

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Budicí systémy synchronních alternátorů

**vedoucí práce: Prof. Ing. Jan Mühlbacher, CSc.
autor: Bc. Jan Mikeska**

2012

Anotace

Předkládaná práce je zaměřena na popis a možnosti simulace budících systémů a návrh regulace a řízení buzení synchronních strojů. Představuje podrobný přehled budících soustav a uspořádání a zapojení jednotlivých prvků v nich. Porovnává výhody a nevýhody jednotlivých soustav a předkládá vlastní návrh budicí soustavy s regulátorem buzení, který autor vyhodnotil jako nejlepší. V závěru simuluje navržené řešení pomocí softwaru ATP-EMTP, konkrétně preprocesoru ATPDraw.

Klíčová slova

buzení, budicí systém, stropní buzení, synchronní stroj, turboalternátor, regulace, modelování, simulace, statický budicí systém, rotační budicí systém, závislá budicí soustava, nezávislá budicí soustava, řízený usměrňovač, neřízený usměrňovač, bezkartáčová budicí soustava, odbuzovač

Abstract

The purpose of the thesis is to describe various options of excitation systems simulation and design regulation for exciting synchronous machines. The thesis presents a detailed overview of excitation systems including possibilities to organize and connect individual components in the systems. Both the positives and negatives of individual systems are compared. Subsequently, the author presents his own design of an excitation system using the excitation regulator that he assessed as the best one. Finally, the author simulates the designed solution using the ATP Draw preprocessor in the ATP-EMTP software.

Key words

excitation, excitation system, ceiling excitation, synchronous machine, turbine generator, regulation, modeling, simulation, static excitation system, rotational excitation system, dependent excitation system, independent excitation system, controlled rectifier, uncontrolled rectifier, brushless excitation system, field circuit breaker

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 18.5.2012

Jan Mikeska

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Mühlbacherovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 MOŽNOSTI BUZENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ S HLADKÝM ROTOREM	11
1.1 STRUČNÝ PŘEHLED BUDICÍCH SOUSTAV	11
1.2 POŽADAVKY NA BUDICÍ SOUSTAVY	12
1.3 HODNOTÍCÍ KRITÉRIA VLASTNOSTÍ BUDICÍCH SOUSTAVY	12
1.4 USPOŘÁDÁNÍ BUDICÍHO SYSTÉMU	14
1.5 ZAPOJENÍ POUŽÍVANÁ U SYNCHRONNÍCH STROJŮ S HLADKÝM ROTOREM (TURBOALTERNÁTORŮ)	14
2 VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ RŮZNÝCH PROVEDENÍ BUZENÍ TURBOALTERNÁTORŮ	15
2.1 BEZKARTÁČOVÉ SOUSTAVY	15
2.2 STATICKE BUDICÍ SOUSTAVY	16
2.3 ZÁVISLÁ A NEZÁVISLÁ BUDICÍ SOUSTAVA	18
2.4 VYHODNOCENÍ POUŽITÍ BUDICÍCH SOUSTAV	19
2.5 BUDICÍ SOUSTAVA JAKO ZDROJ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	20
3 NÁVRH NEJLEPŠÍ MOŽNOSTI REGULACE A ŘÍZENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ, VČETNĚ MOŽNOSTI STROPNÍHO BUZENÍ A POUŽITÍ ODBUZOVAČE PRO NOUZOVÉ ODBUZENÍ	20
3.1 STANOVENÍ PARAMETRŮ BUDIČE	20
3.2 STANOVENÍ PARAMETRŮ NAPÁJECÍCH ZDROJŮ	21
3.3 VÝPOČET ČASOVÉ KONSTANTY BUDIČE	23
3.4 VÝPOČET ODEZVY K_R TOČIVÉHO BUDIČE	23
3.5 VÝPOČET ODEZVY TYRISTOROVÉHO MĚNIČE	23
3.6 NÁVRH POLOVODIČOVÉHO USMĚRŇOVAČE	24
3.7 NÁVRH ODBUZOVAČE	25
3.8 NÁVRH ŘÍDICÍCH OBVODŮ	27
3.9 NÁVRH OCHRAN MĚNIČŮ	27
3.10 VLASTNÍ NÁVRH BUDICÍ SOUSTAVY	29
3.10.1 <i>Návrh regulátoru buzení</i>	31
4 MODELOVÁNÍ REGULACE A ŘÍZENÍ SYNCHRONNÍCH ALTERNÁTORŮ	33
4.1 PROSTŘEDÍ ATP-EMTP	33
4.1.1 <i>Popis programu ATP-EMTP</i>	33
4.1.2 <i>Programy pro práci s ATP-EMTP</i>	34
4.1.3 <i>Grafický preprocesor ATPDraw</i>	34
4.2 VYTVOŘENÍ MODELU SYNCHRONNÍHO ALTERNÁTORU	35
4.2.1 <i>Popis modelu stroje SYNCHRONOUS WI</i>	35
4.2.2 <i>Vytvoření modelu regulátoru buzení</i>	35
4.3 MODEL REGULACE SYNCHRONNÍHO ALTERNÁTORU	36
ZÁVĚR	38
POUŽITÁ LITERATURA	39

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na popis a možnosti simulace budicích systémů a návrh regulace a řízení buzení synchronních strojů. Cílem práce je se seznámit se s výhodami a možnostmi jednotlivých budicích soustav, podle výsledných poznatků navrhnout nejlepší možnost regulačního systému buzení synchronních strojů a ten v závěru nasimulovat ve vhodném softwaru.

V první kapitole se budu věnovat podrobnému popisu možných způsobů buzení synchronních strojů s hladkým rotorem. Nejprve předložím podrobný přehled budicích soustav. Dále uvedu požadavky a kritéria budicích soustav a následně uspořádání a zapojení jednotlivých prvků v budicí soustavě.

V druhé kapitole se budu zabývat porovnáním a výhodami budicích soustav, přičemž vyhodnotím klady a zápory jednotlivých soustav. Především se zaměřím na soustavy využívající polovodičové prvky a v závěru kapitoly uvedu záporné vlivy použití polovodičových prvků v řídicím systému budiče.

Ve třetí kapitole představím možný návrh buzení synchronních strojů z potřebných prvků, které lze použít v zapojení budicího systému, jako je usměrňovač, odbuzovač a regulátor buzení synchronního stroje. Dále uvedu vlastní návrh budicí soustavy s regulátorem buzení, který jsem z poznatků této práce vyhodnotil jako nejlepší.

Ve čtvrté, závěrečné kapitole popíši zvolený software pro vytvoření modelové regulace a řízení synchronních alternátorů. Popíši jednotlivé možnosti simulace ve zvoleném softwaru a jednotlivé prvky použité v modelování regulace a řízení. Úplným závěrem vytvořím simulovaný model, na němž nasimuluji průběhy jednotlivých veličin, které budu prezentovat v grafické podobě.

Seznam symbolů

Θ [°].....	Komutační úhel
Φ [Wb].....	Magnetický tok
ΔU_o [V].....	Konstantní úbytek napětí na odbuzovači
C [F].....	Kapacita
$\cos\varphi$ [-].....	Účinník
F_1 [A].....	Magnetomotorické napětí na pól
GD_g^2 [tm ²].....	Moment setrvačnosti
I_{1V} [A].....	Proud tekoucí ventilem
I_{b0} [A].....	Proud rotoru
I_{bN} [A].....	Budicí proud
I_{BN} [A].....	Jmenovitý proud budiče
I_f [A].....	Efektivní hodnota fázového proudu zdroje
I_{fN} [A].....	Jmenovitý proud zdroje
I_N [kA].....	Jmenovitý proud alternátoru
I_p [A].....	Přídržný proud polovodičové součástky
K_R [s ⁻¹].....	Odezva napětí
K_s [p].....	Poměrné stropní napětí
L [H].....	Indukčnost
L_B [H].....	Indukčnost budiče
L_{bb} [H].....	Indukčnost rotoru
N [-].....	Počet závitů na pól
p [p].....	Překryv
P_{Bmax} [W].....	Maximální činný výkon budiče
P_{BN} [W].....	Jmenovitý činný výkon budiče
P_K [-].....	Počet kyvů
P_n [MW].....	Činný výkon
R [Ω].....	Odpor
R_B [Ω].....	Celkový odpor obvodu v teplém stavu
R_p [Ω].....	Odpor přídržného rezistoru
R_ζ [Ω].....	Odpor fáze statoru (při provozní teplotě)
S_N [VA].....	Jmenovitý zdánlivý výkon

T_0 [s].....	Doba odezvy
T_a [s].....	Časová konstanta stejnosměrné složky
T_B [s].....	Časová konstanta budiče
T_d' [s].....	Časová konstanta přechodná
T_d'' [s].....	Časová konstanta podélná rázová
T_q'' [s].....	Časová konstanta příčná rázová
T_s [s].....	Doba stropního buzení
T_U [s].....	Doba ustálení
U_{BN} [V].....	Jmenovité napětí budiče
U_{bn} [V].....	Budicí napětí
U_{bs} [V].....	Stropního napětí
U_f [V].....	Efektivní hodnota fázového napětí
U_{Fn} [V].....	Jmenovité budicí napětí
U_n [KV].....	Sdružené napětí statoru
W_r [J].....	Energie nahromaděná v rotoru
X [Ω].....	Reaktance
x_0 [%].....	Reaktance netočivé složky
X_{2n} [%].....	Reaktance zpětné složky nesyčená
X_d'' [Ω].....	Reaktance podélná rázová
x_{dn} [%].....	Reaktance podélná synchronní nesyčená
x_{ds} [%].....	Reaktance podélná synchronní sycená
x_{ds}' [%].....	Reaktance podélná sycená přechodná
x_{ds}'' [%].....	Reaktance sycená podélná rázová
X_q'' [Ω].....	Reaktance příčná rázová
x_{qn} [%].....	Reaktance příčná synchronní nesyčená
x_{qs}'' [%].....	Reaktance sycená příčná rázová
$\rho \left[\frac{U_{b \max}}{U_{bn}} \right]$	Strop budicího napětí

1 Možnosti buzení synchronních strojů s hladkým rotorem

Budicí soustavou synchronního stroje rozumíme zdroj regulovaného stejnosměrného proudu, pracující v uzavřené regulační smyčce, který zajišťuje buzení synchronního stroje. Budicí soustava se skládá zpravidla z budiče s odbuzovačem, regulátoru buzení, ručního řízení a čidel pro měření regulovaných veličin viz obr. 1.3. Budicí soustava je primární regulací elektrárenského synchronního generátoru. Její správná funkce je podmínkou dodání elektrické energie z generátoru do elektrizační soustavy. Budicí soustava je v podstatě regulovaný zdroj stejnosměrného proudu dodávaného do budicího vinutí synchronního stroje. U turboalternátorů budicí soustava společně s regulací turbíny tvoří neoddělitelný celek, kde velikost napětí a regulace turbíny určuje velikost činného výkonu generátoru.

1.1 Stručný přehled budicích soustav

Podle typu použitého budiče lze členit budicí soustavy na statické, s točivými budiči a bezkartáčové soustavy. Dále lze soustavy dělit podle budicího příkonu na závislé, nezávislé a kompaundní. [1]

- *Statická budicí soustava*

Tato soustava se vyznačuje tím, že budič je statický, např. stojící neřízený nebo řízený usměrňovač.

- *Budicí soustava s točivým budičem*

Tato soustava používá pro buzení rotoru stejnosměrný stroj s komutátorem.

- *Bezkartáčová budicí soustava*

Soustava zajišťuje přenos budicí energie bez sběrného ústrojí tak, že usměrňovač se otáčí na společné hřídeli s budicím vinutím hlavního alternátoru a se zdrojem elektrické energie pro buzení.

- *Závislá soustava*

U závislé soustavy budicí příkon budiče závisí na napětí regulovaného stroje.

- *Nezávislá soustava*

Soustava se vyznačuje tím, že energie dodávaná budiči je nezávislá na regulovaném napětí.

- *Kompaundní soustava*

Soustava obsahuje kromě složky závislé na napětí i další komponenty obvykle proudové.

1.2 Požadavky na budicí soustavy

Na budicí soustavy jsou kladeny velké nároky na spolehlivost, především v případech poruchových stavů a přechodových dějů během provozu. Hlavní požadavky lze rozdělit do několika skupin požadavků. Hlavní požadavky jsou tyto:

- *Vysoká provozní spolehlivost*

Spolehlivost by měla být vyšší než vlastní alternátor. Soustava běžně obsahuje rezervní budič. Spolehlivost celé soustavy především ovlivňuje systém kroužkového sběracího soustrojí.

- *Plynulá a rozsáhlá regulace budicího proudu a napětí*

K zajištění plynulé regulace je třeba zajistit rezervu stropu pro destabilizační přechodné děje. Hodnota stropního napětí dle literatury [2] je $1,6$ až $1,8 U_n$ pro rotační budiče, $1,6 U_n$ pro nezávislé tyristorové budiče a až $2 U_{fn}$ pro závislé tyristorové budiče.

- *Dostatečná rychlost budicího napětí*

Rychlost budicího napětí je charakterizována odezvou budiče naprázdno jako střední rychlost změny poměrného napětí budiče za prvních 0,5 s. Rychlost budicího napětí je 0,5 až 2 s. [2]

- *Dostatečná rychlost odbuzení alternátoru*

Rychlost odbuzení alternátoru musí být taková, aby doba, za kterou magnetický tok ve stroji zanikne na nulu, byla co nejkratší. Tím se omezuje případný rozsah škod ve stroji při vnitřních zkratech na minimum. [1]

- *Udržování žádané velikosti svorkového napětí*

Napětí musí být udržováno v mezích tolerancí diagramů napětí, předepsaných pro jednotlivé body soustavy, aby bylo možné udržet normální napěťové poměry u spotřebitelů.

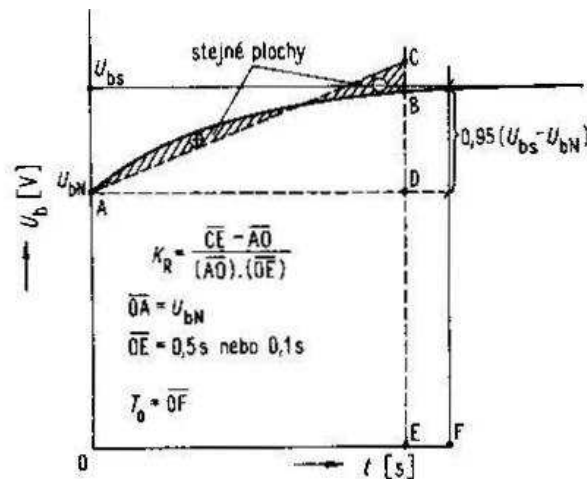
- *Dovolená oteplení*

Teplotní odolnost je zapotřebí dodržet v provozních a mimořádných poruchových stavech. Oteplení je závislé především na proudovém zatížení stroje. Dostatečné chlazení je nutné zabezpečit jak u budicího vinutí stroje, tak především u polovodičových součástí použitých v regulátorech budicího systému.

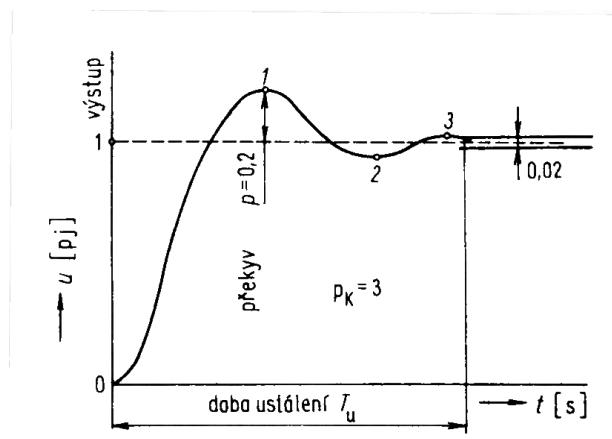
1.3 Hodnotící kritéria vlastností budicí soustavy

K hodnocení vlastností budicích soustav i jejich jednotlivých složek byly stanoveny některé pojmy a zavedena hodnotící kritéria. Z nich uvádím tyto hlavní:

- *Stropní napětí* U_{bs} (V) je maximální hodnota stejnosměrného napětí na výstupu budiče zatíženého odporem stejným, jako je odpor budicího vinutí při jeho pracovní teplotě.
- *Poměrné stropní napětí* K_s je dáno vztahem $K_s = U_{bs}/U_{bN}$, kde U_{bN} je budicí napětí na kroužkách rotoru pro jmenovité parametry stroje.[1]
- *Odezva napětí* K_R (s^{-1}) je hodnota, kterou získáme vyhodnocením časového průběhu vzrůstu napětí na budiči podle návodu stanoveného na obr. 1.1 v časovém intervalu 0 až 0,5 s, popř. 0 až 0,1 s. Pro budicí soustavy mající dobu odezvy $T_0 \leq 0,1$ s se měřený interval odezvy uvažuje do 0,1 s, protože odezva pro 0,5 s již nevystihuje dobře jejich jakost. Budicí soustava spolu se strojem v uzavřené smyčce tvoří řízený systém. Na obr. 1.2 je zakreslena typická odezva napětí alternátoru vybaveného řízeným budicím systémem na skokovou změnu na vstupu a jsou na něm zakresleny veličiny, které slouží ke klasifikaci budicích soustav. Jsou to: překryv p (pj), počet kyvů p_k a doba ustálení T_u (s). [1]



Obr. 1.1 Stanovení odezvy budiče [1]



Obr. 1.2 Doba odezvy napětí regulovaného alternátoru na skok žádané hodnoty [1]

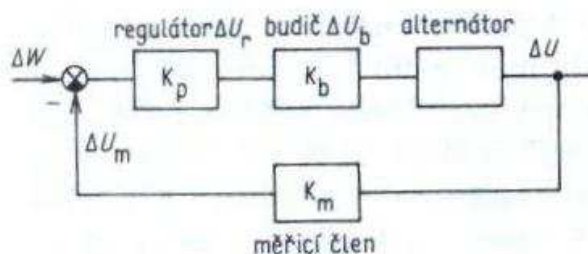
- Doba stropního buzení T_s (s) je doba, kdy napětí na budiči dosáhne 95% rozdílu mezi U_{bs} a U_{bN} . Budicí soustava s $T_0 \leq 0,1$ se nazývá rychlá budicí soustava. [1]

1.4 Uspořádání budicího systému

Dle normy [15] se kompletní budicí soustava skládá z:

- budiče
- automatického regulátoru buzení
- ručního řízení nebo rezervního automatického regulátoru buzení
- zařízení pro odbuzení rotoru
- vypínače a odpojovače v obvodu přívodů a vývodů proudu od budiče
- ochrany rotoru synchronního stroje proti přepětí a přetížení
- zařízení pro automatické řízení, signalizaci a ochranu při vnitřních poruchách budicího systému
- kontrolní a měřicí přístroje a čidla pro dálkové měřicí přístroje

Principiální uspořádání nejjednodušší uzavřené regulační smyčky, regulující na konstantní napětí, je na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Základní obvod regulace napětí synchronního alternátoru [1]

1.5 Zapojení používaná u synchronních strojů s hladkým rotorem (turboalternátorů)

Turboalternátory se staví převážně jako dvoupólové, jen výjimečně jako čtyřpólové. V obou případech je rotor hladký s nevyjádřenými póly. Turboalternátory lze rozdělit na:

- Malé turboalternátory do 75 MVA

Používají převážně statické řízení usměrňovače (závislá soustava) nebo bezkartáčové soustavy.

- Střední turboalternátory do 350 MVA

Zde převažují nezávislé budicí soustavy, často také závislé nebo i bezkartáčové

diodové soustavy.

- *Velké turboalternátory od 350 MVA*

Mají nezávislé budicí soustavy se statickými usměrňovači nebo bezkartáčové diodové soustavy.

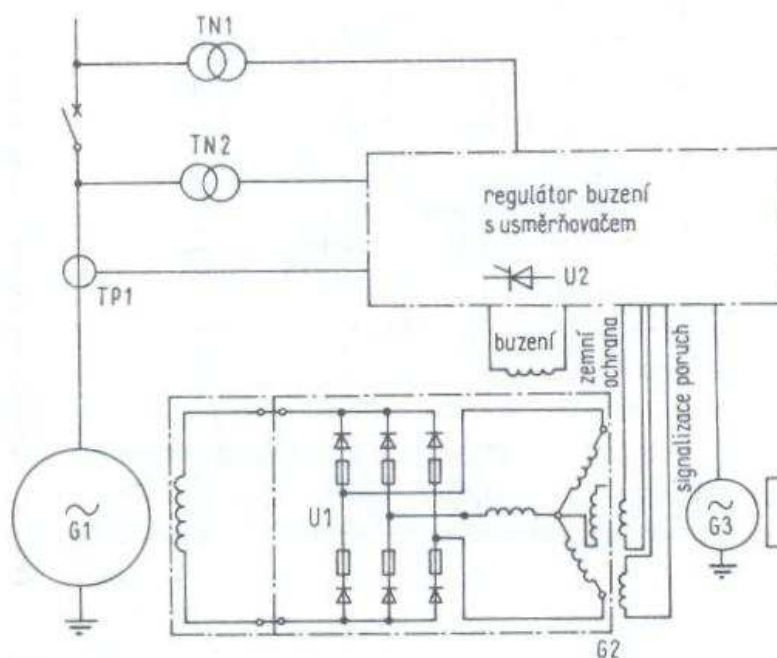
2 Vyhodnocení a porovnání různých provedení buzení turboalternátorů

Jak již bylo uvedeno výše, pro buzení turboalternátorů lze použít statické nebo bezkartáčové soustavy, které jsou závislé nebo nezávislé. Do nedávné doby se pro buzení synchronních strojů používaly pouze stejnosměrné točivé budiče na hřídeli synchronního stroje nebo jako součást budicího soustrojí. Stejnosměrné budicí systémy byly nahrazeny výkonovými polovodičovými součástkami použitými v diodových usměrňovačích a řízených tyristorových usměrňovačích. Z tohoto důvodu se zaměřím pouze na provedení obsahující polovodičové usměrňovače. Jednotlivá provedení, výhody a nevýhody uvádím zde:

2.1 Bezkartáčové soustavy

Hlavní výhoda bezkartáčové soustavy je odstranění sběracího ústrojí. Principiální schéma bezkartáčové budicí soustavy je zobrazeno na obr. 2.1. Na rotoru se nachází střídavý budič G2 s trojfázovým vinutím, který napájí usměrňovač U1 v trojfázovém můstkovém zapojení. Výstup z usměrňovače prochází přímo do budicího vinutí. Stator střídavého budiče G2 má budicí vinutí řízené regulátorem buzení a usměrňovačem U2. Napájení regulátoru zajišťuje budič G3 s trvalými magnety. Pracovní kmitočet budičů G2 a G3 bývá 150 až 400 Hz. K měření budicího proudu generátoru G1 a poruch usměrňovače U1 jsou umístěny měřicí cívky v příčném poli stroje G2. Na usměrňovač působí značné točivé síly a je na něj kladen maximální požadavek spolehlivosti. Proto je rotační usměrňovač vždy navržen s co nejmenším počtem součástí, nejlépe jen z diod.

Diody by se měly použít s co největším závěrným napětím a nejvyšším proudem. Z hlediska konstrukčního řešení je zapotřebí měnič dostatečně dimenzovat, pro chlazení nejlépe využít nosný kotouč usměrňovače. Zajistit snadnou vyměnitelnost součástí a dodržet hlukové hladiny. Bezkartáčové soustavy se díky bezkontaktnímu buzení generátoru používají v agresivním prostředí a tam, kde je požadována minimální údržba. Používají se především pro malé turbogenerátory a pro největší elektrárenské bloky, kde je odstraněno sběrné ústrojí.



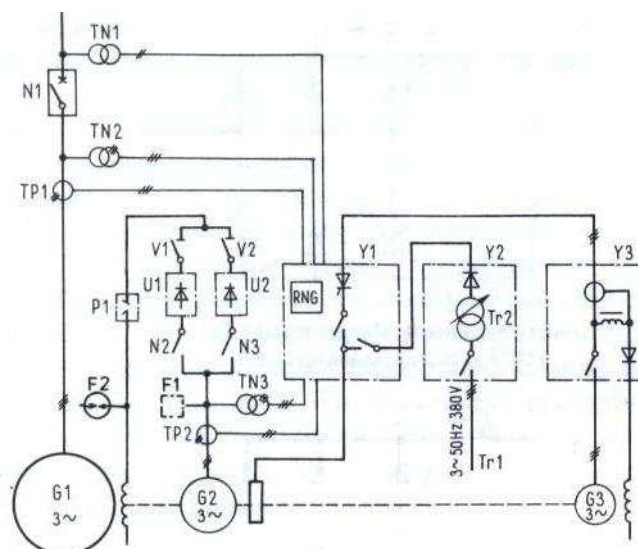
Obr. 2.1 Principiální schéma zapojení bezkartáčové budicí soustavy s pomocným alternátorem G3 s trvalými magnety pro napájení regulátoru buzení [1]

2.2 Statické budicí soustavy

Statické budicí soustavy mají výkonový člen budicí soustavy připojený přímo na budicí vinutí alternátoru přes sběrací ústrojí. Jako výkonový člen se nejčastěji používá řízených nebo neřízených usměrňovačů.

- *Neřízené statické budicí soustavy*

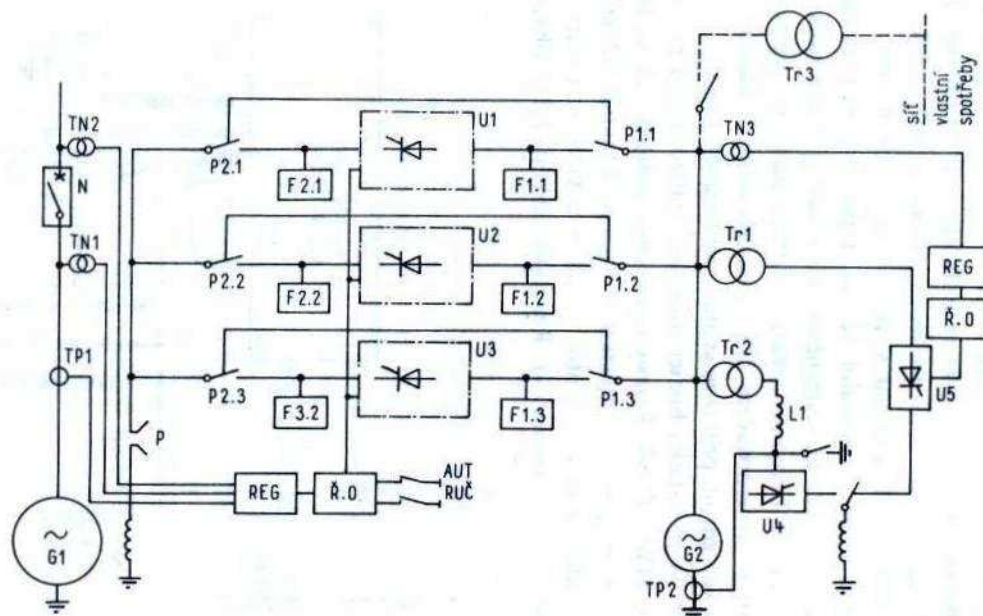
Neřízené statické systémy jsou vybaveny výkonovými diodami, které nahrazují stejnosměrný budič na společné hřídeli střídavým budičem (alternátorem), u kterého je daleko vyšší výkon a mnohem jednodušší údržba i konstrukce. Hlavní i pomocný střídavý budič jsou na pomocné hřídeli s alternátorem. Hlavní budič napájí dvě skupiny neřízených usměrňovačů a sám je ovládán a napájen přes tyristorovou soupravu z pomocného budiče. Pomocí fázové proudové kompaudace na pomocném budiči se udržuje konstantní napětí. Napětí hlavního budiče reguluje napětí alternátoru, které závisí na odchylce napětí s proudem a na proudu hlavního budiče. Dynamické vlastnosti této soustavy jsou podobné jako vlastnosti klasického stejnosměrného budiče a tato soustava pracuje velmi spolehlivě. Jelikož nelze změnit polaritu napětí, používá se zde odbuzovač, např. zhášecí komora. Příklad statické budicí soustavy je uveden na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Nezávislá budicí soustava pro alternátory 220MW se střídavým budičem a diodovým usměrňovačem; TP1 až TP3 čidla pro regulátor napětí, F1 přepěťová ochrana, F2 ochrana s jiskřištěm, G1 turboalternátor, G2 budicí alternátor, G3 pomocný budicí alternátor, TN1 a TN2 čidla pro regulátor napětí, N1 až N3 výkonové vypínače, P1 odbuzovač, U1 a U2 neřízené usměrňovače, V1 a V2 odpojovače, Y1 rozvaděč regulace s tyristorovým koncovým stupněm, Y2 rozvaděč záložního buzení, Y3 rozvaděč kompaudace [1]

- Řízené statické soustavy

U budicích systémů s tyristory se pro napájení budicího vinutí používá trojfázových řízených můstků, které napájecí energii odebírají ze svorek vlastní spotřeby alternátoru, nebo ze střídavého budiče, u kterého napětí udržujeme na konstantní hodnotě fázovou proudovou kompaudací. Blokové zapojení s využitím řízených tyristorů je uvedeno na obr. 2.3. Napájení budiče může být provedeno usměrňovačem, ale pouze za předpokladu, že je soustrojí v provozu. I obecně lze říci, že je výhodnější nezávislý zdroj, jelikož u závislých zdrojů zaniká schopnost tyristoru ihned reagovat na změny napětí na svorkách alternátoru při poklesu napětí na tyristorech. Jelikož tyristorový usměrňovač může pracovat v invertorovém režimu, umožní tím okamžité připojení maximálního napětí opačné polarity pro odbuzení, které tudíž probíhá rychleji než nabuzování, a tento způsob je možno dále kombinovat se zhášecí komorou. Tato rychlost změny buzení je tak velká, že regulátor, jež provozujeme, je možné provozovat i v oblasti umělé stability s úhlem β o velikosti až 120° . Při návrhu je nutno u tyristoru respektovat možnost zkratových proudů, případně výpadku některého z tyristorů a na tyto situace je dimenzovat. [10]



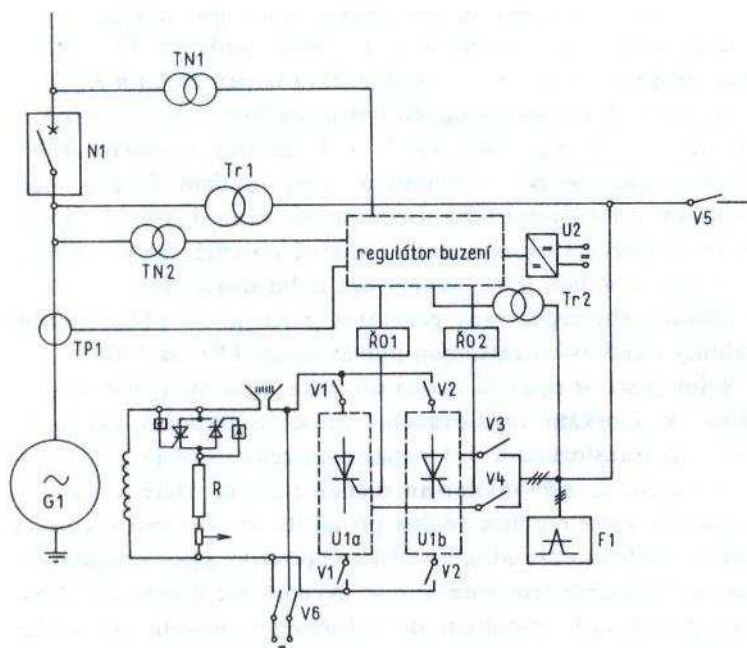
Obr. 2.2 Nezávislé tyristorové buzení turboalternátoru 500 MW s budícím alternátorem na hřídeli [1]

2.3 Závislá a nezávislá budicí soustava

Výhodnost použití závislé nebo nezávislé soustavy nelze jednoznačně určit, hlavním rozdílem je způsob napájení budiče. U závislé soustavy se napájení budiče většinou uskutečňuje přes výkonový snižující transformátor na svorky regulovaného stroje jako v případě zapojení na obr 2.3. Zde je nahrazen pomocný alternátor výkonovým transformátorem jako u nezávislé soustavy.

Často dochází k diskuzím ohledně vhodnosti použití závislé soustavy v souvislosti s postupným odstraňováním rotačních budičů z budicích obvodů turbogenerátorů větších výkonů týkajících se odezvy na zkrat v síti a tím související stability generátoru. Z výsledků zahraničních i českých studií bylo zjištěno:

- Při blízkém zkratu rozhoduje o stabilitě pouze doba trvání zkratu a konfigurace sítě. Povolená doba trvání zkratu je velmi krátká a nezávisí na druhu budicího systému. Stabilitu zajistí pouze co nejrychlejší odezva zkratové ochrany a co nejkratší vypínací doba příslušného vypínače, který zkrat odpojuje. [7]



Obr. 2.3 Závislá soustava s budícím transformátorem Tr1; výkonový usměrňovač je rozdělen na dvě části, U1a a U1b. Regulátor buzení má záložní napájení ze stejnosměrného měniče U2, připojeného k stejnosměrnému napětí staniční baterie. Napájený přes vypínač V5 je určen pouze pro najíždění ochrany generátoru [1]

2.4 Vyhodnocení použití budicích soustav

Z výše uvedených poznatků lze shrnout vhodnost použití různých budicích soustav. Souhrn uvádím zde:

- *Bezkartáčové a statické soustavy*

Jak již bylo uvedeno, bezkartáčové soustavy se nejvíce hodí do agresivních prostředí s malými nároky na údržbu, kde se kladou velké nároky na použití co nejjednoduššího a odolného usměrňovače budicího vinutí. Oproti statické soustavě, kde je usměrňovač vyveden mimo ústrojí generátoru, je možné usměrňovač vybavit dodatečnými ochranami, řízeným usměrňovačem s tyristory a účinnějším chlazením. V případě poruchy usměrňovače budicího vinutí u bezkartáčové soustavy je složitější a náročnější oprava. Oproti tomu statická soustava je znevýhodněna nutností použití sběracího ústrojí, které je proudově omezeno a dále na ně působí elektrické a mechanické vlivy.

- *Závislé a nezávislé soustavy*

Závislá a nezávislá soustava je z pohledu zkratových poruch v elektrizační soustavě srovnatelná. Jediným rozdílem je použití buď budicího alternátoru u závislé budicí soustavy,

nebo budicího generátoru na hřídeli regulovaného stroje u nezávislé budicí soustavy. V případě údržby či poruchy je výhodnější zapojení s budicím transformátorem, který v případě poruchy lze nahradit za jiný nebo náhradní transformátor a tím snížit odstávku turboalternátoru na minimum.

2.5 Budicí soustava jako zdroj rušivých signálů

V závěru této kapitoly je potřeba zmínit se o možnostech rušení v případě použití řízeného usměrňovače, kdy dochází k deformaci proudu napájecího zdroje. Tento deformační proud, který lze rozložit na základní a vyšší harmonické složky, způsobuje nežádoucí zkreslení v rozvodné soustavě. Tyristorový měnič je vždy zdrojem vyšších harmonických napětí a proudů pro napájecí zdroj nebo síť. Celé spektrum se obvykle dělí na dvě pásma:

- a) pásmo energetického rušení do 1250 Hz [1]
- b) pásmo rušení rozhlasu od 10 kHz do 300 MHz [1]

3 Návrh nejlepší možnosti regulace a řízení synchronních strojů, včetně možnosti stropního buzení a použití odbuzovače pro nouzové odbuzení

Zapojení a návrh budicí soustavy synchronního stroje jsou dány velikostí a druhem stroje, důležitostí v síti a způsobem jeho provozu. Důležitými faktory pro rozhodování o návrhu budicí soustavy jsou:[1]

- *Poměrné stropní napětí K_s a doba stropního buzení T_s*
Obě tyto hodnoty stanoví norma. [15]
- *Odezva K_R budicí soustavy*
Stanoví norma [15] a má být v rozsahu 1,6 až 2 s⁻¹
- *Požadavek na trvalou přetížitelnost*
Dle normy [15] je požadavek o 10 % vyšší v napětí i proudu.
- *Bezpečný převod proudu usměrňovačem*
Požadavek čl.175 normy [15], aby usměrňovač bezpečně převedl proud v budicím obvodu stroje, na jehož svorkách vznikne náhlý zkrat při jmenovitém napětí.

3.1 Stanovení parametrů budiče

Dle normy [15] musí být budicí soustava trvale schopna provozu, je-li zatížena proudem i napětím o 10 % větším, než je budicí proud a napětí pro jmenovité zatížení. Pro všechny druhy budičů platí vztahy:

$$U_{BN} = 1,1U_{bN} \quad (3.1)$$

$$I_{BN} = 1,1I_{bN} \quad (3.2)$$

$$P_{BN} = 1,21U_{bN}I_{bN} \quad (3.3)$$

$$P_{B\max} = U_{bN}I_{bN}K_s^2 \quad (3.4)$$

3.2 Stanovení parametrů napájecích zdrojů

Napájecími zdroji pro výkonové usměrňovače jsou zpravidla transformátory nebo budicí alternátory. Neřízené a řízené usměrňovače jsou obvykle zapojeny do trojfázových můstků. [1] Pro toto zapojení platí vztah:

$$U_f = \frac{U_b + \frac{3}{\pi}XI_b}{2,35 \cos \alpha} \quad (3.5)$$

Kde U_f je efektivní hodnota fázového napětí na svorkách měniče, α řídicí úhel tyristorů, X celková reaktance napájecího obvodu, která určuje dobu komutace.

Komutační reakce transformátorů se stanoví z napětí nakrátko. Komutační reaktance budicího alternátoru je dána vztahem:

$$X = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (3.6)$$

Je-li před každým tyristorem reaktor, je nutné připočítat i jeho reaktanci. Z toho efektivní hodnota fázového proudu zdroje je:

$$I_f = 0,815 \cdot 1,1I_b \quad (3.7)$$

- *Vztahy pro neřízený usměrňovač v můstkovém spojení*

Jmenovitý proud zdroje:

$$I_{fN} = 0,815 \cdot 1,1I_{bN} \quad (3.8)$$

Jmenovitý zdánlivý výkon:

$$S_N = 3U_{fN}I_{fN} \quad (3.9)$$

Účinnost zdroje:

$$\cos \varphi = \frac{P_N}{S_N} \quad (3.10)$$

Pro obvyklé poměry je $\cos \varphi = 0,87$

- *Vztahy pro řízený usměrňovač v můstkovém spojení*

Jmenovité napětí zdroje odpovídá stropnímu napětí U_{bs} a stropnímu proudu I_{bs} pro řídicí úhel $\alpha = 0^\circ$.

$$U_{fN} = \frac{U_{bs} + \frac{3}{\pi} I_{bs} X}{2,35} \quad (3.11)$$

Jmenovitý proud zdroje je dán vztahem (3.7). Jmenovitý zdánlivý výkon je dán vztahem (3.9).

Účinnost pro jednotlivé režimy s jakými zdroj pracuje určený ze vztahu (3.10)

Pracovní účinnost:

$$\cos \varphi_P = \frac{U_{bN} I_{bN}}{3U_{fN} \cdot 0,815 I_{bN}} = \frac{U_{bN}}{2,45U_{fN}} \quad (3.12)$$

Jmenovitý účinnost:

$$\cos \varphi_N = \frac{1,21U_{bN} I_{bN}}{3U_{fN} \cdot 0,9 I_{bN}} = \frac{U_{bN}}{2,23U_{fN}} \quad (3.13)$$

Stropní účinnost:

$$\cos \varphi_S = \frac{K_S^2 U_{bN}}{3U_{fN} \cdot 0,815 K_S} = \frac{K_S U_{bN}}{2,45U_{fN}} \quad (3.14)$$

Známe-li velikost komutační reaktance, můžeme určit velikost komutačního úhlu Θ , pro který platí:

$$\Theta = \arccos \left(\cos \alpha - I_b \frac{2}{\sqrt{6}} \frac{X}{U_{fN}} \right) - \alpha \quad (3.15)$$

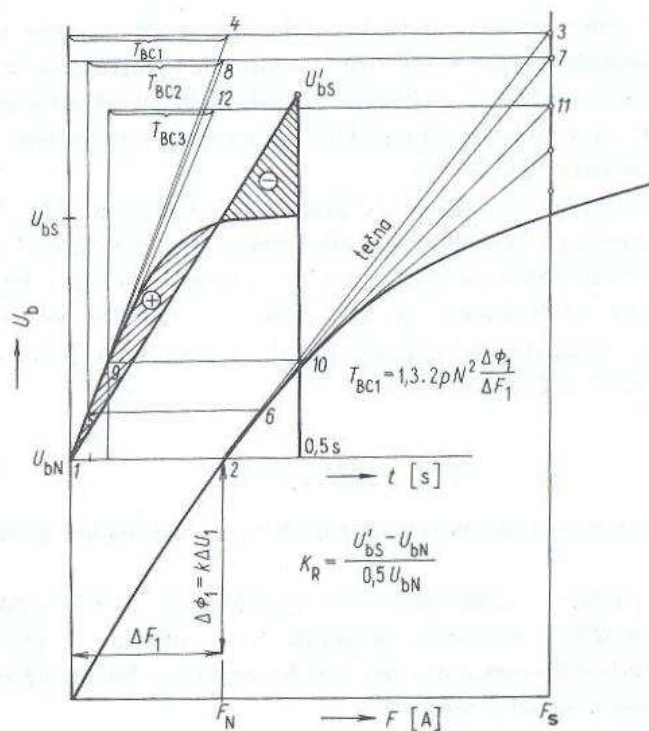
Velikost komutačního úhlu je pro tyristorové budiče malá a bývá v rozmezí 4 až 10°.

3.3 Výpočet časové konstanty budiče

Časová konstanta budiče tvořeného tyristorovým usměrňovačem je $T_B = 0,002$ s. Tyristorový usměrňovač je schopen během své jedné periody dosáhnout stropního napětí. [1]

3.4 Výpočet odezvy K_R točivého budiče

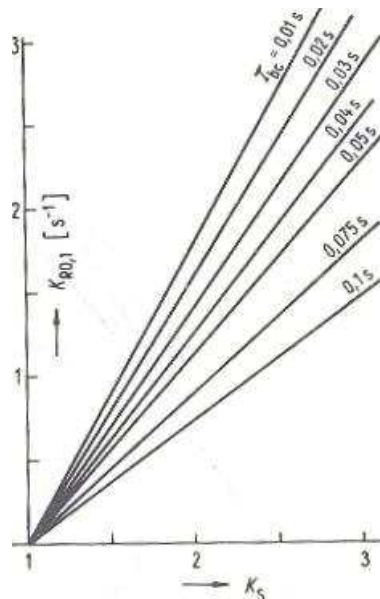
Pro přesnější určení odezvy budiče se v praxi nejlépe osvědčila grafická metoda vyznačená na obr. 3.1. Stanovíme celkovou konstantu T_{BC} pro U_{bN} , stropní napětí U_{bS} a postupujeme po krocích. Pro každý krok se znovu určuje T_{BC} i U_{bs} . Počítaný interval je nutné rozdělit alespoň na pět dílů. Získaný průběh napětí nahradíme rovnoplochým trojúhelníkem obr. 1.1. [1]



Obr. 3.1 Grafické stanovení odezvy budiče [1]

3.5 Výpočet odezvy tyristorového měniče

U tyristorového měniče se stanovuje odezva K_{R01} pro dobu 0,1 s. Podle obrázku 3.3 má být $T_B \leq 0,02$ s. K_{R01} pro různé K_s a T_B stanovíme z obr. 3.2.



Obr. 3.2 Graf pro určení odezvy budiče pro rychlou budicí soustavu [1]

3.6 Návrh polovodičového usměrňovače

Polovodičové součástky navrhujeme tak, aby jejich závěrné napětí bylo alespoň 2,2krát vyšší, než je amplituda napájecího napětí, které se na součástce vyskytuje. Proudově navrhujeme měnič podle stropního proudu I_{bs} . Podle doporučení výrobce stanovíme maximální dovolený proud ventilem I_{IV} pro 120° a dané chladicí a teplotní podmínky. Odhadneme, že pro doby 10 až 50 s jsou polovodičové součástky přetížitelné o 20 % a stanovíme počet paralelních větví a podle (3.16). Skutečný počet větví stanovíme o jednu větší a z proudů I_{bs} a I_{bN} vypočítáme skutečný proud tekoucí ventilem I_{IV} a podle něj určíme skutečné ztráty z katalogu výrobce ventilu.[1]

$$a \geq \frac{I_{bs}}{3,0,9 \cdot I_{IV} \cdot 1,2} \quad (3.16)$$

Pro zajištění velké provozní spolehlivosti polovodičových usměrňovačů se zpravidla požaduje, aby usměrňovač pracoval bez proudového omezení i při poruše jednoho z paralelně spojených ventilů ve větvi můstku.

Jištění polovodičových součástek v měničích se provádí pomocí rychlých pojistek, zapojených obvykle do série ke každé součástce. Pojistku je třeba dimenzovat o málo větší než $I^2 t$ polovodičové součástky a zároveň je potřeba kontrolovat, že napájecí zdroj je schopen při poruše pojistku prorazit. Pro zamezení poruchy z důvodu proražení pojistky je třeba řadit

alespoň tři polovodičové součástky paralelně. Pro omezení d_u/d_t a d_i/d_t jsou před polovodičové součástky řazeny vzduchové reaktory. Přepětí vzniklé při komutaci se omezují pasivními filtry RC . Na výstupu z usměrňovače bývá obvykle připojen přídržný rezistor, který zajišťuje plynulou regulaci napětí na reaktoru při počátku nabuzování. [1]

Odpor přídržného rezistoru pro trojfázový můstek lze určit ze vztahu (3.17)

$$R_p = \frac{U_f \sqrt{3}}{4aI_p} \quad (3.17)$$

3.7 Návrh odbuzovače

Podle normy [15] musí budicí systém obsahovat hlavní a rezervní buzení, pro případy běžného odbuzení stroje při plánovaném odstavení nebo pro případ vzniku havarijních stavů samotného budicího systému. Odbuzovač musí být navržen tak, aby doba, za kterou magnetický tok ve stroji zanikne na nulu, byla co nejkratší a vlastní vypínací čas odbuzovače nesmí překročit 0,1 s. energii nahromaděnou v rotoru při chodu naprázdno lze určit vztahem:

$$W_r = \frac{1}{2} L_{bb} I_{b0}^2 = \frac{1}{2} R_b T_b I_{b0}^2 \quad (3.18)$$

Během zkratu se však tato energie zvětší, protože se při zkratu zvětší budicí proud. V současné době se používají odbuzovače s rezistorem, obloukovým zhášením a invertorovým režimem řízeného usměrňovače.

Principiální schéma odbuzovače s rezistorem je na obr. 3.3. Při buzení je kontakt 2 spojen, kontakt 1 rozpojen. Při odbuzování se nejprve zapne 1 a pak se rozpojí kontakt 2.

Odpor R_o se volí takový, aby úbytek $R_o I_{b0}$ nepřesáhl 75 % zkušební napětí. Prakticky se volí $R_o = 3$ až $5 R_b$. [1]

Proud, který projde jednoduchým obvodem s indukčností při zkratování zdroje, je dán vztahem (3.19), kde I_0 je proud na začátku děje a T časová konstanta obvodu. [1]

$$i = I_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.19)$$

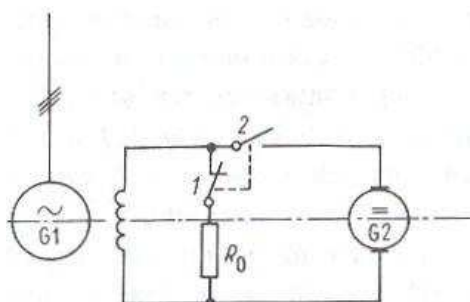
Pro jednoduchost předpokládáme, že rotor synchronního stroje se odbuzuje z chodu naprázdno a že budicí vinutí není spřaženo s žádným dalším vinutím na stroji. Pak lze určit pro proud i vztah (3.20), kde $K_R = R_o/R_b$, I_{b0} budicí proud chodu naprázdno a $T_b = L_{b0}/R_b$. [1]

$$i = I_{b0} \exp\left[\frac{-t(K_R + 1)}{T_b}\right] \quad (3.20)$$

Pro dobu, za kterou proud i dosáhne 1/100 své původní velikosti, platí vztah:

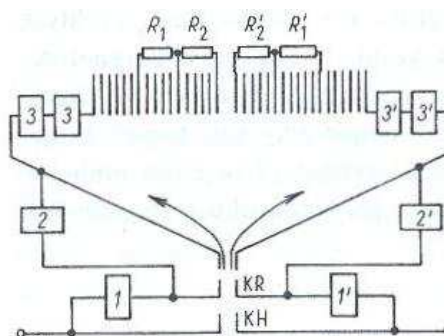
$$T_o = \frac{4,6T_b}{K_R + 1} \quad (3.21)$$

Za tuto dobu dosáhne stroj plného odbuzení. Odbuzení rezistorem trvá poměrně dlouho, proto se používá místo rezistorů odbuzovač se zhášecí mřížkou na obr. 3.4.



Obr. 3.3. Schématické naznačení funkce odbuzovače s odsuzovacím rezistorem R_o [1]

Princip odbuzovače se zhášecí mřížkou spočívá ve vytvoření řady oblouků v komůrkách, které jsou spojeny sériově. Zhášecí proud je magnetickým polem cívek 1, 1' a 2, 2' vytlačen do prostoru zhášecích komůrek. Přičemž cívky 3, 3' způsobí pomocí magnetického pole kruhový pohyb oblouku v komůrkách. Rezistory R_1, R'_1, R_2, R'_2 , omezují přepětí při zhasínání oblouku.



Obr. 3.4 Schématické naznačení funkce odbuzovače se zhášecí mřížkou [1]

Proud v budicím obvodu zaniká podle vztahu (3.22), kde $k_R = \Delta U_o / U_{b0}$.

$$i = I_o \left[(k_R + 1) \exp\left(\frac{-t}{T_b}\right) - k_R \right] \quad (3.22)$$

Budicí proud i projde nulou v době

$$T_o = T_b \ln \frac{k_R + 1}{k_R} \quad (3.23)$$

Vztahy pro odbuzovač se zhášecí mřížkou lze aplikovat i pro invertorový režim řízeného usměrňovače. Velikost konstantního protinapětí je určena stropním napětím a platí $U_o = 0,9U_{bs}$.

3.8 Návrh řídicích obvodů

Řídicí obvody jsou určeny k řízení polovodičových usměrňovačů s přirozenou komutací. Hlavní zásady návrhu řídicích obvodů měniče pro budicí soustavy jsou:[1]

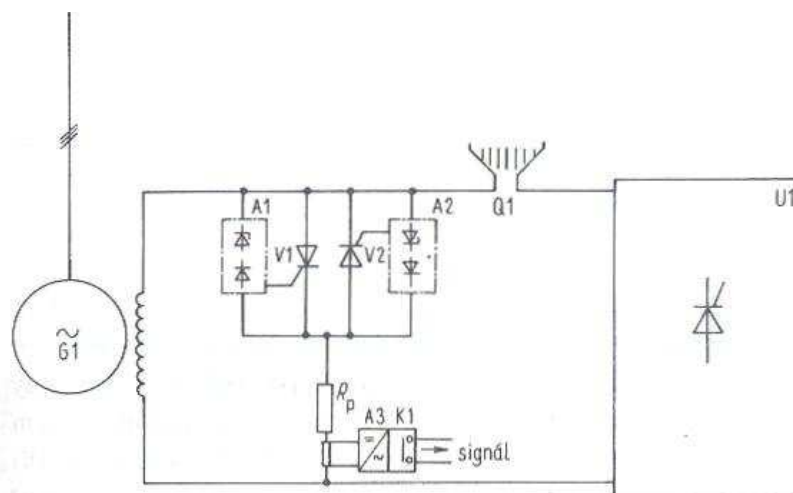
- Řídicí obvody musí pracovat spolehlivě při toleranci napájecího napětí měniče $\pm 0,4U_N$, u závislých při $0,1U_N$.
- Řídicí obvody měniče pro turboalternátory stačí navrhnout, aby kmitočet měl toleranci $\pm 0,15f_N$.
- Důležité energetické bloky vyžadují zdvojené řídicí obvody.
- Pro nabuzení závislých budicích soustav musí synchronizační jednotka pracovat již při 10 % napájecího napětí měniče.

3.9 Návrh ochran měničů

Polovodičové součástky jsou náchylné na poškození vlivem přepětí, proto je potřeba speciálních ochran v budicích obvodech.

- *Ochrana proti přepětí rotoru a polovodičové soustavy*

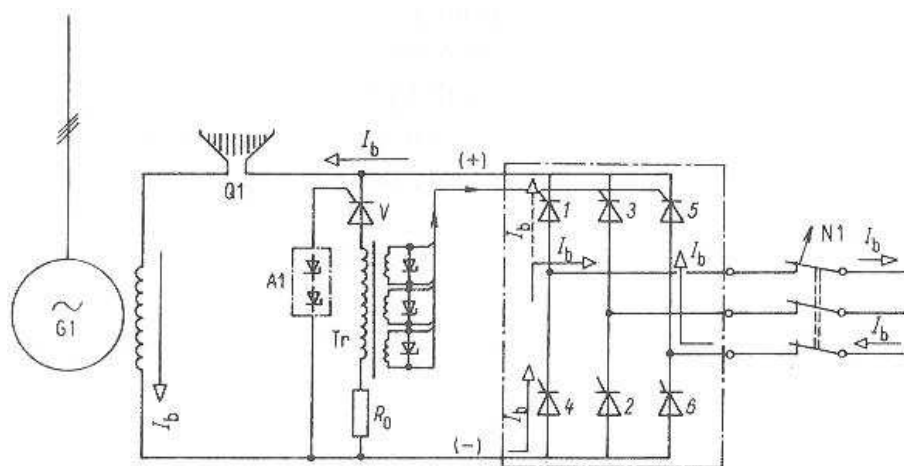
Při poruchových stavech, jako jsou asynchronní chod, nesprávné fázování, dvoupólový zkrat, se může do rotorů strojů zejména s neúčinným tlumičem nebo velkým počtem závitů na rotoru, indikovat přepětí. Tato přepětí mají značnou energii a ochrana těchto přepětí se uskutečňuje zkratováním budicího vinutí přes odpor R_p , připínaný pomocí tyristorů jako na obr. 3.5, který se volí mezi 10 až 15 R_b . Tento odpor se zapojuje mezi rotor a odbuzovač. Místo připínacích tyristorů lze využít napěťově závislý rezistor, varistor. Výška přepětí pro zareagování ochrany se volí 4 až 5 U_{bN} .



Obr. 3.5 Ochrana rotoru a polovodičové budicí soustavy proti přepětí [1]

- Ochrana proti přepětí vznikající při rozpojení na střídavé straně usměrňovače

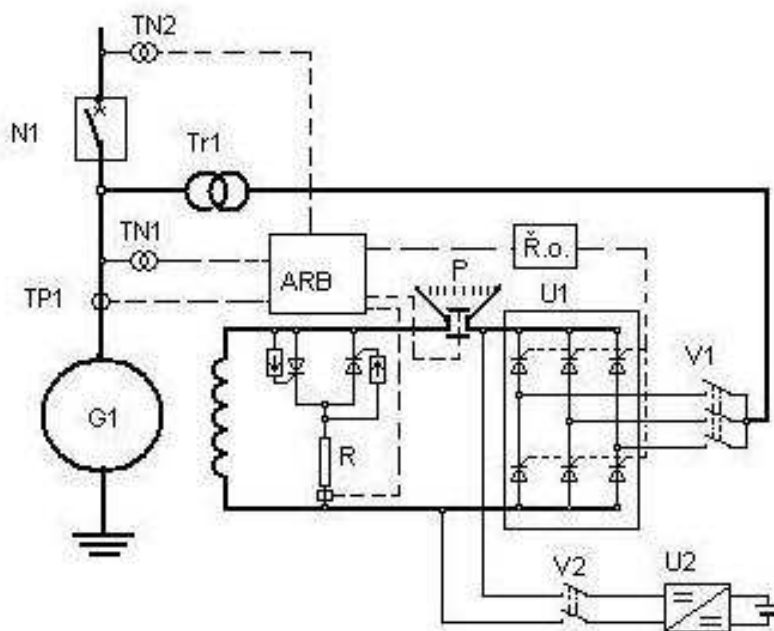
Často vzniká potřeba připojit usměrňovač na jiný napájecí zdroj. Při vypnutí vznikne přepětí hlavně u měničů, které nemají nulovou diodu. Toto přepětí je schopna zachytit ochrana s rezistorem R_p nebo vytvoříme na měniči nulovou diodu. Zapneme-li v okamžiku přepětí alespoň polovinu ventilů můstku, můstek na okamžik zkratuje budicí vinutí a proud rotoru se uzavře nakrátko. Po obnovení napájení pracuje můstek dál normálně. Energie zapalovacího impulsu je opět brána z energie přepětí. [1] Princip zapojení ochrany je na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Princip působení ochrany budicí soustavy proti přepětí při odpojeném napájení. Plně vyznačené proudy znamenají stav před vypnutím, přerušované je vyznačen proud po vypnutí vypínačem N1 [1]

3.10 Vlastní návrh budicí soustavy

Dle předchozích kapitol lze aplikovat vztahy a uvedené principy do vlastního návrhu budicí soustavy. Jako nejvhodnější a nejuniverzálnější řešení budicí soustavy jsem vyhodnotil statickou soustavu s přímo řízeným tyristorovým usměrňovačem U1, závislým zdrojem v podobě snižovacího výkonového transformátoru Tr1, zapojeným přímo ke svorkám regulovaného zdroje G1. Počáteční nabuzení této soustavy je řešeno ze stejnosměrného regulovaného zdroje U2, napájeného ze staničních baterií. V zapojení je zapojena ochrana rotoru a polovodičové budicí soustavy proti přepětí. Jako odbuzovač P je použit odbuzovač se zhášecí mřížkou. Automatický regulátor buzení (ARB) je zálohován ručním řízením Ř.o, signály do řídicího obvodu se přenášejí z měřicích transformátorů napětí TN1 a TN2, měřicího proudového transformátoru TP1.



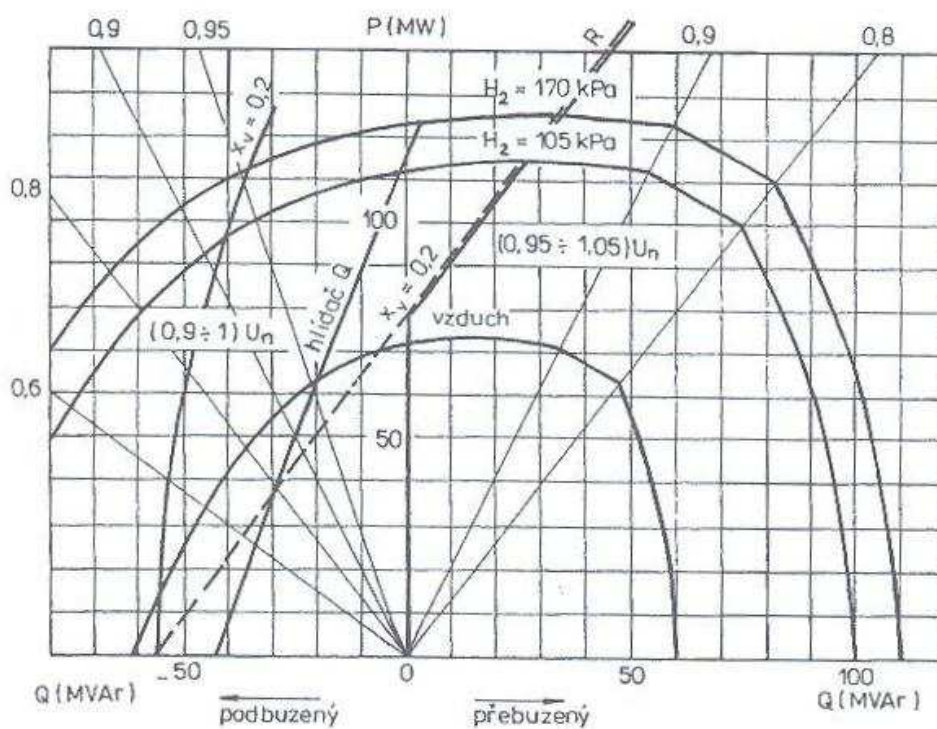
Obr. 3.7 Blokové chéma návrhu budicí soustavy

Aby bylo možné určit hodnoty budicí soustavy je nutné znát parametry regulovaného zdroje G1. Pro názornost byl zvolen alternátor s hodnotami v tab. 3.I.

Tab. 3.I Vybrané parametry alternátoru

Zdánlivý výkon	S_n	MVA	137,5
Činný výkon	P_n	MW	110
Sdružené napětí statoru	U_n	kV	13,8
Jmenovitý proud	I_n	kA	3,78
Budicí proud	I_{bN}	A	1180

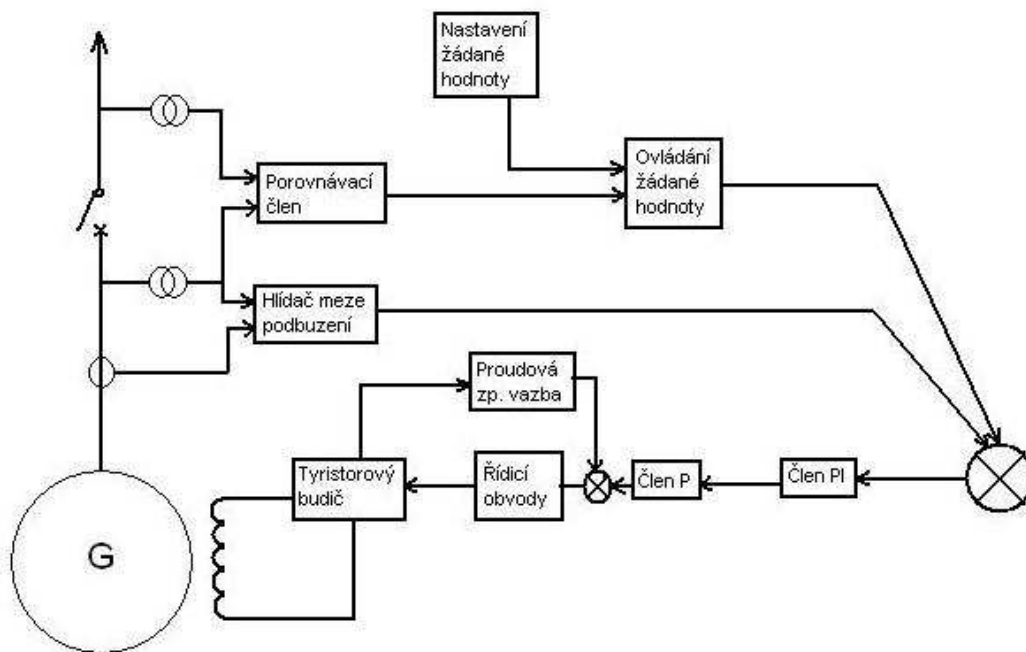
Ohmický odpor fáze statoru (při provozní teplotě)	R_{ζ}	Ω	0,00322
Reaktance rázová sycená	x_{ds}''/x_{qs}''	%	13/13,3
Reaktance přechodná sycená	x_{ds}'	%	21
Reaktance synchronní nesycená	x_{dn}/x_{qn}	%	218/206
Reaktance synchronní sycená	x_{ds}/x_{gn}	%	200/175,1
Reaktance netočivé složky	x_0	%	10,3
Reaktance zpětné složky nesycená	x_{2n}	%	16,6
Časová konstanta rázová	T_d''/T_q''	s	0,025/0,015
Časová konstanta přechodná	T_d'	s	0,7
Časová konstanta stejnosměrné složky	T_a	s	0,3
Časová konstanta budiče	T_b	s	0,3
Strop budicího napětí	ρ	$\frac{U_{b \max}}{U_{bn}}$	2,06
Moment setrvačnosti	GD_g^2	Tm^2	16,59
Synchronní otáčky	n	min^{-1}	3000



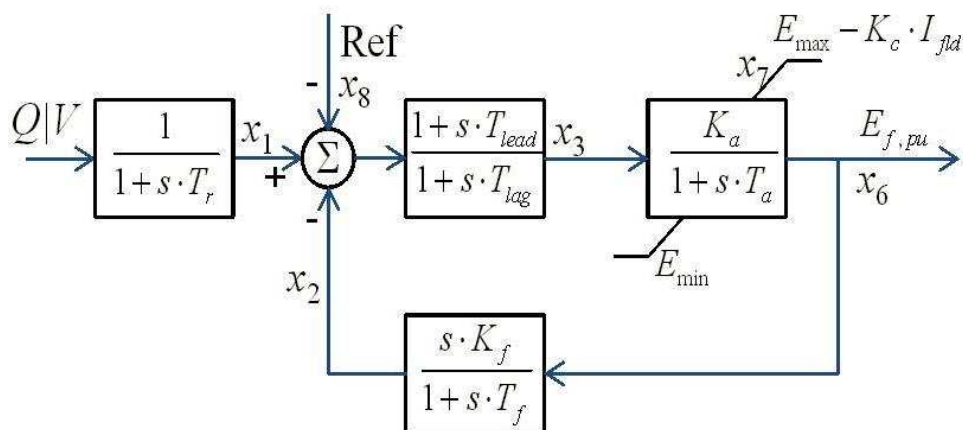
Obr. 3.8 Provozní P-Q diagram turboalternátoru 110 MW [11]

3.10.1 Návrh regulátoru buzení

Regulační obvod pro navrhovaný budicí systém je na obr. 3.9. Regulátor budicího systému lze vyjádřit jako matematický model v blocích obr. 3. 10.



Obr. 3.9 Blokové schéma regulátoru budicího systému



Obr. 3.10 Model řízení budicího systému

Matematický model řízení je složen z několika funkčních částí: filtrační s usměrňovačem, součtového členu, zesilovače a zpětné odezvy.

- *Filtrační člen s usměrňovačem*

Do tohoto členu přichází hodnoty z výstupu regulovaného stroje, u navrhovaného

stroje to jsou hodnoty z měřicího transformátoru TN1 připevněného na svorkách synchronního generátoru. Naměřená hodnota se následně přefiltruje a usměrní. Na výstupu tohoto členu se po filtraci a usměrnění nachází stejnosměrná hodnota. Stejnosměrná hodnota se v tomto členu vypočítá na základě vztahu (3.24), kde V_T je efektivní hodnota vstupního napětí, V_C výstupní hodnota stejnosměrného napětí, s je Laplaceova transformační funkce a T_r představuje časovou konstantu usměrňovače.

$$V_C = \frac{1}{1 + sT_r} \times V_T \quad (3.24)$$

- *Součtový člen*

V součtovém členu je výstupní signál součtem vstupujících hodnot napětí v modelu označených jako x_1 , vstupu hodnoty V_C z filtru a usměrňovače, vstupu hodnoty napětí ze zpětné vazby x_2 a x_8 a vstupu stanoveného referenčního napětí V_{ref} .

- *Zesilovač*

Tento člen v sobě obsahuje zesilovač vstupních hodnot na požadované hodnoty. Zesilovač je omezen maximálním a minimálním zesílením regulovaného napětí. Regulované napětí V_R musí ležet mezi minimální hodnotou napětí V_{Rmin} a maximální hodnotou napětí V_{Rmax} , maximální hodnota napětí určuje maximální hodnotu stropního buzení při buzení budicího vinutí. Vztah pro zesílení v tomto členu je uveden v (3.25), kde V_E představuje vstupní hodnotu chybového napětí, V_R výstupní regulovanou hodnotu napětí, K_A lineární zisk napětí a T_A je časová konstanta.

$$V_R = \frac{K_A}{1 + sT_A} \times V_E \quad (3.25)$$

- *Zpětná vazba*

Je založena na integračně derivačním kompenzátoru. Vstupem je regulovaná veličina, která vstupuje zpět do regulačního systému a tím regulační systém zpětně vyhodnocuje výstup regulované hodnoty.

4 Modelování regulace a řízení synchronních alternátorů

Pro správné modelování regulace a řízení synchronních alternátorů je zapotřebí se přiblížit co nejpřesnější simulaci skutečného prostředí, v jakém regulace a řízení alternátorů budou pracovat. Proto je pro model přibližující se skutečnému stavu zapotřebí navrhnout další závislé modely. Pro model regulace a řízení je pro správnou funkci zapotřebí znát parametry alternátoru, na který budeme model řízení aplikovat. Mimo parametry alternátoru je popřípadě dobré znát také parametry prostředí a elektrizační soustavy, do které alternátor pracuje. Je tedy potřeba nějaký univerzální systém, který dokáže komplexně nasimulovat řízení a prostředí alternátorů v závislosti na přechodových, elektrických a mechanických dějích. Jako simulační systém je potřeba si zvolit vhodný software, který dokáže splnit naše požadavky. Jako vhodný software je na trhu nabízen např. Simulink, PSS/E, EMTP-96, EMTP-RV, ATP-EMTP.

Pro modelování jsem si zvolil nekomerční software ATP-EMTP, který je po vyžádání studentské licence nabízen zdarma. Nedílnou součástí tohoto softwaru je grafický editor ATPdraw, který je nabízen zdarma .

4.1 Prostředí ATP-EMTP

ATP-EMTP (Alternative Transient Program) je univerzální softwarový systém pro digitální simulaci přechodových jevů elektromagnetické a elektromechanické povahy. ATP má rozsáhlé modelovací schopnosti, umožňuje simulovat komplexní elektrizační sítě a řídicí systémy. Software se neustále rozvíjí prostřednictvím mezinárodních příspěvků.[16]

4.1.1 Popis programu ATP-EMTP

Program ATP-EMTP má rozsáhlé možnosti modelování a další přidané prostředky, jako je například výpočet přechodových jevů prostřednictvím diferenciálních funkcí v časové oblasti, které jsou řešeny základními lichoběžníkovými pravidly integrace. Standardně je možné modelovat síť s 250 uzly, 300 lineárními větvemi, 40 vypínači, 50 zdroji. Program je možné využít v jedno a vícefázových sítích pro výpočty:

- Ustálených hodnot fázorů v lineárních a nelineárních systémech se stejnosměrnými a střídavými zdroji jedné a nebo vícerozčasných frekvencí.
- Výpočet energií uvolněných nebo akumulovaných v prvcích.
- Dynamiky konkrétního systému.
- Elektromagnetických přechodových jevů a torzní dynamiky hřídele generátoru a turbíny.

Program ATP-EMTP využívá pro řešení algebraické, diferenciální a parciální diferenciální rovnice, které popisují obvody skládající se z libovolně připojených článků elektrické sítě, tyto prvky:

- Prvky se soustřednými parametry R, L, C
- Prvky se vzájemnou vazbou, transformátory, vedení
- Vícefázová přenosová vedení
- Nelineární prvky R, L, C ,
- Spínače s proměnnými spínacími podmínkami
- Napěťové a proudové zdroje různých frekvencí
- Model trojfázového synchronního stroje s rotorem, budicím vinutím, tlumiči a pružným hmotnostním systémem na simulaci torzních oscilací
- Modely univerzálního stroje na simulaci trojfázového indukčního stroje, jednofázového střídavého stroje a stejnosměrných strojů

4.1.2 Programy pro práci s ATP-EMTP

Samotný program ATP-EMTP je program pouze výpočtový. Pro zpřehlednění práce, zjednodušení vytváření obvodů, bylo vytvořeno několik programů, které s tímto programem spolupracují.

- *ATPDraw* – grafický preprocesor
- *PCPlot, PlotXY, GTPPlot* – grafické výstupy ATP
- *Programmer's File Editor (PFE)* – textový editor na vytváření a editaci vstupních souborů
- *ATP Kontrol center* – program soustřeďující ovládání veškerých těchto programů do jednoho okna.

Pro samostatnou práci s programem ATP-EMTP je plně dostačující použít programy ATPDraw a grafický výstup např. PlotXY.

4.1.3 Grafický preprocesor ATPDraw

ATPDraw je grafický preprocesor plně ovládaný myší. V grafickém prostředí může uživatel pomocí myši vytvořit elektronický obvod, který následně z menu přeloží pomocí výpočtového generátoru do výstupního souboru. Tento výstupní soubor obsahuje všechny nasimulované průběhy zvolených hodnot, které jsou určeny pro další zpracování jako např. pro zobrazení grafů v programu PlotXY. Grafický preprocesor v sobě obsahuje velké množství již předefinovaných prvků, jako jsou RLC prvky, transformátory, elektrická vedení

a kabely, spínače, zdroje, modely strojů, modely logických podmínek a modely TACS. V případě, že uživatel potřebuje prvek, který není obsažen v seznamu nabídky, lze si ho pomocí modulů TACS vytvořit. ATPDraw podporuje 100 standardních prvků, 40 objektů TACS a umožňuje zjednodušené používání modulu Models.

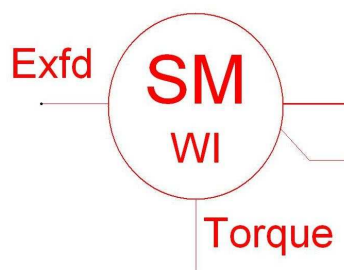
V programu je možné vytvářet vícenásobná okna s řešenými obvody a kopírovat mezi nimi informace.

4.2 Vytvoření modelu synchronního alternátoru

Pro vytvoření modelu synchronního alternátoru se nabízí v menu Machines modely čtyř definovaných strojů. Pro navrhovanou simulaci jsem si vybral stroj s názvem SYNCHRONOUS WI.

4.2.1 Popis modelu stroje SYNCHRONOUS WI

Model na obr. 4.1 je navržen jako univerzální synchronní stroj pro zadání dat přímo od výrobce.



Obr. 4.1 Schématická značka modelu stroje SYNCHRONOUS WI

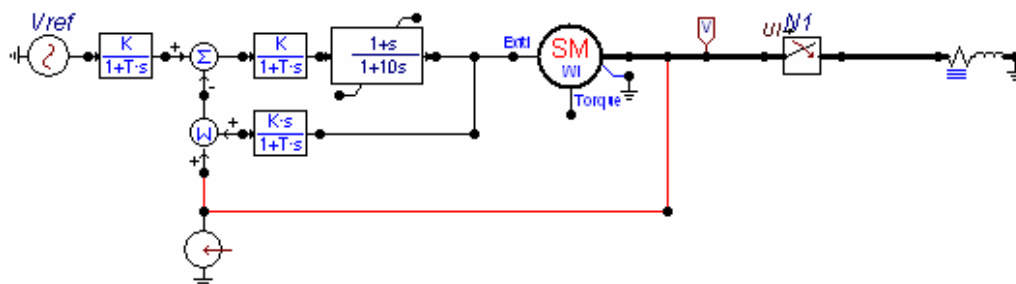
Pro správnou funkci je třeba do modelu zadat data, data jsem použil z tab. 3.1. Dále je potřeba zadat setrvačnost v kg.m^2 , vybrat typ budicího systému ze tří variant *no*, *stl*, *dcl*. Jelikož budu provádět simulaci externího systému, volím variantu *no*. Dále je nutné zvolit typ poháněcí turbíny z výběru žádná, univerzální nebo vodní. Pro účely simulace volím univerzální typ turbíny. Dále je třeba nastavit počáteční podmínky: procentní hodnota počátečního napětí a počáteční úhel.

4.2.2 Vytvoření modelu regulátoru buzení

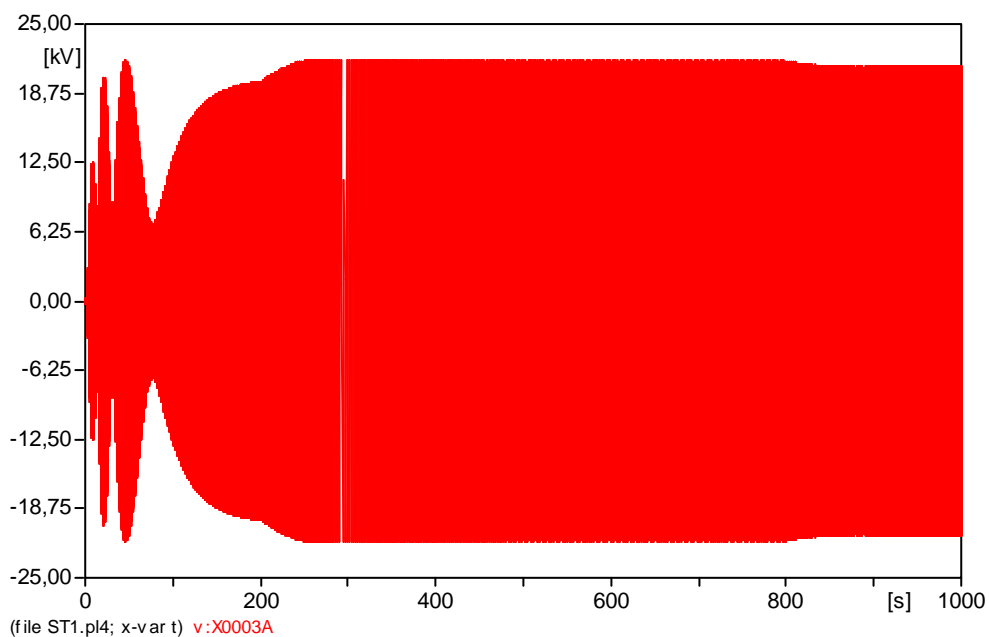
Model regulátoru buzení je vytvořen z nadefinovaných modelů TACS, zapojení se shoduje s modelem řízení na obr. 3.10.

4.3 Model regulace synchronního alternátoru

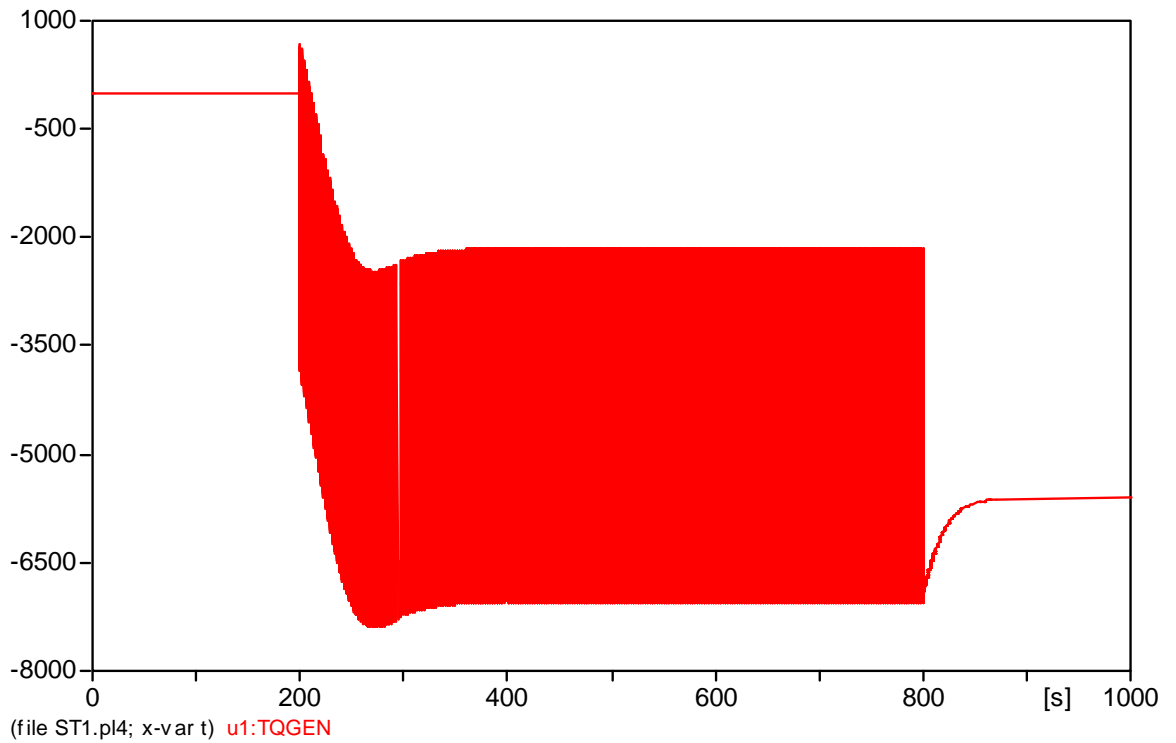
Na obr. 4.2 je znázorněno schéma použité pro model budicího systému. Model je nastaven tak, že v čase 0 až 800 s jde na prázdko od nulových hodnot napětí až do hodnot jmenovitého napětí alternátoru. V čase 800 s se k alternátoru připež zátěž.



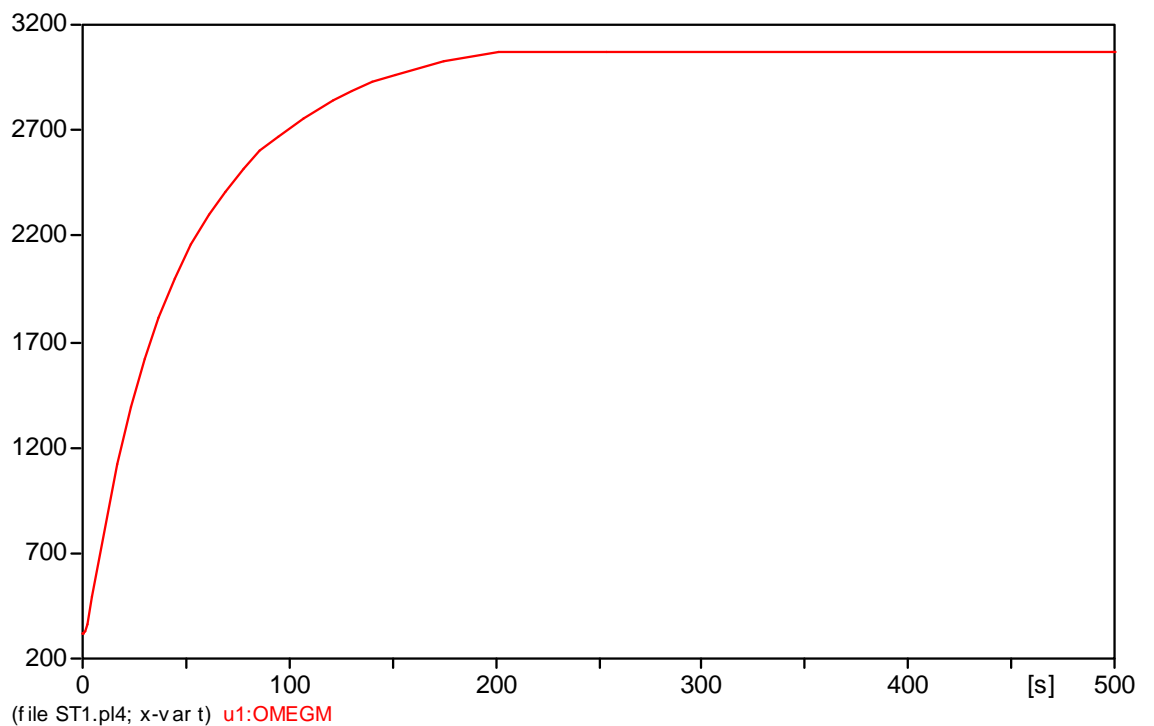
Obr. 4.2 Model budicího systému vytvořený v ATPDraw



Obr. 4.3 Výstupní napětí ze statoru alternátoru



Obr. 4.4 Průběh mechanického momentu od 0 do 800 s nezatíženého alternátoru



Obr. 4.5 Průběh otáček rotoru nezatíženého alternátoru

Závěr

V předchozích kapitolách jsme se seznámili s jednotlivými typy a možnostmi budicích systémů synchronních strojů, kdy jsem provedl rozbor výhod a nevýhod používaných soustav. Dle mých poznatků jsem vybral s ohledem na probrané skutečnosti nejvhodnější budicí systém a jeho regulaci, který jsem se následně pokusil nasimulovat v softwarovém prostředí ATP-EMTP a v jeho grafickém preprocesoru ATPDraw.

Na modelu budicí soustavy jsem nasimuloval rozběh nezatíženého synchronního alternátoru s modelovým budicím systémem. Na rozběhlý alternátor jsem následně připojil zátěž pro vyhodnocení vlivu na synchronní chod alternátoru. Pro přesnější rozbor simulované soustavy by v této fázi bylo dobré srovnat nasimulované výsledky s praktickými výsledky na skutečném alternátoru v provozu. Dále by bylo žádoucí vytvořit model části elektrizační soustavy, do které by byl umístěn modelový alternátor a následně modelový alternátor prověřit na možné poruchové stavy v elektrizační soustavě a také na samotném modelu alternátoru.

Uvědomuji si, že u některých statí by bylo možné jít do větších detailů, jako například u návrhu nejlepší možnosti regulace a komplexnější simulace buzení synchronních alternátorů. V této práci jsem vytvořil jen simulaci rozběhu alternátoru bez ověření výsledků pro skutečný alternátor. Přesto si myslím, že tato práce poskytuje ucelený základní přehled o problematice budicích systémů synchronních strojů a může posloužit jako základ pro další výzkum.

Použitá literatura

- [1] Hora, Oldřich a kolektiv: *Regulační a budicí systémy synchronních strojů*, Vydavatelství SNTL, Praha 1985
- [2] Ibler, Zbyněk; Beran, Miloš. *Elektrárny 2. vyd.* Plzeň : VŠSE, 1982
- [3] Červený.: *Projektování elektrických zařízení*; Plzeň 2008
- [4] Bartoš, V.:*Měření na elektrických strojích*, Plzeň 2002.
- [5] Bartoš, V.:*Teorie elektrických strojů*, Plzeň 2006.
- [6] Bašta, Chládek, Mayer : *Teorie el. stroju*, SMTL, Praha, 1968
- [7] <http://www.allforpower.cz/clanek/budici-soupravy-generatoru-300-mva-jaderne-elektrarny-dukovany/>
- [8] http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/pves/BuzeniSG.pdf
- [9] <http://www.automatizace.cz/article.php?a=835>
- [10] http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29866
- [11] Ibler, Zbyněk a kol.: *Technický Průvodce ENERGETIKA*, vyd. BEN, Praha 2002
- [12] Reddy, S.P.: *Power system transient stability in the application of excitation systems for in-plant generation*. 1995 Process Control Conference:
<http://www.tappi.org/Downloads/unsorted/UNTITLED---pcei95117pdf.aspx>
- [13] <http://www.atpdraw.net/index.php>
- [14] <http://www.stanislav-misak.com/>
- [15] ČSN 35 0255: *Budicí systémy turboalternátorů, hydroalternátorů a synchronních kompenzátorů. Technické požadavky a metody zkoušení* (1. 7. 1988)
- [16] Medved', Hvizdoš: *Modelovanie v prostredí EMTP-ATP*, Košice 2011
- [17] Prikler, Hóidalen: *ATPDRAW User's Manual*, Norway 2009

