

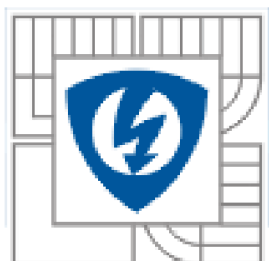


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**

**Ústav elektroenergetiky**



**Bakalářská práce**

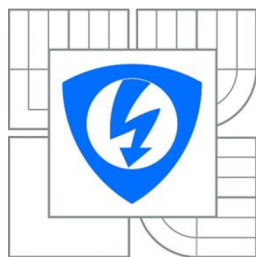
# **Paralelní spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovním režimu**

**Jan Seiml**

**vedoucí: Ing. Tomáš Bartošík**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014**

**Brno**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a  
komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Jan Seiml

**ID:** 146095

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

### Paralelní spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovním režimu

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod do problematiky paralelní spolupráce synchronních a asynchronních generátorů.
2. Synchronní a asynchronní generátory - provozní vlastnosti a jejich charakteristiky.
3. Rozbor problematiky řízení a regulace ostrovních sítí.
4. Vytvoření praktické ukázky paralelní spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovním režimu.
5. Popis provozních vlastností, základních parametrů a charakteristik této soustavy.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 30.6.2014

**Termín odevzdání:** 8.8.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Bartošík

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

SEIML, J. *Paralelní spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovním režimu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Bartošík.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Paralelní spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovním režimu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Ve Zlivi dne ..... Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Tomáši Bartošíkovi za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a cenné rady při zpracování a následném měření ve školní laboratoři.

Ve Zlivi dne ..... Podpis autora .....

## **ABSTRAKT**

Zaměřením této bakalářské práce je popis provozních vlastností asynchronního a synchronního generátoru v ostrovní síti. Dále je zde probraná problematika řízení a regulace ostrovních sítí, chování spotřebičů a zdrojů v této síti a jejich charakteristiky a následně vytvořená praktická ukázka ostrovní sítě s synchronním a asynchronním generátorem.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** ostrovní síť; asynchronní generátor; synchronní generátor; regulace napětí; regulace frekvence

## **ABSTRACT**

The main focus of this bachelor's thesis is the description of the properties of asynchronous and synchronous generator in off-grid network. There is explanation of control and regulation of off-grid networks, the behavior of generators and and resources in the network and their characteristics and the subsequent creation of a practical demonstration of island networks with synchronous and asynchronous generator.

**KEY WORDS:** off-grid network; synchronous generator; asynchronous generátor; voltage regulation; frequency regulation

**OBSAH**

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	12
2 GENERÁTORY A JEJICH POUŽITÍ V PRAXI.....	13
3 ASYNCHRONNÍ STROJE .....	14
3.1 ROZDĚLENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ.....	14
3.2 VZNIK TOČIVÉHO MAGNETICKÉHO POLE .....	14
3.3 VZNIK TAŽNÉ SÍLY .....	15
3.4 TŘÍFÁZOVÝ ASYNCHRONNÍ MOTOR.....	15
3.5 ROZBĚH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....	17
3.6 ŘÍZENÍ OTÁČEK ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....	18
3.7 ASYNCHRONNÍ GENERÁTOR.....	19
3.8 CELKOVÉ SROVNÁNÍ PROVOZNÍCH STAVŮ ASYNCHRONNÍHO STROJE.....	19
4 SYNCHRONNÍ STROJE .....	20
4.1 ROZDĚLENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	20
4.2 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	20
4.3 MOMENT SYNCHRONNÍHO STROJE .....	21
4.4 SOUHRN VÝHOD A NEVÝHOD SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	22
4.5 PROVOZNÍ STAVY SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	23
4.6 SYNCHRONNÍ 3F MOTOR.....	23
4.7 SYNCHRONNÍ 3F GENERÁTOR.....	24
4.8 BUZENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	25
4.9 KÝVÁNÍ STROJE.....	25
5 PŘENOSOVÁ A DISTRIBUČNÍ SÍŤ .....	26
5.1 PŘENOSOVÁ SÍŤ.....	26
5.2 DISTRIBUČNÍ SÍŤ.....	26
6 OSTROVNÍ SÍŤ .....	27
6.1 PROVOZ ELEKTRICKÉ OSTROVNÍ SÍŤE .....	27
6.2 ZMĚNY KMITOČTU .....	27
6.3 KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA ZATÍŽENÍ.....	28
6.4 KMITOČTOVÁ CHARAKTERISTIKA ZDROJŮ .....	29
6.5 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....	31
6.6 REGULACE NAPĚTÍ SÍŤE .....	32

---

<b>7 MĚŘENÍ PROVOZNÍCH CHARAKTERISTIK .....</b>	<b>35</b>
<b>7.1 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK OSTROVNÍ SÍTĚ SE SYNCHRONNÍM GENERÁTOREM .....</b>	<b>35</b>
<b>7.2 MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK OSTROVNÍ SÍTĚ S OBĚMA GENERÁTORY .....</b>	<b>37</b>
<b>7.3 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....</b>	<b>39</b>
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>40</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>42</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>43</b>
<b>A. TABULKY NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT .....</b>	<b>43</b>
<b>B. ŠTÍTKOVÉ HODNOTY POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ .....</b>	<b>45</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1</i> Představa homogenního dvojpólového točivého mg. pole [3] .....	14
<i>Obrázek 2</i> Schématické a reálné uspořádání tří statorových cívek [3] .....	15
<i>Obrázek 3</i> Řez Asynchronním motorem [1] .....	16
<i>Obrázek 5</i> Řez kroužkovým motorem s viditelnými sběracími kroužky [2].....	17
<i>Obrázek 6</i> Průběh spouštění pomocí přepínání odporů [3].....	18
<i>Obrázek 7</i> Provozní stavy asynchronního stroje [3].....	19
<i>Obrázek 8</i> Uspořádání pólů v synchronním stroji s vyjádřenými póly a s hladkým rotorem [11].	21
<i>Obrázek 9</i> Moment synchronního stroje s vyjádřenými póly [11] .....	21
<i>Obrázek 10</i> Moment synchronního stroje s hladkým rotorem. [11] .....	22
<i>Obrázek 11</i> Zjednodušené schéma synchronního stroje [11] .....	23
<i>Obrázek 12</i> Fázorový diagram synchronního motoru .....	24
<i>Obrázek 13</i> Fázorový diagram synchronního generátoru .....	24
<i>Obrázek 14</i> Kývání synchronního stroje .....	25
<i>Obrázek 15</i> Závislost frekvence na činném a jalovém výkonu [12] .....	27
<i>Obrázek 16</i> Závislost frekvence při změnách zatížení[13].....	28
<i>Obrázek 17</i> Kmitočtová charakteristika zdrojů [12] .....	29
<i>Obrázek 18</i> Chování neregulované sítě při narušení rovnováhy při změně zatížení[13] .....	31
<i>Obrázek 19</i> Chování neregulované sítě při narušení rovnováhy při změně výkonu zdrojů[13].....	31
<i>Obrázek 20</i> Závislost jalového výkonu zdroje na napětí[13].....	33
<i>Obrázek 21</i> Závislost jalového výkonu spotřebičů na napětí[13].....	33
<i>Obrázek 22</i> Rovnovážný stav sítě při změnách napětí[13] .....	34
<i>Obrázek 23</i> Frekvenční charakteristiky ostrovní sítě se synchronním generátorem .....	35
<i>Obrázek 25</i> Frekvenční charakteristiky ostrovní sítě s oběma generátory.....	37
<i>Obrázek 27</i> Schéma zapojení zkušební ostrovní sítě .....	39



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 Frekvenční charakteristika synchronního generátoru .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 2 Frekvenční charakteristika ostrovní sítě se synchronním generátorem.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 3 Frekvenční charakteristika synchronního a asynchronního generátoru .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 4 Frekvenční charakteristika ostrovní sítě .....</i>	<i>44</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název	Jednotka
U	Napětí	V
$U_s$	Sdružené napětí	V
$U_f$	Fázové napětí	V
I	Proud	I
R	Odpor	$\Omega$
f	Frekvence	Hz
n	Otáčky	ot/min
P	Počet pólů	-
$\Phi$	Magnetický tok	Wb
P	Činný výkon	W
Q	Jalový výkon	VAr
S	Zdánlivý výkon	VA
M	Moment	Nm
$\omega$	Úhlová rychlost	rad.s <sup>-1</sup>
$k_z$	Výkonový součinitel zatížení	W/Hz
$K_z$	Výkonové číslo	W/Hz
$K_g$	Výkonové číslo generátoru	W/Hz
$k_g$	Výkonový součinitel generátoru	W/Hz
$K_S$	Výkonové číslo soustavy	W/Hz

# 1 ÚVOD

Synchronní generátory jsou točivé elektrické stroje sloužící na přeměnu mechanické energie na energii elektrickou, dnes v převážné většině slouží jako výhradní zdroje elektrické energie. Díky jejich velké účinnosti se používají ve všech větších výrobnách energie. Dokážou pracovat i samostatně, jelikož mohou vyrábět jak činnou tak i jalovou složku proudu. Asynchronní generátor je provozní stav asynchronního stroje, do kterého začneme místo odběru dodávat mechanicky energii tím, že jeho rotor roztočíme rychleji, než jsou otáčky jeho statorového magnetického pole. Tento generátor nemůže samostatně pracovat, jelikož pro svou práci potřebuje magnetizační proud, který si sám vyrobit neumí. Vhodným řešením je spolupráce se synchronním generátorem, který dokáže do sítě dodávat činnou i jalovou složku proudu.

Paralelní spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovní síti má hned několik specifických vlastností. Ostrovní síť je zvláštní druh elektrické sítě, která se vyznačuje tím, že jakákoliv nerovnováha mezi zatížením a výrobou má za následek kolísání napětí či frekvence. Tyto poklesy jsou zde mnohem častější a znatelnější než v distribučních sítích, kde lze napětí a frekvenci považovat za konstantní parametry.

Snaha o udržení jmenovitého napětí s co nejmenšími odchylkami od jmenovité hodnoty je hlavním faktorem kvality elektrické energie. Poklesy napětí mohou mít negativní vliv na spotřebiče a to zejména asynchronní motory, kde jejich moment může být až kvadraticky závislý na napětí. Naopak při překlenutí napětí nad jmenovitou hodnotu, může docházet poškození izolace či průrazu. Změny frekvence sítě mohou mít také negativní vliv na spotřebiče, zejména na synchronní motory, kde jejich otáčky jsou zcela závislé na frekvenci sítě.

V našem případě jde o nezávislou třífázovou síť o sdruženém napětí 400V se středním uzemněným vodičem PEN, se dvěma generátory, odporovou a motorickou zátěží

## 2 GENERÁTORY A JEJICH POUŽITÍ V PRAXI

### Synchronní generátory

Synchronní generátory jsou dodnes nejdůležitějšími elektrickými stroji pro výrobu elektrické energie. Tyto synchronní generátory nazývané také alternátory jsou nejčastěji trojfázové. Alternátory, které jsou v elektrárnách poháněny parními nebo plynovými turbínami při rychlostech nejčastěji 3000 ot/min, kterým říkáme turboalternátory. Konstrukčně jsou vyráběné s hladkým rotorem pro lepší stabilitu ve vysokých otáčkách a průměr rotoru obvykle nepřesahuje 1,2m. Tyto alternátory pracují na své mezi mechanické a elektrické pevnosti. Výkonově se můžeme setkat s výkony přibližně od 100MW až po vrcholné hodnoty kupříkladu v jaderných elektrárnách kde výkon alternátoru se pohybuje i okolo 1100MW. Volba napěťové hladiny alternátoru se volí dle jeho výkonu, pro malé alternátory okolo 100MW je typická napěťová hladina 6,3kV se vzrůstajícím výkonem se napětí zvyšují na hodnoty 10,5kV, 13,8kV, 15,75 až na 24kV, které je použito například v JE Temelín.

Dalším typem alternátorů jsou takzvané hydroalternátory poháněné vodními turbínami při podstatně nižších rychlostech. Tyto pomalu běžné alternátory jsou konstrukčně provedené se svislou osou rotace a jejich výška s příslušenstvím se může pohybovat i okolo 30m. Jejich průměr je podstatně větší než u turboalternátorů, díky nižším odstředivým silám může jejich rotor dosáhnout i 10m. Rozměrově se jedná o jedny z největších elektrických strojů. Hlavní výhodou hydroalternátorů je jejich velmi rychlý start. Obvykle do dvou minut je alternátor už schopen dodávat do elektrické sítě výkon.

### Asynchronní generátory

Asynchronní generátor je nejčastějším zdrojem proudu na současných malých vodních elektrárnách do výkonů přibližně 250kW. Jako asynchronní generátor lze bez úprav použít téměř každý asynchronní motor s kotvou nakrátko. Pro jeho správnou činnost se funkci generátoru, je potřeba jeho rotor roztočit nad synchronní otáčky, zhruba na 110% jeho jmenovitých otáček v motorickém režimu. Jeho hlavní výhodou je, že asynchronní generátor nepotřebuje pro svůj provoz zdroj buzení, proto je jednoduchý na výrobu, jeho obsluhu a lze snadno automatizovat. V porovnání se synchronním generátorem má však o něco menší účinnost.

## 3 ASYNCHRONNÍ STROJE

Asynchronní stroje jsou v dnešní době zatím nepoužívanější točivé elektrické stroje, avšak jejich nadvládu pomalu přebírají synchronní stroje s frekvenčními měniči. Skládají se z magnetického obvodu, který je složen ze dvou částí a to stator a rotor. Mezi nimi je malá, obvykle vzduchová mezera, která tyto obvody dělí od sebe. Stator je tvořen buď jednofázových či nejčastěji třífázovým vinutím připojeném na zdroj střídavého proudu. Rotorové vinutí se skládá z rotorové klece či je ve speciálních případech vinuté s vývody pro připojení reostatů, ale o tom více v další kapitole.

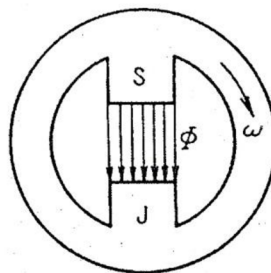
Trojfázový asynchronní stroj lze konstrukčně považovat na velice jednoduchý stroj, nenáročný na obsluhu, který se vyznačuje vysokou spolehlivostí a nízkou poruchovostí. Výkonově se vyrábí už od několika wattů a končí až v řádu desítek Megawattů. Rozsah otáček je též širokopásmový, záleží na frekvenci sítě a díky ní lze stroj roztočit i na desítky tisíc otáček za minutu. [10]

### 3.1 Rozdělení asynchronních strojů

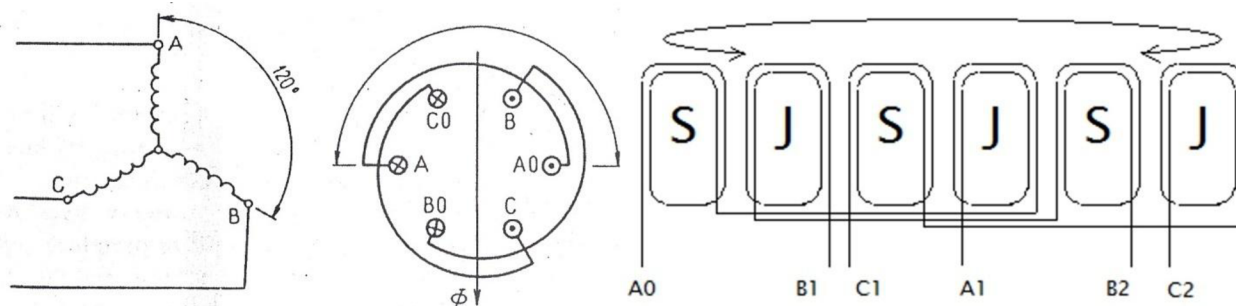
Asynchronní motor	Přeměna elektrické energie na mechanickou energii. Konstrukčně dále dělíme na jednofázové a třífázové s rotorem nakrátko nebo kroužkové.
Asynchronní generátor	Slouží k přeměně mechanické energie na energii elektrickou, avšak pouze za speciálních podmínek.
Asynchronní brzda	Jinak nazývané jako brzdění protiproudem. Vnikne otočením směru otáčení magnetického pole ve statoru. Takto lze efektivně brzdit či zastavit i mnohatunové rotory. Toto brzdění je však nehospodárné, neboť všechna energie se přemění na teplo v rotoru.

### 3.2 Vznik točivého magnetického pole

Točivé magnetické pole můžeme vytvořit nejlépe z dvou či více střídavých magnetických polí, které jsou mezi sebou prostorově i časově poposunutá. Tažná síla vzniká naindukováním napětí v rotoru, které následně protlačí proud a vzájemným působením tohoto točivého pole a magnetického pole rotoru vzniká tažná síla.



Obrázek 1 Představa homogenního dvojpólového točivého mg. pole [3]



Obrázek 2 Schématické a reálné uspořádání tří statorových cívek [3]

Tímto uspořádáním cívek na statoru vytvoříme točivé magnetické pole, dále může snadno vytvořit dvojnásobné napětí a to buď sdužené mezi jednotlivými fázemi, či zavedením středního vodiče pro fázové napětí. [8]

$$U_s = \sqrt{3} * U_f \quad 3.1$$

### 3.3 Vznik tažné síly

Nejjednodušší rotor motoru je složen z jednoho závitu nakrátko, který je v točivém magnetickém poli. Velikost magnetického toku procházejícího plochou stojícího závitu se během otáčení mění vlivem  $\omega$  a to protlačí proud. Jeho magnetické pole spolu s magnetickým polem statoru vytvoří točivý moment.

Asynchronní motor se nikdy nemůže roztočit synchronními otáčkami, jelikož by se v rotoru neindukoval žádný proud a rotor by se neměl o co opřít. [8]

### 3.4 Třífázový asynchronní motor

Třífázový asynchronní motor je hojně používaný motor, avšak je dnes nahrazován synchronními motory, které jsou složitější na konstrukci, avšak mají nepatrně lepší účinnost. Dělíme je na asynchronní motory s kotvou nakrátko a na kroužkové motory.

#### Konstrukce asynchronního stroje s kotvou nakrátko

Mezi hlavní části motoru lze zmínit statorový svazek, kostru, vinutí, rotor ve formě klece, statorová svorkovnice a mechanické části, do kterých řadíme ložiska, hřídel a ventilátor. Statorový svazek je tvořen dynamo plechy o tloušťce okolo 0,5mm, ve kterých jsou drážky pro vložení třífázového vinutí. Kostra, nejčastěji žebrovaná, podle které se skoro na první pohled určíme, o jaký motor jde. Má za úkol odvádět teplo vznikající průchodem proudem statorovým vinutím. Pro další chlazení je na zadním štítu motoru připevněn na hřídeli ventilátor, zajišťující proudění vzduchu v motoru. Na přední štít je vyvedena hřídel rotoru, přizpůsobena na připojení zátěže. Vše je názorně zobrazeno na následujícím obrázku. [11]



Obrázek 3 Řez Asynchronním motorem [1]

Statorová svorkovnice zajišťuje připojení motoru na síť. Jsou zde vyvedeny vývody z jednotlivých vinutí a je uspořádána tak, že snadným prohozením spojovacích plíšků lze zaměnit zapojení hvězda/trojúhelník.

Sekundární vinutí neboli rotorové vinutí je v tomto případě sepnuto trvale do zkratu. Mnohdy je nazýváno jako klec. Konstrukce klecí je tvořena sérií masivních tyčí zhotovených z mědi.

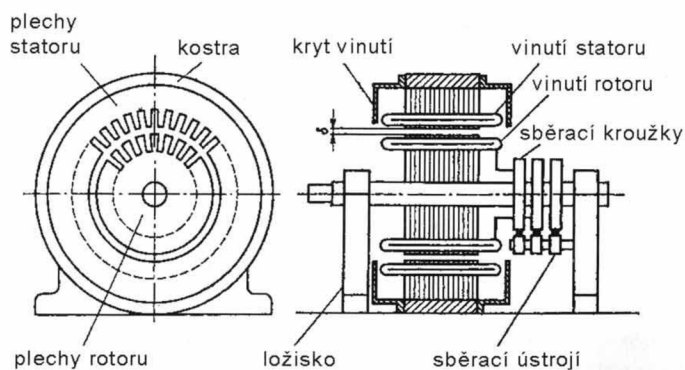
Takzvaná odporová klec zhotovená z mosazi či siluminu zajišťuje větší odpor v kleci, což zvyšuje záběrný moment, zvětšuje skluz a snižuje účinnost motoru. Tyto vlastnosti nahrávají pro použití ve strojích, kde je potřeba častý velký záběrný moment, kupříkladu u výtahů či jeřábů. Při návrhu musíme však dbát na to, aby při použití jiného odporového materiálu nedošlo k výrazné změně tepelné kapacity, čímž by se stroj oteplil nad dovolenou mez. Zároveň návrhem odporové klece, můžeme zajistit to, že maximální moment se bude rovnat momentu záběrnému. [11]

Dalším typem odporové klece je dvojitá, jinde nazývaná jako Boucherotova. Tato klec spojuje výhody obyčejné klece za normálního chodu a odporové klece při samotném rozběhu. Tvoří jí dvě soustavy tyčí (pracovní a odporová), kde každá soustava má zcela odlišný průřez. Jsou umístěny vedle sebe, nebo nejčastěji nad sebou a spojeny tenkým kruhem. Odporová klec je umístěna na povrchu rotoru, pracovní je skryta uvnitř rotoru v železe. Rozběh, při skluzu rovném 1 se indukují do obou soustav proud o frekvenci sítě a v tu chvíli se v tyčích indukují proud nepřímo úměrně odporům soustav, tedy většinová část prochází odporovou částí a motor se chová jako s odporovou klecí. Se zvyšujícími se otáčkami, frekvence proudu v této kleci klesá a většina indukovaného proudu se stahuje do pracovní soustavy. Za ustáleného chodu je frekvence v kleci tak nízká, že proud procházející rozběhovou soustavou je zanedbatelný a motor má obdobné parametry jako s obyčejnou pracovní klecí. Dnešní vyráběné motory od výkonů zhruba 5kW se výhradně osazují s dvojitou klecí. Touto klecí dosáhneme zvětšení záběrného momentu a zmenšení záběrného proudu. [11]

Posledním známým typem klecí, jsou vírové klece. Namísto kruhových průřezů klec tvoří úzké a hluboké pruhy různých tvarů. Při rozběhu se proud díky většímu rozptylovému magnetickému toku vytlačuje do horních částí klece, kde se koncentruje a tvoří tak jakousi odporovou klec. Při ustálení otáček na nominální, se proud skoro celý rovnoměrně rozdělí po celé výšce klece a tím se chová jako standardní pracovní klec. [3]

### Konstrukce kroužkového asynchronního motoru

Celá konstrukce vychází z AS motoru s kotvou nakrátko. Je zde všechno stejné, jen rotor není tvořen souborem na konci spojených tyčí jako u minulého případu, nýbrž je tvořen třífázovým vinutím, podobným jako statorové. Jeho konce jsou spojeny zkratovačem, druhé tři konce jsou vyvedeny na sběrací kroužky. Na tyto sběrací kroužky izolované od zbytku motoru doléhají páry uhlíkových kartáčů, které přenášejí proud z otáčeného rotoru na statickou svorkovnici připevněnou ke kostře motoru. Na tuto svorkovnici připojujeme zpravidla reostaty, kterými regulujeme odpor kotvy a tím řídíme záběrný proud a zvětšujeme záběrný moment. Odporníky tvoří zejména trojice různě velkých odporů s přepínačem. Během rozběhu se postupně přepínají na čím dál menší odpor až do fáze, kdy se úplně vyřadí a zkratují odvod kotvy. Při tomto přepínání je důležité, aby odpory byly spínány bez přerušování. V opačném případě, kdy dojde k přerušování obvodu kotvy se naindukují značné přepětí, které vytáhne oblouk mezi kotvou a přepínačem. Pak zde dochází k opalování kontaktů či porušení izolace. [11]



Obrázek 4 Řez kroužkovým motorem s viditelnými sběracími kroužky [2]

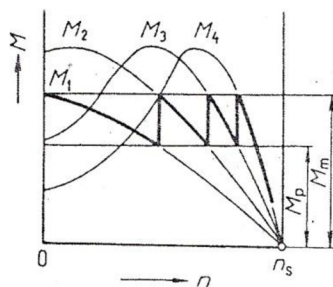
### 3.5 Rozběh asynchronních motorů

Rozběh je celkově stále zmiňovaný provozní problém a to nejen u AS motorů. Jeho charakteristickými veličinami je záběrný proud a moment. Prvním snadným způsobem jak rozběhnout motor je přímé připojení na síť. To můžeme provést pomocí spínače nebo stykače. Dle norem je tento způsob dovolen pro motory 3kW se zapínacím výkonem 22kVA. Tento rozběh má však negativní vliv na síť, jelikož dochází k velkým proudovým rázům a může to vést k problémům v jištění. O trochu šetrnější je metoda s přepínačem Y/D. Jedná se též o přímé připojení na síť, avšak rozběhem na hvězdu snížíme záběrný proud na celou třetinu. Po zvýšení otáček přepneme do trojúhelníka pomocí manuálního přepínače, tak jak známe třeba ze staré cirkulárky, časovým nebo odstředivým spínačem. Tento způsob se běžně používá pro motory od 4 do 15kW a to pouze pro rozběhy naprázdno. [3]

Odstředivá třecí spojka vložená přímo na rotor je další způsob, jak rozběhnout motor se zátěží. Výkonové omezení je kolem 8kW s nárazovým výkonem do 22kVA. Pro představu, tento typ odstředivé spojky se používá u motorových pil.

Již zmiňovaný způsob řízení a tím i rozběhu je pomocí skluzu. Tento způsob je možný pouze u motorů s vinutou kotvou. Pomocí rotorového spouštěče se do kotvy připojí odpory, které se následně odpojují až to úplného zkratování. Tím je možné rozbíhat motor s téměř konstantním momentem tak, aby nedošlo k momentovému přetížení hřídele. [10]





Obrázek 5 Průběh spouštění pomocí přepínání odporů [3]

Posledním známým způsobem je spouštění pomocí spouštěcího transformátoru. Jde o princip na základě skluzu. To se však moc nepoužívá, jelikož je zapotřebí nejlépe auto-transformátor. Musíme dále brát ohled na to, že moment se snižuje s kvadrátem napětí. [10]

$$U^2 \sim M \quad 3.2$$

### 3.6 Řízení otáček asynchronního motoru

Regulovat otáčky asynchronního motoru lze hned několika způsoby. Můžeme regulovat ve statoru, tak i v rotoru. Základem je rovnice vyjadřující otáčky motoru.

$$n = \frac{60 * f}{P} * (1 - s) \quad \left[ \frac{ot}{min} \right] \quad 3.3$$

Z této rovnice je patrné, že otáčky můžeme řídit třemi způsoby. Pomocí frekvence, změnou počtu pólových dvojic nebo skluzem.

Přepínání počtu pólových dvojic je dneska zastaralý způsob, avšak v posledních historických provezech se stále používá. Touto změnou se však nemění záběrný moment, který zůstává stále stejný. Následné změny počtu pólových dvojic se dějí skokově, tudíž jsou znatelné hrubé skoky přepínání. Je to složitý způsob, realizovatelný ještě u motorů s kotvou nakrátko, u motorů s vinutou kotvou by se paralelně musely přepínat i rotorová vinutí, což je konstrukčně a mechanicky velice složité. Speciální je Dahlanderovo zapojení, kde můžeme dosáhnout jemnějších skoků, avšak za cenu vyšší spotřeby mědi. [10]

Regulace skluzem neslouží pro samotnou regulaci otáček. Skluz je totiž úměrný rotorovému odporu. Při této regulaci musíme avšak dbát na to, aby moment neklesl pod nominální.

Posledním způsobem a tím nejpoužívanějším je pomocí frekvence a to přímým a nepřímým měničem kmitočtu. Přímý měnič kmitočtu s minimálně 18 polovodičových řízených prvků sestavuje z jednotlivých fázových sinusovek volenou sinusovku, avšak v možném rozmezí frekvence 0 – 23Hz, výše není možné. Používá se pro pomaloběžné stroje, kupříkladu pro mlýny na uhlí či kameny.

Nejběžnější nepřímý měnič kmitočtu je složen ze dvou částí můstkového provedení. Z usměrňovače, SS obvodu a střídače. Je tvořen tyristory, které umožňují velký rozsah výstupní frekvence a hlavně povolují rekuperaci tj. navrácení energie zpět do sítě. Slouží k samotnému rozběhu, kde můžeme najít takovou frekvenci, kde je záběrový moment roven maximálnímu, i pro roztočení motorů nad 3000 ot/min. Obvyklé kmitočty v praxi se pohybují v rozmezí 100 – 400 Hz.

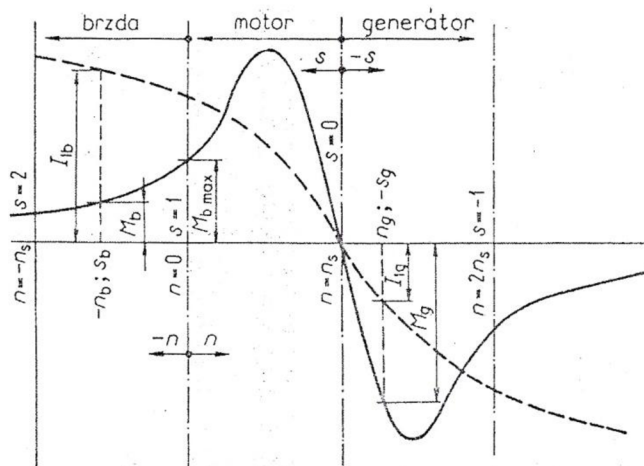
Asynchronní motor se nikdy nemůže roztočit synchronními otáčkami, jelikož by se v rotoru neindukoval žádný proud, který se nevytvořil magnetické pole a rotor by se nemohl o co opřít. [3]

### 3.7 Asynchronní generátor

Konstrukčně je jedná o asynchronní motor popsany v předchozích kapitolách. Asynchronní motor přejde bez jakéhokoliv přepojování na generátor tehdy, když do motoru začneme přidávat vnější moment a tím roztočíme rotor nad synchronní otáčky. Velikost skluzu se dostane do záporných hodnot. Při motorickém chodu odebírá stroj ze sítě jak jalový tak i činný výkon. Po překročení synchronních otáček – přechodu do generátorového stavu se činný výkon stane záporným, začne ho stroj dodávat do sítě, ale magnetizační proud je stále odebírán jako ve stavu motorickém.

Jeho uplatnění najdeme nejčastěji v malých elektrárnách, především vodních. Je to generátor snadný na údržbu, jelikož odpadá starost se servisem uhlíkových kartáčů, nepotřebuje budič ani regulátor. [9]

### 3.8 Celkové srovnání provozních stavů asynchronního stroje



Obrázek 6 Provozní stavy asynchronního stroje [3]

Z celkové charakteristiky lze vypočítat mnoho vlastností. Při generátorovém stavu je důležité, dát si pozor na momentové přetížení. Pokud překročíme vnějším momentem maximální moment stroje, stroj sice bude do sítě dodávat větší výkon, avšak za následek bude to, že stroj se nekontrolovatelně roztočí do vysokých otáček a vlivem odstředivých sil může dojít k havárii. Stabilní chod stroje lze považovat oblast mezi momenty zvratu generátoru a motoru. V brzděném režimu má maximální brzdový moment při nulových otáčkách, při vyšších otáčkách proti směru otáčení magnetického pole se brzdový moment postupně zmenšuje.

Dodávaný či odebíraný proud do sítě se nelineárně zvyšuje se zvyšující se odchylkou od synchronních otáček. [10]

## 4 SYNCHRONNÍ STROJE

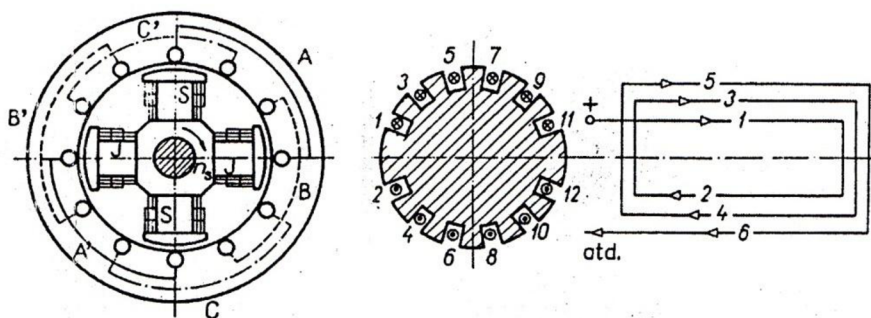
Synchronní stroj lze považovat takový elektrický stroj, jehož rotor se současně otáčí s jeho magnetickým polem. Rotorové vinutí je napájeno SS proudem na rozdíl od asynchronních strojů, kde se v rotoru indukují střídavý proud. Nemá tedy žádný skluz, jeho otáčky jsou zcela závislé na frekvenci sítě. V současné době vytlačuje z trhu pomalu asynchronní stroje díky velkému rozvoji a dostupnosti frekvenčních měničů. [3]

### 4.1 Rozdělení synchronních strojů

Alternátor	Dnes výhradní zdroj elektrické energie, dělí se na pomaloběžné hydroalternátory a vysokootáčkové turboalternátory
Synchronní motory	Stroje na přeměnu elektrické energie na mechanickou při stálých otáčkách danými sítí. Speciální typ motoru je synchronní motor, který se spouští jako asynchronní kroužkový motor, po rozběhu se začne budit stejnosměrným proudem, takže pracuje jako synchronní.
Synchronní kompenzátory	Jsou to odlehčené a přebuzené synchronní motory, které jsou vodíkem tlakově zapouzdřené. Jejich rotor není vůbec vyveden ven. Slouží k dodávkám jalového výkonu.
Synchronní konvektory	Jedná se o přímý usměrňovač střídavého proudu na stejnosměrný.

### 4.2 Konstrukce synchronních strojů

Konstrukce vychází se strojů asynchronních. Skládají se obvykle z třífázového statorového vinutí uloženého do dynamových plechů, které jsou uloženy v kostře, dále z rotoru tvořící soustavu pólů, které jsou buzeny stejnosměrným proudem přes kroužky. Toto buzení obvykle obstarává derivační dynamo. Při otáčení soustavou pólů se do statorového vinutí, vlivem pohybu vodiče v magnetickém poli indukuje napětí. Rozeznáváme dva typy rotorů. Rotor s vyjádřenými póly tvořící rotorové kolo, na kterém jsou navinuty jednotlivé cívky představující póly. Při tomto uspořádání je zde navinuto čtyři a více cívek se značně velkým průměrem a použití najde především v pomaloběžných strojích, kupříkladu ve vodních elektrárnách. Rotory s hladkým rotorem tvoří pevný válec, do kterého jsou vyřezány drážky, v nichž je uloženo samotné vinutí. Jednotlivé cívky jsou v rotoru utěsněny klínem. Použití je především v tepelných elektrárnách, kdy se i mnohatunový rotor v generátoru i řádech stovek i tisíců MW otáčí rychlostí 3000ot/min, což odpovídá jedné pólové dvojici. Průměr takto zkonstruovaného rotoru bývá do 1300mm a rotory pracují na mezi mechanického namáhání. [11]



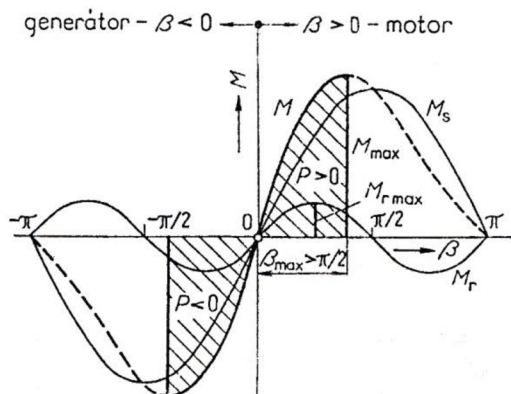
Obrázek 7 Uspořádání pólů v synchronním stroji s vyjádřenými póly a s hladkým rotorem [11]

### 4.3 Moment synchronního stroje

Mluvíme o momentu, který vnější zdroj energie, řekněme třeba pára musí vytvořit na elektrický výkon. Naopak u motoru, mluvíme o momentu, který je mechanicky změřitelný na hřídeli.

#### S vyjádřenými póly

Pro vznik hladkého sinusového napětí je potřeba vhodně upravit takzvané pólové nastavce, které jsou umístěné na krajích pólů, na straně statorového vinutí. Obvykle mají tvar připomínající hříbek, který způsobí sinusový průběh magnetického toku.

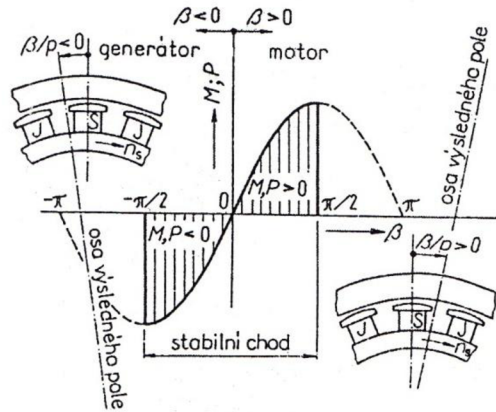


Obrázek 8 Moment synchronního stroje s vyjádřenými póly [11]

Na výše zobrazeném obrázku je zobrazen průběh momentů v synchronním stroji. V levé části obrázku jde o generátor, v pravé části o motor. Úhel  $\beta$ , neboli zatěžovací úhel stroje je úhel mezi magnetickým polem rotoru a statoru. Udáván je obvykle v elektrických stupních. Synchronní moment „ $M_s$ “ je zcela závislý na buzení a  $\sin \Psi$  a je stejný jako u stroje s hladkým rotorem.  $M_r$  – reakční moment se mění v závislosti na  $\sin \omega t$ , jehož velikost závisí na rozdílu příčné a podélné reaktance. Výsledný moment  $M$  je součtem těchto předešlých momentů. Za stabilní chod lze považovat vyšrafovanou oblast grafů. Pokud zatížení překročí bod zvratu, tj. maximální moment, elektromagnetický tah klesne, motor se zastaví a přejde do chodu nakrátko. Naopak v generátoru, když překročíme moment zvratu, tak přebytkem momentu se stroj roztočí na velké otáčky a ztratí synchronismus. Začne ze sítě odebírat značný proud. [8]

### S hladkým rotorem

V provedení s hladkým rotorem, mluvíme o vysokootáčkových strojích při 3000ot/min. Tyto stroje mají pouze jednu pólovou dvojici a jejich provedení odpovídá úzkému rotoru a délkou i v řádu desítek metrů.



Obrázek 9 Moment synchronního stroje s hladkým rotorem. [11]

U motoru se vlivem zatížení rotor zpožďuje za výsledným magnetickým tokem, naopak u generátoru předbíhá a snaží jakoby přetlačit síť a zvednout u ní frekvenci. Při stavu překročení  $M_{max}$ , přestává stroj pracovat jako generátor a začíná odebírat značný proud. Pomocí ochran se musí stroj co nejrychleji odpojit. Tyto též nazývané turboalternátory jsou vrcholem strojírenské výroby. Pracují na mezi elektrického a mechanického namáhání. [8]

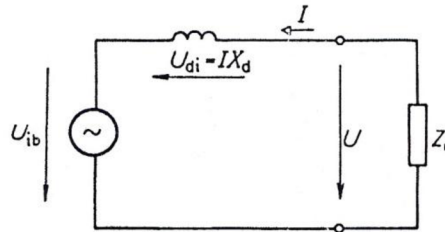
## 4.4 Souhrn výhod a nevýhod synchronních strojů

Alternátory představují v dnešní době výhradní zdroj elektrické energie. Mají velkou účinnost a dají se vyrobit i pro velké výkony. Synchronní stroje mají stálé otáčky dané pouze frekvencí a počtem pólů, nezatěžují síť jalovinou, naopak mohou ji spolehlivě dodávat. V porovnání s asynchronním strojem mají zhruba o 10% větší účinnost. Výrobně mají jednodušší výrobu, jelikož nemusí mít velmi malou vzduchovou mezeru. Tato velká vzduchová mezeru umožňuje otevřené drážky na statoru – kvalitní šablonové vinutí. Závislost momentu je s první mocnou napětí na rozdíl od asynchronních, kde je závislost kvadratická.

Mezi nevýhody lze považovat nutnost užití budiče, což zdražuje výrobu. Ekonomicky se vyplatí od výkonu startujících nad 50kW. Další věcí je to, že se synchronní stroj se sám neroztočí a je proto potřeba ho rozběhnout kupříkladu pomocí asynchronního rozběhu. Regulace stálých otáček je možná buď pomocí počtu pólů, což je historický způsob, nebo pomocí frekvence s užitím frekvenčního měniče. Dále stroj potřebuje pokaždé nový rozběh, pokud vypadne ze synchronismu. Rychlá reverzace není možná, z důvodu čekání na odbuzení budiče. [10]

## 4.5 Provozní stavy synchronních strojů

Rozdíl mezi generátorem a motorem z hlediska konstrukce není. Konstrukčně dělíme stroje jen na pomaloběžné do 1500ot/min a na vysokootáčkové turbomotory a turboalternátory nad 3000ot/min.

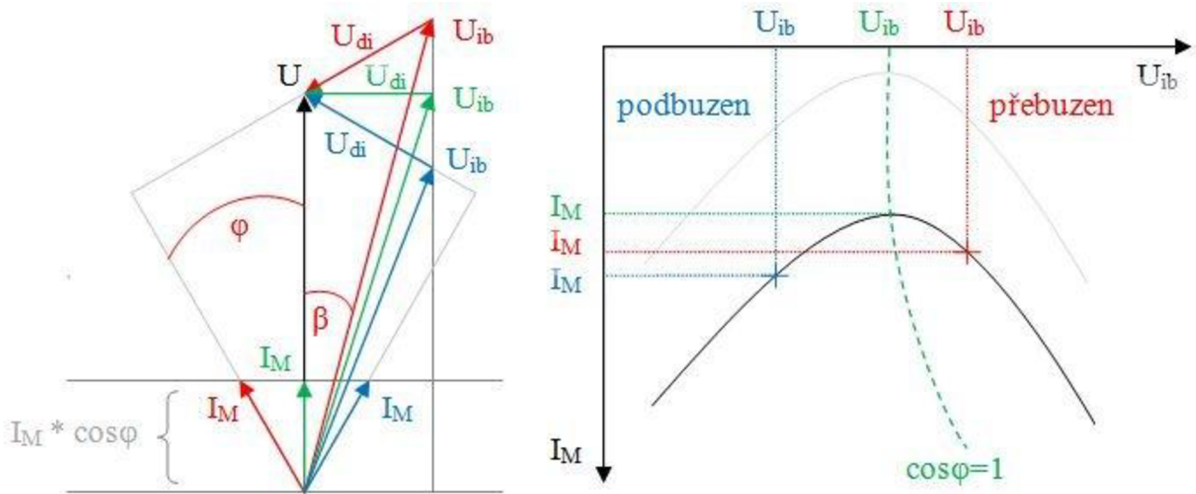


Obrázek 10 Zjednodušené schéma synchronního stroje [11]

Ze zjednodušeného schématu synchronního stroje lze vyčíst několik fázorových hodnot. Napětí  $U$  představuje svorkové napětí alternátoru,  $I$  představuje zatěžovací proud. Indukované napětí  $U_{ib}$  je vybuzečné budícím tokem  $\Phi_b$ , který je dán rozdílem magnetického toku  $\Phi$  a reakčního magnetického toku  $\Phi_a$ . Magnetický tok  $\Phi$  je závislý na velikosti budícího proudu, neboť při zvýšení budícího proudu se zvýší i tento magnetický tok, což ovlivní i napětí naprázdno, které též vzroste. Reakčního magnetický tok  $\Phi_a$  je tok, který se otáčí současně s otáčkami motoru. Jeho velikost je závislá na velikosti proudu kotvy, který ho budí a na odporu mg. obvodu, který tvoří zejména vzduchová mezera. [3]

## 4.6 Synchronní 3f motor

Slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou. Používá se tam, kde jsou vyžadovány stálé otáčky při proměnlivém zatížení. Provozní problém je spouštění. Dneska se většina motorů spouští tzv. autosynchronním rozběhem. Pro tuto funkci slouží rozběhové vinutí v pólových nástavcích se spojovacími kruhy na stranách. Budící vinutí zkratujeme a motor roztáčíme jako asynchronní. Když dosáhne alespoň 95% nominálních otáček, zapneme buzení a motor se synchronním momentem vtáhne do synchronismu. Za obvyčejného chodu působí toto rozběhové vinutí proti kývání stroje. Kývání stroje se objeví při rychlém odlehčení či zatížení stroje. V tomto rozběhovém vinutí se při kývání indukuje napětí, které působí proti kývání, které postupně minimalizuje. [8]

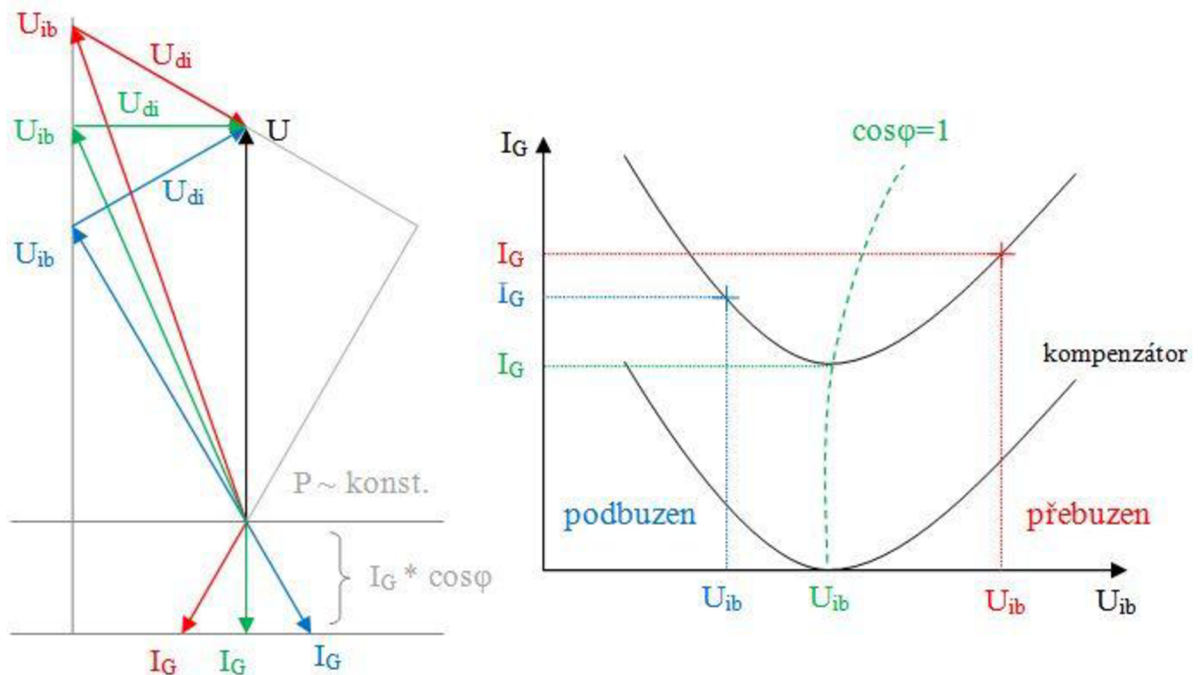


Obrázek 11 Fázorový diagram synchronního motoru

Na diagramu je zobrazen fázorový diagram přebuzeného, podbuzeného a vybuzeného motoru na  $\cos\varphi = 1$  při stálém zatížení. Velikostí indukovaného napětí vybuzeného budícím tokem ( $U_{ib}$ ) lze zvyšovat či snižovat fázový posun  $\varphi$ . Ideálním případem je vybudit motor na  $\cos\varphi = 1$ , což představuje případ, kdy motor nezatěžuje síť jalovým proudem, nýbrž se chová jako čistě činná zátěž. Dalším zvětšením tj. přechod motoru do 4. kvadrantu umí takto přebuzený motor do sítě i dodávat jalový výkon. Tím zlepšuje účinek sítě a chová se jako kapacitní zátěž. [10]

## 4.7 Synchronní 3f generátor

Jedná se stejný princip jako u motoru. Zvětšování či snižování  $U_{ib}$  řídíme fázový posun  $\varphi$  dle aktuálního stavu a potřeb sítě.



Obrázek 12 Fázorový diagram synchronního generátoru

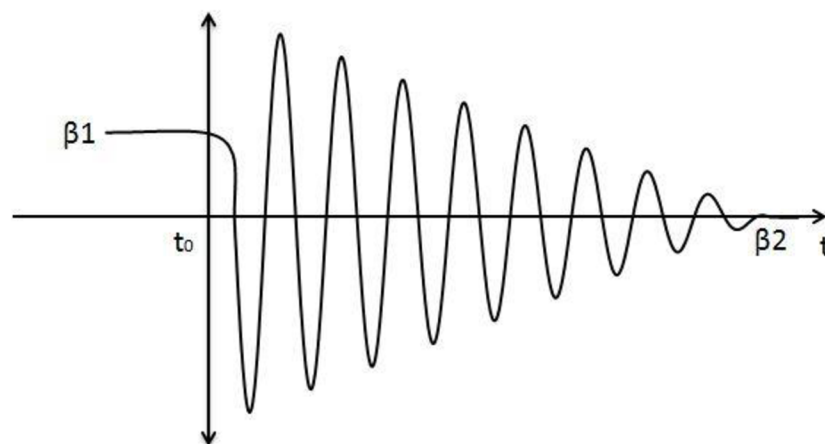
Speciálním případem se synchronní kompenzátor. Jde o synchronní stroj, který je zcela odlehčen a nemá vyveden rotor. Slouží ke zlepšování účinníku sítě, instalace u velkých motorů či v rozvodnách. Celý stroj se zapouzdřen, chlazen nejčastěji výbušným vodíkem. Vodík slouží k dovádění tepla, chrání izolaci a zmenšuje ventilační ztráty. Tlak uvnitř se pohybuje i na hodnotách přes 500kPa. Budicí proud je maximální možný až do tepelné odolnosti. Stroj má charakter kondenzátoru. [10]

## 4.8 Buzení synchronních strojů

Buzení synchronním strojů může být provedeno dynamem nebo statickým buzením napájeným přes usměrňovače ze sítě. V dnešní době je budič složen ze zdroje budicí proudy, kterým může být synchronní generátor na společné hřídeli s hlavním generátorem a dále elektronický systém, který zajišťuje plynulou regulaci a odbuzování. Mezi požadavky na budič lze zmínit vysokou spolehlivost, plynulou a širokopásmovou regulaci a dostatečnou rychlost regulace a odbuzování v případě poruchy. Výkon budiče se obvykle pohybuje okolo 3 – 7% jmenovitého výkonu hlavního synchronního generátoru.

## 4.9 Kývání stroje

Dojde-li k rychlé změně podmínek, například ke zkratu či odpojení spotřebiče, stroj se ustálí na novém zátěžovém úhlu až po určité době, po odeznění elektromechanických přechodných dějů. Jestliže generátor pracuje s určitým úhlem  $\beta$  a náhle zvýšíme elektrický moment, má stroj na hřídeli nedostatek momentu a začne se rotor zpomalovat. Při dosažení rovnováhy na novém úhlu  $\beta$  stroj nezastaví, ale vlivem setrvačnosti dále zvyšuje zátěžový úhel. Po překonání nového úhlu  $\beta$  však nastává opačná nerovnováha momentů a stroj začne zrychlovat, zátěžový úhel se snižuje. Stroj tímto způsobem několikrát zakmitá kolem nové ustálené polohy  $\beta$ , než mechanické a elektrické ztráty stroj ustálí. Tento jev nazýváme kývání synchronního stroje. Utlumení kývání lze urychlit instalací tlumiče na rotoru stroje. Tlumič je kotva nakrátko s tyčemi umístěnými v pólových nástavcích. Při kývání se do tlumiče indukují proudy, které silově působí proti smyslu kývání a přeměňují energii z kývání na Jouleovo teplo v odporech tyčí. Pokud dojde ke změně u vrcholu momentové křivky, může dojít k překývnutí přes mez statické stability, čímž vypadne stroj ze synchronismu a musí se znovu přirázovat.



Obrázek 13 Kývání synchronního stroje



## 5 PŘENOSOVÁ A DISTRIBUČNÍ SÍŤ

### 5.1 Přenosová síť

Přenosovou sítí myslíme soustavu prvků, které zajišťují přenos elektrické energie od výrobce k rozvodnám, od kterých se už jedná o distribuční síť. Přenosovou část v České republice zajišťuje skupina ČEPS. Jde o státní podnik tvořící na území ČR monopol. Provozuje především vedení VVN v napěťových hladinách 400, 220 a 110 kV v řádů tisíců kilometrů a několik trafostanic. Tuto síť lze považovat za tvrdou, má konstantní napětí a frekvenci  $50\text{Hz} \pm 75\text{mHz}$ . [4]

Při pohledu do historie přenosových soustav v roce 1871 bylo vynalezeno dynamo a uskutečněno první dálkové vedení o délce 175Km o napětí 15 kV. V roce 1951 bylo uvedeno do provozu vedení 220kV, v roce 1965 vedení 400kV a v roce 1962 vznikl systém propojených elektrizačních soustav „MIR“. Toto propojení zahrnovalo ČSR, Polsko a Maďarsko. Obdobné propojení energetických soustav bylo na území 12 států západní Evropy s pojmenováním „UCPTE“. O rok později vznikl v severských zemích systém „NORDEL“. Propojení zemí Anglie a Irska s Francií bylo v té době provedeno podmořským kabelem stejnosměrným přenosem. Teprve v roce 1995 bylo realizováno synchronní propojení CENTREL (ČR, SR, Maďarsko a Polsko) a UCPTE. V dnešní době patří přenosová síť České republiky do systému ENTSO-E, která představuje evropskou síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav, která zahrnuje 41 provozovatelů přenosových soustav v celkem 34 zemích Evropy od Portugalska až po Polsko včetně severských států. [5]

### 5.2 Distribuční síť

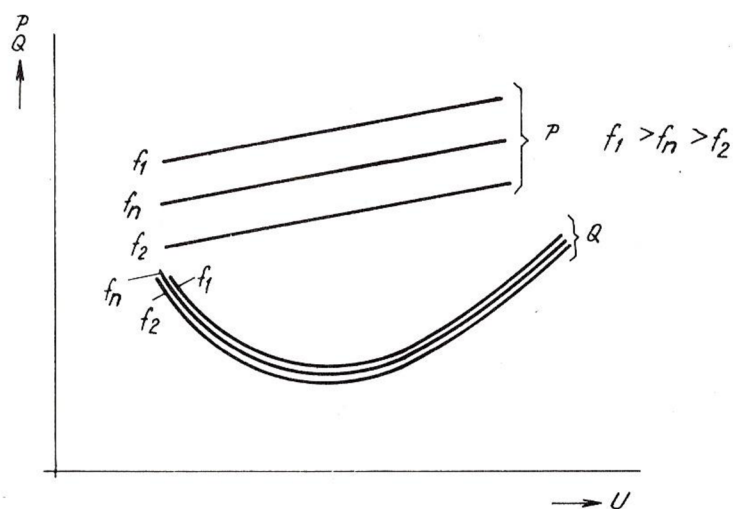
Jedná se o síť, která přímo navazuje na síť přenosovou. Jde o soubor prvků, které slouží pro samotnou distribuci elektrické energie od přenosové soustavy či prvků s ní souvisejících až ke spotřebitelům. Distribuční síť je provozována v typických napěťových hladinách 0,4/0,23kV, 10kV, 35kV a 110kV, která se používá i jako přenosová hladina. Do této sítě patří i systémy v rámci ochrany, měření a systémy pro komunikaci. V České Republice se o distribuci stará trojice společností a to pro jih Čech a Moravy - E.ON Distribuce, a.s., pro Prahu – PREDistribuce, a.s. a zbytek území ČR obstarává ČEZ Distribuce, a.s. [6]

## 6 OSTROVNÍ SÍŤ

Mluvíme o elektrické síti, která je nezávislá na distribuční. Obvykle se používá v místech, kde není k dispozici inženýrská síť, kupříkladu odlehlé chaty, mobilní domy, karavany, lodě či sem lze zařadit záložní síť s generátory v nemocnicích nebo použití ve vojenské technice. V našem případě budeme považovat ostrovní síť jako soubor dvou výrobních jednotek, konkrétně synchronního a asynchronního generátoru se zařazením jednoho spotřebiče.

### 6.1 Provoz elektrické ostrovní sítě

Elektrickou síť lze popsat jako soubor paralelně pracujících výrobních jednotek, přenosových jednotek a spotřebičů se společnou výkonovou rezervou. Jedním z hlavních úkolů elektrické sítě je dodávka elektrické energie v dostatečném a spolehlivém množství pro spotřebiče při zaručení bezpečnosti. Jedním z nejdůležitějších provozních parametrů, které určují i kvalitu elektrické energie je kmitočet a napětí. Jakékoliv narušení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou činného a jalového výkonu má za následek odchýlení kmitočtu a napětí od jmenovité hodnoty. Klasická dovolená odchylka od jmenovitých hodnot kmitočtů je při 50Hz  $\pm 0,4\%$  (0,2Hz) a u napětí jde o  $\pm 5\%$ . Jde li o kmitočet, tak ho lze považovat za centrální parametr, jelikož je ve všech místech elektrické soustavy stejný. Naproti tomu napětí je takzvaný místní parametr a může mít v různých místech soustavy jinou hodnotu. [12]



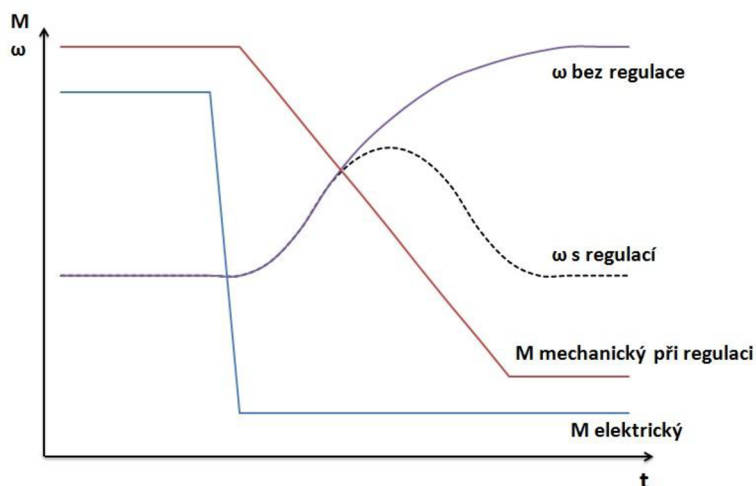
Obrázek 14 Závislost frekvence na činném a jalovém výkonu [12]

Z grafů je patrné, že se při změně kmitočtu výrazně mění činný výkon, naopak při změně napětí není jeho změna tak značná. Jalový výkon se při změně frekvence nijak výrazně nemění, ale změnou napětí se mění značně. Z toho je zřejmé, že  $P = f(f)$ ,  $Q = f(U)$  a lze tyto kvalitativní hlediska kvality elektrické sítě od sebe oddělit. [12]

### 6.2 Změny kmitočtu

Při provozu elektrické sítě je důležitá kvalita elektrické energie. Jedním z hlavních kritérií je zajištění stálého kmitočtu, tj. v Evropě 50Hz  $\pm 1\%$ . Následné odchylky od jmenovitého kmitočtu mohou mít negativní následky na spotřebiče přímo závislé na frekvenci, například u motorů. U spotřebičů na frekvenci nezávislých, kupříkladu topné spirály, tyto změny nemají takový vliv. K nerovnováze mezi momenty na generátorech a momenty mechanickými dohází při změnách

zatížení. Následná nerovnováha momentů je pokrývána ze setrvačnosti soustrojí. K vyrovnání dochází po ukončení přechodových dějů pomocí regulátoru, který dle potřeby zvýší nebo sníží mechanický moment na hřídeli generátoru. Při skokovém odlehčení, například při odpojení spotřebiče v důsledku poruchy, dojde k postupnému zvýšení otáček generátoru v důsledku přebytku momentu a tím i ke zvýšení kmitočtu sítě. Pokud je síť vybavena regulátorem otáček, dojde k jeho zapůsobení a tím i navrácení k jmenovitému kmitočtu. Zvýšíme či snížíme přívod energie do generátoru, až nastane rovnováha mechanického a elektrického momentu. Při provozu sítě rez regulace otáček, se přebytečná energie spotřebovává k roztáčení soustrojí generátorů do vyšších otáček. [13]



Obrázek 15 Závislost frekvence při změnách zatížení [13]

Změny kmitočtu můžeme pozorovat pomalé, které jsou způsobeny kupříkladu zátěžovým denním diagramem u distribučních sítí či pomalým zatěžováním motorů nebo se jedná o změny rychlého rázu. Mohou být způsobené zkraty, vypínáním a zapínáním velkých spotřebičů a kýváním strojů. Náhlé změny zatížení způsobí dočasnou nerovnováhu elektrického a mechanického výkonu. Tuto nerovnováhu kompenzují pohybové energie rotorů generátorů. Dochází k odchýlkám od jmenovitého kmitočtu, na který reagují příslušné regulátory, které jsou voleny dle požadavků na kvalitu elektrické energie a s ohledem na použité výrobní jednotky. [13]

### 6.3 Kmitočtová charakteristika zatížení

Jde o charakteristiku, která je daná vlivem spotřebičů současně v chodu, a jsou závislé na frekvenci. Tyto spotřebiče lze rozdělit do tří skupin. První skupinu tvoří spotřebiče zcela nezávislé na frekvenci jako například odporové topení, žárovky a jiné čistě odporové zátěže. Druhou skupinu tvoří spotřebiče, kde jejich výkon je převážně lineárně závislý na frekvenci. Jsou to především motory sloužící na obrábění, dopravu, čerpání nebo kompresory. Poslední skupinou, jejichž výkony jsou kvadraticky a výše závislé na frekvenci patří ventilátory, odstředivky a další vysokootáčkové motory. Vliv kmitočtu na spotřebu elektrické energie ukazuje kmitočtová charakteristika zatížení [12]

$$P_Z = P_{ZN} \left( \frac{f}{f_n} \right)^{k_z} \quad 6.1$$

Zatížení  $P_Z$  je zatížení při odlišném kmitočtu od jmenovitého,  $P_{zn}$  udává zatížení při jmenovitém kmitočtu a  $k_z$  je výkonové číslo zatížení elektrické soustavy. Jeho určení provedeme pomocí měření a pohybuje se v rozmezí 1 – 2.

$$\left. \frac{\partial P_Z}{\partial f} \right|_{f=f_n} = k_z \frac{P_{zn}}{f_n} \doteq \frac{\Delta P_Z}{\Delta f} \quad 6.2$$

Ze kterého lze odvodit výkonový součinitel zatížení

$$k_z = \frac{\Delta P_Z / P_{zn}}{\Delta f / f_n} \quad 6.3$$

Jedná se o poměrnou změnu zatížení k změně frekvence. Kupříkladu při  $k_z = 2$  se při změně frekvence o 1% změni její zatížení o 2%. Lze také nahradit pomocí směrnici přímky při uvažování malých změn frekvence v okolí jmenovitého kmitočtu.

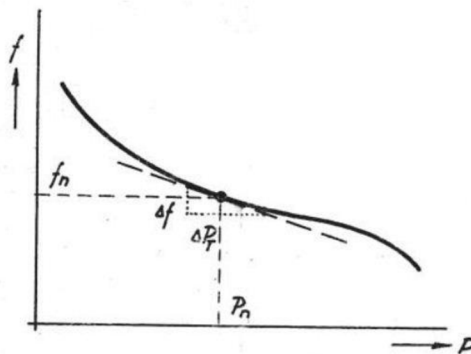
$$k_z \frac{P_{zn}}{f_n} = K_z \quad 6.4$$

$$K_z = \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad [W/Hz] \quad 6.5$$

$K_z$  je výkonové číslo elektrické soustavy ukazuje na to, že při poklesu frekvence, klesá i zatížení. Jedná se příznivý jev soustavy, který můžeme nazvat jako samoregulační účinky zátěže. Z toho vyplývá, že napomáhá udržet kmitočty na jmenovité hodnotě a minimalizuje jeho odchylky.

## 6.4 Kmitočtová charakteristika zdrojů

Jedná se o závislost  $f = f(P_t)$ , která je dána regulačními charakteristikami zdrojů soustavy. Teoreticky ji bychom mohli sestavit z jednotlivých regulačních charakteristik paralelně pracujících zdrojů, ale vhodnější je sestavení výsledné statické charakteristiky elektrické soustavy pomocí měření.



Obrázek 16 Kmitočtová charakteristika zdrojů [12]

Nerovnoměrnost regulátoru lze nazývat oblast kmitočtu mezi chodem naprázdno a jmenovitým zatížením. Lze jej popsat pomocí výkonového čísla generátoru, které popisují změnu zatížení při změně kmitočtu.

$$K_g = - \frac{\Delta P_g}{\Delta f} [W/Hz] \quad 6.6$$

V některých případech se užívá i vztah výkonový součinitel generátoru, který udává podíl poměrné změny zatížení k poměrné změně kmitočtu

$$k_g = - \frac{\frac{\Delta P_g}{P_{gn}}}{\frac{\Delta f}{f_n}} = K_g \frac{f_n}{P_n} [W/Hz] \quad 6.7$$

Například při  $k_g = 10$ , udává vztah to, že při změně zatížení o 10%, se změní kmitočet o 1%. Tento vztah platí pouze pro generátor pracující do vlastní ostrovní sítě a lze jej definovat pouze do jmenovité hodnoty výkonu generátoru. Při paralelní spolupráci více ( $m$ ) zdrojů celková změna zatížení lze označit jako

$$\Delta P_g = \Delta P_{g1} + \Delta P_{g2} + \dots + \Delta P_{gm} = \sum_{i=1}^m \Delta P_{gi} \quad 6.8$$

Při dosazení z rovnice 6.8 za  $\Delta P_g$  dostaneme vztah

$$\Delta P_g = - \Delta f \sum_{i=1}^m K_{gi} = - \Delta f K_{gv} \quad 6.9$$

Ze kterého lze odvodit výsledné výkonové číslo ekvivalentního generátoru, který lze považovat jako součet výkonových čísel generátorů.

$$K_{gv} = \sum_{i=1}^m K_{gi} \quad 6.10$$

Lze usoudit, že čím více se nachází v elektrické soustavě generátorů, tím je větší výsledné výkonové číslo generátorů a tím se sníží i odchylky od jmenovitého kmitočtu při změnách. Dalším důležitým údajem je způsob, jak se celková změna zatížení promítne na jednotlivé zdroje. Z rovnice 6.8 a 6.9 Platí

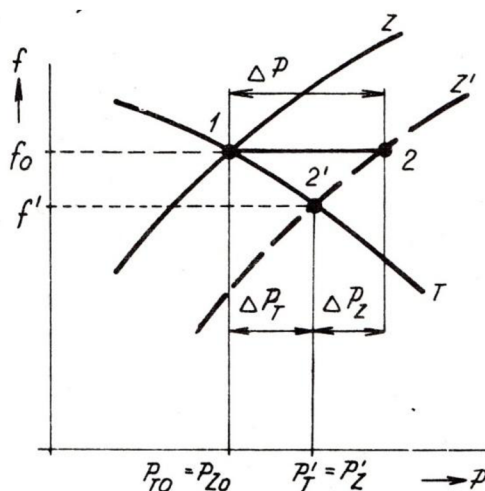
$$\Delta P_g = \sum_{i=1}^m \Delta P_{gi} \quad \Delta P_{gi} = - \Delta f K_{gi} \quad 6.11$$

Z čehož vyplývá, že zatížení se přímo úměrně rozdělí na jednotlivé zdroje v poměru jejich výkonových čísel, jelikož je změna kmitočtu ve všech částech elektrické soustavy stejná. [13]

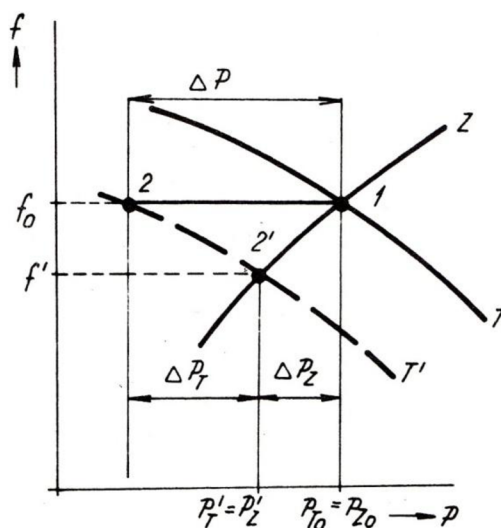
## 6.5 Statická charakteristika elektrizační soustavy

Statická charakteristika elektrizační soustavy se používá při popisu ostrovní soustavy ve stavech, kdy je narušena výkonová rovnováha. Dochází při ní při změně zatížení či změně dodávaného výkonu generátoru.

Statické charakteristiky vznikají spojením statických charakteristik zdrojů a zátěží a její vzájemný průsečík značí pracovní bod ostrovní soustavy. Při narušení rovnováhy výkonů se pracovní bod posouvá o rozdíl výkonů do nového pracovního bodu. Vlivem samoregulačních vlastností ostrovní sítě když klesá kmitočet podle statických charakteristik zdrojů tak roste výkon zdrojů, naopak zátěž při poklesu frekvence snižuje svůj odběr. Po ustálení soustavy soustava přejde do nového pracovního bodu, který je tvořen novými statickými charakteristikami zdrojů nebo zátěže.



Obrázek 17 Chování neregulované sítě při narušení rovnováhy při změně zatížení [13]



Obrázek 18 Chování neregulované sítě při narušení rovnováhy při změně výkonu zdrojů [13]

Z grafů lze odvodit to, že při snížení frekvence (na obrázku  $f_0$ ) nedojde k nárůstu výkonu o celý přírůstek  $\Delta P$ , ale jen o přírůstek  $\Delta P_t$ , který je realizován pomocí zvýšením výroby zdrojů pomocí regulátorů. Zbylá část přírůstku  $\Delta P_z$ , je hrazena pomocí sníženého odběru zátěže při poklesu frekvence. Tento jev je často nazýván jako samoregulační efekt ostrovní soustavy.

Celou ostrovní soustavu lze popsat výkonovým číslem soustavy, které udává odezvu soustavy na změnu výkonu.

$$K_S = -\frac{\Delta P}{\Delta f} [W/Hz] \quad 6.12$$

Použité znaménko mínus v rovnici je udáváno proto, že při zvýšení spotřeby, klesá frekvence sítě. Po odvození výkonových čísel generátorů, zátěží, lze najít mezi nimi souvislost.

$$|\Delta P| = |\Delta P_g| + |\Delta P_z| = |K_g \Delta f| + |K_z \Delta f| = \Delta f |(K_g + K_z)| \quad 6.13$$

$$K_S = K_G + K_Z \quad 6.14$$

Rovnici samoregulačního efektu soustavy pak lze napsat ve tvaru

$$\Delta P + \Delta f (K_g + K_z) = 0 \quad 6.15$$

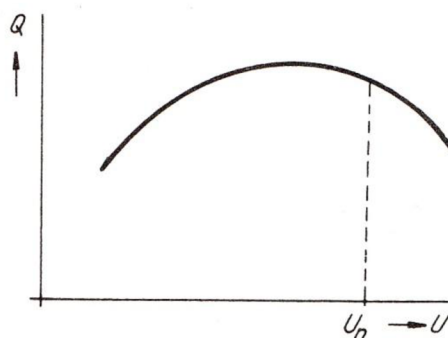
Na závěr lze shrnout to, že při jakékoliv změně zatížení se mění kmitočet. K vyrovňování rovnováhy přispívají zdroje, ale i samotná zátěž. Ostrovní soustava se v ustáleném stavu chová jako statický člen a lze najít přímou závislost mezi změnou výkonu a změnou frekvence. [13]

## 6.6 Regulace napětí sítě

Regulace napětí je druhý hlavní parametr elektrické sítě, zejména jde-li o kvalitu elektrické energie. Jedná o místní parametr, jelikož není ve všech místech elektrické soustavy stejný, jako tomu je u frekvence. Dle požadavků odběratele je dovolené udržovat napětí sítě v toleranci  $\pm 5\%$ , jelikož u většiny spotřebičů může dojít ke zhoršení provozních vlastností či výraznému zkrácení jejich životnosti. Regulace napětí spočívá v udržení rovnováhy výroby a spotřeby jalového výkonu. Výsledné chování napětí sítě při změnách rovnováhy jalového výkonu lze, stejně jako u činného výkonu popsat statickými charakteristikami zdrojů a zátěže. Tyto charakteristiky však neplatí pro celou síť, ale pouze v určité oblasti elektrické sítě.

### Statická charakteristika zdrojů $Q = f(U)$

Jedním z hlavních zdrojů jalového výkonu jsou synchronní alternátory, kompenzátory, kondenzátorové baterie, ale také synchronní motory. Obvyklý průběh závislosti jalového výkonu a napětí zdroje při konstantním buzení je znázorněn na obrázku

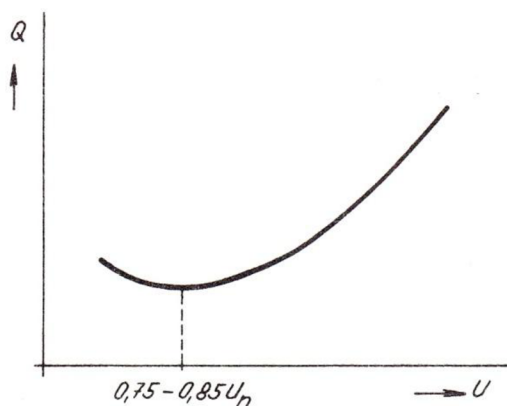


Obrázek 19 Závislost jalového výkonu zdroje na napětí[13]

Tato charakteristika je obdobná i pro další přístroje v elektrické síti, například pro synchronní motory či synchronní kompenzátory.

### Statická charakteristika zátěže $Q = f(U)$

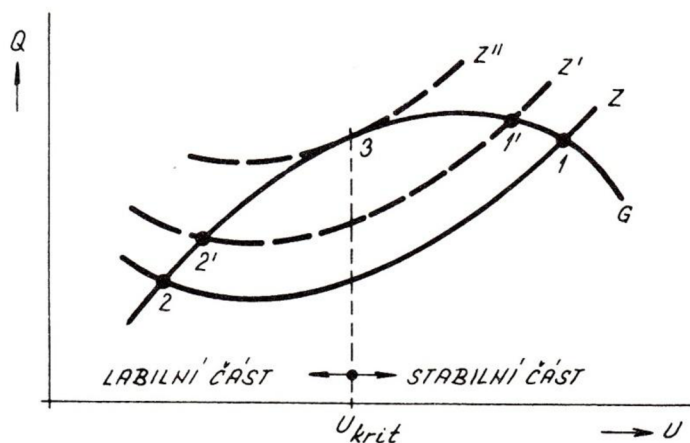
Mezi hlavní spotřebiče jalového výkonu jsou asynchronní alternátory a motory, transformátory a tlumivky. Tento jalový výkon spotřebování z velké části transformátory a asynchronní motory pro svou potřebu magnetizace, které jsou značně závislé na napětí. Kupříkladu při snížení napětí o 2%, klesne spotřebovaný jalový výkon o 4%. Zbýlý jalový výkon je spotřebován na ztráty rozptylem, které jsou nepřímo úměrné napětí. Při snížení napětí se zvýší jalový výkon například o 2%. Následně pak celá charakteristika zátěže má své minimum při cca  $80\%U_n$ . [13]



Obrázek 20 Závislost jalového výkonu spotřebičů na napětí[13]

Za ustálený pracovní bod lze považovat průsečík charakteristik zdrojů a zátěží, tak jak je vidět na následujícím obrázku v bodě 1.





Obrázek 21 Rovnovážný stav sítě při změnách napětí [13]

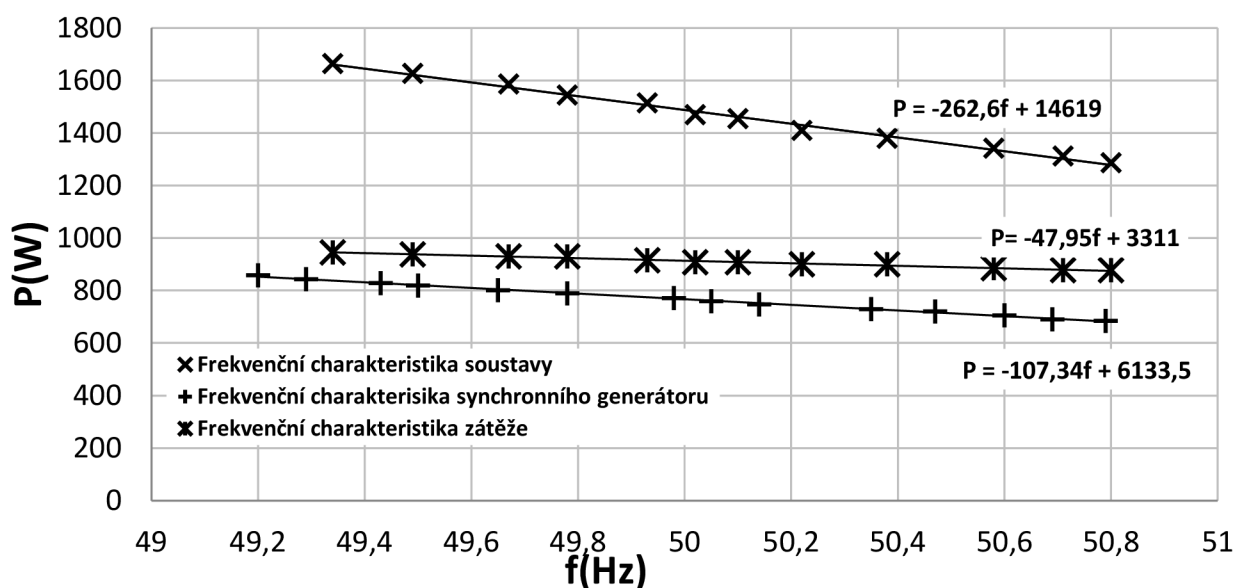
V tomto pracovním bodě 1 je síť v stabilním chodu, jelikož při poklesu napětí, které je způsobeno přebytkem jalového výkonu vyvolá určité zvýšení napětí, které uvede soustavu znovu do rovnovážného stavu. Při značném snížení napětí nastává nedostatek jalového výkonu, což vede k dalšímu poklesu napětí a tím i narušení stability. Při výšeni odběru jalového výkonu se posouvá charakteristika na křivku  $Z'$  či  $Z''$ . Porušení stability a zhroucení napětí dané ostrovní sítě nastává při překročení kritického napětí. Je to napěťová hladina, kde se setkají obě charakteristiky zátěže a generátorů jen v jedné bodě. Z grafů je patrné, že výkyvy napětí se odehrávají ve stabilní části a tyto odchylky od jmenovité hodnoty napětí může překročit stanovenou toleranci. K udržení napětí v mezích tolerance zabezpečíme vhodnou regulací. [13]

## 7 MĚŘENÍ PROVOZNÍCH CHARAKTERISTIK

Měření jsme prováděli v laboratoři výroby elektrické energie za použití již instalovaných soustrojí. Bylo prováděno v celkem čtyřech krocích pro odměření jednotlivých charakteristik a vlastností. Jako zdroj stejnosměrného napětí byly použité stejnosměrné zdroje umístěné v centrální zdrojovně.

### 7.1 Měření charakteristik ostrovní sítě se synchronním generátorem

Prvním měřením bylo samostatné odměření charakteristik ostrovní sítě pouze se synchronním generátorem. Pro zjištění výkonového čísla generátoru byl pomocí rezistorů (dle schématu  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) zapojených do hvězdy měněn činný výkon. Následné měření bylo provedeno tak, že bylo roztočeno soustrojí motor-synchronní generátor na synchronní otáčky cca  $50\text{Hz}$ , připojení odporové zátěže přes stykač a poté zvýšením buzení generátoru byla pomocí voltmetru ( $V_1$ ) nastavena jmenovitá hodnota napětí  $400\text{V}$ , kterou jsme udržovali po celou dobu měření konstantní. Po každé změně nastavení rezistorů jsme odečítali hodnoty fázového výkonu ( $W_1$ ), který byl přepočten na výkon celkový a frekvence ( $f_1$ ). Symetričnost zatížení jsme ověřovali ampérmetry ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ).



Obrázek 22 Frekvenční charakteristiky ostrovní sítě se synchronním generátorem

Z naměřených hodnot frekvenční charakteristiky synchronního generátoru je zřetelně vidět, že s vzrůstajícím kmitočtem lineárně klesá jeho činný výkon na svorkách. Jeho lineární průběh byl změřen v blízkosti  $50\text{Hz}$ . V kmitočtech vzdálenějších od jmenovitých byl průběh už značně nelineární a pro praxi nepoužitelný, neboť provoz generátorů je důležitý pouze v těsné blízkosti  $50\text{Hz}$ . V blízkosti pracovního bodu jsme rovnicí regrese vypočtenou v programu MS Excel určili výkonové číslo generátoru.

$$P = (-107,34f + 6133,5) \text{ W}$$

Tato rovnice nám vyjadřuje vztah mezi zatížením generátoru a frekvencí sítě. Pokud zvýšíme zatížení o 107 W, klesnou otáčky synchronního generátoru o 1 Hz. Tato závislost je však platná pouze v okolí pracovního bodu. Znaménko mínus v rovnici je udáváno proto, že při zvýšení spotřeby, klesá frekvence sítě.

Dalším krokem bylo zjištění frekvenčních charakteristik celé soustavy, potažmo pouze spolupráci synchronního generátoru s připojenou odporovou a motorickou zátěží. Postup měření byl takový, že nejprve jsme rozběhli synchronní generátor pomocí motoru přibližně na synchronní otáčky, zatím naprázdno tj. bez buzení a zátěže, poté jsme připojili odporovou zátěž a asynchronní motor. Po připojení zátěže jsme zvýšili buzení na synchronním generátoru a tím i napětí v síti, čímž jsme uvedli do chodu soustrojí asynchronní motor-dynamo. Toto roztáčení rotoru soustrojí mělo značný vliv na celou síť, zatížení motoru pohánějící synchronní generátor vzrostlo zhruba na třinásovek jmenovitého příkonu a frekvence a napětí poklesly řádově o 30 % na několik sekund.

Pro zjištění výkonového čísla soustavy byl pomocí rezistorů (dle schématu  $R_1, R_2, R_3$ ) zapojených do hvězdy měněn činný výkon. Pomocí buzení synchronního generátoru byla nastavena jmenovitá hodnota napětí 400 V, kterou jsme udržovali po celou dobu měření konstantní pomocí voltmetru ( $V_1$ ). Po každé změně nastavení rezistorů jsme odečítali hodnoty fázového výkonu ( $W_2$ ), který byl přepočten na výkon celkový a frekvence ( $f_1$ ). Symetričnost zatížení jsme ověřovali ampérmetry  $A_1, A_2, A_3$ .

Měření probíhalo v těsné blízkosti jmenovité hodnoty 50 Hz. Z naměřených hodnot je zřetelné, že se vzrůstajícím výkonem klesá frekvence sítě. V blízkosti pracovního bodu jsme rovnicí regrese vypočtenou v programu MS Excel určili výkonové číslo soustavy.

$$P = (-262,6f + 14619) W \quad 7.2$$

Tato rovnice nám vyjadřuje vztah mezi zatížením soustavy a frekvencí sítě. Pokud zvýšíme zatížení o 262 W, klesnou otáčky sítě o 1 Hz. Tato závislost je však platná pouze v okolí pracovního bodu. Znaménko mínus v rovnici je udáváno proto, že při zvýšení spotřeby, klesá frekvence sítě.

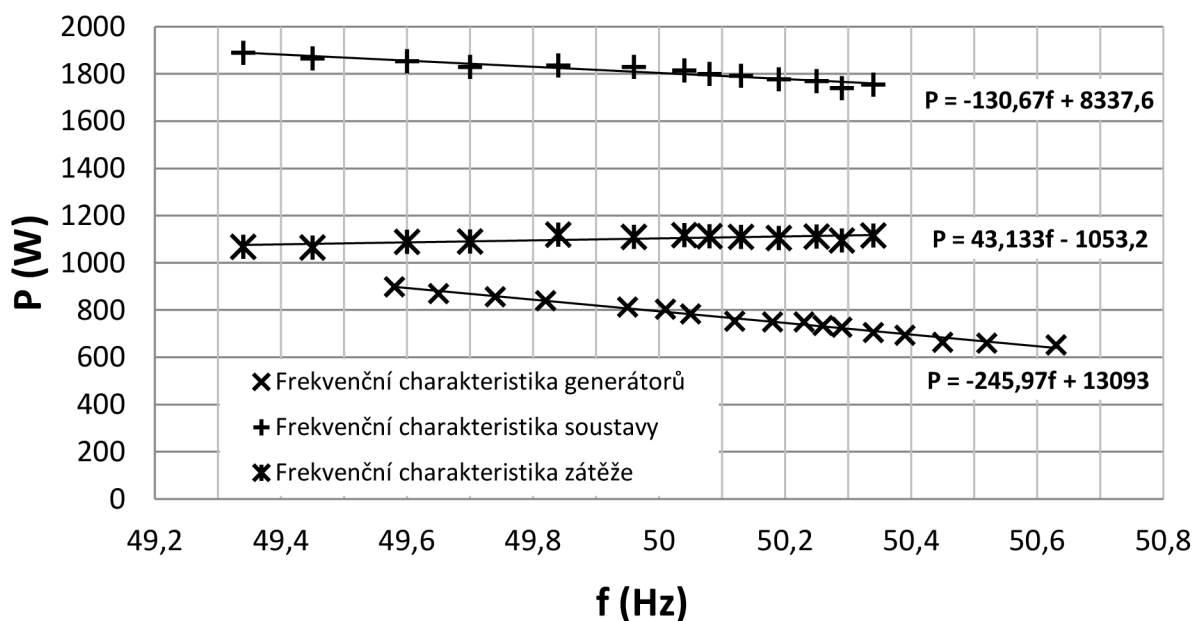
Zjištění výkonového čísla zatížení probíhalo současně s měřením výkonového čísla soustavy. Po každé změně nastavení rezistorů ( $R_1, R_2, R_3$ ) jsme odečítali hodnoty výkonů ( $W_1$  a  $W_2$ ) a výsledným rozdílem výkonu celkového ( $W_2$ ) a rezistorového ( $W_1$ ) jsme určili zatížení motoru. V blízkosti pracovního bodu jsme rovnicí regrese vypočtenou v programu MS Excel určili výkonové číslo zatížení.

$$P = (-47,95f + 3311) W \quad 7.3$$

Tento vztah nám určuje závislost mezi frekvencí sítě výkonem na zátěži. Z měření vyšlo, že při zvýšení frekvence o 1 Hz, klesne výkon na zátěži o 47 W. Toto však zcela neodpovídá teorii, jelikož výkonové číslo zatížení má být kladné.

## 7.2 Měření charakteristik ostrovní sítě s oběma generátory

Dalším měřením byla výsledná spolupráce obou generátorů současně. A to synchronního a asynchronního generátoru. Nejprve jsme rozběhli synchronní generátor pomocí motoru zhruba na synchronní otáčky, naprázdno tj. bez buzení a zátěže, poté jsme připojili odporovou zátěž a soustrojí asynchronní motor-dynamo (zátěž). Po propojení soustrojí jsme zvýšili buzení na synchronním generátoru a tím i napětí v síti, čímž jsme rozběhli soustrojí asynchronní motor-dynamo. Toto roztáčení rotoru soustrojí mělo značný vliv na celou síť, zatížení motoru pohánějící synchronní generátor vzrostlo zhruba na třinásovek jmenovitého příkonu a frekvence poklesla řádově o 30% na několik sekund. Po roztočení několikakilového rotoru jsme ještě manuálně přibudili synchronní generátor na jmenovitou hodnotu napětí a soustrojí pozvolna přešlo do ustáleného stavu. Následovalo připojení asynchronního generátoru přes stykač. Toto soustrojí jsme rozbíhali v motorickém režimu. Po ustálení otáček jsme nabudili dynamo, které je na společné hřídeli, pomocí voltmetru ( $V_2$ ) na hodnotu odpovídající napětí ze zdrojovny. Sepnuli jsme stykač spínající vývody ze zdrojovny a dynamo. Následně jsme z dynamu snížením buzením udělali motor, začali jsme do něj přivádět proud a tím roztáčet společný rotor asynchronního a stejnosměrného stroje na vyšší otáčky. Asynchronní stroj plynule přešel z motorického chodu do chodu generatorického.



Obrázek 23 Frekvenční charakteristiky ostrovní sítě s oběma generátory

Pro zjištění výkonového čísla obou generátorů současně byl pomocí rezistorů (dle schématu  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) zapojených do hvězdy měněn činný výkon. Po každé změně nastavení rezistorů jsme odečítali hodnoty fázového výkonu ( $W_2$ ), který byl přepočten na výkon celkový a frekvence ( $f_1$ ). Symetričnost zatížení jsme ověřovali ampérmetry ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ). Z naměřených hodnot je zřetelně vidět, že s vzrůstajícím kmitočtem lineárně klesá činný výkon na svorkách generátorů. V kmitočtech vzdálenějších od jmenovitých byl průběh už značně nelineární a pro praxi nepoužitelný, neboť provozní charakteristiky generátorů jsou důležité pouze v těsné blízkosti 50 Hz. V blízkosti pracovního bodu jsme rovnicí regrese vypočtenou v programu MS Excel určili výkonové číslo obou generátorů.

$$P = (-245,97f + 13093) W \quad 7.4$$

Tato rovnice nám vyjadřuje vztah mezi zatížením obou generátorů a frekvencí. Pokud zvýšíme zatížení o 246 W, klesne frekvence generátorů o 1 Hz. Tato závislost je však pouze v okolí pracovního bodu. Znaménko mínus v rovnici je udáváno proto, že při zvýšení spotřeby, klesá frekvence sítě.

Pro zjištění výkonového čísla soustavy bylo pomocí rezistorů (dle schématu  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) zapojených do hvězdy měněn činný výkon. Pomocí buzení synchronního generátoru byla nastavena jmenovitá hodnota napětí 400 V, kterou jsme udržovali po celou dobu měření konstantní pomocí voltmetru ( $V_1$ ). Po každé změně nastavení rezistorů jsme odečítali hodnoty fázového výkonu ( $W_2$ ), který byl přepočten na výkon celkový a frekvence ( $f_1$ ). Symetričnost zatížení jsme ověřovali ampérmetry  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ .

Měření probíhalo v těsné blízkosti jmenovité hodnoty 50 Hz. Z naměřených hodnot je zřetelné, že se vzrůstajícím výkonem klesá frekvence sítě. V blízkosti pracovního bodu jsme rovnicí regrese vypočtenou v programu MS Excel určili výkonové číslo soustavy.

$$P = (-130,67f + 8337,6) W \quad 7.5$$

Tato rovnice nám vyjadřuje vztah mezi zatížením soustavy a frekvencí sítě. Pokud zvýšíme zatížení o 131 W, klesnou otáčky sítě o 1 Hz. Tato závislost je použitelná pouze v okolí pracovního bodu. Znaménko mínus v rovnici je udáváno proto, že při zvýšení spotřeby, klesá frekvence sítě.

Zjištění výkonového čísla zatížení probíhalo současně s měřením výkonového čísla soustavy. Po každé změně nastavení rezistorů ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) jsme odečítali hodnoty výkonů ( $W_1$  a  $W_2$ ) a výsledným rozdílem výkonu celkového ( $W_2$ ) a rezistorového ( $W_1$ ) jsme určili zatížení motoru. V blízkosti pracovního bodu jsme rovnicí regrese vypočtenou v programu MS Excel určili výkonové číslo zatížení.

$$P = (43,13f - 1053) W \quad 7.6$$

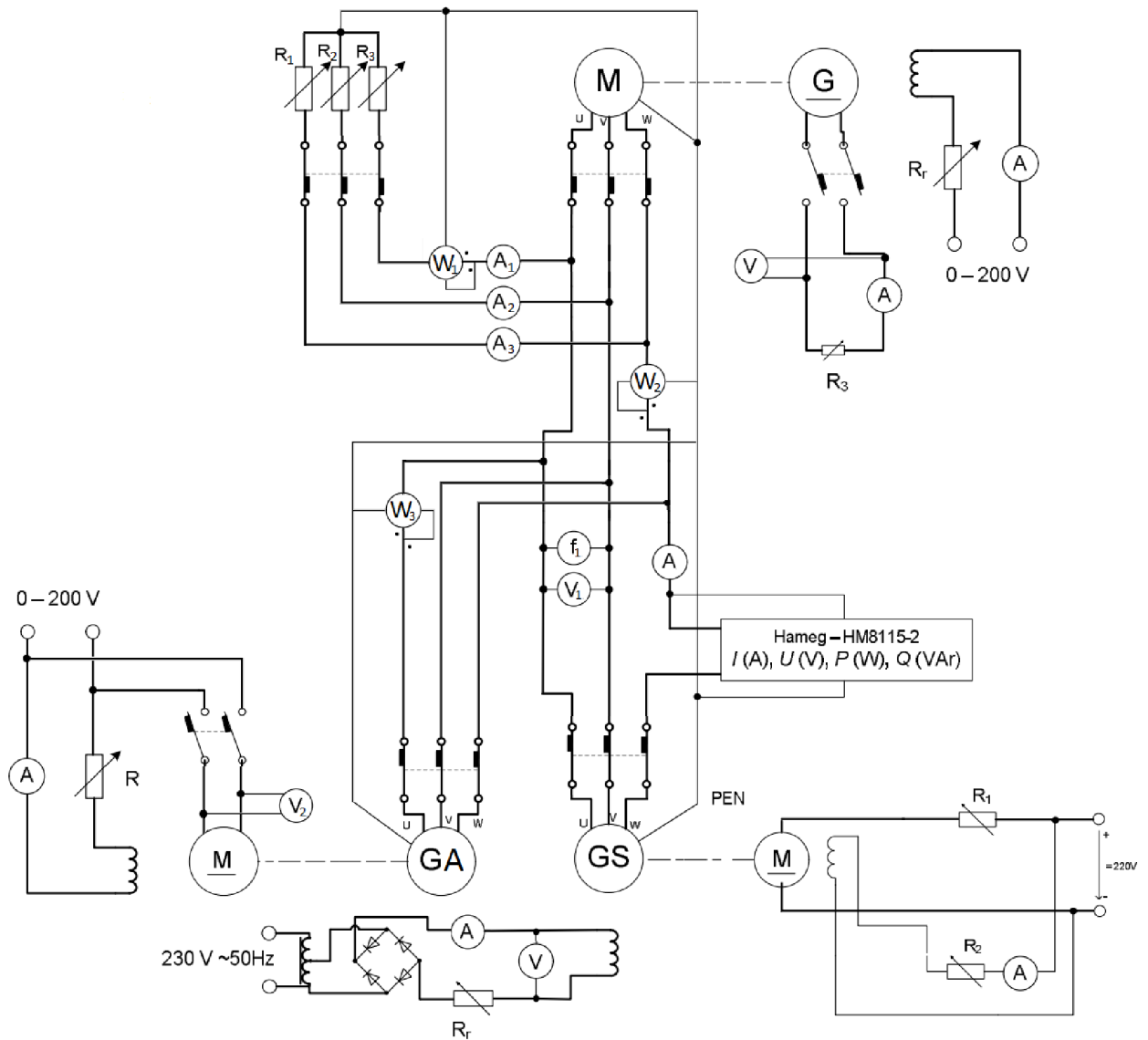
Tento vztah nám určuje závislost mezi frekvencí sítě výkonem na zátěži. Z měření vyšlo, že při zvýšení frekvence o 1 Hz, se zvedne výkon na zátěži o 43 W čemuž odpovídá i kladné znaménko v rovnici.

Samostatné měření výkonového čísla asynchronního generátoru nelze provádět, jelikož pro svůj chod potřebuje i magnetizační proud, který sám vyrobit neumí. Vhodným způsobem jak lze měřit je spolupráce se synchronním generátorem. Z rovnice 6.8 lze pak snadno vypočítat výkonové číslo samostatného asynchronního generátoru.

$$\Delta P_{g(as)} = \Delta P_g - \Delta P_{g(sy)} \quad 7.7$$

$$P = (-246f + 13093) - (-107f + 6133) = (-139f + 6960) W$$

## 7.3 Schéma zapojení



Obrázek 24 Schéma zapojení zkušební ostrovní sítě

## 8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo popsat a vyhodnotit možnosti vzájemné spolupráce asynchronního a synchronního generátoru v ostrovní síti, zejména popsat chování ostrovní sítě při změnách zátěže či různých provozních stavech generátorů.

V prvních třech kapitolách byly obecně popsány principy činností asynchronního a synchronního stroje, jejich charakteristiky a možnosti jejich použití. Dále zde byly popsány obecné provozní charakteristiky ostrovní sítě při různých stavech zatížení, výroby či nerovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektrické energie v síti.

Měření probíhalo v laboratoři výuky výroby elektrické energie v budově Technická 12, na již používaných soustrojích pro výuku. Byla vytvořena třífázová ostrovní síť o sdruženém napětí 400 V, skládající se ze synchronního generátoru, asynchronního generátoru, odporové a motorické zátěže. V první kroku byla změřena frekvenční charakteristika synchronního generátoru. Z naměřené charakteristiky  $f=f(P)$  v těsném okolí pracovního bodu bylo spočteno výkonové číslo generátoru, které udává vliv změny frekvence při změně zatížení. Pro synchronní generátor bylo změřeno a vypočteno výkonové číslo  $K_g = -107$  W/Hz. V druhém měření jsme k síti se synchronním generátorem připojily k odporové zátěži i zátěž motorickou. Pro tuto síť bylo změřeno a odečteno výkonové číslo soustavy  $K_s = -262$  W/Hz. Další měření bylo prováděno už s připojeným asynchronním generátorem. Postup byl stejný jako v předchozích krocích. Nejprve bylo odměřeno výkonové číslo obou dvou generátorů současně s výsledným výkonovým číslem  $K_g = -246$  W/Hz a poté výkonové číslo celé soustavy obsahující synchronní generátor, asynchronní generátor, rezistorovou zátěž a asynchronní motor pohánějící dynamo. Výsledné výkonové číslo bylo stanoveno na hodnotu  $K_s = -130$  W/Hz.

Z naměřených hodnot je vidět, že při zařazení druhého asynchronního generátoru do sítě, se zvedne výkonové číslo generátorů z  $-107$  W/Hz na  $-246$  W/Hz a tím se stane síť frekvenčně stabilnější vůči změnám zatížení. Je to dáno tím, že energii dodávají oba generátory současně. Oproti tomu síť s odporovou a motorickou zátěží vykazovala úplný opak. Při chodu pouze se synchronním generátorem výkonové číslo soustavy bylo větší  $-262$  W/Hz než při paralelním chodu synchronního a asynchronního generátoru, kdy výkonové číslo bylo stanoveno na hodnotu  $K_g = -130$  W/Hz. Znaménko mínus je udáváno proto, že při zvýšení spotřeby, klesá frekvence sítě.

Při měření výkonového čísla zátěže ve spolupráci pouze se synchronním generátorem vyšlo záporné výkonové číslo  $K_z = -48$  W/Hz, což zcela neodpovídá obecnému předpokladu. Možnou chybu při měření lze připsat nepřesnosti měřících přístrojů, kývání rotorů či nestálosti stejnosměrného napětí pro chod stejnosměrných motorů pohánějící generátory. Při spolupráci synchronního a asynchronního generátoru vyšlo kladné výkonové číslo  $K_z = -43$  W/Hz, což odpovídá obecnému předpokladu, že při vzrůstající frekvenci sítě, se zvedá i činný výkon na zátěži.

Měření samostatně pracujícího asynchronního generátoru nebylo prováděno, neboť jeho samostatný chod není možný, jelikož pro svůj chod potřebuje i jalovou složku proudu, kterou sám o sobě vyrobit neumí. Tuto teorii jsme následně vyzkoušely roztočením na jmenovité otáčky a měřením napětí na výstupu. Toto napětí však nepřesáhlo 3 V a po připojení sebemenší zátěže okamžitě kleslo na nulovou hodnotu. Vhodným způsobem jak zjistit výkonové číslo asynchronního generátoru je dodávat mu magnetizační proud kupříkladu ze synchronního

---

generátoru. Výsledné výkonové číslo asynchronního generátoru bylo spočteno za pomoci výkonového čísla obou generátorů pracujících současně a samostatné odměření výkonového čísla synchronního generátoru. Výsledné výkonové číslo asynchronního generátoru bylo stanoveno - 139 W/Hz.

Při měření byl pozorován i vliv kývání synchronního generátoru, který značně komplikoval samotné měření a znemožňoval i měření rozložení výkonů na jednotlivé generátory.

Tato bakalářská práce ukázala možnosti vzájemné spolupráce synchronního a asynchronního generátoru v ostrovní síti. Bylo odměřeno, že samostatný asynchronní generátor pracovat nemůže, ale vhodnou spoluprací se synchronním generátorem lze docílit toho, že může fungovat jako jednoduchý a spolehlivý zdroj činného výkonu.

Práce dále může tvořit základ pro novou úlohu pro studenty předmětu výroba elektrické energie, ve které by studenti mohly odměřovat frekvenční charakteristiky, výkonové čísla alespoň v samotném zapojení úlohy se synchronním generátorem nebo jim může být ukázán fakt, že bez jakéhokoliv přepojování může přejít asynchronní motor do stavu generatorického.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Přehled a zapojení motorů. *LMS Software* [online]. [cit. 2013-11-24]. Dostupné z: <http://www.mylms.cz/text-prehled-a-zapojeni-motoru/>
- [2] ROUBÍČEK O. Motor s kroužkovým rotorem. [online]. [cit. 2013-11-24]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/motor-s-krouzkovym-rotorem>
- [3] SUCHÁNEK, V. Elektrické stroje a přístroje. Praha: SNTL, 1982.
- [4] O společnosti. ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2013-11-24]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/O-spolecnosti/Stranky/Default.aspx>
- [5] SCHANDLOVÁ, A. Maturitní otázky z Elektroenergetiky. České Budějovice, 2011.
- [6] TOMAN, P. Distribuce elektrické energie: BDEE\_P01. Brno, 2013.
- [7] Elektrické stroje a přístroje I. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-03-00406-3.
- [8] Příručka silnoproudé elektro-techniky. Praha: SNTL, 1986. ISBN 04-501-86.
- [9] IBLER, Z a BERAN M. Elektrárny II. Plzeň: Ediční středisko VŠSE Plzeň, 1982.
- [10] SCHANDL, B. Maturitní otázky z Elektrických strojů a přístrojů. České Budějovice, 2011.
- [11] SUCHÁNEK, V. Elektrické stroje a přístroje II. Praha: SNTL, 1982.
- [12] FEJT a ČERMÁK. Elektroenergetika. Praha 1, Husova 5: České vysoké učení technické v Praze Ediční středisko ČVUT, 1981, 359 s.
- [13] HALUZÍK. Řízení provozu elektrizačních soustav. Praha: SNTL, 1987, 125 s.
- [14] IBLER a BERAN. Elektrárny II. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1982.

## PŘÍLOHY

### A. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

č. měření	f [Hz]	P (1f) [W]	P (3f) [W]
1	49,20	286	858
2	49,29	281	843
3	49,43	276	828
4	49,50	273	819
5	49,65	267	801
6	49,78	263	789
7	49,98	257	771
8	50,05	253	759
9	50,14	249	747
10	50,35	243	729
11	50,47	240	720
12	50,60	235	705
13	50,69	230	690
14	50,79	228	684

Tabulka 1 Frekvenční charakteristika synchronního generátoru

č. měření	f [Hz]	P (1f) [W]	P celkový (3f) [W]	P rezistorů 3f [W]	P motoru [W]
1	49,34	555,0	1665,0	945,0	720,0
2	49,49	542,5	1627,5	937,5	690,0
3	49,67	529,0	1587,0	930,0	657,0
4	49,78	515,0	1545,0	930,0	615,0
5	49,93	505,0	1515,0	915,0	600,0
6	50,02	490,0	1470,0	907,5	562,5
7	50,10	485,0	1455,0	907,5	547,5
8	50,22	470,0	1410,0	900,0	510,0
9	50,38	460,0	1380,0	900,0	480,0
10	50,58	447,5	1342,5	885,0	457,5
11	50,71	437,5	1312,5	877,5	435,0
12	50,80	429,0	1287,0	877,5	409,5

Tabulka 2 Frekvenční charakteristika ostrovní sítě se synchronním generátorem

č. měření	f [Hz]	P [W]
1	49,58	898,5
2	49,65	870,0
3	49,74	856,5
4	49,82	840,0
5	49,95	813,0
6	50,01	804,0
7	50,05	783,8
8	50,12	753,0
9	50,18	750,0
10	50,23	750,0
11	50,26	735,0
12	50,29	727,5
13	50,34	705,0
14	50,39	693,8
15	50,45	663,8
16	50,52	660,0
17	50,63	652,5

Tabulka 3 Frekvenční charakteristika synchronního a asynchronního generátoru

č. měření	f [Hz]	P celkový [W]	P rezistorový [W]	P motoru [W]
1	49,34	1890,0	822,0	1068,0
2	49,45	1866,0	801,0	1065,0
3	49,60	1854,0	765,0	1089,0
4	49,70	1830,0	739,5	1090,5
5	49,84	1836,0	716,3	1119,8
6	49,96	1830,0	720,0	1110,0
7	50,04	1815,0	697,5	1117,5
8	50,08	1800,0	687,0	1113,0
9	50,13	1792,5	682,5	1110,0
10	50,19	1777,5	672,0	1105,5
11	50,25	1770,0	658,5	1111,5
12	50,29	1740,0	645,0	1095,0
13	50,34	1755,0	639,0	1116,0

Tabulka 4 Frekvenční charakteristika ostrovní sítě

**B. Štítkové hodnoty použitých přístrojů****Soustrojí - synchronní generátor / stejnosměrný motor**

Synchronní generátor

P	6	kW
S	7,5	Var
cos φ	0,8	
U <sub>s</sub>	400	V
I	10,8	A

Stejnospměrný motor

P	8	kW
U	220	V
I	43	A
I <sub>buz</sub>	1,1	A
U <sub>buz</sub>	213	V
n	1400	ot/mi

**Soustrojí - Asynchronní generátor / stejnosměrný motor**

Asynchronní generátor

P	7	kW
S	8	Var
cos φ	0,8	
U <sub>s</sub>	400	V
I	11,8	A

Stejnospměrný motor

P	8	kW
U	220	V
I	39	A
I <sub>buz</sub>	0,51	A
U <sub>buz</sub>	110	V
n	1440	ot/mi

**Soustrojí - Asynchronní motor / dynamo**

Asynchronní motor

P	12	kW
U	380	V
I	25	A
n	1440	ot/mi

Dynamo

P	13	kW
U	220	V
I	66	A
I <sub>buz</sub>	1,71	A
U <sub>buz</sub>	220	V
n	1400	ot/mi