

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Bakalářská práce

Vyvedení jalového výkonu ze synchronního generátoru

Output of the Reactive Power from the Synchronous Generator



Václav Pieter

Vedoucí práce: *Prof. Ing. Jiří Pavelka DrSc*

Studijní program: *Elektrotechnika, energetika a management*

Obor: *Aplikovaná elektrotechnika*

2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Václav Pieter**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Vyvedení jalového výkonu ze synchronního generátoru**

Pokyny pro vypracování:

1. Synchronní generátor, princip a popis
2. Budící soustavy synchronních generátorů
3. Regulace činného a jalového výkonu synchronního generátoru


Seznam odborné literatury:

[1] Voženílek P., Novotný V., Mindl P., Elektromechanické měniče, skripta ČVUT 2011

[2] Pavelka J., Zděnek J.: Elektrické pohony a jejich řízení. 1. vyd., skriptum ČVUT 2010

Vedoucí: prof. Ing. Jiří Pavelka, DrSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 3. 12. 2013

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na popsání základních vlastností synchronních generátorů, a problematiky jejich řízení a regulace. První část práce se zaměřuje na popis základních fyzikálních veličin a jejich objasnění. Ve druhé části je proveden základní popis synchronních generátorů jak z hlediska konstrukce, tak z hlediska funkce jednotlivých částí a jeho chování v různých stavech. Třetí část je konkrétně zaměřena na popis budících systémů, jakožto hlavního regulačního prvku pro regulaci jalového výkonu. V poslední čtvrté části je popsán základní způsob připojení synchronního generátoru, způsoby a požadavky na jeho regulaci.

Klíčová slova

Synchronní generátor, alternátor, činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, budící soustava, regulace.

Abstract

This thesis focuses on describing basic features of synchronous generators and their regulation and control. The first chapter describes basic laws of physics pertaining to synchronous generator. The second chapter describes the generators basic components and various operation states. The third chapter describes excitation systems as the main reactive power regulator. The last chapter shows how to connect the synchronous generator to the power network and discusses the common requirements for their operation.

Keywords

Synchronous generator, alternator, reactive power, inductive power, apparent power, excitation system, regulation.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 23.5.2014

.....

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Jiřímu Pavelkovi DrSc. za jeho cenné rady a poskytnuté konzultace, které mi věnoval při mém vypracovávání bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat celé mé rodině, která mě vždycky podporovala v mém studiu a osobním rozvoji.

Obsah

1. Úvod	7
1.1. Elektrický výkon.....	8
1.1.1. Průměrný, okamžitý a celkový výkon.....	8
1.1.2. Činný výkon základní harmonické.....	8
1.1.3. Jalový výkon základní harmonické.....	8
1.1.4. Zdánlivý výkon základní harmonické	9
1.1.5. Účinník základní harmonické.....	9
1.1.6. Deformační výkon vyšších harmonických	9
1.2. Výroba elektrické energie pomocí rotačních strojů	10
1.2.1. Generátory pro výrobu stejnosměrného proudu - Dynama	10
1.2.2. Generátory pro výrobu střídavého proudu:.....	10
2. Alternátor- princip a popis.....	12
2.1. Hlavní části alternátoru.....	12
2.1.1. Stator.....	13
2.1.2. Rotor	13
2.1.3. Budící soustava (Budič)	14
2.2. Popis činnosti alternátoru.....	15
2.3. Náhradní schéma a matematický model	16
2.3.1. Obvodové schéma a matematický model v diferenciálním tvaru	17
2.3.2. Obvodové schéma a matematický model pro ustálený chod alternátoru.....	19
2.3.3. Provozní stavy při různých druzích zátěže.....	22
2.3.4. Moment synchronního stroje.....	24
3. Budící soustavy synchronních generátorů a jejich hlavní části.....	25
3.1. Obecné požadavky na budící soustavu	25
3.2. Části budícího systému	25
3.2.1. Zdroj budícího proudu	26
3.2.2. Přenos budícího proudu ze zdroje do vinutí	26
3.2.3. Napěťový regulátor.....	26
3.2.4. Odbuzovač.....	27
3.2.5. Měření.....	27
3.3. Příklady budících soustav.....	27
3.3.1. Budící soustava s rotačním buzením pomocí dynama.....	27

3.3.2.	Budící soustava s neřízeným diodovým usměrňovačem a regulací pomocí odboček transformátoru	28
3.3.3.	Statická budící soustava s řízeným polovodičovým usměrňovačem	28
3.3.4.	Budící kompaundační soustava	29
3.3.5.	Budící soustava s rotujícím usměrňovačem	30
4.	Regulace činného a jalového výkonu synchronního generátoru	31
4.1.	Vyvedení výkonu z alternátoru	31
4.2.	Rozsah řízení a regulace soustrojí	31
4.2.1.	Řízení a regulace alternátoru	32
4.2.2.	Požadavky na regulaci činného a jalového výkonu.....	34
5.	Závěr.....	35
	Seznam symbolů.....	36
	Seznam použitých zkratek.....	36
	Seznam obrázků.....	37
	Seznam použité literatury	38

1. Úvod

Moderní společnost 21. století je závislá na energiích víc, než kdy dřív v historii byla. Neustále se zvyšující životní úroveň obyvatel se sebou nese stále se zvyšující požadavky na kvalitu a stabilitu energetických dodávek. Základní energetické dodávky pro naši společnost se dají rozdělit do dvou skupin.

Do první skupiny můžeme zařadit dodávky surovin plynu, uhlí a ropy, ze kterých se posléze získává potřebná energie. Tyto suroviny jsou důležité pro chod naší společnosti, ale ne nezbytné. Jeden z důvodů jejich významu a rozšířenosti je cena, za kterou jsme schopni tyto suroviny získávat, zpracovávat a distribuovat. Mezi hlavní nevýhody patří malá energetická kapacita těchto surovin a z toho plynoucí neuvěřitelné množství, které je nutno vytěžit, zpracovat a přepravit na požadované místo spotřeby. Je však nezbytné si uvědomit, že celý proces získávání surovin pro výrobu elektrické energie je závislý na elektrické energii samotné a bez ní, při dnešních nárocích na bezpečnost a množství těžených surovin, by nebyl proveditelný. Další nevýhodou je způsob využití těchto surovin, zejména 99% z celkového množství vytěžených surovin se využívá při výrobě tepla.

Do druhé skupiny můžeme zařadit dodávky elektrické energie, která na rozdíl od, výše uvedených dodávek, je transformována z jiné formy energie. Jako hlavní výhody elektrické energie se dá zmínit množství zdrojů, ze kterých jsme schopni elektrickou energii získávat, patří sem tepelná, vodní, větrná a sluneční energie. Ve 21. stol. by vypělá společnost, bez elektrické energie, nemohla existovat. V případě, že by došlo z nějakého důvodu k přerušení dodávek elektrické energie, znamenalo by to celkový kolaps moderní společnosti. Bez elektrické energie by nefungovaly dodávky ostatních surovin - vody, plynu, ropy aj. Přestaly by fungovat systémy, které dnešní člověk považuje za samozřejmost, např. velká část dopravy ve velkoměstech (vlaky, tramvaje, metro), komunikační systémy (internet, televize, rádio, telefon), a další. Většina systémů, na které je dnešní člověk zvyklý by prostě nefungovala, a v některých případech by mohla nastat i taková situace, že by člověk například nemohl otevřít elektrická vrata garáže, nedostal by se ani do budovy, natož do 10. poschodí, nemohl by používat běžné domácí spotřebiče. Na těchto příkladech je vidět, že výroba, bezpečnost a spolehlivost dodávek elektrické energie má a bude mít zásadní význam na dalším rozvoji lidské společnosti.

V případě jakéhokoliv nedostatku nebo přerušení dodávek surovin uvedených v první skupině, jsme schopni tento deficit nahradit elektrickou energií, jelikož ji můžeme vyrábět různými způsoby např. přeměnou kinetické/potenciální energie pomocí rotačních generátorů, přímou přeměnou slunečního záření (solární panely), nebo z chemické reakce, apod. Také můžeme, pomocí elektrické energie, nahradit většinu ostatních surovin určených např. místo plynu, nebo uhlí se dá použít elektrický přímotop na vytápění objektu, sklokeramická deska na vaření, nafta/benzín se dá nahradit automobily poháněnými elektrickou energií z baterií apod. Na těchto příkladech je vidět, že se dnešní společnost celkem bez problému obejde bez dodávek plynu, uhlí, ropy, avšak bez elektrické energie, která nám slouží k získávání, zpracovávání a distribuci těchto surovin a pomáhá nám v každodenním životě, se již neobejde.

1.1. Elektrický výkon

Elektrický výkon je fyzikální veličina, která vyjadřuje práci vykonanou elektrickým proudem za jednotku času t . Výkon můžeme měřit v různých jednotkách. V elektrotechnice se však nejčastěji používá okamžitý výkon a značí se písmenem P , jednotkou je watt [W]. Dále se pak používá průměrný výkon P_A . Často se také setkáváme s celkovým dodaným výkonem P_C za nějaký časový interval, který představuje množství energie, které bylo za tuto dobu vyrobeno. Měří se ve wattsekundách [Ws]. Elektrický výkon můžeme dále dělit u střídavého proudu na činný P , jalový Q a zdánlivý výkon S .

1.1.1. Průměrný, okamžitý a celkový výkon

Následující vztahy popisují výpočet jednotlivých výkonů.

Průměrný výkon:

$$P_A = \frac{W}{t} \quad [W; J, s] \quad (1)$$

Okamžitý výkon jednofázový:

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} * \frac{dq}{dt} = u * i \quad [W; V, A] \quad (2)$$

Celkový dodaný výkon

Má rozměr práce, jako jednotka se však nepoužívá joul [J], ale wattsekunda [Ws].

$$P_C = P * t \quad [Ws; W, s] \quad (3)$$

1.1.2. Činný výkon základní harmonické

Činný výkon je fyzikální veličina, která je přímo spjatá s velikostí práce vykonané elektrickým zařízením, a je tímto zařízením přeměněná na jinou formu energie např. mechanickou, tepelnou, světelnou aj.

$$P_1 = U * I * \cos \varphi \quad [W; V, A, rad] \quad (4)$$

1.1.3. Jalový výkon základní harmonické

Jalový elektrický výkon se dá rozdělit na dva druhy a to na jalový výkon kapacitního nebo induktivního charakteru. Jalový výkon je nutný k vytvoření elektrického pole v kondenzátorech nebo magnetického pole v tlumivkách. Mnoho zařízení potřebuje jalový výkon pro svou funkci a jelikož není v zařízení spotřebováván, ale je periodicky vyměňován se zdrojem, musí se po vedení přenášet. Ze vzorce 5 je zřejmé, že jalový výkon je závislý na velikosti proudu, který se musí po vedení přenášet a vytváří tak ve vedení ztráty, které nejsou svázány s činným (užitečným) výkonem. Z tohoto důvodu je snaha jalový výkon po vedení nepřenášet a jeho velikost kompenzovat, nebo vyrábět co nejbližší k odběrnému místu, takzvaně kompenzace účinníku.

$$Q_1 = U * I * \sin \varphi \quad [W; V, A, rad] \quad (5)$$

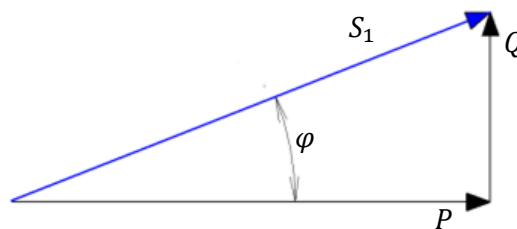
1.1.4. Zdánlivý výkon základní harmonické

Zdánlivý výkon nemá zvláštní fyzikální význam, je však hojně používán ve výpočtech, pro určení ztrát na vedení, dimenzování vodičů atd.

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad [W; W, W] \quad (6)$$

1.1.5. Účinník základní harmonické

Účinník je úhel mezi činným a jalovým proudem. Je to veličina, která určuje poměr mezi činným a jalovým výkonem viz obr. 1. Často je jeho hodnota vyražena na štítku stroje.



Obrázek 1: Výkonový trojúhelník

Následující vzorce ukazují vztah mezi účinníkem a různými elektrickými veličinami.

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad [rad; W, W] \quad (7)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_c}{I} \quad [rad; A, A] \quad (8)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{R}{Z} \quad [rad; \Omega, \Omega] \quad (9)$$

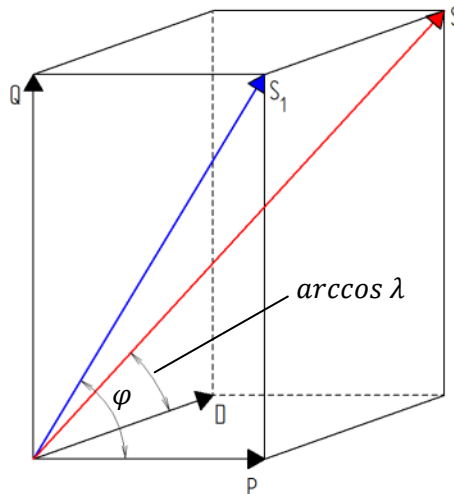
1.1.6. Deformační výkon vyšších harmonických

Jako poslední typ výkonu, je uveden výkon deformační D . Tento výkon je způsoben vyššími harmonickými proudy, které se vyskytují ve vedení z důvodu rušení, nekvalitní výroby, aj. Tyto proudy se přenášejí po vedení společně s proudy výkonu základní harmonické, a způsobují další ztráty ve vedení. Vzorec pro zdánlivý výkon S s uvažováním deformačního výkonu má poté výsledný tvar:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad [W; W, W, W] \quad (10)$$

K deformačnímu výkonu se dále vztahuje činitel jakosti λ (který je také označován jako opravdový účinník), a je určen jako podíl činného a zdánlivého výkonu.

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad [-; W, W] \quad (10)$$



Obrázek 2: Výkonový diagram P, Q, D

1.2. Výroba elektrické energie pomocí rotačních strojů

Pro výrobu elektrické energie se používá několik typů rotačních strojů (generátorů), které jsou schopny dodávat elektrický výkon. Generátory je možno rozdělit podle principu činnosti do několika základních skupin:

1.2.1. Generátory pro výrobu stejnosměrného proudu - Dynama

Vyrábí se v několika různých provedeních, která mají společnou část a tou je komutátor. Jedná se o mechanický kluzný spoj, který se skládá s lamel a uhlíků. Komutátor slouží k přenesení proudu z rotorového vinutí na svorky dynama. Jeho největší nevýhodou je náročnost na výrobu, údržbu a případné opravy. Dynama se dají rozdělit na dva druhy:

Dynama s permanentními magnety

Jejich předností je jednoduchá instalace a provoz. Stačí je připojit k pohonnému zařízení a stejnosměrnému spotřebiči, který chceme napájet. Využívají se především pro malé výkony. Jejich největší nevýhodou je malá možnost řízení vyráběného výkonu.

Dynama s budícím vinutím

Tyto stroje jsou o něco složitější a magnetické pole, které bylo v předešlém případě tvořeno permanentními magnety, je u těchto strojů vytvořeno pomocí budícího vinutí. Z tohoto důvodu již není možno, aby generátor pracoval sám o sobě bez součinnosti dalšího zařízení, nebo sofistikovanějšího zapojení. Výhoda tohoto stroje je možnost řízení velikosti magnetického pole ve stroji a tím i jeho napětí na svorkách a výkonu dodávaného do spotřebiče.

1.2.2. Generátory pro výrobu střídavého proudu:

Tento typ generátorů se používá pro výrobu střídavého proudu. Vyrábějí se v různých provedeních lišících se otáčkami a výkonem, v rozsahu od zlomku wattů až k hodnotě přesahující jeden gigawatt. Tyto generátory se dají rozdělit do dvou základních skupin:

Asynchronní generátory

Jde vlastně o asynchronní motory, které jsou provozovány se záporným skluzem, to znamená, že jsou urychlovány pomocí hnacího stroje tak, aby indukované magnetické pole rotoru předbíhalo rotující magnetické pole statoru. Jeho hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce, která neobsahuje žádné části

náročné na údržbu. Pakliže stroj není napětově, nebo tepelně přetěžován, jeho nejvíce opotřebovanými částmi jsou ložiska. Jeho hlavní nevýhodou, a tím i příčinou jeho malého rozšíření, je nutnost přítomnosti vnějšího střídavého napětí na svorkách stroje. Toto napětí vytvoří ve stroji potřebné točivé magnetické pole a z toho plynoucí požadavky na dodávku jalového výkonu ze sítě. Z výše uvedeného důvodu je zřejmé, že asynchronní generátor není schopen jalový výkon do sítě dodávat.

Synchronní generátor - Alternátor

Alternátor je nejdůležitější rotační stroj pro výrobu elektrické energie, pro svou schopnost, jako jednoho z mála zdrojů elektrické energie, dodávat do sítě nejen činný, ale i jalový výkon, a je z tohoto důvodu dnes nenahraditelný. Pro svůj význam dostal vlastní název a v dalším popisu bude označován jako alternátor. Alternátory jsou nejvýkonnější a největší točivé stroje pro výrobu elektrické energie, vyrábějí se ve různých typech, liší se otáčkami, napětím a výkony od zlomku wattů až po výkony přesahující 1 GW. Podrobnější popis je v následujících kapitolách.

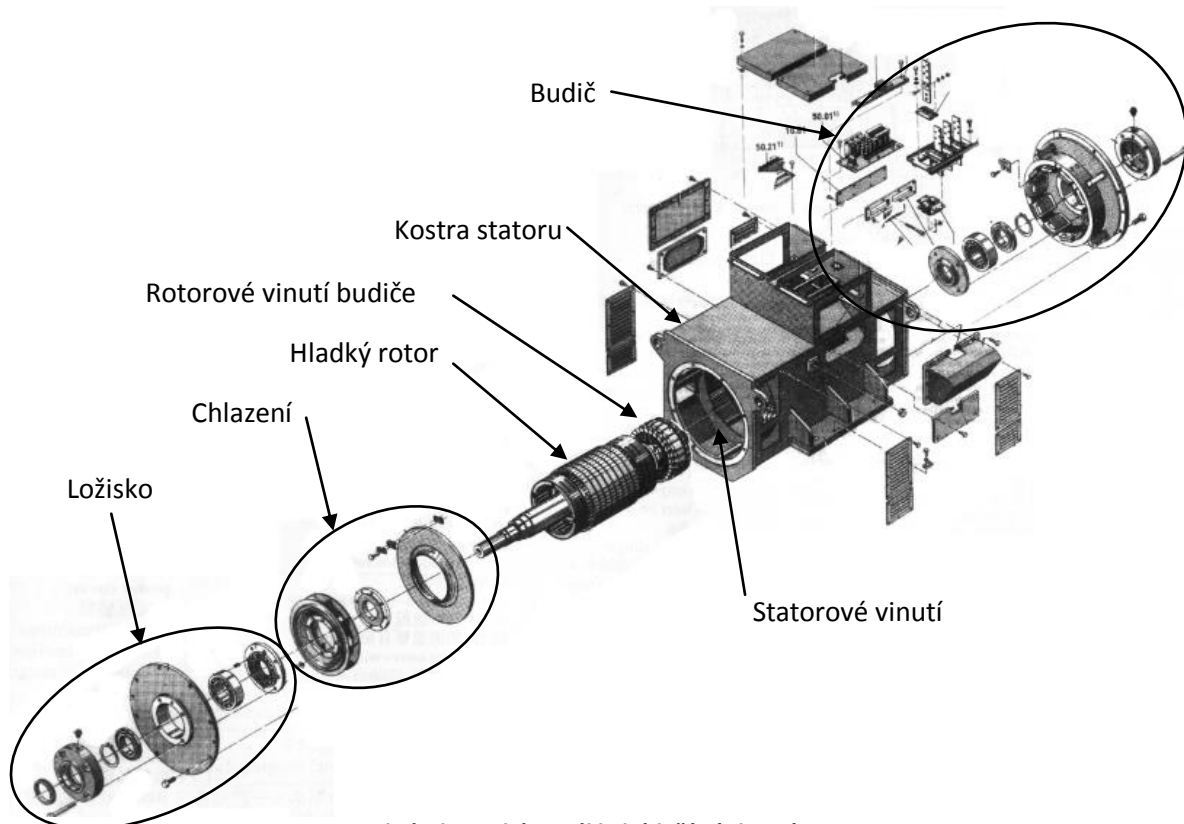
2. Alternátor- princip a popis

V následujícím textu bude popsána jeho konstrukce a princip činnosti. Tento popis se nesnaží být úplným popisem, ale snaží se vysvětlit dílčí části a základní principy, které jsou nezbytné k pochopení jeho fungování.

2.1. Hlavní části alternátoru

Alternátor je rotační elektrický stroj, který je zdokonalován po několik desetiletí a jeho vývoj stále pokračuje. Tento vývoj už není zaměřen na změnu koncepce fungování jeho hlavních částí, které již po mnoho let zůstávají bez výraznějších změn, a ani v dalším období nejspíše nebude důvod je měnit.

Hlavní směry vývoje a zdokonalování alternátorů můžeme rozdělit do dvou oblastí. První oblast je zaměřená na vývoj materiálů určených k výrobě jednotlivých částí alternátorů, a to jak na materiály určené pro výrobu rotorů, u kterých je kladen důraz na mechanickou pevnost, tak na materiály, ze kterých jsou vyrobeny statorové pakety a vinutí stroje, u kterých se klade důraz na magnetické a izolační vlastnosti - například magnetické plechy, izolace aj. Kvalitnější materiály umožní výrobu rotorů s větší délkou a průměrem, a umožní provoz s vyšším napětím a proudem ve vinutích stroje, a tím pádem zvýšení jeho výkonu. Jako druhý směr vývoje se dá označit pokrok v řízení dynamického chodu alternátoru. Toto je umožněno vývojem výkonových součástek, mikroprocesorů a řídicí elektroniky. Díky tomu se dá dosáhnout sofistikovanějšího řízení budícího systému a umožnit tak rychlejší vyhodnocování a řízení budící soustavy v závislosti na změnách v síti. Tyto zdokonalené řídicí systémy mají zásadní vliv na kvalitu elektrické energie dodávané do sítě a zvyšují životnost celého soustrojí.



Obrázek 3: Schéma základních částí alternátoru

2.1.1. Stator

Konstrukce statoru alternátoru se dá rozdělit na dvě části a to na kostru statoru a na magnetický obvod.

Kostra statoru:

Kostra je svařená z ocelových plechů a profilů, tvoří pevný rám a ochranný plášť pro magnetický obvod. Hlavním požadavkem na statorovou kostru je její tuhost. Ke kostře jsou dále přivařené patky, za které se celý stroj uchycuje k dané konstrukci a obsahuje složitý systém chlazení. Tento systém je tvořen kanály, průduchy a přepážkami tak, aby byl zajištěn rovnoměrný odvod tepla z celého stroje a je tím složitější, čím většího výkonu má dané zařízení dosahovat. Další součástí kostry jsou čela, v nichž jsou umístěna hlavní ložiska stroje.

Magnetický obvod statoru:

Je konstrukčně stejný jako magnetický obvod asynchronních motorů a tvoří jej jeden systém třífázového vinutí. Vinutí je vyrobeno z elektrotechnických plechů, které jsou zajištěny stahovacími pásky a vinutím. Tato sestava tvoří takzvaně statorový paket a je pevně zamontována do kostry statoru.

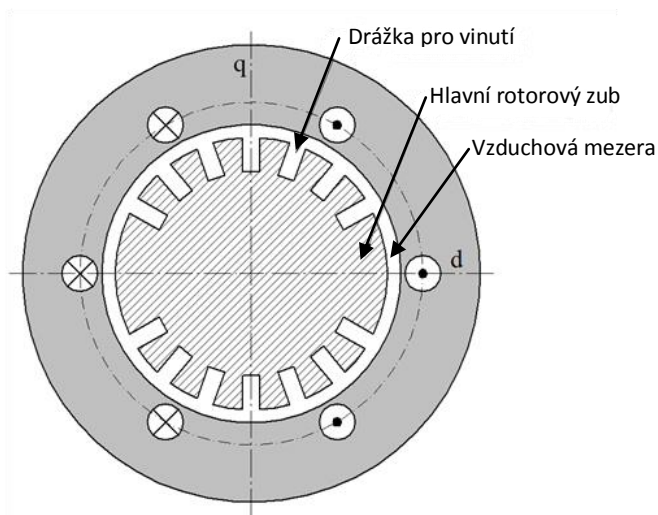
2.1.2. Rotor

Konstrukce rotoru alternátoru je znatelně náročnější na rozdíl od konstrukce rotoru asynchronních strojů, z důvodu nutnosti vytvořit vinutí, které je vyvedeno do budícího systému a tudíž nemůže být odlito do rotorových drážek tak, jak je to při výrobě rotorů pro asynchronní stroje. Na rozdíl od složitě výroby, je návrh rotorů, co se týče elektromagnetických vlastností, podstatně jednodušší než u asynchronních strojů. Tím, že v budícím vinutí umístěném na rotoru nedochází ke střídavému přemagnetování, může být rotor, nebo rotorové póly vyrobeny z plného materiálu, aniž by to mělo vliv na účinnost stroje. Jelikož alternátory pro svoji činnost nemusejí odebírat jalový výkon ze sítě, je jejich dalším významným rozdílem, oproti rotorům asynchronních strojů, velikost vzduchové mezery mezi rotorem a statorem. U asynchronních strojů nejvyšších výkonů se tato mezera musí pohybovat v jednotkách milimetrů, zatím co u synchronních strojů se jedná o desítky mm. Díky tomu se snižují nároky na konstrukční návrh se zaměřením na tepelnou roztažnost a chlazení, a snižují se problémy s následnou výrobou.

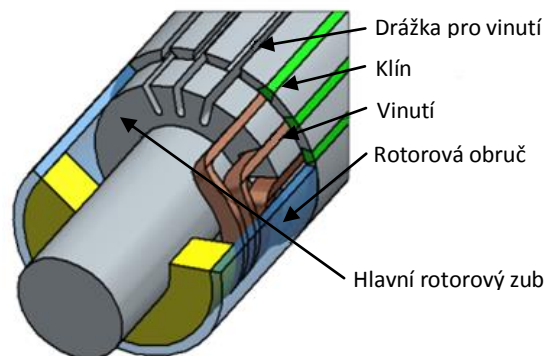
Rotory alternátorů se dají rozdělit na dva typy, na rotory hladké a na rotory s vyniklými póly. Tyto dvě konstrukce se od sebe liší především poměrem délky k průměru, což je zapříčiněno požadovanými jmenovitými otáčkami a tím pádem počtem pólů k dosažení požadované frekvence výstupního napětí.

Hladký rotor:

Hladké rotory jsou používány v turboalternátorech a jsou provozovány obvykle nad 1500 otáček, a vyznačují se velkou délkou přes 10 m a malým průměrem většinou do 1.2m. Tyto rotory se vyrábějí převážně kováním, jejich vinutí je umístěno do rotorových drážek a zajištěno proti vyjetí klínem, viz obrázek 4 a 5.



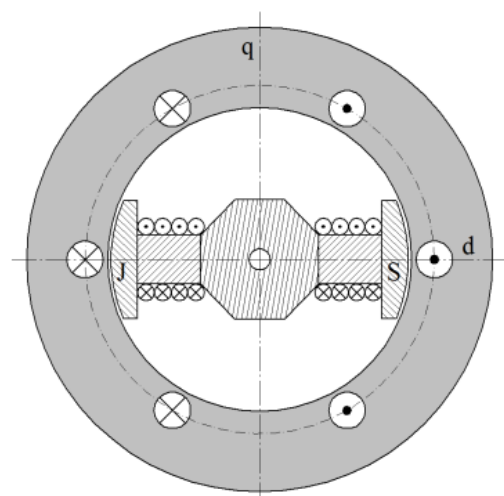
Obrázek 4: Schéma hladkého rotoru v řezu



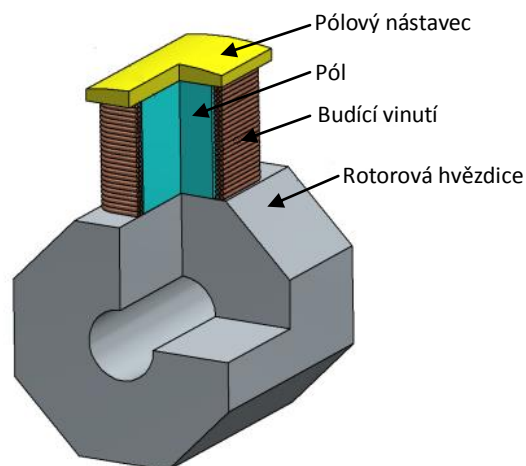
Obrázek 5: Hladký rotor

Rotor s vyniklými póly:

Rotory s vyniklými póly jsou určeny pro hydrogenerátory a jsou navrženy pro provoz v nízkých otáčkách pod 1500 ot/min. Tyto rotory jsou sestaveny z rotorové hvězdy, která je umístěna na hřídeli stroje a musí být navržena tak, aby unesla magnetické póly, které na ní působí momentem a odstředivými silami, viz obr. 6. Průměry těchto rotorů mohou přesahovat 10 m.



Obrázek 6: Schéma řezu rotoru s vyniklými póly



Obrázek 7: Rotor s vyniklými póly

2.1.3. Budící soustava (Budič)

Slouží k regulaci výkonů alternátoru a skládá se z několika částí závislých od typu alternátoru. Mezi hlavní části patří napěťový regulátor, zdroj budícího proudu a sestava budícího vinutí. Budič dále obsahuje systém vodičů, kontaktu a dalších prvků, které umožňují přenos budícího proudu ze zdroje do budícího vinutí.

2.2. Popis činnosti alternátoru

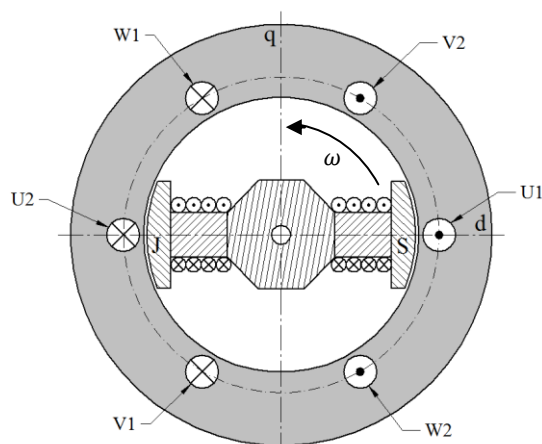
Funkce alternátoru vyplývá z obrázku 8 a 9. Statorové vinutí je tvořeno třemi cívkami (fázemi) vzájemně pootočenými o 120° , a je podobné jako u asynchronních strojů. Princip činnosti můžeme vysvětlit na následující představě, kde rotor, na kterém je umístěno budící vinutí, je poháněn například spalovacím motorem o otáčkách ω . Ten dodává potřebný točivý moment (výkon) a je definován vzorcem:

$$P = \omega * M \quad [W; \text{rad}^{-1}, Nm] \quad (11)$$

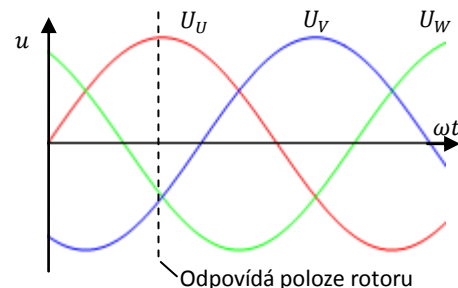
$$P = 2 * \pi * f * M \quad [W; Hz, Nm] \quad (12)$$

Budící vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem z budiče, vytváří točivé magnetické pole jehož velikost je řízená pomocí napěťového regulátoru (AVR). Velikost magnetického pole ovlivňuje velikost napětí na svorkách generátoru a indukuje ve statorových cívkách sinusové napětí obr. 9, které je vyvedeno na svorky. Frekvence napětí je závislá na otáčkách rotoru a počtu pólpárů a je dána vzorcem:

$$f = \frac{p_p * n}{60} \quad [Hz; \text{min}^{-1}] \quad (13)$$



Obrázek 8: Uspořádání statorového vinutí

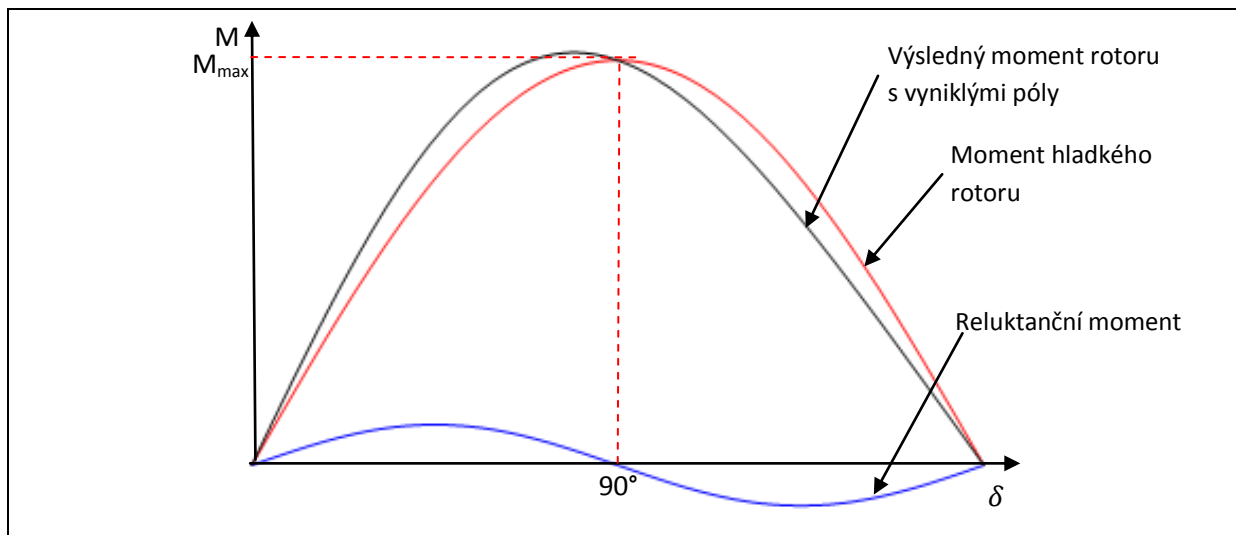


Obrázek 9: Průběhy napětí na svorkách alternátoru

Jestliže sled fází, frekvence a velikost napětí je stejná jako napětí sítě, může dojít k připojení alternátoru k síti. Tato procedura se nazývá fázování a dnes se o ní stará automatický fázovací systém, který neumožní připojit alternátor k síti, pokud nejsou splněny výše uvedené podmínky. Po připojení alternátoru a odeznění přechodových dějů (toků vyrovnávacích proudů, které jsou zapříčiněny nedokonalostí fázovacího procesu a nedokonalostí sinusových průběhů napětí) se v alternátoru nacházejí dvě magnetická pole. Jedno buzené budícím vinutím, a druhé statorovým vinutím připojeným k síti. Jelikož jsou tato pole vzájemně svázána skrze magnetický tok musí se otáčet stejnými otáčkami. Díky této magnetické vazbě je možno měnit vzájemný tok energie mezi budícím vinutím a sítí. Tento rozdíl je možno popsat pomocí zátěžného úhlu δ .

Zátěžný úhel δ

Zátěžný úhel je úzce svázán s momentem na hřídeli. Je to úhel mezi fázorem vstupního napětí U a indukovaným napětím rotoru U_{ib} , nebo také úhel mezi magnetickým polem statoru a rotoru, a vyjadřuje se v elektrických stupních. Na obr. 10 je nakreslen obecný graf závislosti výkonu na zátěžném úhlu. Jejich vzájemná vazba se dá popsat na následujícím příkladu: na rotoru je postupně zvětšován moment pomocí hnacího zařízení, například zvětšením dávky paliva do spalovacího motoru, a jelikož je magnetické pole statoru určeno frekvencí sítě, která se dá považovat za neměnnou, a rotor se musí otáčet konstantními (synchronními) otáčkami, projeví se změna momentu na zátěžném úhlu δ . Jeho velikost bude postupně narůstat se zvyšujícím se momentem, až do hodnoty, kdy se rotor neudrží v synchronním chodu a alternátor vypadne ze synchronizmu. Výsledný tvar závislosti momentu na zátěžném úhlu je dán součtem momentu dle rovnice 37 a reluktančního momentu. Pro alternátory s hladkým rotorem tento stav nastane při zátěžném úhlu 90° elektrických. Při této hodnotě je dosaženo maximálního možného výkonu.



Obrázek 10: Graf závislosti zátěžného úhlu na výkonu

Pozor: Zátěžovací úhel neplést se skluzem. Rotor má stále stejné otáčky jako točivé magnetické pole statoru.

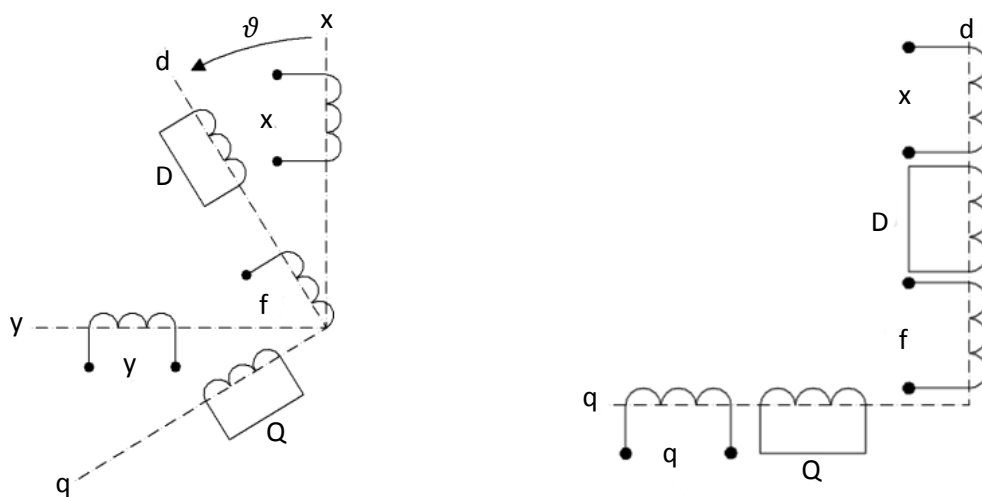
2.3. Náhradní schéma a matematický model

Matematické modely mohou mít obecně různé tvary a na první pohled nemusí vypadat, že popisují stejnou věc. Je třeba se vždy blíže seznámit s tím, jakou fyzikální vlastnost daný model popisuje a s jakou přesností. Mohou být sestaveny modely, které popisují stejné děje, avšak lišící se v závislosti na použitých okrajových podmínkách. Tyto modely mohou vynechat některé proměnné, které popisují chování v podmínkách, do kterých by se dané zařízení nemělo samo dostat, nebo popisují podmínky, které jsou z hlediska doby provozu zařízení zanedbatelné. Některými okrajovými podmínkami v daném matematickém modelu nemusíme věnovat tolik pozornosti, jelikož se tyto okrajové stavy dají omezit vnějšími bezpečnostními prvky. Například nemá smysl se zabývat chováním alternátoru navrženého pro chod v 3000 ot/min při chodu 4500 ot/min. Je zřejmé, že v takovémto případě by již zapůsobilo několik ochranných prvků a stroj by byl odstaven.

Namísto toho se při provozu mohou vyskytnout různé stavy, u nichž je nutné mít alespoň základní představu o tom, co by se mohlo při takovémto chodu dít. Například přechodný stav při přifázování alternátoru a následném toku vyrovnávacích proudů, u kterých je nejdůležitější vědět jakou velikost a po jakou dobu mohou působit, je potřebné, v závislosti na tom, nastavit parametry ochran tak, aby nedocházelo k jejich zafungování při běžném provozu. Pro tyto parametry však není problém si stanovit přibližné hodnoty například odhadem, nebo použít hodnoty z jiných výroben podobného typu, místo toho, aby se složité počítaly přesné průběhy proudů. V této práci budou zmíněny dva základní matematické modely, z nichž jeden popisuje dynamické děje v alternátoru pomocí diferenciálních rovnic a druhý, zjednodušený model, popisuje alternátor v ustáleném chodu.

2.3.1. Obvodové schéma a matematický model v diferenciálním tvaru

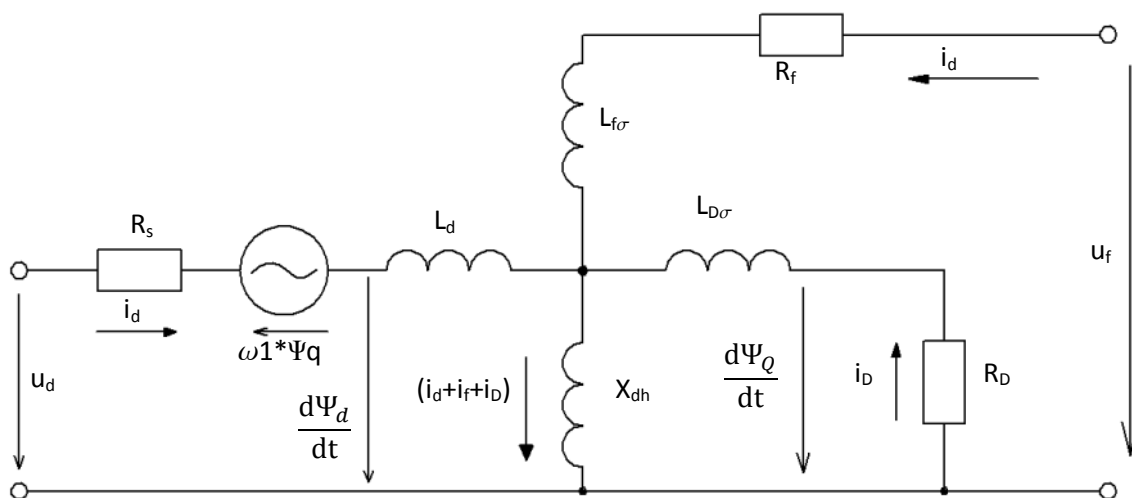
Tento matematický model v sobě zahrnuje veškeré elektromagnetické vlastnosti, které jsou nezbytné pro kvalitní popis alternátoru v dynamicky se měnícím prostředí a v přechodových dějích v síti. Matematický model vychází z transformace vinutí do os d a q obr. 11.



Obrázek 11: Transformace statorového vinutí do os d a q

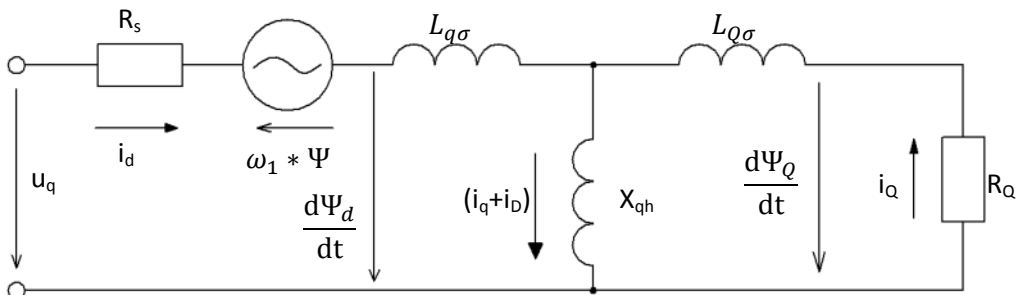
Dále jsou sestavena obvodová schémata, která jsou znázorněna na obr. 12 a 13, a na kterých jsou zřetelně vidět prvky, které jsou potřebné k vytvoření modelu.

Obvodové schéma pro osu d:



Obrázek 12: Obvodové schéma pro osu d

Obvodové schéma pro osu q:



Obrázek 13: Obvodové schéma pro osu q

Na základě výše znázorněných schémat byly vytvořeny matematické rovnice. Pět z nich popisuje problematiku spřažených magnetických toků (14-18), další pak napěťové poměry ve vinutích (19-23). Dále byl matematický model doplněn o rovnici pro elektromagnetický moment (24), pohybovou rovnici (25) a rovnici popisující vztah mezi úhlovou rychlostí Ω rotoru, elektrickou úhlovou rychlostí ω_1 a počtem pólů p_p .

Napěťové rovnice osu d:

$$u_d = R_s * i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_1 * \Psi_q \quad (14)$$

$$u_f = R_f * i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \quad (15)$$

$$0 = R_D * i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \quad (16)$$

Napěťové rovnice osu q:

$$u_q = R_s * i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_1 * \Psi_d \quad (17)$$

$$0 = R_Q * i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt} \quad (18)$$

Rovnice pro spřažený magnetický tok osy d:

$$\Psi_d = L_d * i_d + L_{df} * i_f + L_{dD} * i_D \quad (19)$$

$$\Psi_f = L_{df} * i_d + L_f * i_f + L_{fD} * i_D \quad (20)$$

$$\Psi_D = L_{dD} * i_d + L_{fD} * i_f + L_D * i_D \quad (21)$$

Rovnice pro spřažený magnetický tok osy q:

$$\Psi_q = L_q * i_q + L_{qQ} * i_Q \quad (22)$$

$$\Psi_Q = L_{qQ} * i_q + L_Q * i_Q \quad (23)$$

Rovnice pro elektromagnetický moment:

$$M = \frac{3}{2} + p_p * (\Psi_d * i_q - \Psi_q * i_d) \quad (24)$$

Pohybová rovnice:

$$M - M_z = J * \frac{d\Omega}{dt} \quad (25)$$

Vztah mezi mechanickou úhlovou rychlostí a úhlovou rychlostí magnetického pole:

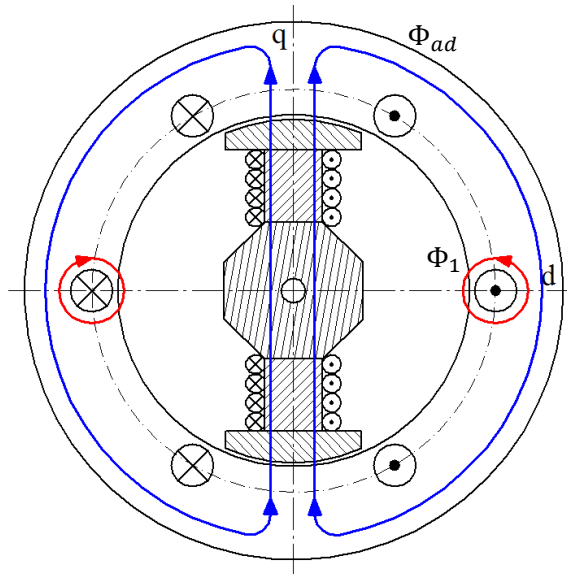
$$\omega_1 = p_p * \Omega \quad (26)$$

2.3.2. Obvodové schéma a matematický model pro ustálený chod alternátoru

Následující obvodové schéma a jeho matematický model popisuje turboalternátor v různých ustálených chodech.

Reaktance:

Každý synchronní stroj se vyznačuje svými specifickými reaktancemi X , které jsou dány jeho vnitřní konstrukcí. Reaktance vychází z indukčnosti cívek a magnetického odporu magnetického obvodu. Ve stroji rozlišujeme dvě základní reaktance a to reaktanci podélnou X_d a příčnou X_q . Každá z těchto reaktancí se skládá s reaktance kotvy a rozptylové reaktance statoru $X_{1\sigma}$. Tyto reaktance jsou závislé na hlavním a rozptylového toku viz obr. 14.



Obrázek 14: Hlavní a rozptylový magnetický tok

Výsledné reaktance jsou poté dány součtem:

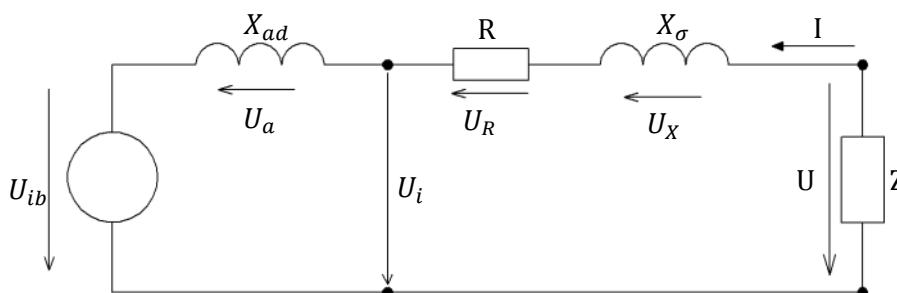
$$X_d = X_{ad} + X_{1\sigma} \quad (26)$$

$$X_q = X_{aq} + X_{1\sigma} \quad (27)$$

Náhradní schéma alternátoru pro ustálený chod:

Náhradní schéma na obr. 15 popisuje synchronní stroj s hladkým rotorem, u kterého se předpokládá stejná vzduchová mezera po celém obvodu rotoru, obr. 4, díky čemuž lze použít zjednodušení, které vychází z předpokladu přibližně stejné velikosti podélné a příčné reaktance.

$$X_q = X_d \quad (28)$$



Obrázek 15: Náhradní schéma pro ustálené stavy alternátoru

Na schématu obr. 15 je znázorněn zdroj napětí U_{ib} , což je napětí statorového vinutí, které je indukováno točivým magnetickým polem vytvořeným budícím vinutím. Toto napětí se po odečtení úbytku napětí způsobeného podélnou reaktancí kotvy označuje jako výsledné indukované napětí kotvy U_i . Dále je pak ve schématu zařazen odpor R , který reprezentuje činný odpor statorového vinutí, a reaktance X_σ , která respektuje rozptylový tok. Pomocí těchto prvků se dá sestavit obvodová rovnice pro napětí U generátoru při průtoku proudu I a zátěží Z .

Velikost indukovaného napětí je možno vyjádřit vzorcem:

$$U_i = 4,44 * N * \Phi * f * k_v \quad [U; -, Wb, Hz, -] \quad (29)$$

Výsledná velikost napětí generátoru je poté definovaná vzorcem:

$$\hat{U} = jX_\sigma * \hat{I} + R * I + jX_{ad} * \hat{I} - \hat{U}_{ib} \quad [U; \Omega, I, \Omega, I, \Omega, I, U] \quad (30)$$

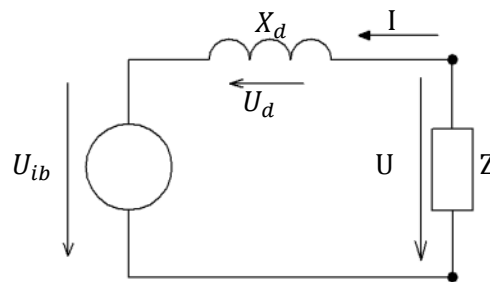
Pro zjednodušení popisu jednotlivých provozních stavů vezmeme v úvahu vliv jednotlivých parametrů. Typické hodnoty pro jednotlivé parametry jsou:

$$\begin{aligned} r &\sim 1\% \\ x_\sigma &\sim 10\% \\ x_{ad} &\sim 170\% \end{aligned}$$

Z uvedeného výpisu je zřejmé, že zanedbáním odporu R se dopustíme minimálního zhoršení přesnosti. Dále můžeme nahradit podélnou a rozptylovou reaktanci jednou společnou reaktancí:

$$X_d = X_{ad} + X_{1\sigma} \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (31)$$

Zahrnutím zmíněných pravidel dojde ke zjednodušení schématu obr. 16, které bude použito k popsání chodu alternátoru pro různé druhy zátěže.



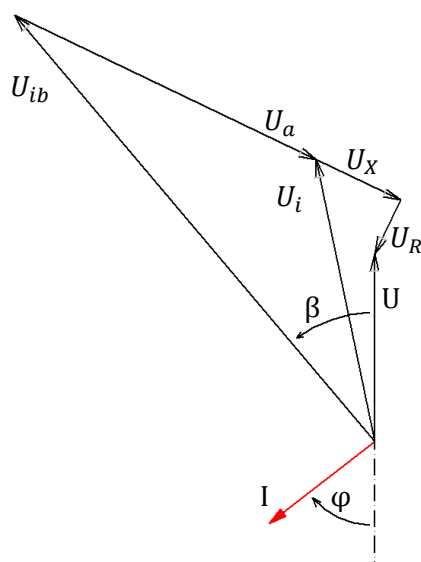
Obrázek 16: Zjednodušené náhradní schéma pro ustálený stav alternátoru

Výsledná zjednodušená rovnice pro napětí generátoru dle schématu na obr. 16 pak bude mít tvar:

$$\hat{U} = jX_d * \hat{I} - \hat{U}_{ib} \quad [U; \Omega, I, U] \quad (32)$$

Úplný fázový diagram

Následující fázorový diagram obr. 17 je sestaven pro ustálený chod v generátorovém režimu v přebuzeném stavu dle úplného náhradního schématu obr. 15.



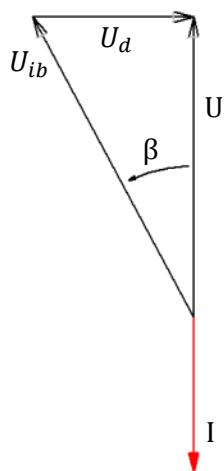
Obrázek 17: Úplný fázorový diagram

2.3.3. Provozní stavy při různých druzích zátěže

Následující vektorové diagramy popisují různé druhy provozu dle typu připojené zátěže.

Zátěž typu R

Při čistě odporové zátěži je alternátor nabuzen tak, aby pokryl vlastní potřebu jalového výkonu a pracuje s účinníkem $\cos \varphi = 1$.



Obrázek 18: Fázorový diagram pro odporovou zátěž

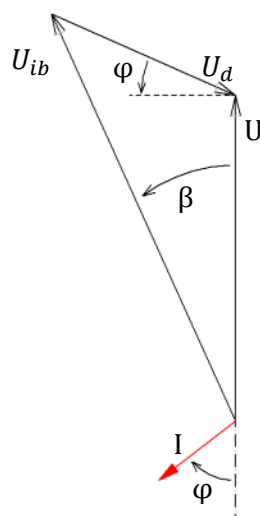
Zátěž typu RL

Při induktivní zátěži je nutné zvýšit budící proud pro budící vinutí a tím i U_{ib} . Jedná se o chod v přebuzeném stavu. V takovémto případě je nutné hlídat zdánlivý výkon na stroji, aby měřením pouze činného výkonu nenastalo přetížení stroje celkovým výkonem S .

$$\hat{U}_d = jX_d * \hat{I} \quad [U; \Omega, I] \quad (33)$$

$$\hat{U} = jX_d * \hat{I} + \hat{U}_{ib} \quad [U; \Omega, I, U] \quad (34)$$

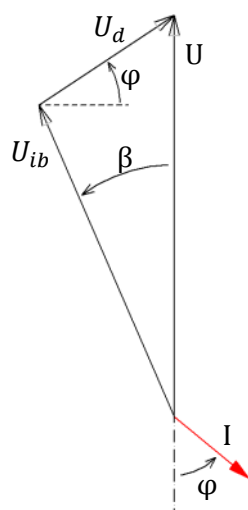
$$\hat{U} = \hat{U}_d + \hat{U}_{ib} \quad [U; U, U] \quad (35)$$



Obrázek 19: Fázorový diagram pro RL zátěž

Zátěž typu RC

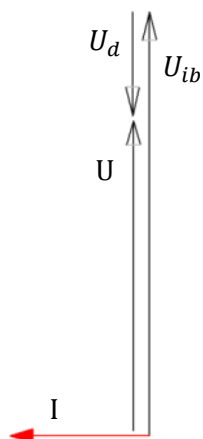
Při kapacitní zátěži se alternátor chová jako spotřebič induktivního výkonu. To vyžaduje snížení proudu budícího vinutí a tím i U_{ib} . Jedná se o chod v podbuzeném stavu.



Obrázek 20: Fázorový diagram pro RC zátěž

Provoz jako synchronní kompenzátor

Provoz alternátoru jako synchronního kompenzátoru byl hojně využíván v minulosti ve velkých rozvodných sítích a v rozvodných průmyslových areálech, kde byl značný odběr jalového výkonu, a přitom bylo nutné tento výkon kompenzovat, nebo v tomto místě stabilizovat napětí. Synchronní kompenzátor je v podstatě synchronní motor, který nepohání žádné zařízení, a jeho jediný spotřebovaný výkon slouží k pokrytí vlastních ztrát. Tento stroj pracuje s účinníkem $\cos \varphi = 0$ a dodává do sítě pouze jalový výkon, čímž dokáže stabilizovat napětí v rozvodně, ke které je připojen. Zátěžný úhel β se v tomto případě pohybuje okolo 0.



Obrázek 21: Fázorový diagram pro kompenzátorový stav

2.3.4. Moment synchronního stroje

Jelikož jsou otáčky alternátoru konstantní nemá smysl vyjadřovat moment v závislosti na těchto otáčkách. Mnohem užitečnější je vyjádřit moment v závislosti na zátěžném úhlu obr. 10.

Obecný vztah pro výpočet momentu stroje:

$$M = \frac{P}{n} \quad [Nm; W, \text{min}^{-1}] \quad (36)$$

Pro synchronní stroj platí:

$$M = \frac{\sqrt{3} * U * U_{ib}}{\omega * X_d} * \sin(\delta) \quad [Nm; V, V, \text{min}^{-1}, -, \text{rad}] \quad (37)$$

3. Budící soustavy synchronních generátorů a jejich hlavní části

Budící soustava je jedna z mála částí alternátoru, která v poslední dekádě prošla významným vývojem. Tento vývoj je umožněn díky značnému pokroku ve výkonových polovodičích a řídicí elektronice. Kvalitní návrh a zpracování jednotlivých dílů budící soustavy má značný vliv na kvalitu a životnost celého zařízení. Jednotlivé budící soustavy alternátoru se od sebe odlišují dle použitých technologií zdrojů budícího proudu, regulátoru budícího proudu a způsobem přenosu budícího proudu z regulátoru do budícího vinutí na hřídeli alternátoru.

3.1. Obecné požadavky na budící soustavu

Provozní spolehlivost

Měla by být vyšší než spolehlivost vlastního alternátoru, a to zejména při použití systému se sběracími kroužky.

Výkon regulace

Plynulá regulace budícího proudu v dostatečném rozsahu je nezbytná pro zajištění celého provozního rozsahu alternátoru s dostatečnou rezervou pro pokrytí výchylek v přechodových stavech, obecně cca v 1.6-2 násobku U_{fn} . Výkon budící soustavy se pohybuje mezi 0.3-0.6% jmenovitého výkonu stroje.

Dobrá odezva budící soustavy

Odezva budící soustavy je rychlost, s jakou je budící soustava schopna reagovat na změny vnějších podmínek. U tohoto parametru je třeba brát v potaz celkovou koncepci budícího systému, aby se zabránilo případnému rozkývání stroje při příliš rychlých a velkých změnách.

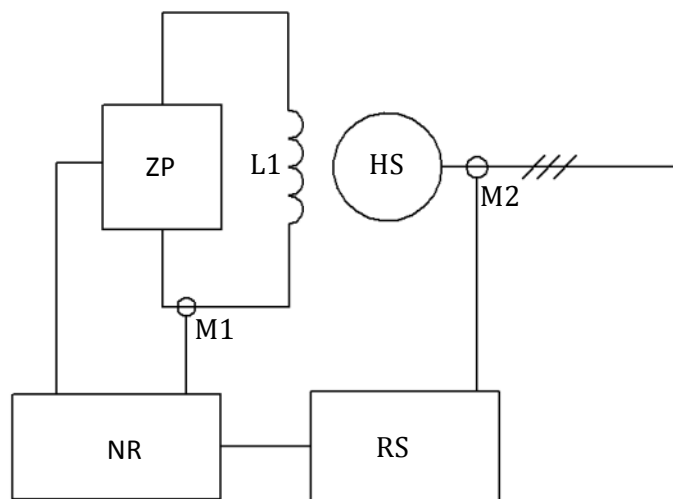
Rychlost odbuzení alternátoru

Při náhlém výkonovém odlehčení nebo poruše alternátoru by mělo dojít k co nejrychlejšímu odbuzení alternátoru, aby nedošlo k poškození stroje.

3.2. Části budícího systému

Obecné schéma standardní budící soustavy

Budící soustava znázorněna na obr. 22 ukazuje uspořádání základních prvků budícího systému alternátoru, bez kterých tento systém není schopen činnosti. Každý alternátor HS má vlastní budící vinutí L1, které je napájeno budícím proudem ze zdroje budícího proudu ZP, přes systém který může obsahovat sběrné kroužky s kartáči, nebo soustavu vinutá na statoru a rotoru a budící proud je v takovém to případě přenášen pomocí magnetického pole. Velikost tohoto proudu je regulována pomocí napěťového regulátoru NR, který je řízen nadřazeným řídicím systémem RS.



Obrázek 22: Obecné schéma budícího systému

3.2.1. Zdroj budícího proudu

Zdroj budícího proudu je zařízení, které má za úkol dodávat budící proud do budící soustavy. Dodávaný proud musí splňovat požadované parametry po celou dobu provozu stroje, a to i v případě, vyskytnou-li se poruchy v síti. Nároky na zdroje budícího proudu se zvyšují s jmenovitým výkonem, s požadovanou kvalitou a stabilitou dodávek elektrické energie do sítě. Jako zdroje budícího proudu mohou být použita různá řešení například stejnosměrné rotační dynamo, řízený a neřízený usměrňovač aj. Podrobněji budou popsána v jednotlivých příkladech budících soustav.

3.2.2. Přenos budícího proudu ze zdroje do vinutí

Na tuto část systému jsou kladeny zvláštní nároky na životnost. V případě poruchy této části systému, obzvláště u strojů s velkými výkony dosahujícími stovek MW, to může znamenat při několikadenní odstávce, značné finanční ztráty. V praxi se používají dva základní způsoby přenosu budícího proudu ze zdroje do vinutí. Prvním způsobem je použití systému se sběrnými kroužky a kartáči a druhý způsob řešení využívá soustavu vinutí na rotoru a statoru, a požadovaný proud je přenášen do budícího vinutí pomocí magnetického pole.

3.2.3. Napěťový regulátor

Napěťový regulátor je často označován jako AVR (Automatic voltage regulator). Jedná se o řídicí systém, který má za úkol vyhodnocovat naměřené hodnoty požadovaných veličin a porovnávat je s hodnotami zadanými nadřazeným řídicím systémem. V jednoduchém provedení porovnává pouze napětí na svorkách alternátoru s požadovanou hodnotou a tomu přizpůsobuje velikost budícího proudu. V sofistikovanějších řešeních může hlídat požadovanou velikost jalového výkonu, a může mít zabudované různé ochranné prvky např. hlídání zatížení alternátoru aj. Tyto ochranné prvky se však často řeší až v nadřazeném systému. Provedení dokonalejšího regulátoru, který je schopen poskytovat jak údaje o vlastním provozu nadřazenému systému, tak měření dalších veličin, a proto může snížit riziko poškození stroje a zajistit větší stabilitu výroby. Jako základní požadavky na regulátor by měly být - udržování zadané velikosti svorkového napětí, hlídání dodávky jalového výkonu nezávisle na činném zatížení (i v poruchových stavech, aby byla zajištěna energie pro vlastní spotřebu), udržování rozdělení jalového zatížení při paralelním chodu alternátoru a hlídání meze podbuzení jako limitu statické stability chodu alternátoru. Regulátory se dají rozdělit do dvou základních skupin.

Odporový regulátor

Regulace pomocí nastavitelného odporu je nejjednodušší regulací vůbec. V minulosti byla tato regulace hojně využívána, ale z důvodů velkých ztrát a velikosti jednotlivých dílů, se pro regulaci velkých výkonů nepoužívá.

Řízený polovodičový regulátor

Pro své kvality a výhody např. rozsah, rychlost regulace, aj. a vývojem výkonových polovodičových součástek a řídicí elektroniky, se cena polovodičového regulátoru snížila natolik, že se s ním v dnešní době, setkáme ve většině zařízení.

3.2.4. Odbuzovač

Odbuzovač je část regulátoru budícího proudu, který slouží k rychlému odbuzení stroje v případě náhlého poklesu odebíraného výkonu z alternátoru. Toto zařízení je nezbytné k tomu, aby nedošlo k poškození samotného stroje, nebo některého z dalších zařízení připojeného k tomuto stroji.

3.2.5. Měření

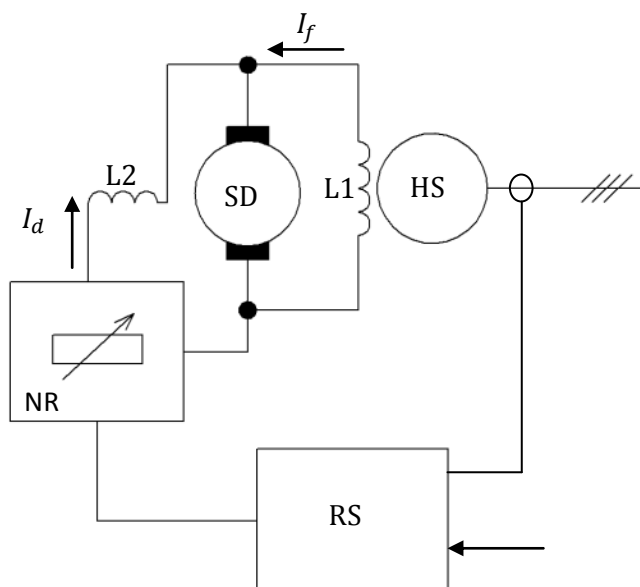
Měření fyzikálních veličin je v dnešní době nedílnou součástí většiny zařízení a jejich řídicích systémů. Tato část, ať se to nezdá, nabývá na významu, a s vývojem propracovanějších a složitějších řídicích systémů a jejich algoritmů, umožňuje, dosáhnou vyšších kvalit a delší životnosti celého soustrojí. Prvotní alternátory byly řízeny výhradně lidskou obsluhou, která pracovala s minimem informací o tom, co se s alternátorem v době chodu odehrává. Dnešní řídicí systémy, ke své činnosti a rozhodování, mají k dispozici množství měřených veličin od těch nejdůležitějších, jako jsou napětí a proudy, až po různé, méně podstatné, veličiny jako jsou teploty, nebo vibrace stroje. Díky tomu, jsou schopny zabránit většímu poškození stroje a to i v případě většiny běžných poruch, a dokonce jsou schopny odstavit soustrojí dříve, než se stačí nějaká porucha projevit natolik, aby došlo k nenávratnému poškození stroje.

3.3. Příklady budících soustav

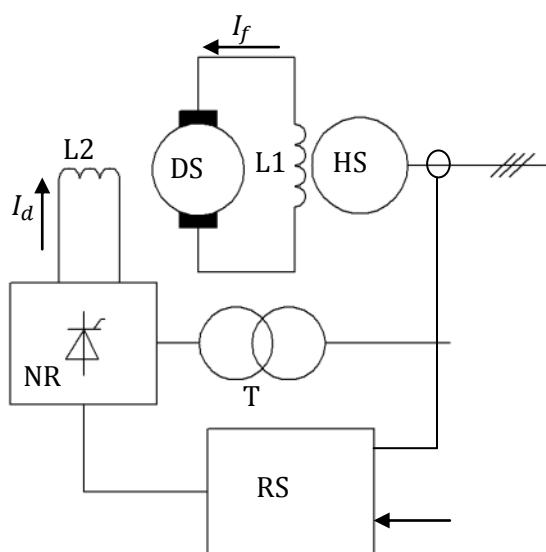
V následujících odstavcích jsou popsány základní typy budících soustav. Z popisovaných jednotlivých částí těchto soustav se mohou mezi sebou kombinovat a vytvářet složitější systémy.

3.3.1. Budící soustava s rotačním buzením pomocí dynama.

Je to jeden z nejjednodušších budících systému, co se týče provedení. Je sestaven z hlavního synchronního stroje HS a stejnosměrného dynama SD, které je umístěno na hřídeli alternátoru. Řízení napětí na hlavním stroji je provedeno pomocí změny budícího proudu dynama. Řídicí systém RS měří napětí na svorkách alternátoru a porovnává ho s požadovanou hodnotou a v závislosti na tom pošle signál do napěťového regulátoru NR, který upraví hodnotu budícího proudu I_d . Tento proud může být řízen buďto pomocí nastavitelného odporu obr. 23, nebo pomocí řízeného usměrňovače obr. 24. Hlavní nevýhody tohoto řešení jsou v nutnosti použití komutátoru pro usměrnění budícího proudu alternátoru I_f a v nutnosti použití sestavy kroužku s kartáči pro přenos budícího proudu z dynama do budícího vinutí alternátoru. Tyto dvě části jsou nejvíce náročné na údržbu.



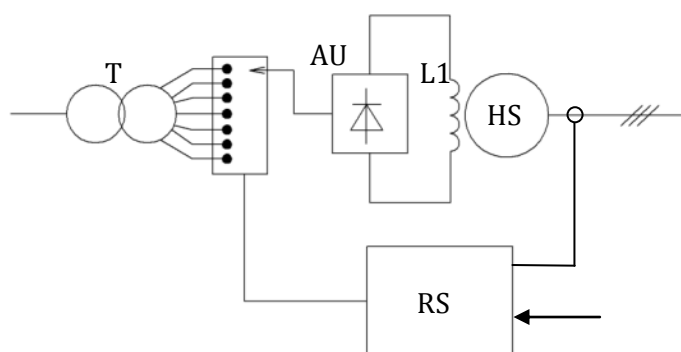
Obrázek 23: Budící systém s dynamem a odporovým napěťovým regulátorem



Obrázek 24: Budící systém s dynamem a řízeným polovodičovým usměrňovačem

3.3.2. Budící soustava s neřízeným diodovým usměrňovačem a regulací pomocí odboček transformátoru

Tento typ budící soustavy je složený z napájecího transformátoru T, který má dostatečný počet odboček pro pokrytí požadovaného rozsahu výkonu alternátoru a neřízeného usměrňovače AU. Tento typ budící soustavy je již v dnešní době bezvýznamný a to z důvodu nemožnosti měnění budícího proudu za chodu alternátoru. Přestal se používat ve chvíli, kdy byly vyvinuty dostatečně výkonné polovodičové součástky a k nim potřebné řídicí obvody. U tohoto obvodu budícího systému probíhá regulace pomocí řídicího systému, který hlídá, jako jeden z parametrů, napětí na svorkách alternátoru a přepíná odbočky na transformátoru. U tohoto budícího systému již odpadla nutnost použití komutátoru, avšak přibýly zde mechanické kontakty odboček transformátoru. Dále jsou stále používány kroužky s kartáči k přenosu budícího proudu.

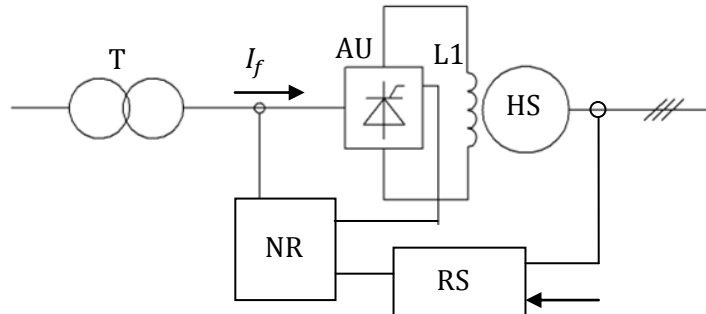


Obrázek 25: Budící systém s diodovým usměrňovačem a odbočkovým transformátorem

3.3.3. Statická budící soustava s řízeným polovodičovým usměrňovačem

U tohoto typu budiče byl nahrazen diodový usměrňovač usměrňovačem složeným z říditelných polovodičových součástek, který umožňuje měnit budící proud, tím pádem může být transformátor s

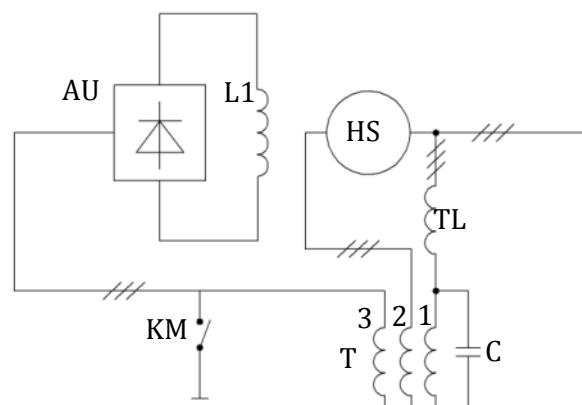
přepínatelnými odbočkami nahrazen obyčejným transformátorem obr. 26 , který nyní slouží pro galvanické oddělení budicího obvodu od sítě a změně napěťové hladiny. Jeho hlavní výhodou je odstranění mechanických kontaktů, které přepínaly odbočky transformátoru. Stále však zůstal systém přenosu proudu do budicího vinutí pomocí kroužků s kartáči.



Obrázek 26: Schéma budicí soustavy s řízeným usměřňovačem

3.3.4. Budicí kompaundační soustava

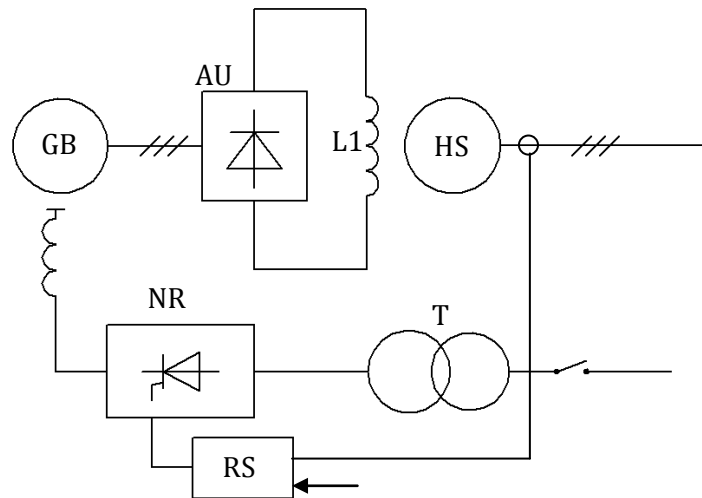
Zdrojem budicího proudu je diodový usměřňovač AU, který je napájený ze speciálního kompaundačního transformátoru T. Tento transformátor má pro každou fázi tři vinutí s tím, že vinutí 1 je připojeno přes tlumivku TL, která způsobí zpoždění proudu za napětím o 90° . Velikost proudu na prvním vinutí je úměrná velikosti napájecího napětí U. Aby tato úměrnost nebyla ovlivněna napětím na vinutí HS, připojuje se kondenzátor C paralelně s vinutím 1, který s tlumivkou vytváří tzv. Boucherotův obvod. Vinutí 2 je připojeno ke statorovému vinutí a protéká jím proud statoru I. Vinutí 3 je připojeno na budicí usměřňovač AU a jeho proud je dán fázorovým součtem magnetomotorických napětí proudů vinutí 1 a 2. Automatickou regulaci vytvoří součet magnetomotorických napětí soustavy vinutí kompaundačního transformátoru při vhodné volbě počtu závitů jednotlivých cívek a velikost budicího proudu bude měněna dle zatížení alternátoru, bez jakéhokoliv regulátoru. Z důvodu potřeby odbuzení se do obvodu přidává ještě stykač KM, při jehož sepnutí dojde k odbuzení.



Obrázek 27: Schéma kompaundační budicí soustavy

3.3.5. Budící soustava s rotujícím usměrňovačem

Tento typ budící soustavy je prvním typem, u kterého není zapotřebí použít kroužky a kartáče k přenosu budícího proudu. Budící proud u tohoto typu budící soustavy vzniká v generátoru GB, který je umístěn na rotoru alternátoru. Generátor GB je buzen proudem z napěťového regulátoru NR, vyrábí střídavý proud, který je přes usměrňovač dodáván do budícího vinutí alternátoru HS. Usměrňovač AU je umístěn na rotoru alternátoru a musí být tedy navržen tak, aby odolal odstředivým silám a případným vibracím.



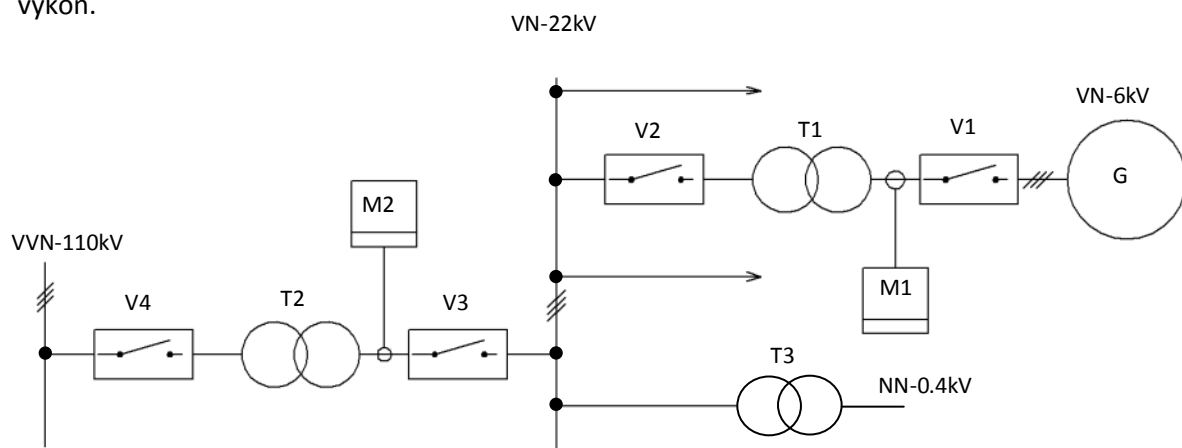
Obrázek 28: Schéma budící soustavy s rotačním usměrňovačem

4. Regulace činného a jalového výkonu synchronního generátoru

Kvalitní návrh způsobu regulace výkonu alternátoru a jeho vyvedení do sítě je jednou z nejdůležitějších částí celého návrhu. Kvalitně provedený návrh a dobře zvládnutý systém regulace má zásadní vliv na stabilitu, kvalitu a spolehlivost celého soustrojí.

4.1. Vyvedení výkonu z alternátoru

Vyvedení výkonu z alternátoru je možné provést několika způsoby, které se od sebe odlišují dle požadovaných provozních podmínek. Vždy by však měli obsahovat prvky např. hlavní vypínač V1, blokový transformátor T1, měření vyrobeného výkonu M1, transformátor vlastní spotřeby T3 aj., bez kterých by již v dnešní době nemělo být představitelné takovéto zařízení provozovat. Následující schéma na obr. 29 zobrazuje základní způsobu připojení alternátoru malého výkonu (jednotky MW) k podnikové rozvodné síti. Toto schéma obsahuje prvky, které by neměly v návrhu připojení chybět. Některé prvky však nemusí být vždy přítomny, například blokový transformátor T1, transformátor rozvodny T2 aj., jestliže se jedná o síť stejných napětových hladin. Měření vyrobené energie je většinou provedeno dvěma nezávislými měřicími systémy, na schématu označené jako M1 a M2. Toto dvojí měření je provedeno buď to z důvodu kontroly naměřených údajů, nebo jeli k rozvodně připojeno více zdrojů, pak M1 měří výrobu konkrétního alternátoru, zatímco M2 měří celkový dodaný výkon.



Obrázek 29: Schéma základního zapojení alternátoru

4.2. Rozsah řízení a regulace soustrojí

S rozvojem řídicích systémů a vývojem výkonových součástek se zvýšily a stále se zvyšují požadavky na kvalitu, výkon a rozsah regulačních systémů. Tato oblast je nejvíce se rozvíjející oblastí dnešní doby, a umožňuje nám kvalitnější a bezpečnější provoz zařízení. Co se týče regulace a řízení výkonu soustrojí s alternátorem, dělí se většinou na dva základní systémy. První systém řídí pohonné zařízení spalovacích motorů a reguluje činný výkon. Hlavní parametry, které ke své funkci tento systém potřebuje, jsou otáčky, na kterých se musí udržet před přifázováním, dále pak některé základní provozní hodnoty, které nesmí být překročeny. Druhý systém řídí a reguluje výrobu jalového výkonu pomocí budícího systému. Jako parametry pro svou činnost využívá hlavně měření velikostí napětí na svorkách alternátoru a velikost budícího proudu. Tyto dva řídicí systémy jsou zastřešeny nadřazeným řídicím systémem, který má za úkol reagovat na vnější podněty a stavy, a udržuje soustrojí v stabilním chodu. Tento systém je již schopen reagovat na podněty od distributora sítě. V případě potřeby změny činného výkonu odesílá požadavek do řídicího systému pohonného zařízení na zvýšení momentu (dávky paliva), nebo jedná-li se o potřebu změny dodávky jalového výkonu pošle tento

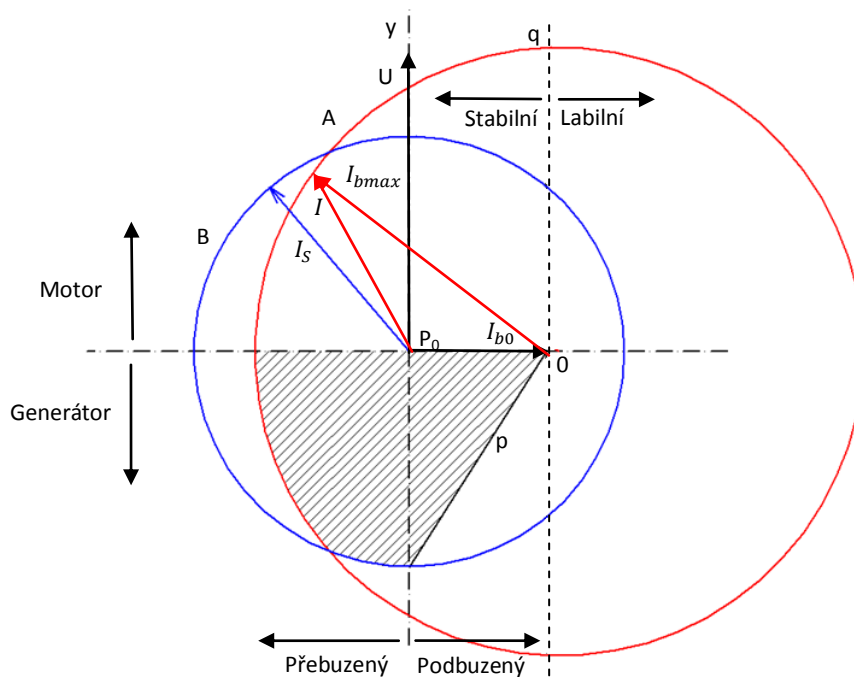
systém požadavek na přibuzení nebo odbuzení do budícího systému alternátoru, a tím upraví účinník na požadovanou hodnotu. Tento systém má pak také za úkol reagovat na další podněty tak, aby zajistil stabilní dodávku a omezil případná poškození zařízení. Například při poruše chlazení upraví hodnoty výkonu tak, aby dodržel bezpečnou mez a zajistil dodávky elektrické energie pro důležité části v systému.

4.2.1. Řízení a regulace alternátoru

Řízení alternátoru a regulace jalového výkonu je věc čistě budícího systému alternátoru a jeho možnostech rychle a kvalitně reagovat na různé podněty, ať už se jedná o změny v síti, nebo příkazy nadřízeného řídicího systému.

Provozní diagram alternátoru

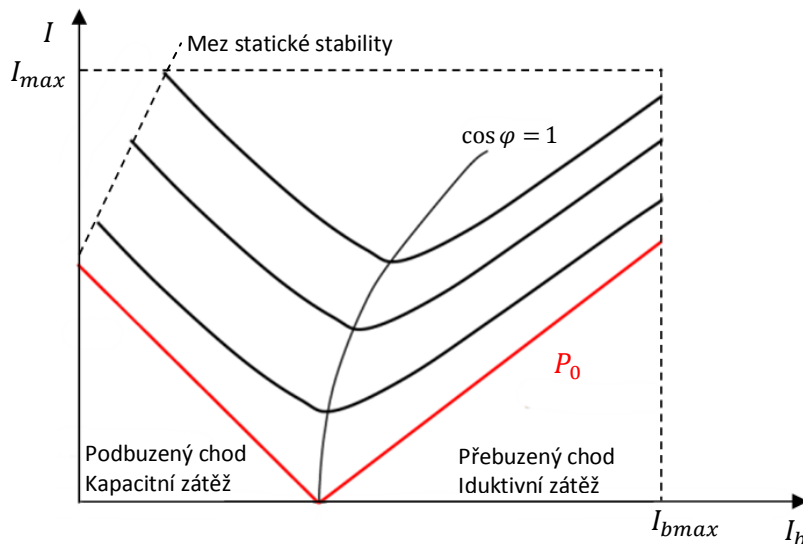
Na následujícím diagramu obr. 30 je šrafováním znázorněná oblast rozsahu nastavení fázoru budícího proudu pro alternátor. Graf znázorňuje polohu fázoru satorového proudu pro konstantní polohu satorového napětí \hat{U} v ose y . Horizontální osa x rozděluje diagram na motorickou a generátorovou oblast. Vertikální osa y pak určuje zda-li alternátor pracuje v přebuzeném nebo podbuzeném stavu, tzv. jako zdroj nebo spotřebič jalového výkonu. Tyto osy se protínají v bodě P_0 což je ustálený stav kdy alternátor pracuje s nulovým činným a jalovým výkonem. Oblast regulace budícího proudu je omezená kružnicí A o poloměru I_{bmax} , což je proud, který představuje maximální proud budícího systému a má střed v bodě 0 . Bod 0 je dán magnetizačním proudem stroje. Dále je pak omezená kružnicí B , která má poloměr I_S , který je odvozen od velikosti maximálního výkonu alternátoru, a střed kružnice je vzdálen od bodu 0 o velikost proudu I_{b0} . I_{b0} je magnetizační proud procházející budícím vinutím. Oblast regulace je dále omezená přímkou q , která znázorňuje mez statické stability a prochází bodem 0 . Poslední omezení oblasti je určeno přímkou p , která je dána konstantním poměrem podbuzení.



Obrázek 30: Graf rozsahu budícího proudu

V-Křivky

Na obrázku 31 jsou znázorněny V-křivky pro různé výkony. V-křivky znázorňují závislost proudu, procházejícího statorovým vinutím, na budícím proudu při daném konstantním výkonu. Nejnižší body V-křivek odpovídají výkonu dodávanému do sítě při účinnosti $\cos \phi = 1$. Spojením nejnižších bodů vznikne křivka, která zřetelně znázorňuje nutnost postupného přibuzování alternátoru se zvyšujícím se činným výkonem. Graf je omezen, z jednotlivých stran, parametry alternátoru. Zhora je omezen maximálním proudem procházejícím statorovým vinutím, z levé strany je omezen mezí statické stability a z pravé strany je omezen maximální hodnotou budícího proudu.



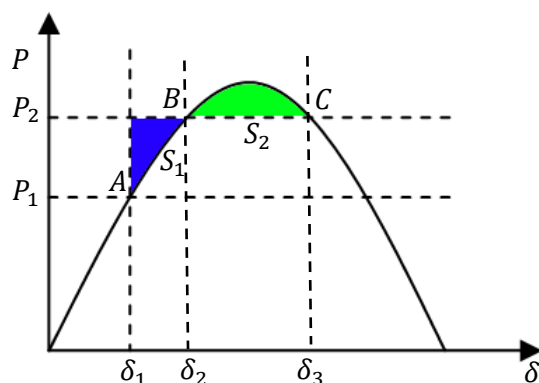
Obrázek 31: V-křivky

Statická stabilita alternátoru

Stabilita synchronního stroje je dána takzvaně synchronizačním výkonem, ten je možné vypočítat s derivace rovnice 37 a jedná se o směrnici tečny ke grafu funkce momentu na zatěžném úhlu obr. 10. Tento synchronizační výkon je největší při nulovém zatížení, a s rostoucím zatížením, jeho hodnota klesá až do nuly. Nulový synchronizační výkon je označován jako mez statické stability a po dalším zvýšení momentu se jeho hodnota dostane do záporných hodnot a generátor se dostane do takzvané asynchronního chodu. V takovémto případě je nezbytné stroj okamžitě odlehčit a poté odpojit od sítě.

Dynamická stabilita alternátoru

Dynamická stabilita charakterizuje chování alternátoru při přechodných dějích a poruchách v síti. Její hodnota je závislá na zátěžném úhlu a odpovídá určitému výkonu. Aby se snížila pravděpodobnost vypadnutí ze synchronního chodu, je nezbytné udržovat tuto hodnotu na rozumné míře. Tento stav by mohl nastat, například při rozkývání alternátoru, v důsledku přechodových dějů a poruch v síti. Dynamická stabilita je úzce spojená s rychlostí odezvy řídicího systému na změny zatížení a na setrvačném momentu celého soustrojí. K určení vhodného zátěžného úhlu se používá tzv. pravidlo ploch viz. obr. 32.



Obrázek 32: Dynamická stabilita pravidlo ploch

Na předchozím obrázku 32 je znázorněn přechodový stav, který nastane při změně výkonu alternátoru. Alternátor dodává výkon o velikosti P_1 při zátěžném úhlu δ_1 . V závislosti na požadavku většího výkonu je zvýšen točivý moment na hřídeli stroje a alternátor přechází na požadovaný výkon P_2 , spolu s tím se zvyšuje zátěžný úhel δ , který by se měl zastavit na hodnotě δ_2 . Průsečík výkonu P_2 se zátěžným úhlem δ_2 je označen v grafu bodem B. Tento bod je však přeběhnut v důsledku nedokonalé regulace a prodlevy v řídicím systému, a alternátor se může dostat až do chodu s výkonem P_2 avšak zátěžným úhlem δ_3 . Jeli oblast S_1 menší než oblast S_2 dojde k absorbování přebytečné energie do momentu setrvačnosti, která ji následně vydá zpět při přechodu zpátky k bodu B. Soustrojí tento průsečík několikrát překmitne, než se ustálí na nové hodnotě. Nastane-li ovšem situace kde plocha S_1 je větší než S_2 dojde k přeběhnutí stroje, a jeho odpojení od sítě.

4.2.2. Požadavky na regulaci činného a jalového výkonu

Požadavky na dodávku činného a jalového výkonu může mít jak majitel výrobního zařízení, tak provozovatel distribuční soustavy. Majitel může například požadovat kompenzování jalového výkonu v průmyslovém areálu, nebo výrobu tepla u kogeneračních jednotek, k čemuž je nezbytné vyrábět činný výkon. Většinu požadavků však má provozovatel distribuční soustavy, který určuje za jakých podmínek se může dané zařízení v síti provozovat.

Regulace činného výkonu je možná pouze na straně hnacího zařízení, ať už se jedná o parní nebo plynové turbíny, vodní kola, nebo spalovací motory. Vždy jde o to zvýšit točivý moment hnacího stroje pomocí zvýšením tlaku páry, množství vody, nebo přísunu paliva do motoru. O tuto regulaci se stará řídicí systém poháněcího stroje, který reaguje na požadavky od nadřízeného systému.

O regulaci jalového výkonu se stará budícím systémem alternátoru, ten upravuje velikost napětí na svorkách alternátoru, udržuje požadovaný účinek a reaguje taktéž na podněty od nadřízeného systému.

Obě tyto regulace však pracují společně jelikož jsou zastřešeny jedním společným systémem, který musí zároveň hlídat obě zařízení, tak, aby nedošlo k poškození z důvodů jejich nesoučinnosti. Aby se alternátor mohl provozovat v síti jsou PDS stanoveny přesné podmínky jeho provozu viz [3] např. stanovením pracovního bodu alternátoru buďto hodnotou účinníku, hodnotou činného a jalového výkonu, nebo hodnotou požadovaného napětí v přípojném místě alternátoru. Hodnoty těchto veličin mohou být stanoveny buď sjezdáním zadané hodnoty, eventuálně průběhem v dodatku smlouvy o připojení, dále pak charakteristikou v závislosti na pracovním bodu výroby, nebo online pomocí HDO řízením z dispečinku PDS. Při online řízení jsou PDS stanovené přesné požadavky na odezvy systému při změně požadovaných parametrů, které je nezbytné dodržet viz [3]. V případě provozování zařízení, se špatně nastavenými parametry např. účinníkem, může být výrobce sankcionován za nevyžádanou dodávku jalové energie do distribuční soustavy. Nevyžádanou dodávku jalové energie může být například dodávka kapacitního jalového výkonu, dle cenového rozhodnutí ERU v závislosti na celkové velikosti dodaného výkonu.

5. Závěr

V této práci byl proveden základní popis důležitých částí alternátoru a vysvětlena jejich funkce. Dále byly zmíněny režimy, ve kterých se dá alternátor provozovat. V první kapitole byly popsány základní fyzikální veličiny, se kterými se velmi často setkáváme při práci s alternátory. V druhé kapitole je proveden popis alternátoru a jeho principů dle zadání č.1. Třetí kapitola odpovídá na zadání č.2 - „Popis budících soustav synchronního generátoru“. Zadání č.3 je popsáno ve čtvrté kapitole, která se zabývá regulací výkonu synchronního generátoru. Jsem přesvědčen, že jsem splnil všechny body zadání mé bakalářské práce, i když si myslím, že by měly být některé části popsány podrobněji. Také problémy které se mohou při práci s alternátory vyskytnout, by bylo vhodné více rozebrat, bohužel v této práci není dostatek prostoru. Tuto práci jsem si zvolil z důvodu mé součinnosti při vývoji a testování kogeneračních jednotek do výkonu 2 MW, a v závislosti na tom jsem se zde snažil objasnit základní pojmy a problémy, se kterými jsem se při své práci setkal. Myslím si, že informace zmíněné v této práci mohou sloužit jako základní přehled o tom, co se dá kolem alternátoru najít, a s čím se může člověk v praxi setkat. Každý, kdo se kolem alternátoru pohybuje delší dobu, však zjistí, že informace zde uvedené, jsou opravdu jen základní, a chybí zde spousta důležitých informací, které by měly být v povědomí každého, kdo se jimi chce zabývat. Jako příklad mohu uvést chování alternátoru při zkratech, bezpečnostní prvky jako jsou jističe, odpojovače, dále se pak dá setkat s ochranami proti zpětnému toku výkonu atd. Dle mého názoru, každému, komu se tato bakalářská práce dostane do ruky jako první, neměl by zůstat u informacích zde uvedených, ale měl by pokračovat ve studiu další odborné literatury.

Seznam symbolů

U	Napětí
U_i	Indukované napětí
I	Proud
R	Odpor
Z	Impedance
X	Reaktance
L	Indukčnost
Φ	Magnetický tok
Ψ	Spřažený magnetický tok
P	Výkon (činný výkon)
P_A	Průměrný výkon
P_A	Celkový výkon
Q	Jalový výkon
S	Zdánlivý výkon
$\cos \varphi$	Účinitel
λ	Činitel jakosti
D	Deformační výkon
f	Frekvence
P_p	Počet pólů
n	Otáčky
δ	Zátěžný úhel
k_v	Činitel jakosti
M	Moment
ω	Otáčky
J	Moment setrvačnosti

Seznam použitých zkratk

GB	Generátor budícího proudu (rotační)
NR	Napěťový regulátor
HS	Hlavní stroj
AU	Usměřňovač
KM	Stykač
ZP	Zdroj budícího proudu
C	Kondenzátor
L	Tlumivka
T	Transformátor
M	Měřicí místo
HDO	Hromadné dálkové ovládání
AVR	Napěťový regulátor (Automatic voltage regulator)
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
ERU	Energetický regulační úřad

Seznam obrázků

Obrázek 1: Výkonový trojúhelník.....	9
Obrázek 2: Výkonový diagram P, Q, D	10
Obrázek 3: Schéma základních částí alternátoru.....	12
Obrázek 4: Schéma hladkého rotoru v řezu	14
Obrázek 5: Hladký rotor	14
Obrázek 6: Schéma řezu rotoru s vyniklými póly.....	14
Obrázek 7: Rotor s vyniklými póly	14
Obrázek 8: Uspořádání statorového vinutí	15
Obrázek 9: Průběhy napětí na svorkách alternátoru	15
Obrázek 10: Graf závislosti zátěžného úhlu na výkonu.....	16
Obrázek 11: Transformace statorového vinutí do os d a q	17
Obrázek 12: Obvodové schéma pro osu d	18
Obrázek 13: Obvodové schéma pro osu q	18
Obrázek 14: Hlavní a rozptylový magnetický tok	20
Obrázek 15: Náhradní schéma pro ustálené stavy alternátoru.....	20
Obrázek 16: Zjednodušené náhradní schéma pro ustálený stav alternátoru	21
Obrázek 17: Úplný fázorový diagram.....	22
Obrázek 18: Fázorový diagram pro odporovou zátěž	22
Obrázek 19: Fázorový diagram pro RL zátěž	23
Obrázek 20: Fázorový diagram pro RC zátěž	23
Obrázek 21: Fázorový diagram pro kompenzátrový stav.....	24
Obrázek 22: Obecné schéma budicího systému.....	26
Obrázek 23: Budicí systém s dynamem a odporovým napěťovým regulátorem	28
Obrázek 24: Budicí systém s dynamem a řízeným polovodičovým usměřňovačem	28
Obrázek 25: Budicí systém s diodovým usměřňovačem a odbočkovým transformátorem.....	28
Obrázek 26: Schéma budicí soustavy s řízeným usměřňovačem	29
Obrázek 27: Schéma kompaundační budicí soustavy.....	29
Obrázek 28: Schéma budicí soustavy s rotačním usměřňovačem.....	30
Obrázek 29: Schéma základního zapojení alternátoru	31
Obrázek 30: Graf rozsahu budicího proudu	32
Obrázek 31: V-křivky	33
Obrázek 32: Dynamická stabilita pravidlo ploch	34

Seznam použité literatury

- [1] Voženílek, P., Novotný, V., Mindl, P.: *Elektromechanické měniče*; ČVUT, Praha, 2011
ISBN 978-80-01-04875-7
- [2] Pavelka, J., Zdeněk, J.: *Elektrické pohony a jejich řízení*; ČVUT, Praha, 2010
ISBN 978-80-01-04642-5
- [3] Provozovatelé distribučních soustav: *Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. 2011, PPDS, příloha 4.
- [4] Sokol, Z.(2014): *Synchronní stroje*. SPSE Dobruska. 11s. Dostupné z:
<http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>
- [5] Tes Vsetín: *Synchronní generátory řady GSV*. 11s Dostupné z:
http://www.tes.cz/dokumenty/gsv_cz.pdf