony asynchronního generátoru a  $Q_0$  je potřebný jalový výkon pro nabuzení stroje naprázdno. Z grafu je patrné, že s rostoucí spotřebou činného výkonu je potřeba dodat asynchronnímu generátoru vyšší jalový výkon, aby bylo možné udržet, pokud možno, konstantní velikost napětí v OP. To i z hlediska pohybové rovnice, kde  $P_{el} > P_{mech}$ , dává smysl, protože dojde ke snížení otáček. Tím dojde ke snížení frekvence, magnetizační charakteristika se posune směrem dolů a vzhledem k poklesu frekvence se změní i směrnice přímkou  $X_C$ . To znamená změnu průsečíku charakteristik, tedy změnu napětí na svorkách stroje a odebíraného magnetizačního proudu. V případě, že by se zvýšením zátěže nedošlo ke zvýšení dodaného jalového výkonu budičem, bude magnetizační proud, který je dodáváný budičím zařízením, menší než proud potřebný pro udržení stabilního napětí. Pokles napětí odpovídá dodanému magnetizačnímu proudu, jak je vidět v průsečíku magnetizační charakteristiky s charakteristikou kapacitní reaktance. Pokud uvažíme konstantní velikost kapacity budičeho zařízení a konstantní velikost otáček, potom vypadá závislost výstupního fázového napětí na zátěži dle Obr. 13. V grafu je vidět, že s rostoucí odporovou zátěží se napětí na výstupu generátoru za výše uvedených podmínek snižuje. Na paměti je stále nutné mít pohybovou rovnici, ve které se zátěží dochází ke změně  $P_{el}$  (13). Ve zdroji [7] jsou zatěžovací charakteristiky stroje o výkonu 7,5 kW (Obr. 14). Z těch je možné vidět, že s rostoucími otáčkami hnacího zařízení, se maximální dosažitelné napětí zvyšuje. Šedivý trojúhelník reprezentuje bezpečnou pracovní oblast. [3], [7]



Obr. 12 Závislost spotřeby jalového výkonu stroje na zátěži [3]



Obr. 13 Závislost fázového napětí na zátěži SEIG s pasivním budičem [3]



Obr. 14 Zatěžovací charakteristiky při změně otáček [7]

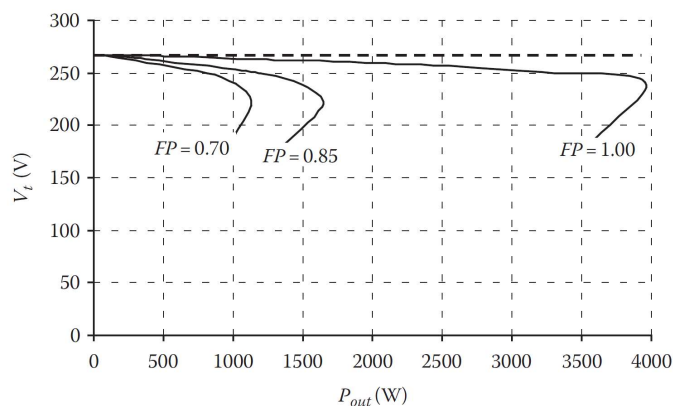
### 2.4.2 Induktivní zátěž L

Induktivní zátěž, stejně jako asynchronní generátor, potřebuje jalový výkon. To znamená, že induktivní zátěž bude odebírat asynchronnímu generátoru určitou velikost magnetizačního proudu. To vede ke snížení dodaného jalového výkonu generátoru a k poklesu napětí na jeho svorkách. Připojením induktivní zátěže dojde také k nerovnováze pohybové rovnice (13). Navíc dojde ke zmenšení efektivní velikosti kapacity budiče dle vztahu (25), kde  $R$  je odporová složka elektrické zátěže,  $L$  je induktivní složka,  $C$  kapacita budiče a  $\omega$  je elektrická úhlová rychlost. Pokud je velikost indukčnosti zátěže zanedbatelně malá, tak na změnu efektivní kapacity nemá vliv. Pokud je však velikost indukčnosti zátěže vyšší, může dojít k odbuzení stroje. Se změnami efektivní kapacity dochází ke změnám směrnice přímky  $X_C$ . Odebíraný  $P_{el}$  se opět změní. Se snížením napětí, jako následek poklesu jalového výkonu, dojde ke snížení  $P_{el}$  a otáčky stroje se budou zvyšovat, dokud nedojde k rovnováze  $P_{mech} = P_{el}$ . [3], [7]

$$C_{ef} = C - \frac{L}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (25)$$

### 2.4.3 Odporově induktivní zátěž RL

Pokud není zátěž čistě činná a její účinník neodpovídá jedné, vede to k většímu odběru jalového výkonu, se kterým se účinník snižuje. Na zatěžovací charakteristice se to projeví dřívějším kolapsem napětí na svorkách stroje (Obr. 15). Pokud zátěž odebírá jalový výkon, následkem je menší pracovní interval. Pokud bychom však měli k dispozici regulátor, bylo by možné řídit spotřebu zátěže takovým způsobem, aby napětí ani frekvence v závislosti na velikosti odběru činného výkonu nekolísaly. Tím by se problém omezil pouze na kompenzaci jalového výkonu. [3], [7]



Obr. 15 Průběh zatěžovacích charakteristik<sup>2</sup> v závislosti na změně účinníku [7]

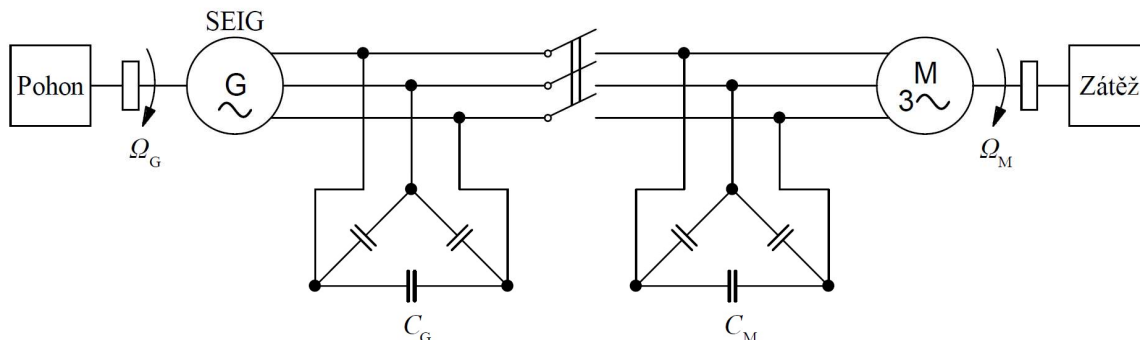
#### 2.4.4 Asynchronní motor jako zátěž

Jedná se o nejnáročnější typ zátěže v OP asynchronního generátoru. Příkladem by mohlo být typické zahradní čerpadlo. SEIG nemůže sám o sobě napájet asynchronní motor bez speciální úpravy. Je to kvůli velkému nárazovému proudu, který může být např. až šestinásobek jmenovitého proudu stroje, a kvůli spotřebě jalového výkonu při spouštění asynchronního motoru. Tento pokles jalového výkonu způsobí pokles napětí na svorkách SEIG. Asynchronní motor je odporově induktivní zátěž, dojde tedy ke snížení  $C_{ef}$ , ke změně průsečíku charakteristik a ke změně velikosti dodávaného magnetizačního proudu generátoru. [3], [7]

Řešením by bylo budicí zařízení, které by pokrylo spotřebu jalového výkonu obou strojů. Výhodné by bylo velikost kapacity regulovat. Pokud by došlo k odpojení asynchronního motoru od SEIG, došlo by k prudkému nárůstu magnetizačního proudu generátoru z důvodu přítomnosti vysoké kapacity. [4]

Podle [4] je však možné použít jednoduché řešení. Řešení spočívá v tom, že by každý stroj měl k sobě připojené své vlastní paralelní budicí zařízení, které by dodalo požadovaný jalový výkon. Na Obr. 16 to jsou zařízení s kapacitou  $C_G$  a  $C_M$ . Postup je takový, že by se nejprve rozeběhl SEIG. Tím by došlo k jeho nabuzení na jmenovité napětí, čehož je možné dosáhnout právě správnou volbou  $C_G$  v závislosti na průsečíku s magnetizační charakteristikou stroje. Otáčky stroje by byly konstantní. Po rozběhu generátoru by došlo k připojení asynchronního motoru spolu s jeho budičem  $C_M$ . Motor by se ustálil v okamžiku, kdy by se jeho moment rovnal případnému momentu zátěže působícího na jeho hřídel.

<sup>2</sup> Jedná se o stroj z kapitoly 2.2, ke kterému jsem hledal vhodnou velikost kapacity.

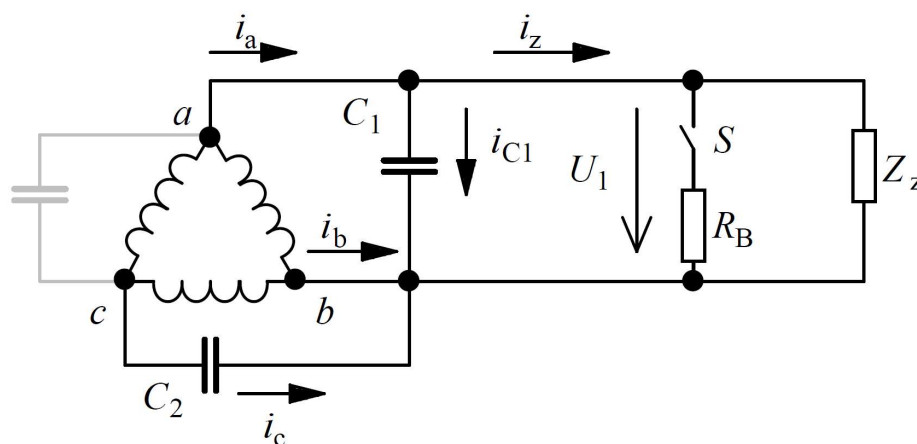


Obr. 16 Spojení SEIG s třífázovým asynchronním motorem [4]

Pro bezpečný rozběh je doporučeno, aby činný výkon SEIG byl alespoň v poměru s asynchronním motorem 1:0,6, jak uvádí [4]. Pokud mám tedy SEIG o výkonu 7,5 kW, asynchronní motor by měl mít maximální výkon 4,5 kW.

#### 2.4.5 Jednofázová zátěž na třífázovém SEIG

Třífázový SEIG je možné provozovat jako jednofázový generátor. Na Obr. 17 je spotřebič o impedanci  $Z_z$ , ke kterému je paralelně připojena elektrická šuntovací zátěž  $R_B$ . Úkolem této zátěže je udržet konstantní velikost elektrické zátěže. Je vhodné velikost elektrické šuntovací zátěže při proměnné impedanci elektrické zátěže  $Z_z$  měnit. S tímto způsobem zátěže SEIG je možné se setkat v odlehlých oblastech s malým vodním tokem, ve kterých je SEIG součástí malé vodní elektrárny. Tento typ provozu je však velmi limitován a omezen pouze na určité odporové zátěže. Aby byl provoz zátěže udržován na určité kvalitě dodávky elektrické energie, musí platit fázorové rovnosti (26), (27), (28) a úhel  $\varphi = 60^\circ$ . Zapojením  $C_2$  podle obrázku mezi body  $b$  a  $c$  se zaručí kolmost  $i_c$  na  $U_{bc}$ . To lze vidět ve fázorovém diagramu na Obr. 18. Pokud by se  $C_2$  zapojil mezi body  $a$  a  $c$  (na obrázku šedivě), došlo by k nesymetrické zátěži generátoru. Ve fázorovém diagramu by byla velikost  $i_a$  dvakrát větší než velikost  $i_b$  a  $i_c$ . To může způsobit větší oteplení vinutí stroje. Velikost kondenzátoru by měla být  $C_2 = 2C_1$ , aby byl provoz vyvážený. [7]

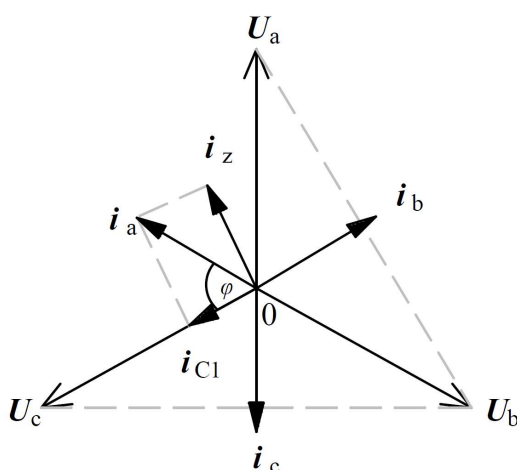


Obr. 17 Zapojení jednofázové zátěže na třífázový SEIG [7]

$$i_a = i_z + i_{C1} \quad (26)$$

$$i_b = -(i_a + i_c) \quad (27)$$

$$\|i_a\| = \|i_c\| \quad (28)$$

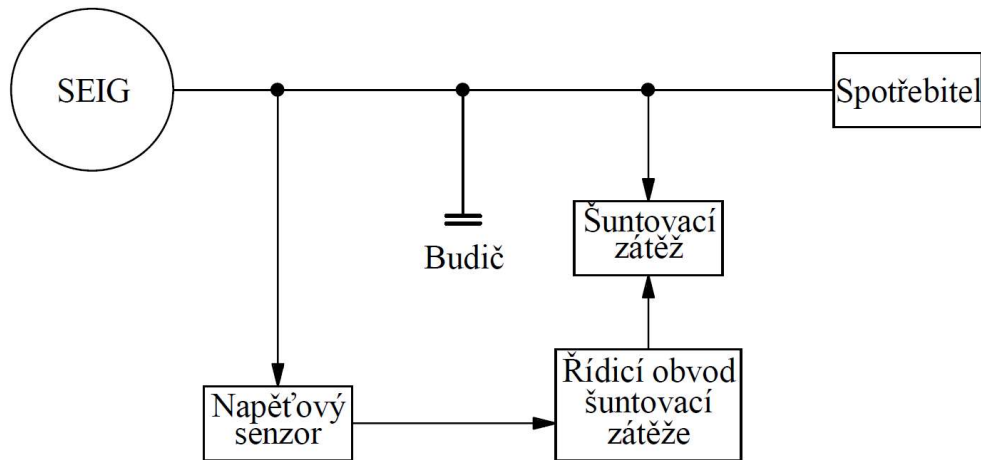


Obr. 18 Fázorový diagram pro jednofázové zatížení třífázového SEIG [7]

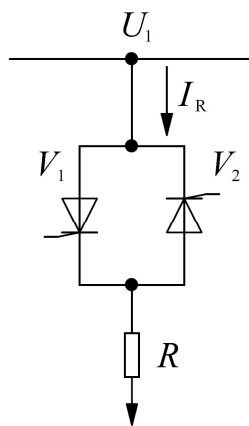
#### 2.4.6 Realizace jednofázové zátěže SEIG v praxi

U malých vodních elektráren (Obr. 19) s malým vodním tokem se nereguluje rychlost asynchronního generátoru. Následkem je možné kolísání napětí a frekvence. V případě velmi malé elektrické zátěže by se turbína mohla urychlit do průběžných otáček, což je nežádoucí stav. Řešením může být právě šuntovací elektrická zátěž  $R_B$ , která je paralelně připojená ke spotřebiči  $Z_z$ . Tím je možné udržet kolísání napětí a frekvence v určitém limitu. K regulaci šuntovací elektrické zátěže se používá napěťový snímač. Realizace šuntovací zátěže může být např. z antiparalelně zapojených tyristorů v sérii s odporovou zátěží (Obr. 20). Velikostí řídicího úhlu  $\alpha$  je možné řídit výkon na elektrické šuntovací zátěži. Nevýhodou je, že s rostoucím řídicím úhlem, tedy otevíráním tyristorů, dochází k vyšší spotřebě jalového výkonu napěťovým střídavým měničem. Tím dojde ovšem k poklesu napětí na generátoru. Paralelně lze připojit více odporových zátěží v sérii s antiparalelně spojenými tyristory. Jedná se však o nespojitě řízení, které lze potlačit vhodnou binární volbou velikosti odporových zátěží tj.  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 2 \cdot R$  a  $R_3 = 4 \cdot R$  (Obr. 21). Takto by bylo možné pomocí tří různých odporových zátěží řídit velikost zátěže od nuly do  $7 \cdot R$  s krokem  $R$ . Tuto metodu je možné použít i ve třífázovém systému, ale v tomto případě je velmi drahá a náročná, navíc s nespojitou regulací. Další možností řízení elektrické šuntovací zátěže je jednofázový můstkový neřízený usměrňovač s pulzním měničem obsahujícím spínací tranzistor (Obr. 22). V případě spínací frekvence tranzistoru, která by byla alespoň desetkrát vyšší než frekvence generátoru, by bylo možné udržet velikost účinníku zhruba na jedničce pro jakoukoliv velikost střídavy pulzního měniče.

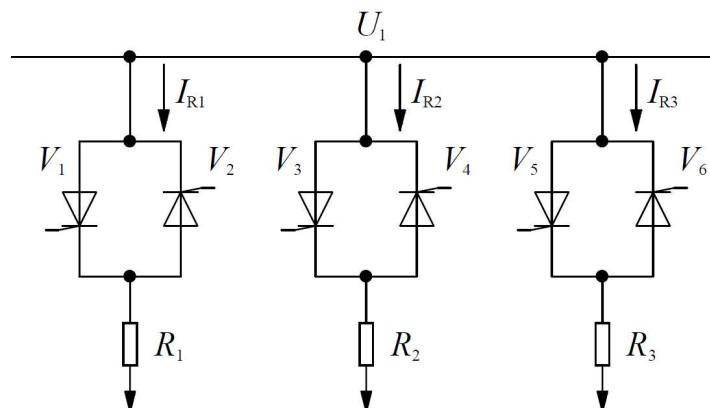
V případě, že nechceme, aby došlo k nerovnovážnému zatížení SEIG, je nutné, aby platila rovnost (29). [3], [7]



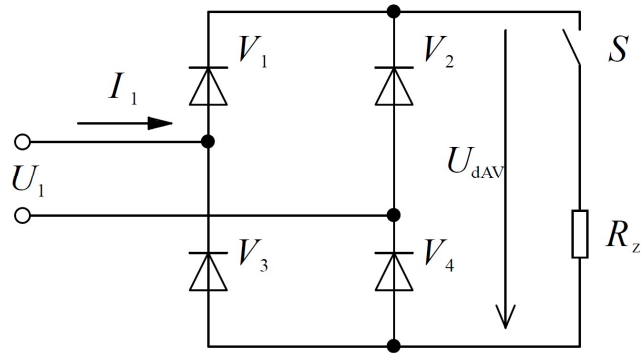
Obr. 19 Blokové schéma malé vodní elektrárny se SEIG a regulací pomocí šuntovací zátěže [7]



Obr. 20 Možnost realizace šuntovací zátěže pomocí antiparalelního spojení tyristorů [7]



Obr. 21 Nespojité řízení paralelně připojených šuntovacích zátěží [7]



Obr. 22 Jednofázové zatížení třífázového SEIG pomocí Graetzova můstku s pulzním spínačem [7]

$$P = U_1 i_z = \sqrt{3} U_1 i_{C1} = \sqrt{3} U_1^2 \omega C_1 \quad (29)$$

## 2.5 Kompenzace jalového výkonu

Výstupní napětí SEIG, jak již bylo řečeno, závisí na jalovém výkonu. Jalový výkon dodávaný asynchronnímu stroji v generátorickém režimu, musí být stejně velký nebo vyšší, než je jalový výkon odebíraný strojem v motorickém režimu. Pokud je jalový výkon příliš velký, bude vysoké i napětí na svorkách generátoru. Napětí je však omezené saturací materiálu stroje. Naopak pokud bude jalový výkon nedostatečný, bude napětí nízké a v krajním případě se stroj nemusí vůbec nabudit. Kompenzaci jalového výkonu lze dosáhnout zlepšení napěťové regulace v případě, že SEIG pracuje s proměnnou zátěží. [3], [5]

V případě, že je k SEIG připojena pouze čistě činná zátěž, není potřeba kompenzovat jalový výkon. To platí v případě, pokud dokážeme řídit činný výkon odebíraný zátěží  $P_{e1}$  a máme správně navržené budičí zařízení tak, aby se SEIG neodbudil. U řízení odebíraného činného výkonu je ale potřeba brát na vědomí spotřebu jalového výkonu výkonovým měničem. Pokud by jeho odběr mohl způsobit razantní pokles napětí, bylo by potřeba tento odběr jalového výkonu kompenzovat. [3]

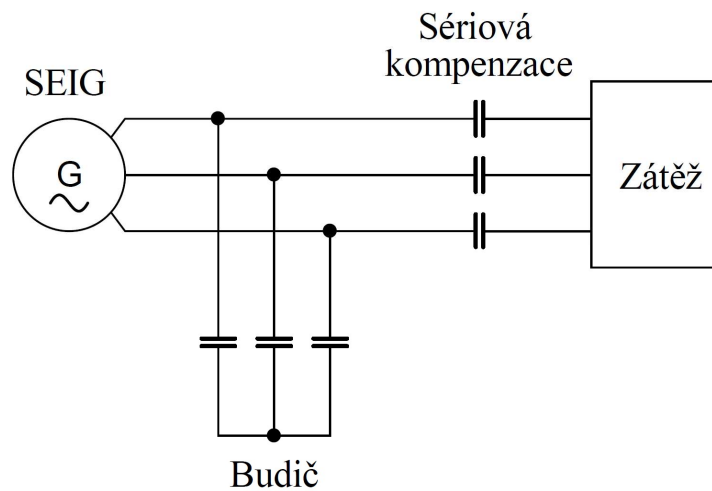
### 2.5.1 Spínané kapacity

Jedná se o jednoduchou metodu. Princip spočívá v tom, že se paralelně ke stroji a budiči připojí další kapacitní zařízení. Nevýhodou této metody je nespojité řízení napětí, což zhoršuje přesnost této metody a nemusí dojít k přesnému splnění požadavku na jalový výkon. Optimální kombinace kapacit je spínána v závislosti na napětí, které snímá napěťový snímač. Pokud by byla potřeba pro kompenzaci příliš velká velikost kapacity, tak se z finančního hlediska nejedná o výhodnou metodu. [3]

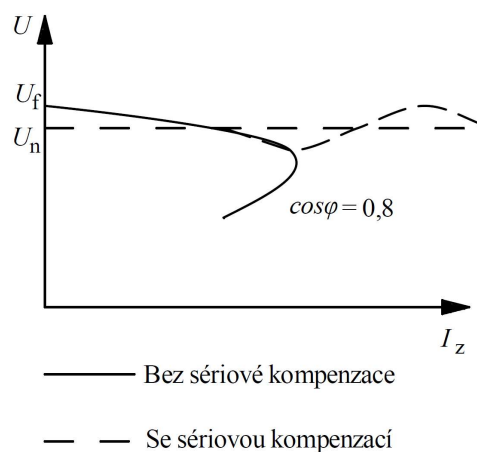
### 2.5.2 Kapacity zapojené do série se zátěží

Tato metoda (Obr. 23) je nejjednodušší a finančně nejméně náročná. Důležité je, že k asynchronnímu generátoru musí být stále připojené paralelně budičí zařízení, sériové kapacity jsou jen doplňkem pro kompenzaci. Sériové kapacity by samy o sobě nedokázaly pokrýt

potřebu jalového výkonu asynchronního generátoru. Tyto kapacity je možné připojit jak na stranu generátoru (mezi generátor a paralelní budicí zařízení) nebo na stranu zátěže (za paralelním budicím zařízením). Připojení na stranu zátěže je méně finančně náročné, protože toto řešení vyžaduje menší velikost kapacity a umožňuje lepší regulaci napětí. Velikost jalového výkonu, které tvoří paralelně připojené budicí zařízení, je dána velikostí napětí. Velikost jalového výkonu, které vytvářejí sériově připojené kapacity, je dána velikostí proudu. To znamená, že sériově připojené kapacity vytvářejí jalový výkon v závislosti na velikosti zátěže. Výhodou této kompenzace je možnost téměř lineárního průběhu zatěžovací charakteristiky SEIG (Obr. 24), pokud se zvolí vhodná velikost kapacit. Nevýhoda této metody může být subsynchronní rezonance. To je oscilace proudu a napětí při nižší frekvenci. Velikost oscilace je dána velikostí sériové kapacity a zátěží. Vliv subsynchronní rezonance je možný potlačit správným návrhem sériových kapacit a paralelního budicího zařízení. [3]



Obr. 23 Kompenzace pomocí sériových kapacit [3]

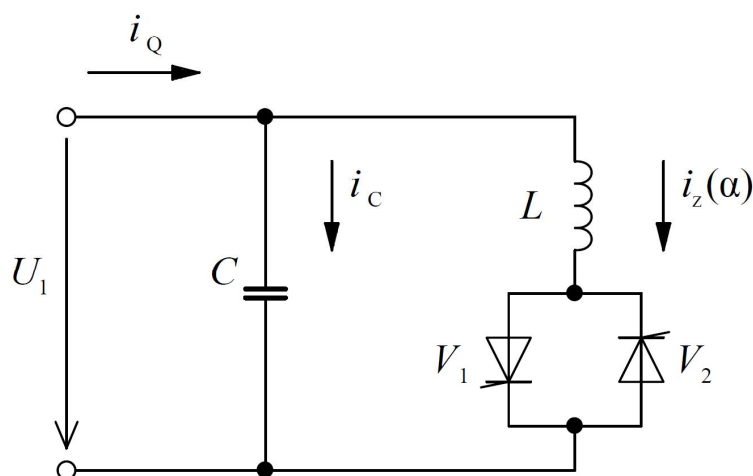


Obr. 24 Zatěžovací charakteristika se sériovou kompenzací [3]



### 2.5.3 SVC (Static Var Compensator)

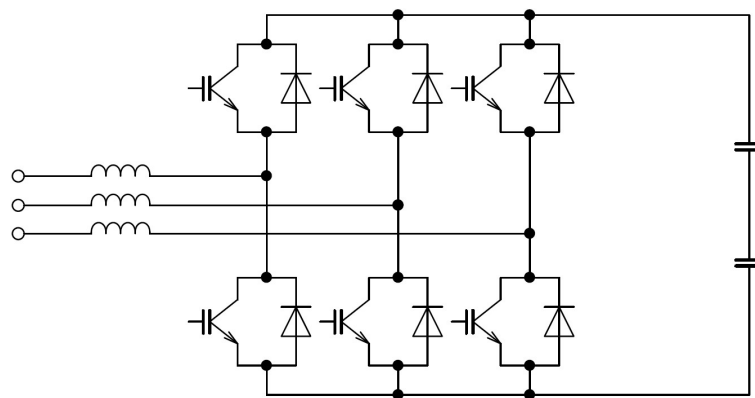
Existuje více variant. Jednou z nich je paralelní spojení kapacity a sériového spojení cívky s antiparalelně zapojenými tyristory (Obr. 25). Spojení cívky s tyristory tvoří proměnnou zátěž, paralelně připojená kapacita je konstantní. Tento generátor/spotřebič jalového výkonu se připojuje paralelně k SEIG. Řídící úhly se mění tak, aby bylo možné řídit napětí a frekvenci v systému SEIG pomocí nastavení spotřeby jalového výkonu cívky. Řídí se tedy poměr jalových výkonů kapacity  $Q_C$  a cívky  $Q_L$ . Je opět potřeba mít na paměti, stejně jako v případě induktivní zátěže, změnu efektivní velikosti kapacity dle vztahu (25). Výhodou této metody je spojitě řízení jalového výkonu a rychlá odezva. Nevýhodou představuje možná porucha tyristorů, která může zapříčinit přepětí v systému v důsledku dodávaného velkého jalového výkonu budičem i kompenzačním kondenzátorem. Další nevýhodou jsou u vyšších výkonů požadavky na výkonnější a rozměrově větší součástky. [2], [3]



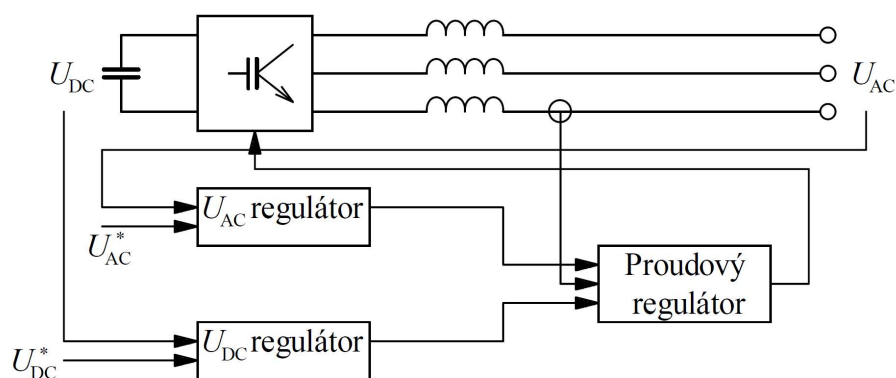
Obr. 25 SVC – paralelní spojení cívky a kapacity [3]

### 2.5.4 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

STATCOM je elektronický regulátor jalového výkonu tvořen IGBT tranzistory (Obr. 26), které je možné řídit spojitě v závislosti na satorovém proudu stroje. Jeho zapojením je možné nabudit asynchronní generátor. Dokonce je možné ho použít i pro kompenzaci jalového výkonu zátěže a udržet tak účinník na požadované velikosti. Není tedy potřeba pasivního budiče. Ve stejnosměrném meziobvodu měniče je možné zapojit kondenzátor. Indukčnost v sérii s tímto měničem je zapotřebí pro vyhlazení proudů. Podstata pulzního řízení tohoto měniče spočívá ve fázovém posunu střídavého proudu vůči střídavému napětí. Na Obr. 27 jsou regulátory střídavého napětí a napětí meziobvodu, jejichž výstup řídí spínání měniče. Spínání měniče je řízeno tak, že se proud může zpožďovat za napětím nebo ho předbíhat. [2], [5], [8]



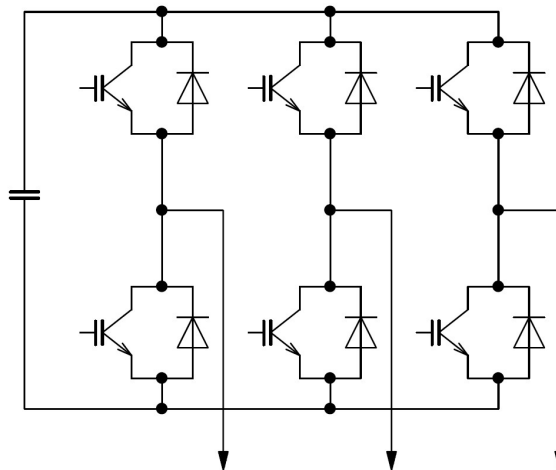
Obr. 26 Zapojení měniče STATCOM [5]



Obr. 27 Regulace měniče STATCOM [2]

### 2.5.5 VSI (Voltage Source Inverter)

Dalším elektronickým regulátorem jalového výkonu může být napěťový střídač (Obr. 28), který má ve svém stejnosměrném meziobvodu umístěný kondenzátor. VSI je připojen ke statoru stroje a dodávaný výkon je stejně jako v případě STATCOM řízen spojitě pomocí spínání tranzistorů. Řízení je podobné asynchronnímu motoru. Opět se zde spínáním jednotlivých tranzistorů volí vektor napětí. Rozdíl je, že na svém vstupu nemusí mít na rozdíl od STATCOM vyhlazovací tlumivky. Pokud jsou ale potřeba, umisťují se v sérii se zátěží. Stejně jako u STATCOM není potřeba přítomnost pasivního budiče SEIG. [5]



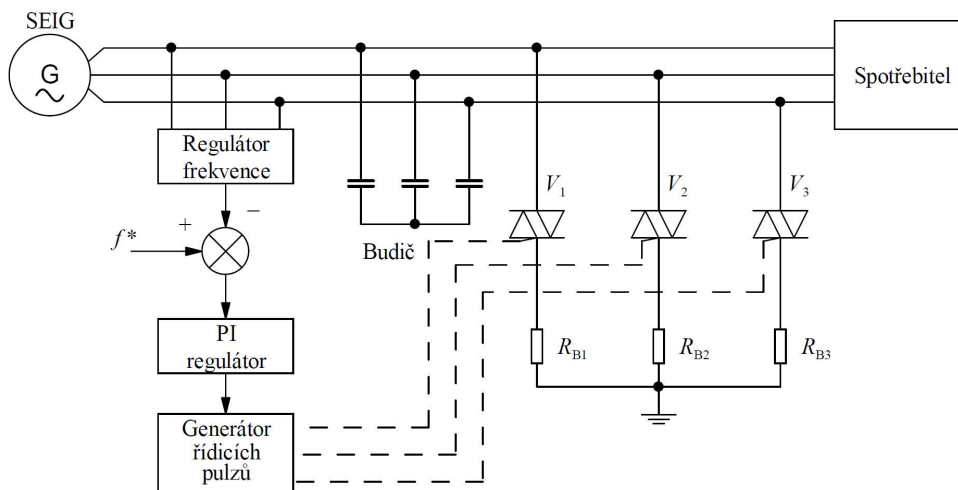
Obr. 28 Zapojení VSI [5]

## 2.6 Elektronické regulátory šuntovací elektrické zátěže

Požadavky na elektronické regulátory jsou, aby byly spolehlivé, odolné a pokud možno jednoduché za přijatelnou cenu. Jejich výhodou je, že neobsahují žádné mechanické prvky a mohou regulovat systémy ve výkonovém rozmezí 500 W až 150 kW. [3], [7]

### 2.6.1 Regulátor s triaky

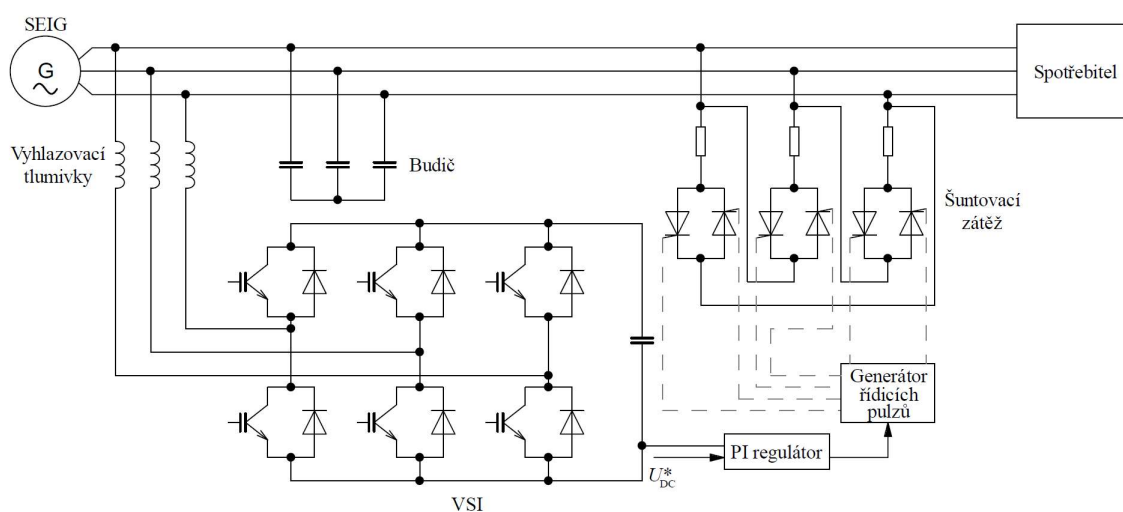
Tento regulátor (Obr. 29) se skládá z triaků, které řídí velikost šuntovací elektrické zátěže. Triak umožňuje tok proudu oběma směry a tvoří tedy analogii k antiparalelnímu spojení tyristorů. Triak je řízený řídicím úhlem v každé půlperiodě. Regulace spočívá v odběru napětí na výstupu generátoru, které následně vstupuje do regulátoru frekvence, přes zpětnou vazbu putuje signál do PI regulátoru, ze kterého vstupuje do generátoru řídicích pulzů. Řídicí pulzy jsou generovány v závislosti na změně napětí a na jeho požadavku. V sérii s triaky je zapojena zátěž, ve které dochází ke změně elektrické energie na teplo. Nevýhodou jsou vyšší harmonické, jedná se o starou a neefektivní metodu. Může fungovat ve spojení se synchronním i asynchronním generátorem. [3]



Obr. 29 Regulátor šuntovací zátěže s triaky [3]

## 2.6.2 Napěťový střídač (VSI) se šuntovací zátěží

Asynchronní generátor je buzený z napěťového střídače. Obrovskou výhodou této metody je, že je frekvence určena a udržována právě pomocí VSI. Díky tomu se tento způsob zaměřuje pouze na řízení napětí v systému. Paralelně ke generátoru může být připojená elektrická šuntovací zátěž (Obr. 30) pro regulaci napětí a frekvence v systému anebo je možné zátěž připojit do stejnosměrného meziobvodu napěťového střídače podle [3]. V případě zátěže na straně generátoru se používá sériové spojení antiparalelních tyristorů a činné zátěže. Díky zátěži na AC straně není napěťový střídač tak zatěžován, jako v případě DC zátěže. Ve druhém případě, kde je zátěž připojená ve stejnosměrném meziobvodu střídače, je využíván pulzní měnič, kterým je řízená spotřeba elektrické energie šuntovací zátěží. Můžeme si povšimnout, že je stále paralelně přítomné pasivní budicí zařízení. To zaručuje nabuzení generátoru ve stavu naprázdno a VSI je v tomto případě jen doplňkový zdroj/spotřebič jalového výkonu v systému. [3]



Obr. 30 VSI s elektronickým regulátorem se šuntovací zátěží na straně AC [3]

## 2.7 Shrnutí

Pokud máme systém se SEIG a rotor se točí konstantní rychlostí, znamená to, že s rostoucí zátěží klesá napětí i frekvence, s klesajícím napětím klesá i jalový výkon dodávaný budičem. Zátěž je zde reprezentována záporným skluzem v absolutní hodnotě, který se se zátěží zvyšuje. Maximální výstupní výkon a napětí se zvyšuje v závislosti na velikosti kapacity budicího zařízení, a tedy dodaného jalového výkonu. [4]

V jednoduchých systémech, kde nevadí menší kolísání napětí a frekvence, může postačit i regulace rychlosti mechanického stroje. [7]

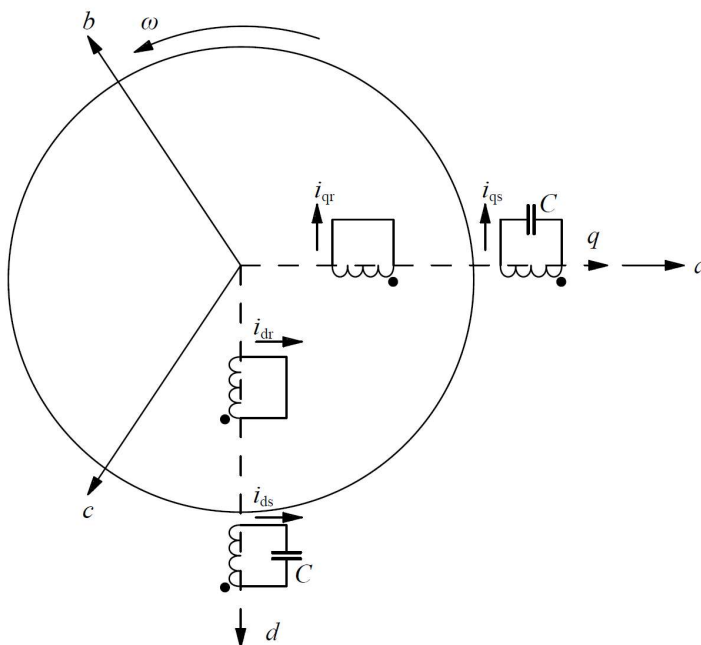
Na změnu napětí a frekvence SEIG má vliv změna jalového výkonu a zátěže. Spotřeba jalového výkonu se s rostoucím odběrem činného výkonu zvyšuje. Pokud se spotřeba činného výkonu nemění, bude i spotřeba jalového výkonu stejná. Pokud máme k dispozici elektronický regulátor, je možné jím řídit spotřebu činného výkonu zátěže tak, aby byly v systému změny napětí a frekvence téměř nulové, tím se řízení omezí, v případě přítomnosti induktivní zátěže, pouze na kompenzaci jalového výkonu. [3]

## 3 Model SEIG

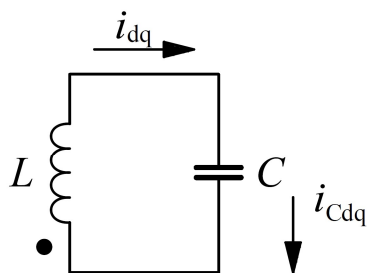
### 3.1 Rovnice matematického modelu

Pro tuto práci byl zvolen model asynchronního generátoru reprezentující přechodný stav v ostrovním provozu s vnějším budičem (SEIG) [7]. Jedná se o model, který uvažuje postupný nárůst svorkového napětí generátoru během procesu samobuzení a dále zahrnuje i elektrickou zátěž  $RL$ . Model se skládá ze soustavy diferenciálních napěťových a proudových rovnic, které reprezentují stroj, samobuzení a zátěž, dále model uvažuje změnu vzájemné indukčnosti  $M$  v závislosti na velikosti magnetizačního proudu stroje  $I_\mu$  ( $I_m$ ). [7]

Pro vytvoření modelu SEIG je použita Parkova transformace [11], která slouží k popisu třífázových rotačních strojů ve dvouosé  $d$ - $q$  soustavě. V této soustavě rotuje prostorový vektor spolu s dvouosým systémem elektrickou úhlovou rychlostí  $\omega$ . Na každé ose ( $d$  a  $q$ ) jsou dvě cívky, jedna představuje vinutí rotoru a druhá vinutí statoru. K cívce, která představuje vinutí statoru, je navíc od asynchronního motoru, připojen paralelně kondenzátor, který představuje vnější budičí zařízení. Na Obr. 31 je trojosý systém spolu s dvouosým  $d$ - $q$  systémem, který se otáčí protisměru hodinových ručiček elektrickou úhlovou rychlostí  $\omega$ , na Obr. 32 se uvažuje stav naprázdno. Tečka u cívek značí začátek vinutí. Index  $s$  označuje složku statorového vinutí a index  $r$  složku rotorového vinutí. [7]

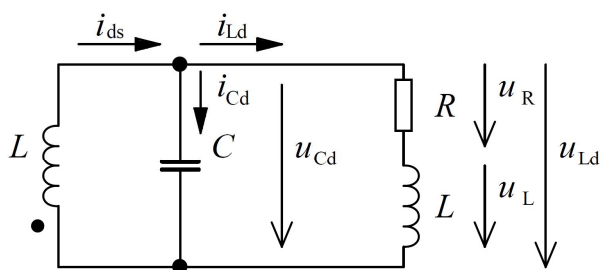


Obr. 31 Systém  $abc$  a systém  $d$ - $q$  [7]



Obr. 32 Část statorového vinutí v systému  $d$ - $q$  ve stavu naprázdno [7]

Odvození uvažuje symetricky navinutý třífázový stroj v soustavě  $d$ - $q$ , ke kterému jsou paralelně připojené tři shodné kondenzátory. Jedná se tedy o třífázový budič, který je paralelně připojený ke stroji. Odvození je vztažené na stator. Pokud budeme uvažovat zátěž  $RL$ , což je vlastně zátěž  $RLC$ , protože kondenzátor musí být stále přítomný, upraví se části statorového vinutí z Obr. 32 do tvaru Obr. 33. Podobně i pro část statorového vinutí v ose  $q$ . Napětí na kondenzátoru odpovídá napětí na zátěži  $RL$ . Podle druhého Kirchhoffova zákona platí napěťové rovnice pro osu  $d$  (30) a pro osu  $q$  (31). Tyto napěťové rovnice reprezentují napětí na zátěži. Z těchto rovnic je možné vyjádřit derivace proudů  $d(i_{Ld})/dt$  pro osu  $d$  (32) a  $d(i_{Lq})/dt$  pro osu  $q$  (33). Proud na kondenzátoru je dán (34). Z prvního Kirchhoffova zákona platí (35) pro osu  $d$ , z tohoto vztahu je možné vyjádřit proud  $i_{Ld}$  a podobně  $i_{Lq}$ . Vztah mezi proudem na kondenzátoru v jednotlivých osách a napětím na zátěži je dán vztahy (36) pro osu  $d$  a (37) pro osu  $q$ . Jedná se opět o aplikaci prvního Kirchhoffova zákona. [7]



Obr. 33 Část statorového vinutí v ose  $d$  ve stavu naprázdno [7]

$$u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} \quad (30)$$

$$u_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} \quad (31)$$

$$\frac{di_{Ld}}{dt} = \frac{u_{Ld}}{L} - \frac{R}{L}i_{Ld} \quad (32)$$

$$\frac{di_{Lq}}{dt} = \frac{u_{Lq}}{L} - \frac{R}{L}i_{Lq} \quad (33)$$

$$i_C = C \frac{du}{dt} \quad (34)$$

$$i_{ds} = i_{Cd} + i_{Ld} \quad (35)$$

$$\frac{du_{Ld}}{dt} = \frac{i_{Cd}}{C} = \frac{i_{ds}}{C} - \frac{i_{Ld}}{C} \quad (36)$$

$$\frac{du_{Lq}}{dt} = \frac{i_{Cq}}{C} = \frac{i_{qs}}{C} - \frac{i_{Lq}}{C} \quad (37)$$

Stavové napěťové rovnice stroje jsou (38), (39), (40) a (41). Rovnice (38) a (39) se upraví tak, abychom vyjádřili derivace jednotlivých proudů  $d(i_{dr})/dt$  a  $d(i_{qr})/dt$ , diferenciální rovnice pro tyto proudy zapíšeme ve tvaru (42) a (43). Substitucí rovnice (43) do (41) a vyjádřením  $d(i_{qs})/dt$  získáme rovnici (44). Pro zjednodušení se zavede rozptylový koeficient (45), upraví se rovnice (44) a vznikne rovnice (46). Stejný postup se použije pro osu  $d$ . Nejprve se provede substituce (42) do (40) a vyjádří se  $d(i_{ds})/dt$  stejným způsobem jako (44), tím vznikne rovnice (47). Rovnice (46) se sloučí s rovnicí (43) a po úpravě vznikne (48), kde  $MK$  je (49). Dále se upraví (48) a vznikne (50) pro osu  $q$ . Stejným postupem je možné vyjádřit (51)<sup>3</sup> pro osu  $d$ . Pokud uvážíme rovnice (32), (33), (36), (37), (46), (47), (50), (51) a proudy  $i_{Ld}$  a  $i_{Lq}$  nulové, získáme stav naprázdno. Pokud jsou proudy  $i_{Ld}$  a  $i_{Lq}$  nenulové, máme SEIG se zátěží. [7]

$$u_{ds} = R_1 i_{ds} + L_1 \frac{di_{ds}}{dt} + u_{Ld} + M \frac{di_{dr}}{dt} \quad (38)$$

$$u_{qs} = R_1 i_{qs} + L_1 \frac{di_{qs}}{dt} + u_{Lq} + M \frac{di_{qr}}{dt} \quad (39)$$

$$u_{dr} = R_2 i_{dr} + L_2 \frac{di_{dr}}{dt} + M \frac{di_{ds}}{dt} + \omega M i_{qs} + \omega L_2 i_{qr} \quad (40)$$

$$u_{qr} = R_2 i_{qr} + L_2 \frac{di_{qr}}{dt} + M \frac{di_{qs}}{dt} - \omega M i_{ds} - \omega L_2 i_{dr} \quad (41)$$

$$\frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{M} \left( u_{ds} - R_1 i_{ds} - L_1 \frac{di_{ds}}{dt} - u_{Ld} \right) \quad (42)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{M} \left( u_{qs} - R_1 i_{qs} - L_1 \frac{di_{qs}}{dt} - u_{Lq} \right) \quad (43)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{M}{M^2 - L_1 L_2} (u_{qr} + \omega M i_{ds} - R_2 i_{qr} + \omega L_2 i_{dr}) - \frac{L_2}{M^2 - L_1 L_2} (u_{qs} - R_1 i_{qs} - u_{Lq}) \quad (44)$$

$$K = \frac{1}{M^2 - L_1 L_2} \quad (45)$$

<sup>3</sup> V rovnici (51) jsem našel při modelování neshodu. Zdroj uvádí ve zmíněné rovnici jiné znaménko, než které použil v simulaci v jazyce C, v této práci je neshoda opravena.



$$\frac{di_{qs}}{dt} = MK(u_{qr} + \omega M i_{ds} - R_2 i_{qr} + \omega L_2 i_{dr}) - L_2 K(u_{qs} - R_1 i_{qs} - u_{Lq}) \quad (46)$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = MK(u_{dr} - \omega M i_{qs} - R_2 i_{dr} - \omega L_2 i_{qr}) - L_2 K(u_{ds} - R_1 i_{ds} - u_{Ld}) \quad (47)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1 + L_1 L_2 K}{M} (u_{qs} - R_1 i_{qs} - u_{Lq}) - L_1 K(u_{qr} + \omega M i_{ds} - R_2 i_{qr} + \omega L_2 i_{dr}) \quad (48)$$

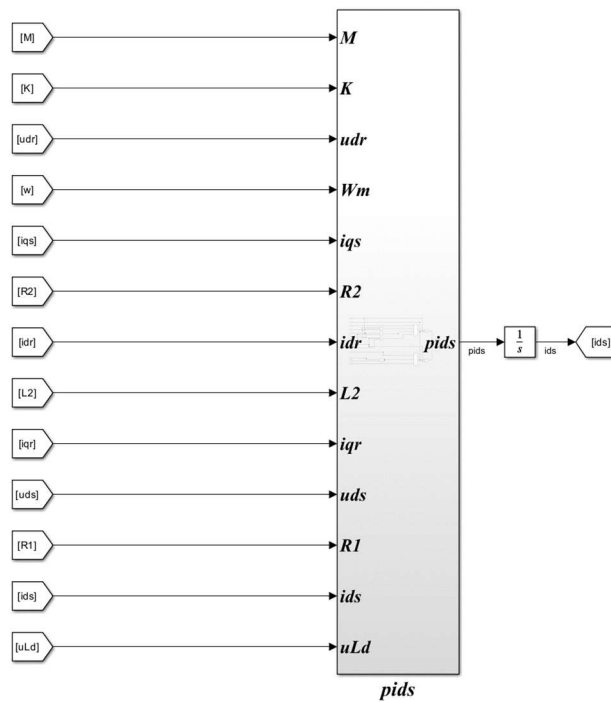
$$MK = \frac{1 + L_1 L_2 K}{M} \quad (49)$$

$$\frac{di_{qr}}{dt} = MK(u_{qs} - R_1 i_{qs} - u_{Lq}) - L_1 K(u_{qr} + \omega M i_{ds} - R_2 i_{qr} + \omega L_2 i_{dr}) \quad (50)$$

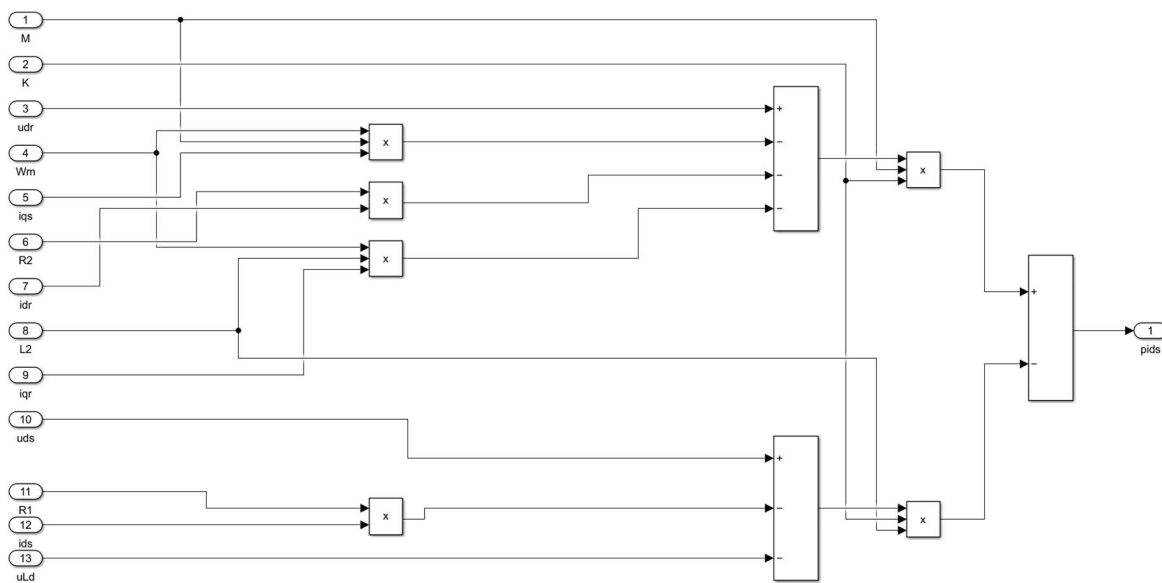
$$\frac{di_{dr}}{dt} = MK(u_{ds} - R_1 i_{ds} - u_{Ld}) - L_1 K(u_{dr} - \omega M i_{qs} - R_2 i_{dr} - \omega L_2 i_{qr}) \quad (51)$$

### 3.2 Realizace rovnic v programu Simulink

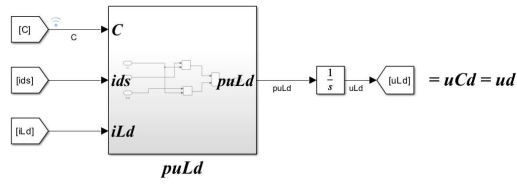
Blok pro proud  $i_{ds}$  je realizovaný podle Obr. 34, jehož vnitřní struktura zapojení je na Obr. 35. Podobně jsou realizovány ostatní proudy stroje v systému  $d-q$ . Vnější bloky napětí  $u_{Ld}$  a  $u_{Lq}$  na svorkách stroje v soustavě  $d-q$  jsou zapojeny následovně podle Obr. 36, přičemž Obr. 37 představuje opět vnitřní strukturu zapojení bloku napětí  $u_{Ld}$ . Složky proudů na zátěži jsou na Obr. 38. Vnitřní zapojení jednoho z těchto bloků je na Obr. 39, pro druhý blok je zapojení podobné. U bloku je umístěn blok hodin, díky kterému si můžeme nastavit, v jakém čase dojde k připnutí elektrické zátěže. Realizace rozptylového koeficientu je na Obr. 40. Pro simulaci jsou dále potřebné bloky, které jsem realizoval jako funkce. Jeden z těchto bloků je pro vzájemnou indukčnost (Obr. 41), jehož funkci můžeme vidět na Obr. 42. V bloku se současně po každé iteraci počítá rozptylová reaktance statoru a rotoru vzhledem ke změně magnetizační reaktance stroje. Další blok realizovaný pomocí funkce je pro remanentní napětí (Obr. 43) sloužící pro spuštění simulace. Funkce tohoto bloku je na Obr. 44. Nakonec jsem do modelu přidal experimentální zapojení  $C_{ef}$  (Obr. 45), abych uvážil změnu jalového příkonu asynchronního generátoru po připojení induktivní zátěže. V originálním modelu, jehož ukázka je v jazyce C dostupná v [7], se tento člen nevyskytuje.



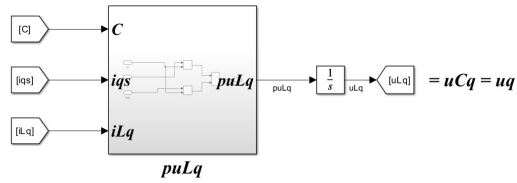
Obr. 34 Blok pro proud  $i_{ds}$



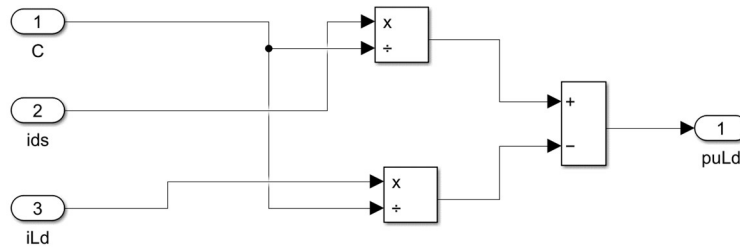
Obr. 35 Vnitřní struktura bloku  $i_{ds}$



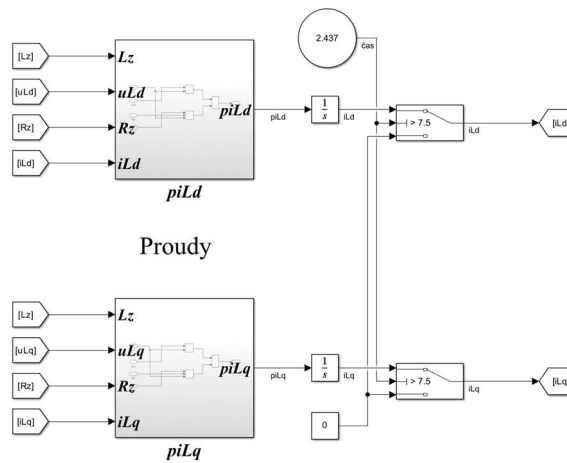
Napětí



Obr. 36 Blok pro napětí  $u_{Ld}$  a  $u_{Lq}$

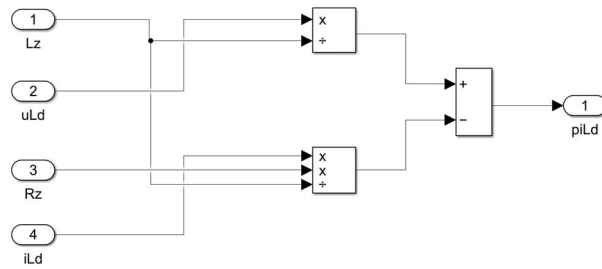


Obr. 37 Vnitřní pohled na blok  $u_{Ld}$

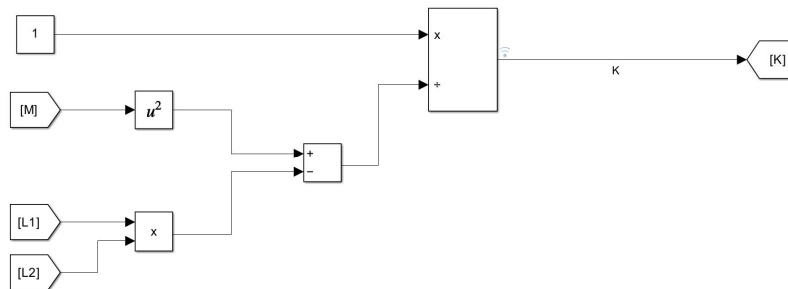


Proudy

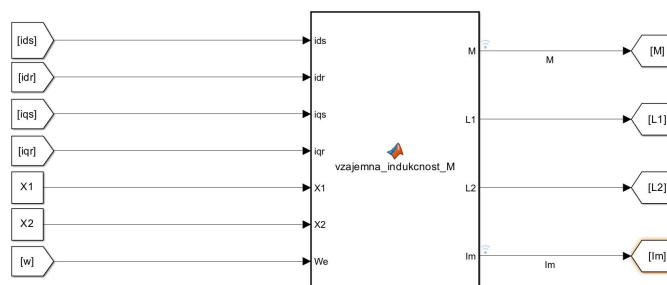
Obr. 38 Blok pro proud  $i_{Ld}$  a  $i_{Lq}$



Obr. 39 Vnitřní pohled na blok  $i_{Ld}$



Obr. 40 Zapojení rozptylového koeficientu



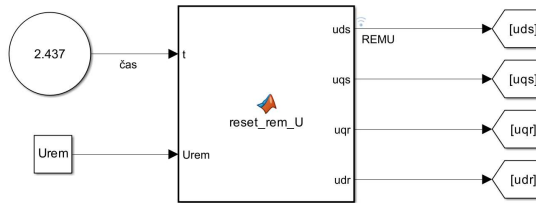
Obr. 41 Blok pro výpočet vzájemné indukčnosti po každé iteraci

```

1 function [M,L1,L2,Im] = vzajemna_indukcnost_M(ids,idr,iqs,iqr,X1,X2,We)
2
3 Im = (sqrt(((ids+idr)*(ids+idr))+((iqs+iqr)*(iqs+iqr)))); %A magnetizační proud
4 M = (0.0423*exp(-0.0035*Im*Im))+0.0236; %H vzájemná indukčnost
5
6 Xm = We*M; %Ohm magnetizační reaktance
7 L1 = (X1+Xm)/(We); %H rozptylová indukčnost statoru
8 L2 = (X2+Xm)/(We); %H rozptylová indukčnost rotoru
9 end
10

```

Obr. 42 Vnitřní pohled na funkci vzájemné indukčnosti



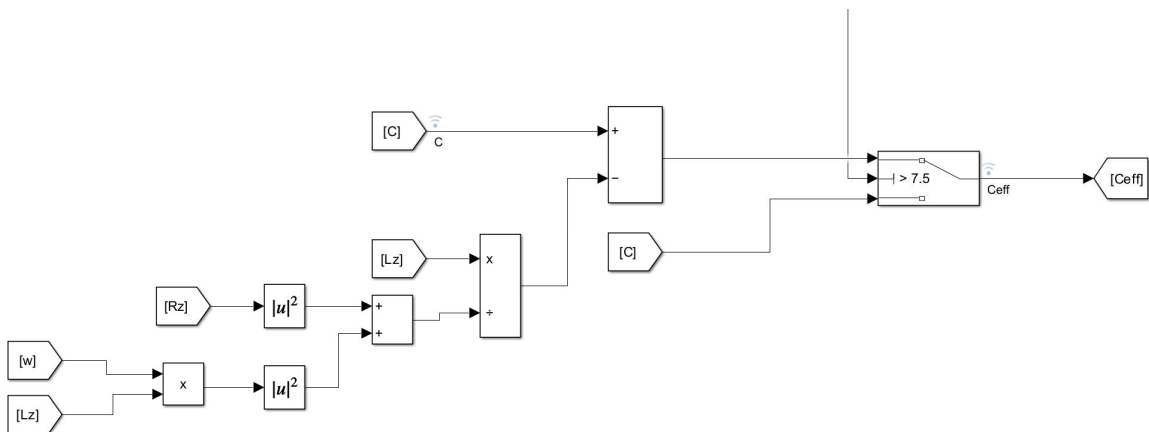
Obr. 43 Blok pro definování remanentního napětí na počátku simulace

```

1 function [uds, uqs, uqr, udr] = reset_rem_U(t,Urem)
2
3 % Logika pro nastavení nebo resetování napětí
4 if t == 0
5
6     uds = Urem;
7     uqs = Urem;
8     uqr = 0;
9     udr = 0;
10 else
11     uds = 0;
12     uqs = 0;
13     uqr = 0;
14     udr = 0;
15 end

```

Obr. 44 Vnitřní pohled na funkci remanentního napětí



Obr. 45 Experimentální blok efektivní kapacity

## 4 Simulace SEIG

Pro uskutečnění simulace SEIG je potřeba soustava diferenciálních rovnic z konce předchozí kapitoly, která popisuje stroj, samobuzení a zátěž. Je důležité pamatovat na remanentní magnetismus, který je potřeba do simulace zahrnout, bez něj by simulace nefungovala správně. Remanentní magnetismus je možné realizovat počátečními hodnotami napětí  $u_{ds}$  a  $u_{qs}$ . Napětí  $u_{dr}$  a  $u_{qr}$  ponecháme rovné nule, jelikož uvažujeme rotor spojený nakrátko. Remanentní napětí musí po první iteraci simulace odpadnout. Dále je důležité myslet na to, že jsou rovnice řešené v systému os  $d-q$ , proto pokud chceme získat výsledky v třiosém systému  $abc$  [11], je potřeba provést transformaci do  $abc$ . Při simulaci jsou také důležité vztahy pro magnetizační proud  $I_\mu$  (52), který se mění v závislosti na jednotlivých proudech os  $d-q$ , a pro vzájemnou indukčnost  $M$ . [7]

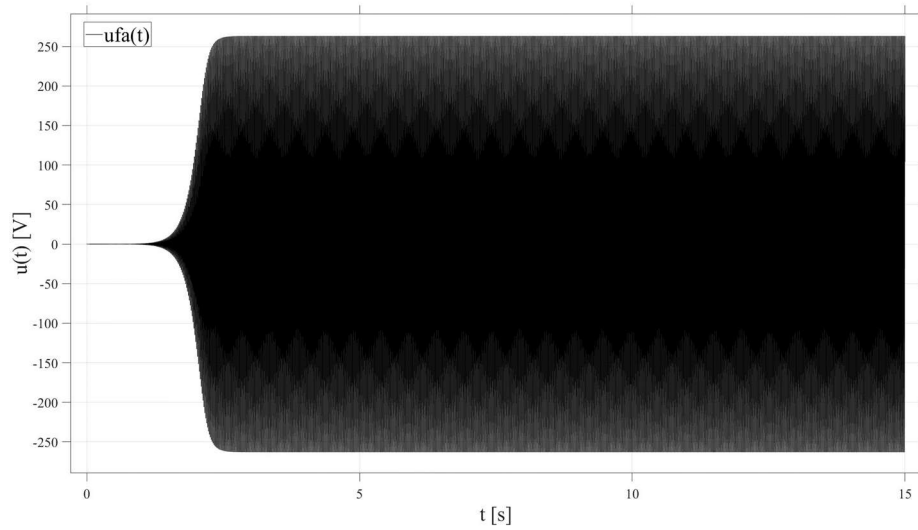
$$I_\mu = \sqrt{(i_{ds} + i_{dr})^2 + (i_{qs} + i_{qr})^2} \quad (52)$$

Pro simulaci jsem si vybral program Simulink z prostředí MATLAB a simuloval jsem stroj ze zdroje [7]. Vztah pro vzájemnou indukčnost je dán vztahem (53). Jednotlivé rovnice stroje, buzení i zátěže jsem poskládal ve vývojovém prostředí z bloků. Důležité bylo mít na paměti počáteční hodnotu remanentního napětí, aby mohla simulace správně fungovat. Další velmi důležitý faktor simulace je, že každý stroj má svůj vlastní průběh vzájemné indukčnosti v závislosti na magnetizačním proudu. Nelze proto simulovat libovolně zvolený stroj s rovnicí vzájemné indukčnosti z [7]. Vzájemná indukčnost pro obdržení správných výsledků musí být proměnná a měnit se v závislosti na magnetizačním proudu. [7]

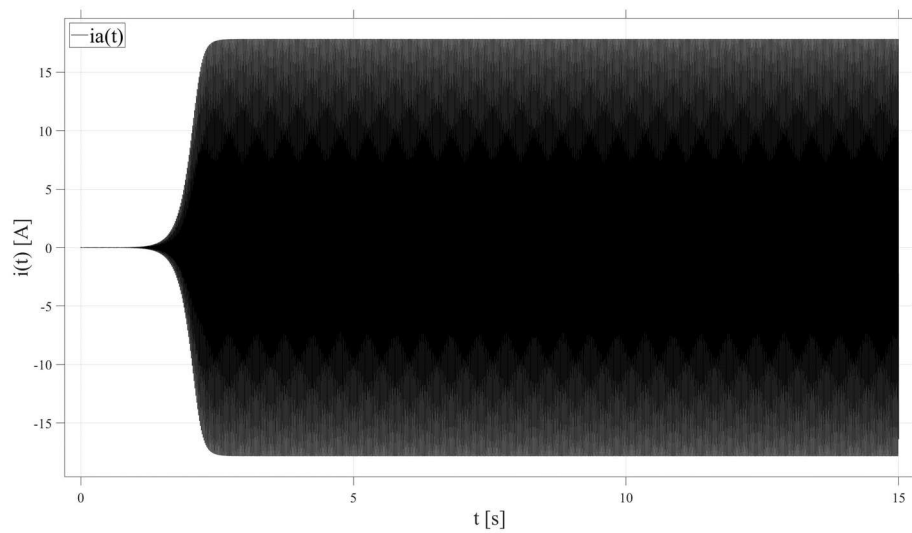
$$M = 0,0423e^{(-0,0035I_\mu^2)} + 0,0236 \quad (53)$$

### 4.1 Simulace stavu naprázdno

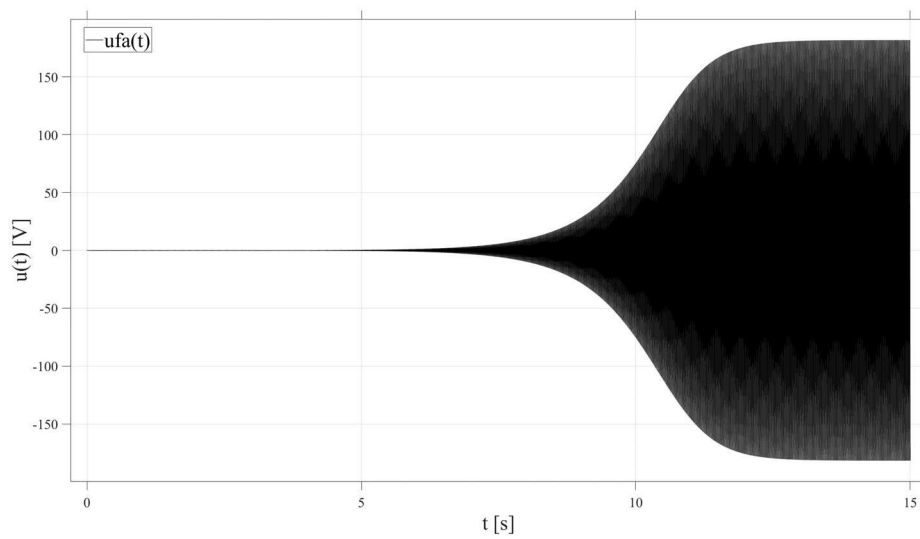
Pro simulaci stavu naprázdno jsem zvolil kapacitu udávanou [7]. Snímané průběhy napětí odpovídají fázovému napětí generátoru a snímané průběhy proudu odpovídají proudu na generátoru. Simulaci odpovídají časové průběhy napětí (Obr. 46) a proudu (Obr. 47). Dále jsem změnil velikost kapacity na  $C = 120 \mu\text{F}$ . Průběhy napětí (Obr. 48) a proudu (Obr. 49) se změnily, respektive se dle teoretického předpokladu snížily jejich amplitudy. Došlo totiž ke změně průsečíku magnetizační charakteristiky s průběhem kapacitní reaktance, průsečík se posunul blíže k počátku. Důležité je si povšimnout, že zmenšením velikosti budiče se také prodloužila doba nabuzení stroje. Extrémní situace je volba velikosti kapacity např.  $C = 60 \mu\text{F}$ , kde na Obr. 50 a Obr. 51 vidíme, že se stroj nenabudil. Pro zajímavost jsem ještě sejmul průběh magnetizačního proudu  $I_\mu$  (Obr. 52) pro velikost kapacity uvedené v [7], který tvoří obálku průběhu proudu. Časový průběh vzájemné indukčnosti opět pro stejnou velikost kapacity budiče je na Obr. 53.



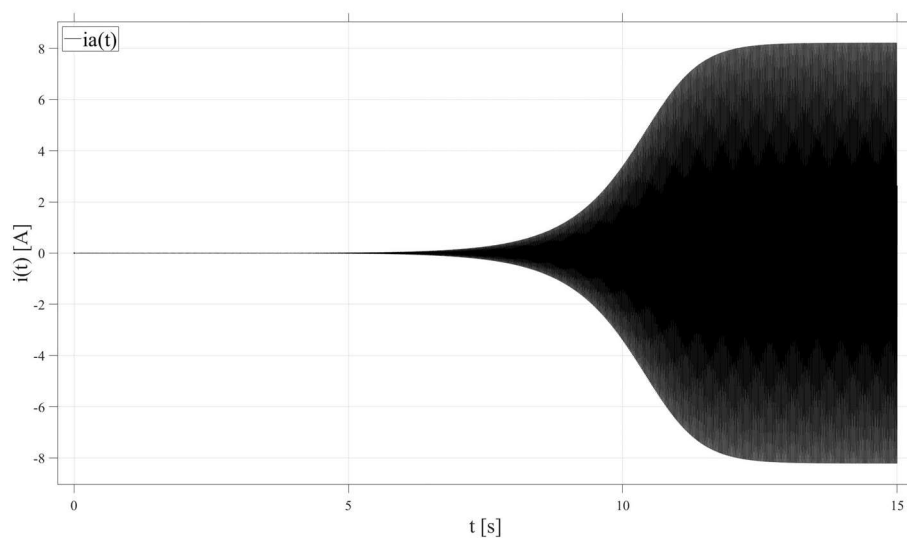
*Obr. 46 Časový průběh fázového napětí – 180  $\mu$ F naprázdno*



*Obr. 47 Časový průběh proudu – 180  $\mu$ F naprázdno*

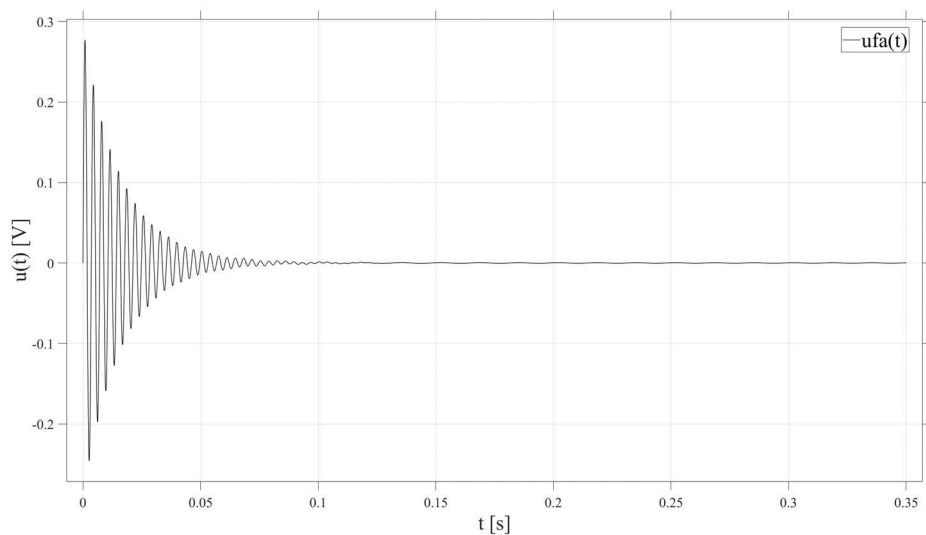


*Obr. 48 Časový průběh fázového napětí – 120  $\mu$ F naprázdno*

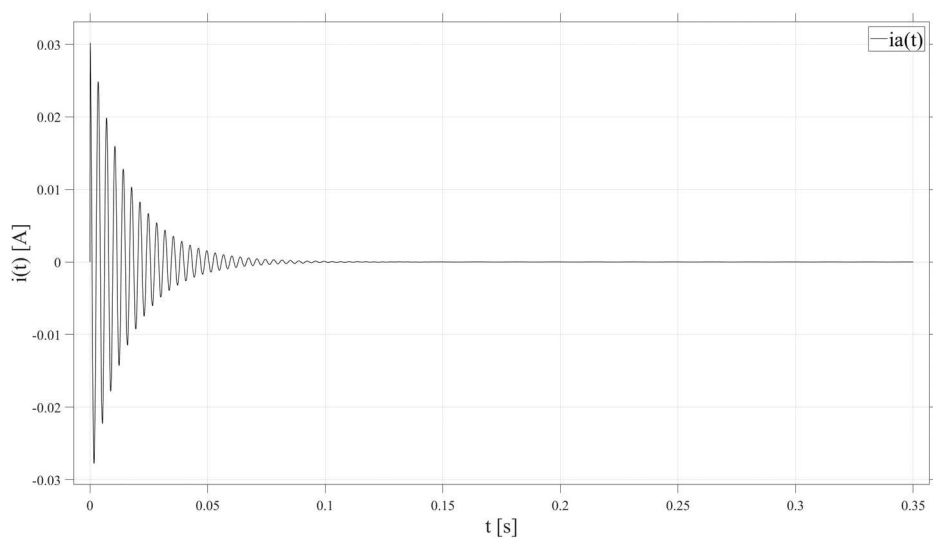


*Obr. 49 Časový průběh proudu – 120  $\mu$ F naprázdno*

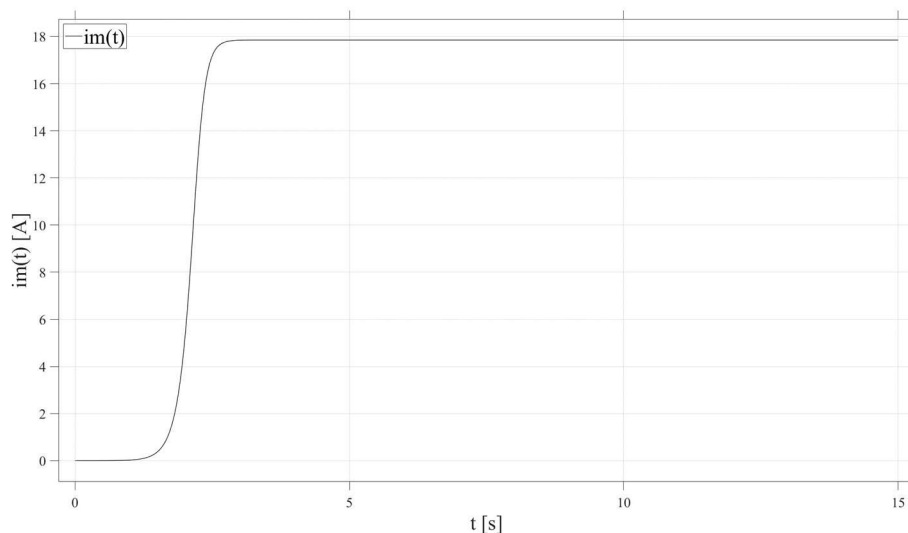




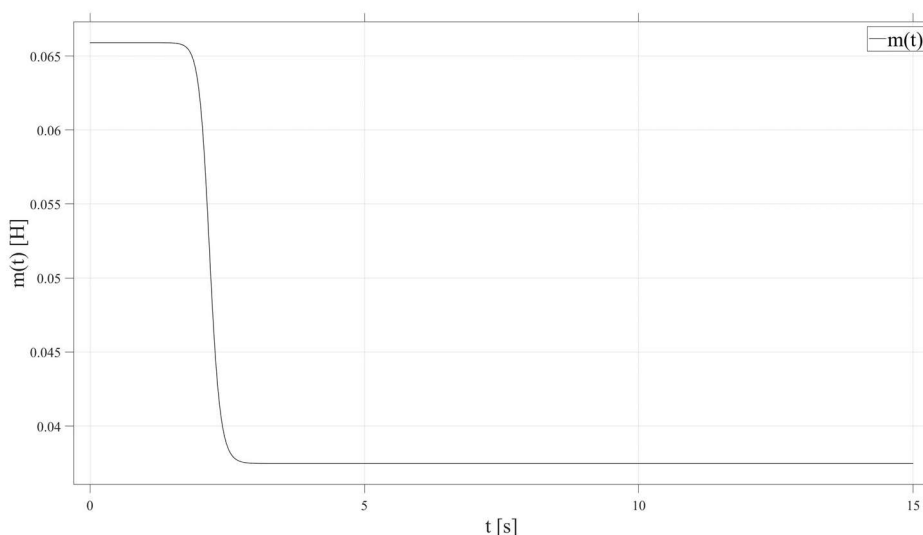
*Obr. 50 Časový průběh fázového napětí – 60  $\mu$ F naprázdno*



*Obr. 51 Časový průběh proudu – 60  $\mu$ F naprázdno*



Obr. 52 Průběh magnetizačního proudu v čase – 180  $\mu$ F naprázdno

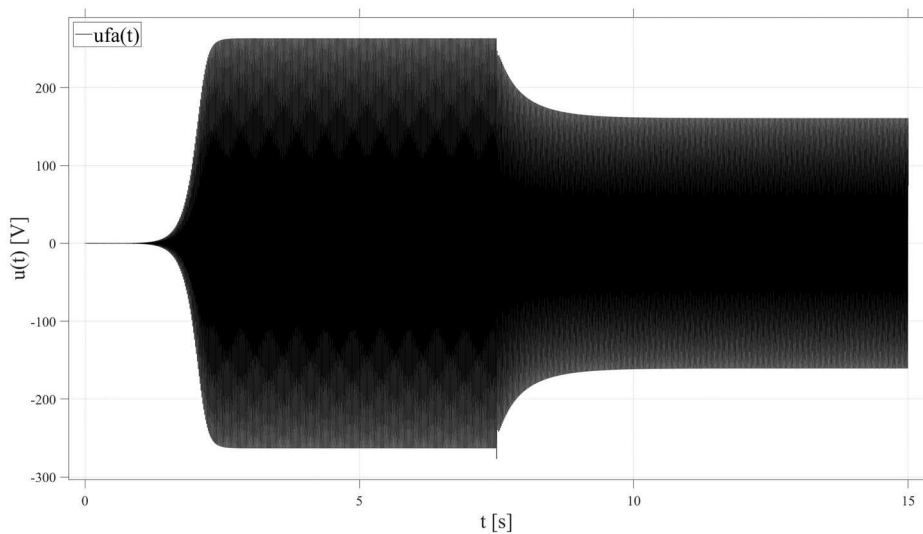


Obr. 53 Průběh vzájemné indukčnosti v čase – 180  $\mu$ F naprázdno

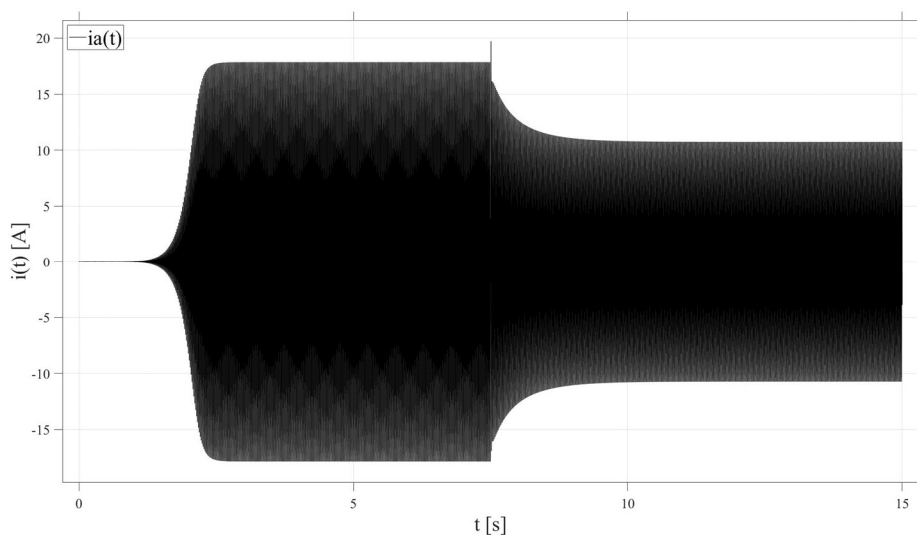
## 4.2 Simulace stavu s elektrickou zátěží

Začal jsem opět s velikostí kapacity budiče dle [7]. Na Obr. 54 a Obr. 55 jsou průběhy napětí a proudu. Napětí i proud klesly po připojení elektrické zátěže zvolené podle [7]. Pro porovnání jsem ještě vyzkoušel pro stejnou velikost kapacity budiče zvolit jinou zátěž. Nejprve jsem zvolil změnu velikosti činného odporu na  $R = 50 \Omega$ , velikost induktivní složky zátěže jsem ponechal. Na průbězích Obr. 56 a Obr. 57 vidíme, že napětí a proud oproti předešlé zátěži neklesly tak razantně. To dává smysl, pokud se podíváme na rovnice napětí (30) a (31) ve kterých jde vidět, že se s rostoucím  $R$  rostou napětí  $u_{Ld}$  a  $u_{Lq}$ , se kterými roste současně proud budičem (34)  $i_C$ . To je způsobeno tím, že pokud má elektrická zátěž větší velikost  $R$ , tak proud teče spíše kondenzátorem. Pokud se tedy bude velikost  $R$  zvyšovat, budeme se přibližovat stavu naprázdno, pokud se však bude snižovat, přiblížíme se stavu nakrátko. Pro další ukázkou jsem

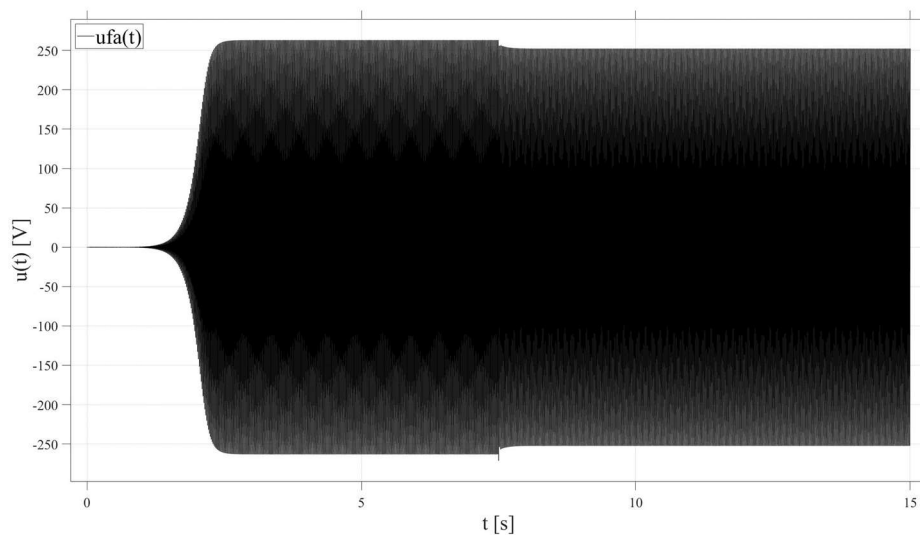
nechal velikost  $R$  shodnou s první simulací zátěže podle [7], ale změnil jsem velikost indukčnosti na  $L = 25$  mH. Se zvětšující indukčností se dle Obr. 58 a Obr. 59 zmenšuje velikost napětí stroje a proudu, což je v souladu s logikou tohoto modelu. Impedance zátěže s rostoucí induktivní složkou roste a přes zátěž teče menší proud. Pokud bychom indukčnost zmenšili, velikost napětí a proudu by se zvýšila. Nakonec jsem ještě sejmul průběhy magnetizačního proudu (Obr. 60) a vzájemné indukčnosti (Obr. 61) při zátěži dle [7]. Velikost kapacity budiče jsem ani u jedné ze simulací elektrické zátěže neměnil, protože je podle předešlého testování stavu naprázdno možné udělat si vlastní představu.



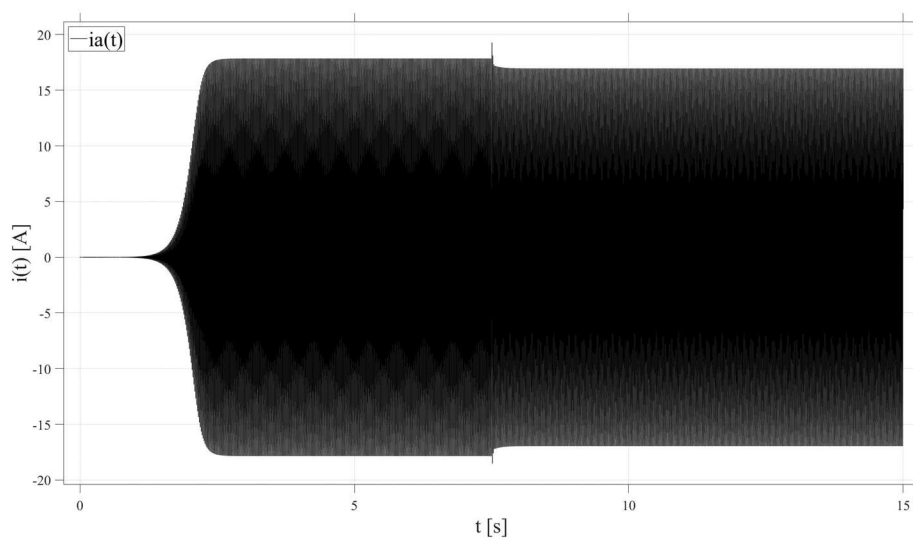
Obr. 54 Časový průběh fázového napětí –  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $20$  mH



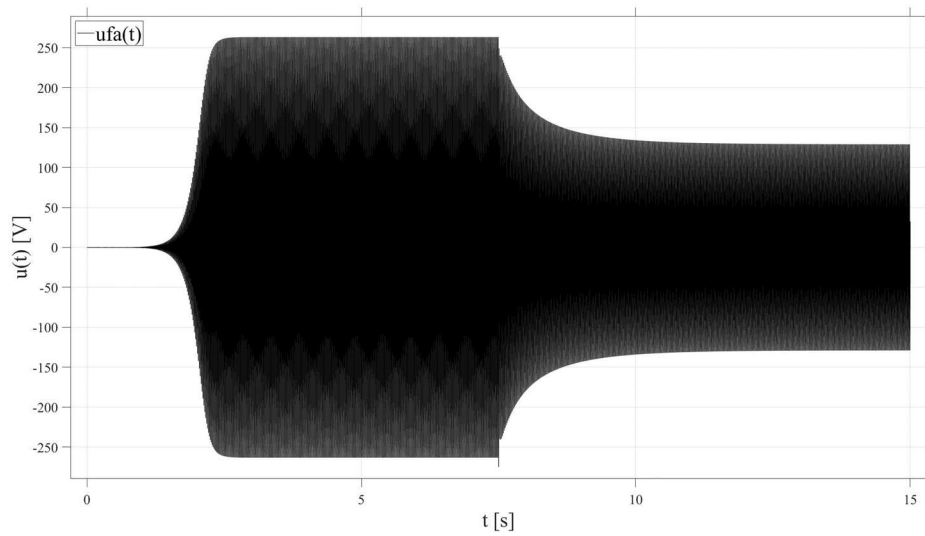
Obr. 55 Časový průběh proudu –  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $20$  mH



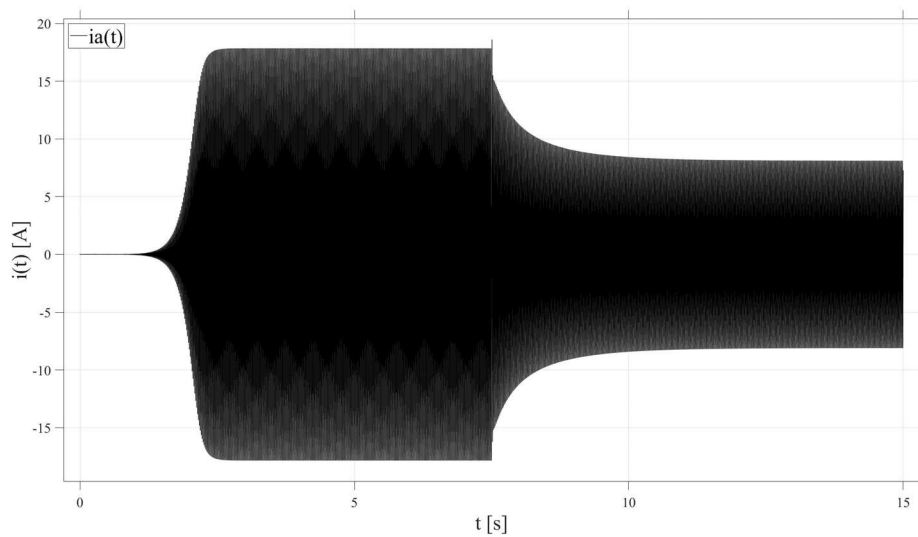
*Obr. 56 Časový průběh fázového napětí –  $180 \mu\text{F}$ ,  $50 \Omega$ ,  $20 \text{mH}$*



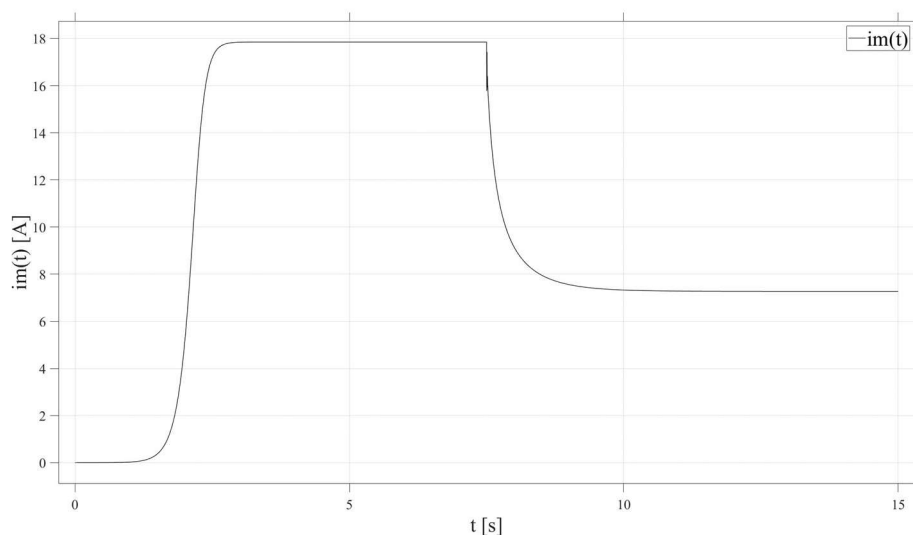
*Obr. 57 Časový průběh proudu –  $180 \mu\text{F}$ ,  $50 \Omega$ ,  $20 \text{mH}$*



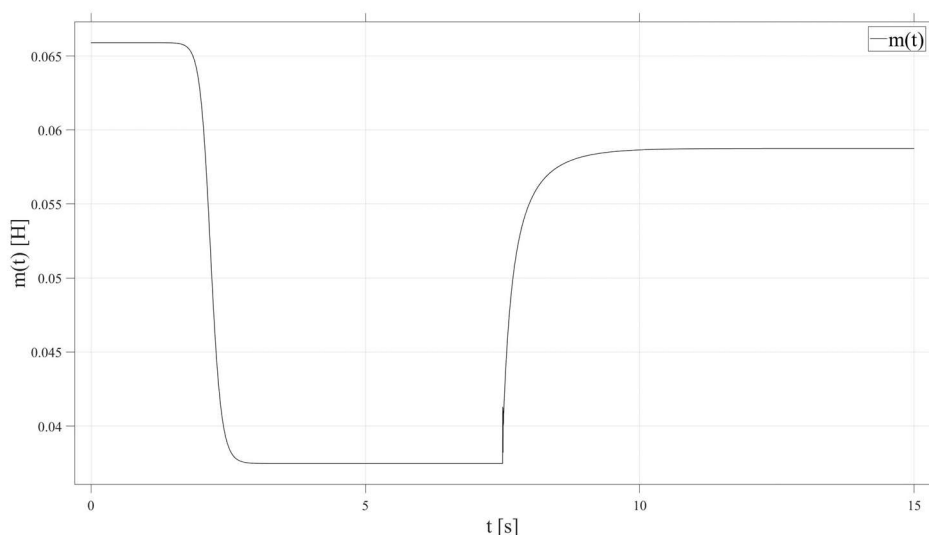
*Obr. 58 Časový průběh fázového napětí –  $180 \mu\text{F}$ ,  $20 \Omega$ ,  $25 \text{mH}$*



*Obr. 59 Časový průběh proudu –  $180 \mu\text{F}$ ,  $20 \Omega$ ,  $25 \text{mH}$*



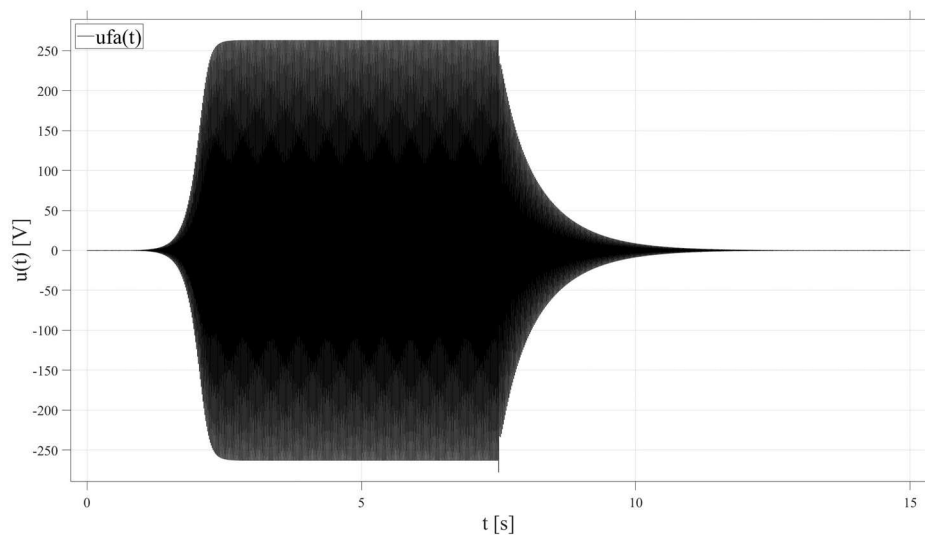
Obr. 60 Průběh magnetizačního proudu v čase –  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $20 mH$



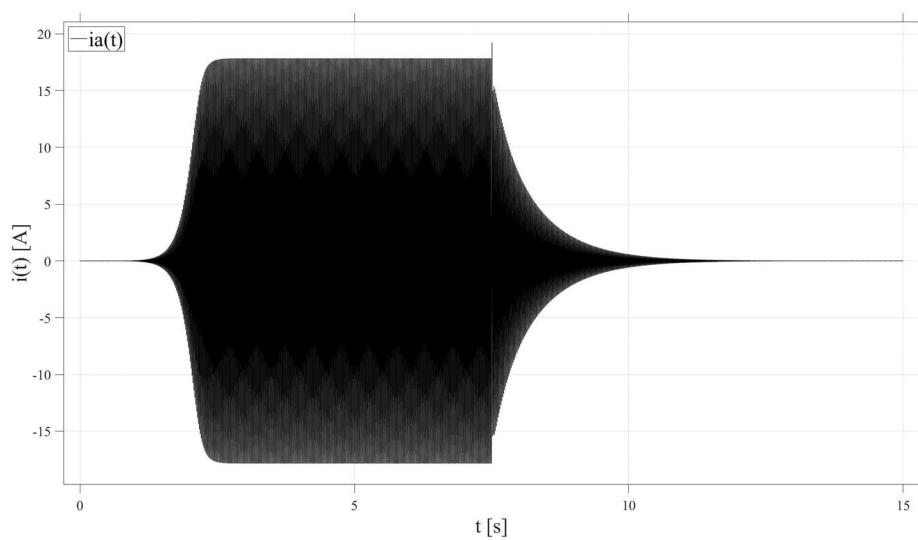
Obr. 61 Průběh vzájemné indukčnosti v čase –  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $20 mH$

### 4.3 Simulace přetížení

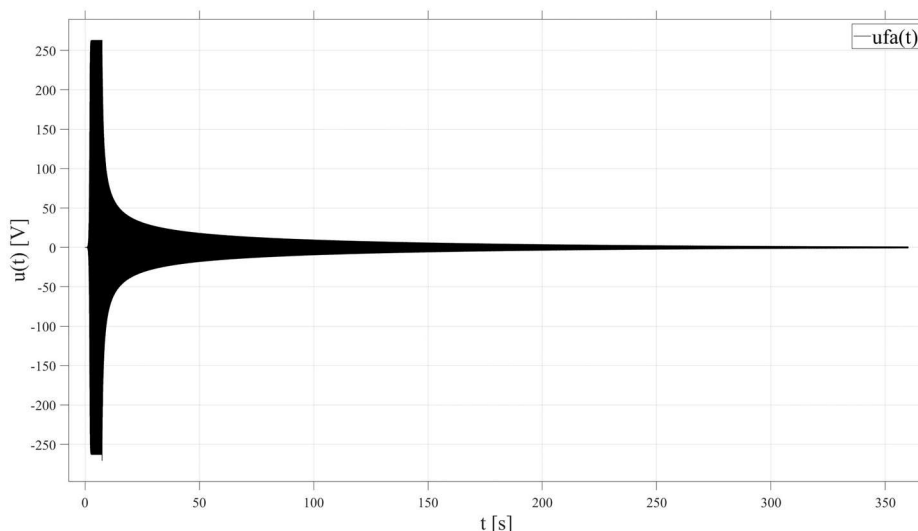
V předešlé části jsem zmínil, že s klesajícím  $R$  se přibližujeme stavu nakrátko. Pokud zvolím velikost např.  $R = 15 \Omega$  při stejné velikosti indukčnosti, tak dojde k odbuzení stroje a zanikne napětí (Obr. 62) i proud (Obr. 63). Experimentálně jsem zkusil ještě přetížít velikostí indukčnosti  $L = 45 mH$ , průběh napětí (Obr. 64) klesal v čase, ale napětí nezaniklo úplně. To mě vedlo k pokusu s využitím  $C_{ef}$ , který uvažuje pokles jalového výkonu dodaného do generátoru při připojení indukčnosti podle (25).



*Obr. 62 Časový průběh fázového napětí – přetížení  $180 \mu\text{F}$ ,  $15 \Omega$ ,  $20 \text{ mH}$*



*Obr. 63 Průběh proudu – přetížení  $180 \mu\text{F}$ ,  $15 \Omega$ ,  $20 \text{ mH}$*

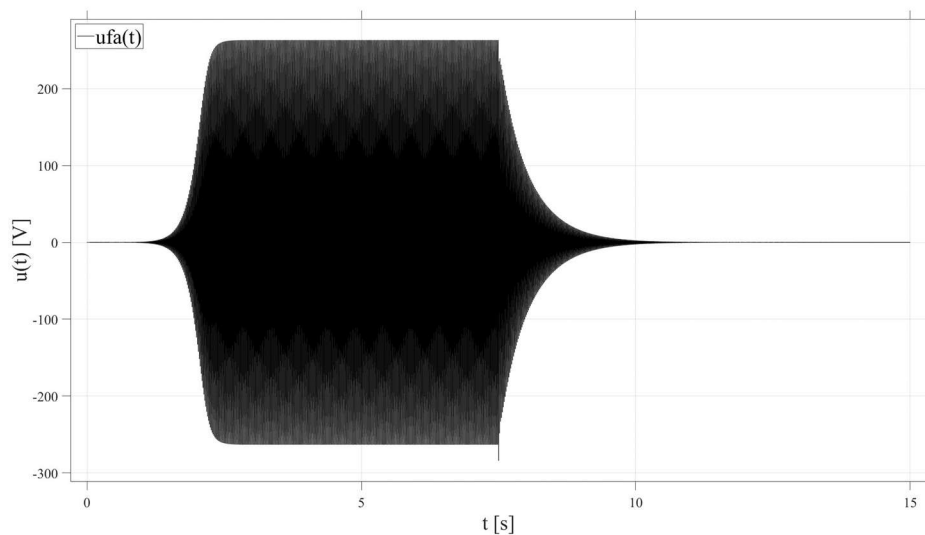


Obr. 64 Časový průběh fázového napětí – přetížení  $180 \mu\text{F}$ ,  $20 \Omega$ ,  $45 \text{ mH}$

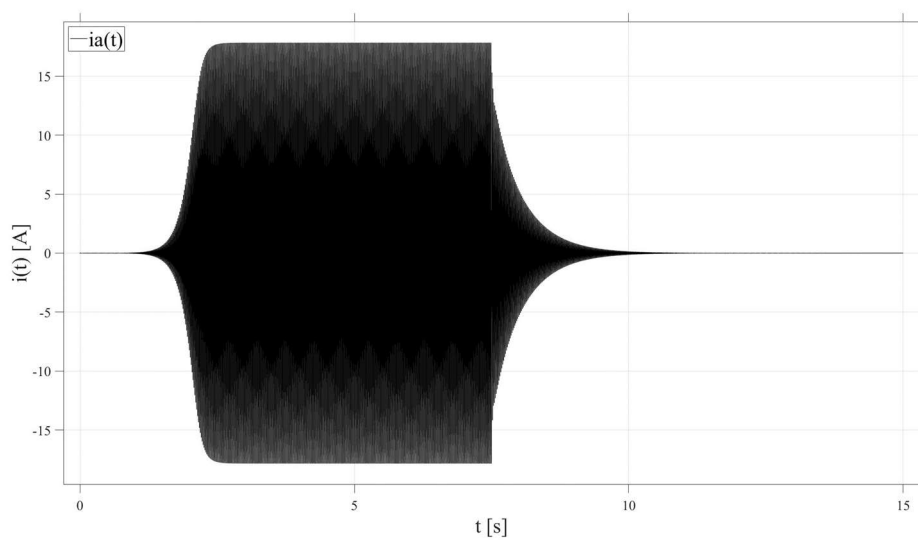
#### 4.4 Experiment – zatížení s uvážením efektivní kapacity

V případě zátěže ze [7] vidíme na Obr. 65 a Obr. 66, že došlo k odbuzení stroje. Dále jsem zvolil stejnou velikost odporu  $R$ , ale zmenšil jsem velikost indukčnosti na polovinu, tedy na velikost  $L = 10 \text{ mH}$ , tím by mělo dojít ke zvětšení amplitudy proudu a napětí oproti předešlé simulaci, a navíc ke zmenšení vlivu  $L$  na velikost kapacity budiče  $C$  podle (25). Na Obr. 67 a Obr. 68 vidíme, že se podle průběhů napětí a proudu stroj neodbudil. Pro zajímavost můžeme předešlé výsledky simulací porovnat s průběhy napětí (Obr. 69) a proudu (Obr. 70) pro stejnou zátěž, ale tentokrát bez uvážení vlivu efektivní kapacity. Vidíme, že bez vlivu efektivní kapacity pokles napětí a proudu není po připojení stejné zátěže  $RL$  tak značný. Na Obr. 71 vidíme po připojení zátěže v čase  $t = 7,5 \text{ s}$ , že došlo připojením velikosti zátěže volené dle [7], k poklesu velikosti kapacity, kterou má generátor k dispozici, na takovou velikost, že byla nedostatečná pro buzení stroje.

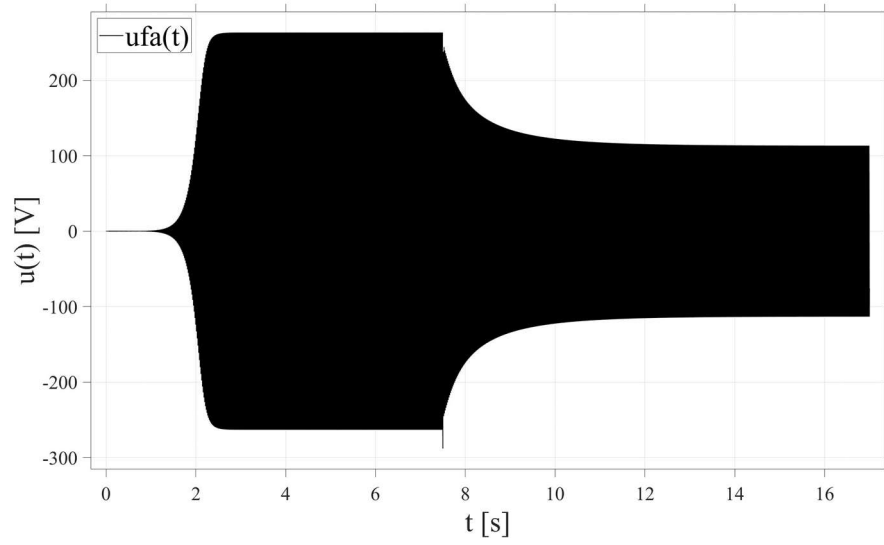




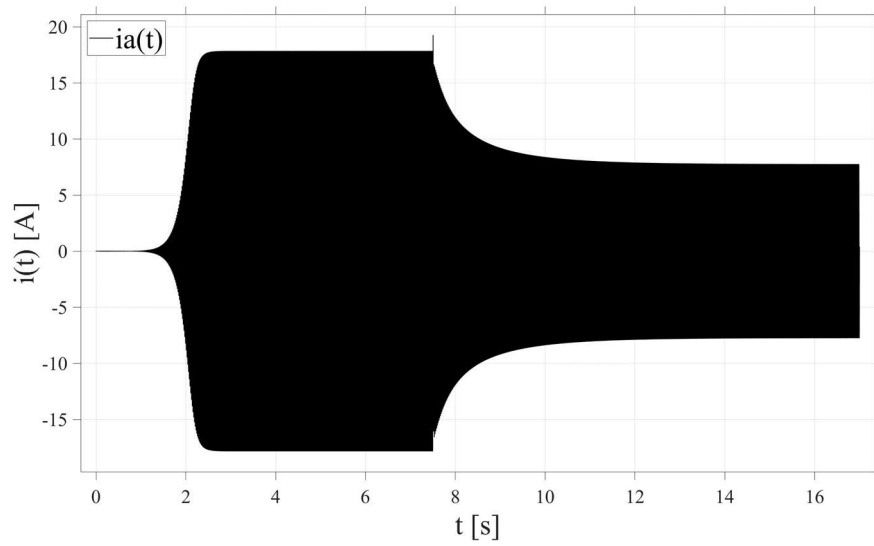
Obr. 65 Časový průběh fázového napětí – zatížení s uvážením  $C_{ef}$ ,  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $20 mH$



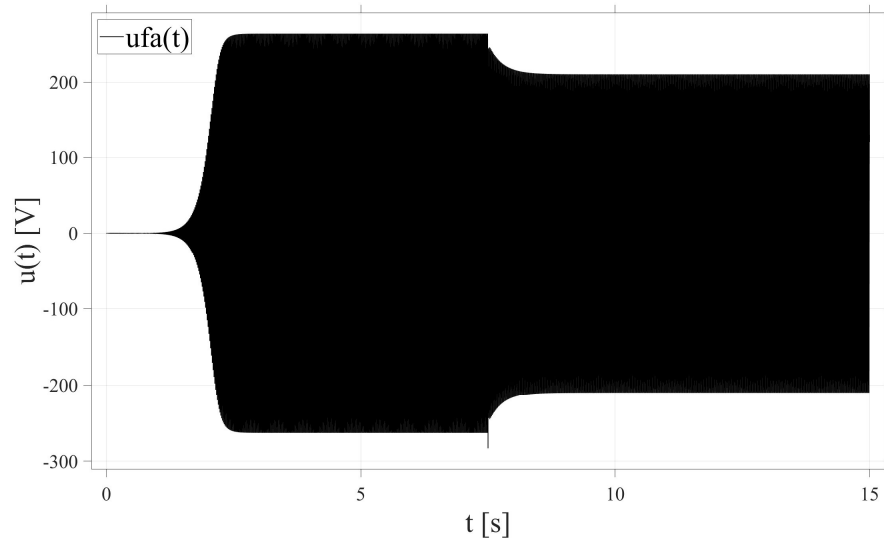
Obr. 66 Průběh proudu – zatížení s uvážením  $C_{ef}$ ,  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $20 mH$



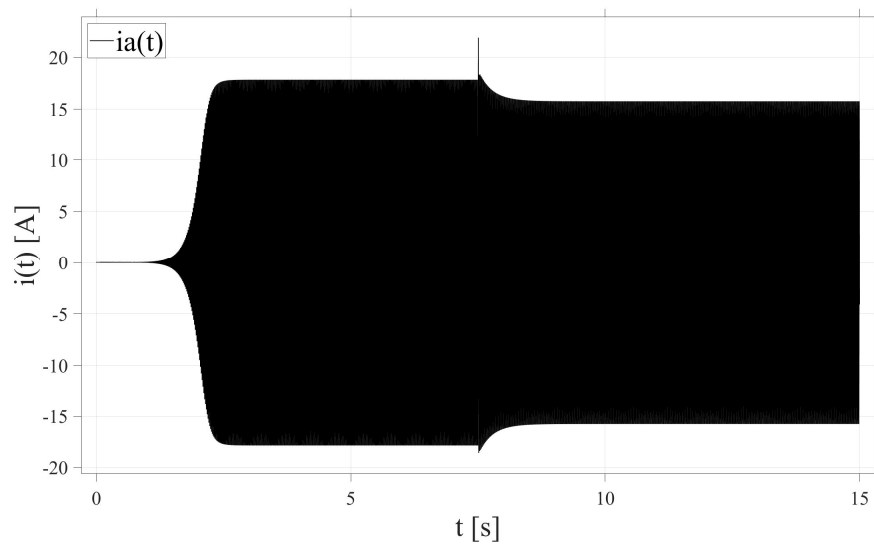
Obr. 67 Časový průběh fázového napětí – zatížení s uvážením  $C_{ef}$ ,  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $10 mH$



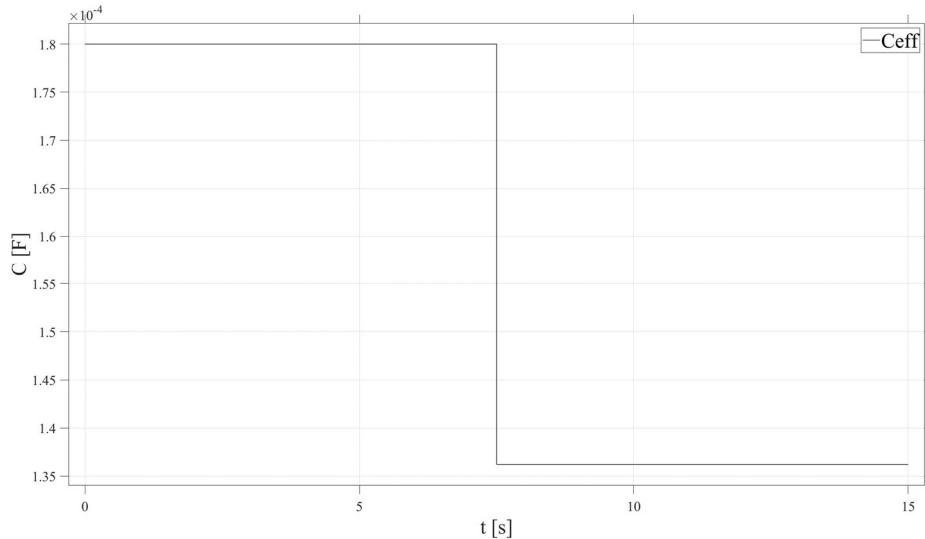
Obr. 68 Průběh proudu – zatížení s uvážením  $C_{ef}$ ,  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $10 mH$



Obr. 69 Časový průběh fázového napětí – bez uvážení  $C_{ef}$ ,  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $10 mH$



Obr. 70 Průběh proudu – bez uvážení  $C_{ef}$ ,  $180 \mu F$ ,  $20 \Omega$ ,  $10 mH$



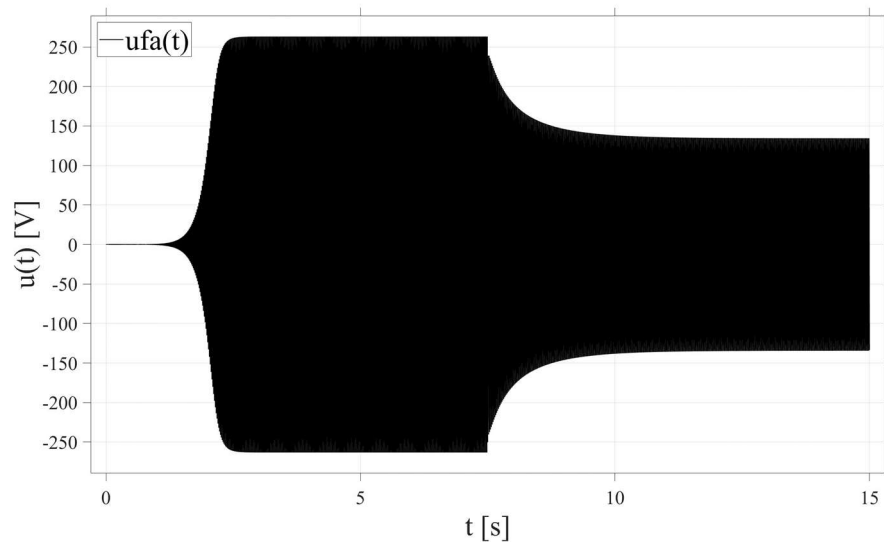
Obr. 71 Pokles velikosti kapacity dostupné pro SEIG – zátěž 180  $\mu$ F, 20  $\Omega$ , 20 mH

#### 4.5 Experiment – čistě odporová zátěž

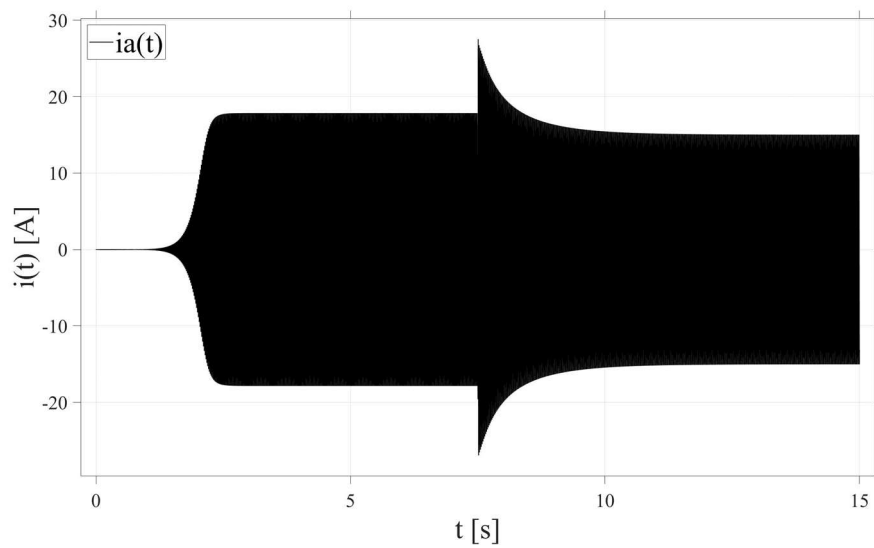
Matematický model pro čistě odporovou zátěž vznikne, pokud nebudeme uvažovat indukčnost  $L$ , potom dostaneme matematický model, který je vyjádřený upravenými rovnicemi (30) a (31) do tvaru (54) a (55). Zbylé rovnice modelu jsou (36), (37), (46), (47), (50) a (51). Pro tyto rovnice jsem přizpůsobil zapojení modelu. Neuvažoval jsem vliv  $C_{ef}$ . Na Obr. 72 vidíme průběh napětí, který v případě velikosti odporové zátěže  $R = 11 \Omega$  vykazuje pokles napětí. Průběh proudu je zajímavější, tam se setkáváme s tím, že po připojení zátěže došlo k proudovému nárazu a poté k jeho postupnému poklesu a ustálení na menší hodnotě, než byla hodnota proudu (magnetizačního) naprázdno (Obr. 73). V případě, že se budeme držet teorie, kterou jsem zmínil výše, a budeme chtít stroj přetížit, musím velikost  $R$  dostatečně snížit. Pro následující průběhy jsem zvolil velikost  $R = 5 \Omega$ . Podle Obr. 74 i Obr. 75 vidíme, že se stroj přetížil a došlo k jeho odbuzení. Za povšimnutí opět stojí proudový náraz, který procesu odbuzení předcházelo.

$$u_{Ld} = Ri_{Ld} \quad (54)$$

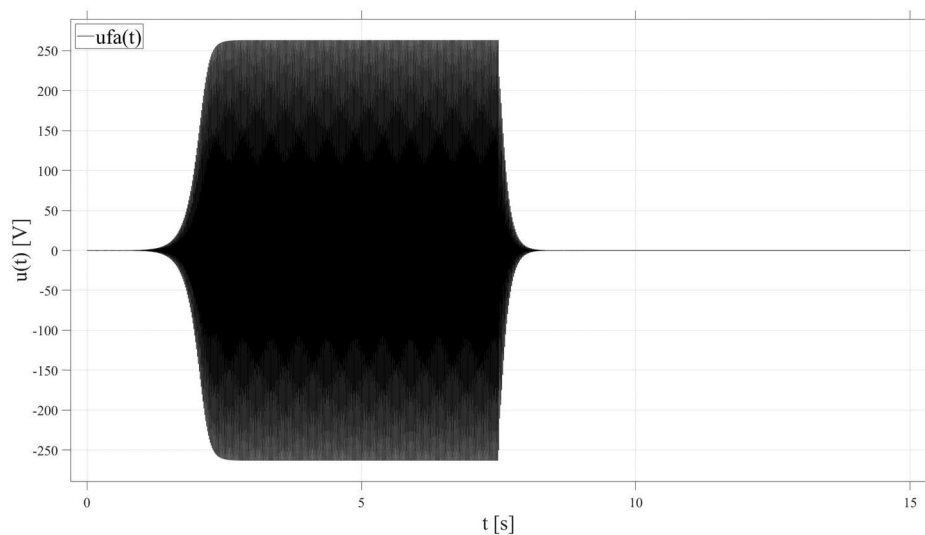
$$u_{Lq} = Ri_{Lq} \quad (55)$$



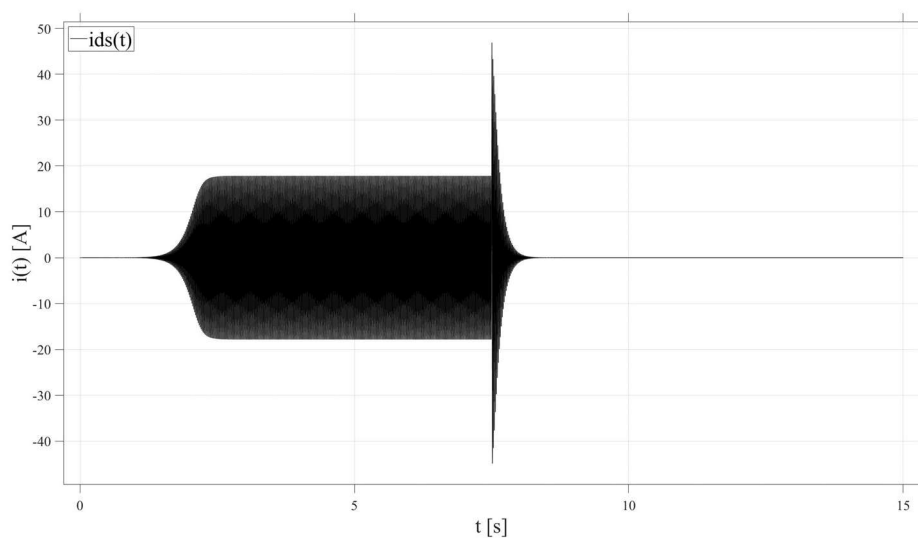
Obr. 72 Časový průběh fázového napětí – zatížení  $R$ ,  $180 \mu\text{F}$ ,  $11 \Omega$



Obr. 73 Průběh proudu – zatížení  $R$ ,  $180 \mu\text{F}$ ,  $11 \Omega$



*Obr. 74 Časový průběh fázového napětí – přetížení  $R$ ,  $180 \mu\text{F}$ ,  $5 \Omega$*



*Obr. 75 Průběh proudu – přetížení  $R$ ,  $180 \mu\text{F}$ ,  $5 \Omega$*

## Závěr

Výsledkem této práce je popis provozu asynchronního generátoru v ostrovním provozu. Začátek práce se věnuje ostrovní síti, režimu generátoru asynchronního stroje a jeho práci v ostrovní síti. Dále je názorně teoreticky i prakticky vysvětleno, jak je stroj možné nabudit a jaké způsoby určení velikosti kapacity budiče je možné použít. V kapitole 2 jsou zmíněny také limity spolupráce budiče s asynchronním generátorem. Z práce je patrné, že regulace tohoto stroje, obzvláště v ostrovním provozu, je náročná bez použití jakékoliv výkonové elektroniky. Je tomu tak z důvodu vazby frekvence a napětí. Změna frekvence je dána otáčkami, skluzem (zátěží) a konstrukcí stroje (počtem pólů). Změna napětí souvisí se změnou velikosti kapacity budiče, a tedy dodaného jalového výkonu stroji. Sázet na pasivní budič a regulaci pomocí maření elektrické energie je možné pouze v odlehlých oblastech a ve zvláštních případech, a to zejména tam, kde nejsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a kontinuální dodávku elektrické energie. Nicméně způsob tohoto provozu je možný, jak dokládají použité zdroje [2] a [7]. Lepší metoda buzení stroje však spočívá v řešení využívajícím výkonovou elektroniku. Pomocí tohoto řešení je možné implementovat i elektrickou zátěž, na které se bude mařit elektrická energie. Pro lepší řízení stroje je možné použít regulátor mechanického hnacího zařízení, aby byla dodržena rovnováha pohybové rovnice. Pro lepší představu byl zrealizován matematický model podle knihy „Modeling and Analysis with Induction Generators“. Ve vybraném matematickém modelu bylo v programu Simulink nasimulováno několik provozních režimů. Jednak proces samobuzení generátoru, dále chod naprázdno, ve kterém je poukázáno na to, co se děje se strojem při změně velikosti kapacity budiče, potom zatížení  $RL$  zátěží s různými kombinacemi velikostí  $R$  a  $L$ , a nakonec i přetížení. Simulace byly ještě využity pro tři experimenty. První se týkal uvážení efektivní kapacity, druhý experiment uvažoval pouze čistě odporovou  $R$  zátěž a poslední byl použit pro demonstraci funkčnosti metod určujících velikost kapacity budiče. Velkým problémem při zpracování práce byla nedostupnost relevantních parametrů pro asynchronní generátor. Ve velkém množství literatury kompletní sada parametrů k simulacím neseďí. Setkal jsem se s případem, kde byly známy parametry stroje, ale neodpovídala jim uvedená aproximace vzájemné indukčnosti [12]. Dále jsem narazil na článek, ve kterém byly uvedeny parametry stroje a aproximace průběhu vzájemné indukčnosti, ale výsledky simulací neseďely s uvedeným výkonem stroje [13]. Elektrické parametry byly nekompatibilní, z toho plyne doporučení do budoucna, že je nutné si reálný stroj fyzicky proměřit, abychom získali vlastní parametry.

## Seznam použité literatury

- [1] F. Sulla, “Island Operation with Induction Generators: Fault Analysis and Protection”, Licentiate Thesis, Department of Measurement Technology and Industrial Electrical Engineering Faculty of Engineering, Lund University, 2009.
- [2] J. Björnstedt, “Island Operation with Induction Generators: Frequency and Voltage Control”, Licentiate Thesis, Department of Measurement Technology and Industrial Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, 2009.
- [3] A. Andersson and E. Bye, “Analysis of Self-Excited Induction Generator for use in Rural Area with Electronic Load Controller and Additional Compensation Methods”, project thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [4] I. Boldea and S. A. Nasar, *The Induction Machines Design Handbook*, 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [5] J. Bauer, S. Fligl, V. Marsel, and R. Sergey, “Control of Island Mode Working Induction Generator Based on State Space Controller”, *IEEE*, vol. 16, no. 978-1-4799-2060-0/14, pp. 527-532, 2014.
- [6] A. C. Joshi and M. S. Chavan, “Induction Generator: Excitation & Voltage Regulation”, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 2017, no. 10.17148/IJIREEICE.2017.5534, pp. 219-223, 2017.
- [7] M. Godoy Simões and F. A. Farret, *Modeling and Analysis with Induction Generators*, 3rd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- [8] J. Björnstedt, “Voltage and Frequency Control for Island Operated Induction Generators”, research, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund University, 2007.
- [9] M. H. Haque and A. I. Maswood, “Determination of Excitation Capacitance of a Three-Phase Self-Excited Induction Generator”, *IEEE*, vol. 2012, no. 978-1-4673-2729-9/12, pp. 1-6, 2012.
- [10] M. M. Khalaf and A. M. Ali, “Voltage Build-Up Behavior of Self-Excited Induction Generator Under Different Loading Conditions”, *IEEE*, vol. 2020, no. 978-1-6654-1579-8/20, pp. 190-194, 2020.
- [11] P. Koblík, *Matematický model asynchronního motoru a transformace souřadnic: Učební text pro potřeby vlastní výuky*. Peking, 2019.
- [12] G. Ofualagba and E. Ubeku, “The Analysis and Modelling of a Self-excited Induction Generator Driven by a Variable Speed Wind Turbine”, *ResearchGate*, vol. 2011, no. 10.5772/18159, p. 21, 2011.
- [13] M. Ruff and H. Grotstollen, “Identification of the saturated mutual inductance of an asynchronous motor at standstill by recursive least squares algorithm”, *IEEE*, vol. 1993, no. 5, pp. 103-108, 1993.