



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Digitální ochrany alternátorů

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Vedoucí práce: Ing. Pavel Koblík, Ph.D.

Jakub Fišera

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Fišera** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **411212**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Digitální ochrany alternátorů

Název diplomové práce anglicky:

Digital protections of synchronous generators

Pokyny pro vypracování:

1. Popište standardní regulátor buzení alternátoru a definujte potřebné ochranné funkce.
2. Vypočítejte nastavení regulátoru buzení konkrétního pohonu se synchronním strojem.
3. Prostudujte možnosti digitálního regulátoru TE-5403 a nastavte jej podle předchozích výpočtů.
4. Proveďte sekundární a primární zkoušky ochranných funkcí.
5. Zhodnoťte měření a zpracujte protokol o provedených zkouškách.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Balátě, J.: Automatické řízení, BEN - technická literatura, Praha, 2003
- [2] Hora, O., Navrátil, S. a kol.: Regulace elektrických strojů, SNTL, Praha, 1976.
- [3] Instrukční manuál regulátoru TE-5403, Tenel s.r.o.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Koblře, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na tematiku automatického regulátoru napětí a budicích soustav. Představuje teoretický přehled typů budicích soustav, regulátorů napětí, ochranných funkcí regulátoru a zabývá se konkrétním nastavením konstant regulátoru typové řady TE-5403 empirickou metodou syntézy konstant regulátoru pro zkušební soustrojí. Nastavení regulátoru buzení je prakticky ověřeno předepsanými sekundárními a primárními zkouškami na zkušebním soustrojí.

Klíčová slova

AVR, regulátor, alternátor, budicí systém, regulace, budič, statický budicí systém, bezkartáčový budicí systém, omezovač, tyristorový můstkový usměrňovač, regulační obvod, kritické zesílení.

Annotation

This master thesis is focused on theme about automatic voltage regulator and excitation systems. Presents theoretical overview of excitation system types, voltage regulators, protection functions of a voltage regulator and deals with the settings of automatic voltage regulator TE-5403 using empirical methods of synthesis for the regulator constants of an alternator with a static excitation system. The settings of the regulator is tested with predefined secondary and primary tests on the alternator with the static excitation system.

Key words

AVR, regulator, alternator, excitation system, regulation, exciter, static excitation system, brushless excitation system, limiter, thyristor bridge rectifier, regulation circuit, critical amplification.

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Jakub Fišera

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Kobrlemu, Ph.D. za vstřícnost, věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále děkuji také firmě Tenel s.r.o. za poskytnutí prostředků a pomoc k tvorbě praktické části této práce, která by jinak nikdy nevznikla.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Budicí systém synchronního generátoru.....	10
2.1 Budicí soustava	10
2.2 Princip regulace soustavy.....	12
2.3 Požadavky na budicí soustavy	13
3. Regulátory buzení	15
3.1 Regulátor	15
3.2 Typy regulátorů.....	16
3.2.1 Proporcionální člen	17
3.2.2 Integrovaný člen.....	17
3.2.3 Derivační člen	18
3.2.4 PID regulátor.....	18
3.3 Kvalita regulace	19
3.4 Automatický regulátor napětí (AVR).....	21
3.4.1 Regulační smyčky AVR TE 5403	22
3.4.2 Ochranné funkce	23
3.4.2.1 Omezovač rotorového proudu (ORP).....	25
3.4.2.2 Omezovač statorového proudu (OSP).....	25
3.4.2.3 Hlídač meze podbuzení (HMP).....	26
3.4.2.4 Podfrekvenční ochrana U/f	26
3.4.2.5 Power System Stabilizator (PSS)	26
4. Nastavení regulátoru buzení	28
4.1 Výpočet konstant regulátoru	28
4.1.1 Metoda kritického zesílení regulátoru	30
4.1.2 Metoda standartních tvarů	32

4.2	Ladění regulačních smyček.....	35
4.3	Nastavení ochranných funkcí.....	37
4.3.1	ORP, OSP a podfrekvenční ochrana U/f	38
4.3.2	Hlídač meze podbuzení (HMP)	38
4.3.3	Omezení zadávaných rozsahů.....	39
4.3.4	Havarijní hodnoty	39
4.3.5	Ochrany fázování	39
5.	Primární a sekundární zkoušky.....	41
5.1	Popis měřeného pracoviště.....	41
5.2	Primární zkoušky	44
5.2.1	Provoz do stojícího stroje	44
5.2.2	Chod naprázdno	45
5.2.3	Fázování generátoru.....	47
5.2.4	Chod na síti	47
5.2.5	Provozní najetí a odstavení soustrojí	47
5.3	Sekundární zkoušky	48
6.	Závěr	49
	Seznam obrázků.....	50
	Seznam tabulek	51
	Seznam zkratk	52
	Seznam použitých symbolů	53
	Seznam použité literatury	55
	Seznam příloh	56

1. Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou automatických regulátorů napětí AVR, které jsou součástí budicích soustav pro synchronní generátory. Automatické regulátory napětí chrání synchronní generátory před poškozením a zajišťují automatickou regulaci výstupního napětí synchronního generátoru. Cílem práce je seznámit se s regulátory buzení a jeho možnostmi, provést nastavení digitálního regulátoru TE-5403 a ověřit jeho funkci na soustrojí motor-generátor.

Druhá kapitola shrnuje popis budicích soustav a jejich požadavků. Zobrazuje jednotlivé výhody a nevýhody typů budicích soustav.

Třetí kapitola je zaměřena na teoretický rozbor druhů regulátorů, princip a kvalitu regulačního pochodu. Popisuje standardní automatický regulátor napětí a jeho implementované ochranné funkce.

Čtvrtá kapitola se zabývá nastavením automatického regulátoru napětí firmy Tenel typu TE-5403 pro statickou budicí soustavu synchronního generátoru. Cílem kapitoly je využít teoretickou metodu syntézy k odhadu stavitelných parametrů regulátoru a nastavit ochranné funkce regulátoru buzení pro konkrétní synchronní stroj.

Pátá kapitola popisuje zkoušky provedené na měřeném pracovišti, kde byl nastaven automatický regulátor napětí AVR TE-5403.

2. Budicí systém synchronního generátoru

2.1 Budicí soustava

Budicí soustava je soubor zařízení zajišťující dodávku stejnosměrného proudu do budicího vinutí synchronního stroje umístěném na jeho rotoru. Taková soustava musí zajišťovat stabilní dodávku proudu jak při normálních pracovních stavech, tak při havarijních stavech. Velikost dodávaného stejnosměrného proudu ovlivňuje výstupní napětí synchronního alternátoru a jalový výkon dodávaný do elektrizační soustavy.

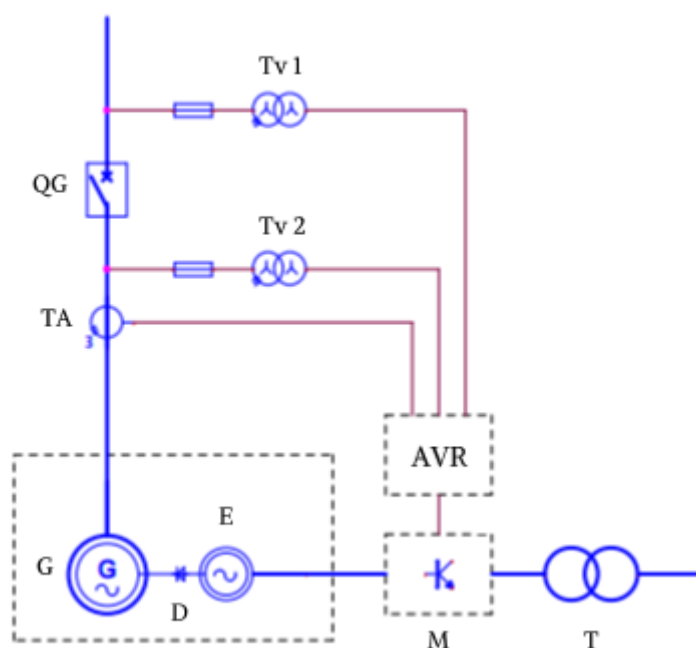
Podle norma ČSN 35 0255 [4] pro technické požadavky a metody zkoušení budicích systémů turboalternátorů, hydroalternátorů a synchronních kompenzátorů se jedná o kompletní budicí soustavu, pokud obsahuje následující prvky:

- 1) budič,
- 2) automatický regulátor napětí,
- 3) rezervní automatický regulátor napětí nebo zařízení pro ruční řízení,
- 4) zařízení pro odbuzení rotoru,
- 5) vypínače a odpojovače v obvodu proudu dodávaného budičem,
- 6) ochrany rotoru alternátoru proti přepětí a přetížení,
- 7) zařízení pro automatizované řízení, signalizaci a ochranu při vnitřních poruchách budicího systému,
- 8) kontrolní a měřicí přístroje.

Podle provedení budiče, tedy způsobu dodávky stejnosměrného proudu do budicího vinutí, dělíme budicí soustavy na statické a bezkartáčové. Statické budicí systémy využívají k dodávce stejnosměrného budicího proudu výkonových polovodičových prvků, které dodávají potřebný proud sběracím ústrojím (kartáči sběracích kroužků) do budicího vinutí. Výkonový měnič je řízen pomocí regulátoru napětí. Bezkartáčové budicí systémy odstraňují nevýhodu problematického sběracího ústrojí. To je zde nahrazeno střídavým budičem – alternátorem – s buzením na statoru a kotvou na rotoru. Na společné hřídeli budiče a synchronního stroje se nachází též rotující diodový usměrňovač

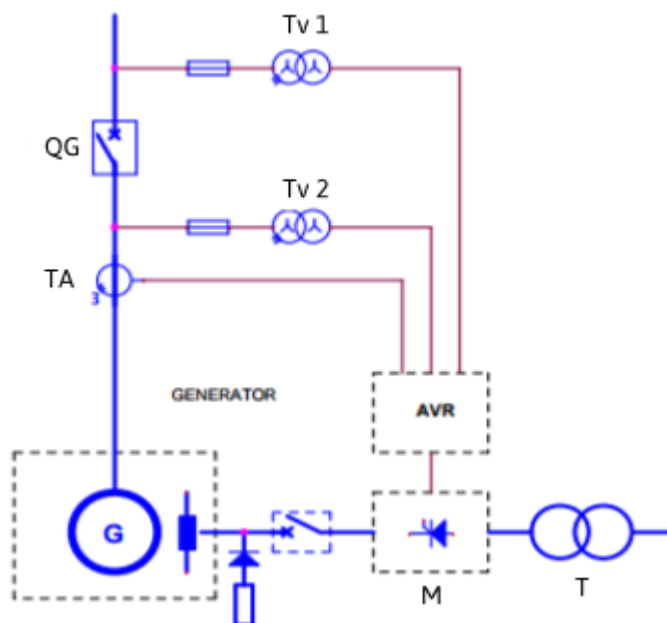
usměrňující výstup budiče, jenž je připojen přímo k budicímu vinutí bez použití sběracích kroužků nebo kartáčů.

V dnešní době jsou kvůli jednodušší údržbě a stabilnějšímu dodávání budicího proudu využívány spíše bezkartáčové budicí systémy. Referenční listina dokazující převážný zájem o bezkartáčové budicí systémy firmy dodávající budicí soustavy se nachází ve druhé příloze práce. Příklad zjednodušeného bezkartáčového budicího systému je uveden na Obr. 1.



Obr. 1 Bezkartáčová budicí soustava napájená ze sítě vlastní spotřeby, převzato a upraveno [3]

Budicí vinutí G alternátoru je na společné hřídeli se střídavým budičem E, na jehož výstupu se nachází rotující diodový usměrňovač D. Stator budiče je připojen k IGBT měniči M. Ten je v tomto případě napájen ze sítě vlastní spotřeby a řízen pomocí automatického regulátoru napětí AVR. Jednotlivé typy takových soustav se obvykle liší ve způsobu napájení měniče (napájení pomocí generátoru s permanentními magnety, z baterie, z pomocného vinutí, ...).



Obr. 2 Statická budicí soustava napájená ze sítě vlastní spotřeby, převzato a upraveno [3]

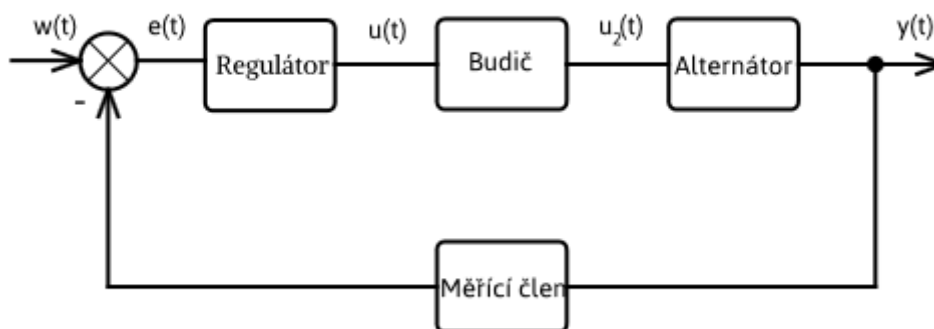
Příklad zapojení statického budicího systému je na Obr. 2. Budicí proud dodává řízený tyristorový můstkový usměrňovač M přes kroužky. Měnič je řízen automatickým regulátorem napětí AVR a je napájen ze sítě vlastní spotřeby výkonovým transformátorem. Takové transformátory bývají nejčastěji provedeny v zapojení hvězda-trojúhelník. Ve schématu je zobrazen mezi generátorem a měničem nezbytný odbuzovač ve formě odbuzovacího odporu, jehož funkce bude popsána v kapitole Z hlediska ochrany bývá samotný měnič doplněn pojistkami a vlastním chlazením. Funkce AVR jsou kontrolovány odezvou měřicích prvků, nejčastěji měřicích transformátorů. Generátor lze oddělit od sítě bezpečně generátorovým vypínačem QG.

2.2 Princip regulace soustavy

Automatická regulace nastává v případě, kdy prvek zvaný regulátor na základě vyhodnocené regulační odchylky ze zpětné vazby a požadované hodnoty na vstupu regulační soustavy vytvoří akční veličinu k její eliminaci.

Na Obr. 3 je zobrazeno zjednodušené blokové schéma regulace napětí na svorkách synchronního generátoru. Vstupní hodnota $w(t)$ je v našem případě požadované napětí na svorkách alternátoru, které chceme udržet. Požadovaná hodnota je porovnána se skutečnou naměřenou hodnotou měřicím členem. Vyhodnocením vzniklé regulační

odchylky $e(t)$ regulátorem vzniká akční veličina $u(t)$. Budič na základě akční veličiny $u(t)$ vyhodnotí potřebnou vstupní hodnotu $u_2(t)$ budicího proudu do budicího vinutí alternátoru. Výstupní hodnotou $y(t)$ celého systému je napětí na svorkách alternátoru.



Obr. 3 Blokové schéma regulace napětí na svorkách alternátoru, převzato a upraveno z [4]

2.3 Požadavky na budicí soustavy

Na budicí soustavy jsou kladeny vysoké požadavky, které z různých hledisek často přesahují samotné požadavky na alternátor. Uvedené požadavky platí pro všechny stavy (poruchové a přechodové děje), ve kterých se budicí soustava může nacházet. Důraz je kladen výhradně na bezporuchovost, stabilitu a rychlost regulace. Jednotlivé požadavky se dají rozdělit do několika kategorií:

- 1) **Vysoká provozní spolehlivost** soustavy, která často přesahuje spolehlivost buzeného alternátoru. Tato spolehlivost je značně ovlivněna hlavně využitím statického budiče, která je snížena jeho sběracím ústrojím. Pro zvýšení spolehlivosti se využívá rezervní budič.
- 2) **Plynulá a rozsáhlá regulace budicího proudu a napětí** zajišťuje celý pracovní rozsah alternátoru s dostatečnou stropní rezervou (maximální proud/napětí, které může při definovaných podmínkách budicí systém dodávat). Obecný rozsah dle [14] je udáván v rozsahu 1,6 až 1,8 násobku jmenovitého napětí U_n pro soustavy bezkartáčové a 1,6 až 2 násobku jmenovitého napětí U_n pro soustavy statické.
- 3) **Udržení velikosti svorkového napětí alternátoru** kvůli zachování napěťových poměrů u spotřebitelů. Buzený stroj by měl mít trvale udržované napětí nezávislé na činném zatížení stroje alespoň pro zajištění vlastní spotřeby bloku.

- 4) **Rychlost změny budicího napětí** je charakterizována odezvou budiče naprázdno jako střední rychlost změny poměrného napětí budiče za 0,5 sekundy. Rychlost budicího napětí se pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 sec.
- 5) **Rychlost odbuzení alternátoru** musí být co nejrychlejší, aby byly případné škody co nejnižší. Přebytek energie v nabuzeném stroji způsobí na výstupu přepětí, které může poškodit jednak připojené spotřebiče na síti nebo samotný alternátor. Úplným odbuzením alternátoru se rozumí zánik magnetického toku v alternátoru. Norma [4] uvádí potřebný vypínací čas odbuzovače budicí soustavy nižší než 0,1 sekundy.
- Moderní budicí soustavy jsou vybaveny dvěma systémy odbuzení. Jedná se o provozní odbuzovač a havarijní odbuzovač. **Provozní odbuzovače** jsou realizované invertorovým chodem tyristorového usměrňovače v případě potřeby odbuzení. **Havarijní odbuzovače** jsou tvořeny rychlovypínačem, jehož spínací kontakty odepnou budicí vinutí od zdroje (od měniče) a rozpínací kontakty připojí paralelně k budicímu vinutí odbuzovací odpor, ve kterém se zmaří energie budicího vinutí.
- 6) **Teplotní odolnost** musí být zajištěna pro všechny pracovní stavy. Tato odolnost je závislá především na proudovém zatížení soustavy. Zejména je kladen důraz na polovodičové součástky použité v budicí soustavě.

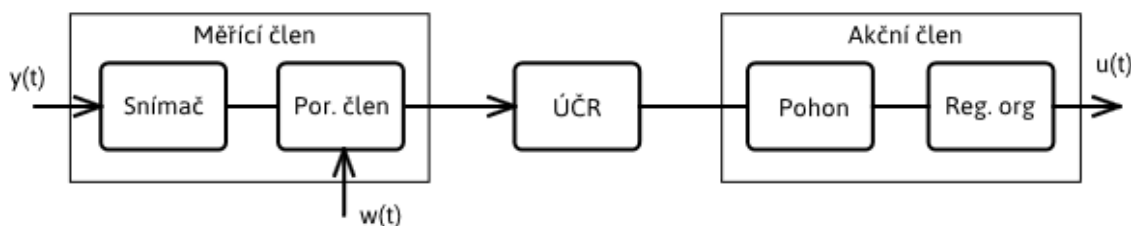
3. Regulátory buzení

3.1 Regulátor

Činnost regulátoru spočívá v udržení požadované hodnoty na výstupu soustavy. Na základě vyhodnocení regulační odchylky $e(t)$, která vzniká porovnáním požadované hodnoty a skutečné naměřené hodnoty na výstupu, vytváří akční veličinu $u(t)$ k eliminaci této odchylky. Princip funkce regulované soustavy budicího systému, jehož je regulátor součástí, byl nastíněn v kapitole 2.2.

Regulátory lze rozdělit podle způsobu napájení:

- 1) Přímé – energii potřebnou ke své činnosti získávají z regulované soustavy.
- 2) Nepřímé – energii získávají z externího zdroje.



Obr. 4 Blokové schéma nepřímého regulátoru, převzato a upraveno z [1]

Na Obr. 4 je zobrazeno obecné schéma nepřímého regulátoru. Snímač přivádí skutečnou hodnotu $y(t)$ do porovnávacího členu, kde je hodnota porovnána s nastavenou požadovanou hodnotou $w(t)$. Následně pokračuje do ústředního členu regulátoru (ÚČR), který zpracuje regulační odchylku podle matematického zákona daný typem regulátoru. Ústřední člen regulátoru je nejčastěji proveden jako zesilovač se zpětnou vazbou. Zpětná vazba nám slouží k vyhodnocení regulační odchylky. Vypočtený člen je vyslán pro pohon, který pohání regulační orgán. Pohon je nejčastěji realizován jako polohový servomechanismus [1]. Regulační orgán řídí průtok energie řízeným systémem.

Pro zhodnocení kvality regulátoru využíváme několik hledisek. Skutečná regulační smyčka, obsahuje kromě zmíněných částí v kapitole 2.2 také tzv. poruchovou veličinu $d(t)$. Což je veličina, která reprezentuje změnu vlastností řízeného procesu (v našem

případě alternátoru) a využívá se k modelování náhodného rušení kdekoli v systému. Mezi sledované vlastnosti regulátoru řadíme:

- 1) schopnost regulované veličiny $y(t)$ sledovat vyhovujícím způsobem žádanou hodnotu $w(t)$,
- 2) schopnost vhodně potlačit vliv případné poruchové veličiny $d(t)$ na regulovanou veličinu $y(t)$,
- 3) stabilitu regulační smyčky při změně parametrů řízeného systému nebo regulátoru.

3.2 Typy regulátorů

Typ regulátoru udává, jakým způsobem bude zpracována regulační odchylka matematickým výpočtem. Mezi základní členy spojitých regulátorů řadíme proporcionální (P), integrační (I) a derivační člen (D). Mezi základní typy regulátorů řadíme P, PI a PD regulátor a úplný PID regulátor. U každého regulátoru je nutné pomocí těchto členů určit a posléze doladit parametry. Možné metody (metoda Zielger-Nichols, metoda přechodové charakteristiky, metoda Whitneye, ...) k počátečnímu určení parametrů a k následnému ladění regulátoru jsou dány specifickými postupy a empirickými vztahy. Jedná se o následující parametry:

- zesílení regulátoru K_0 ,
- integrační časovou konstantu T_I ,
- derivační časovou konstantu T_D .

Vztah mezi akční veličinou $u(t)$ a regulační odchylkou $e(t)$ vyjádříme v čase:

$$u(t) = K_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(r) dr + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

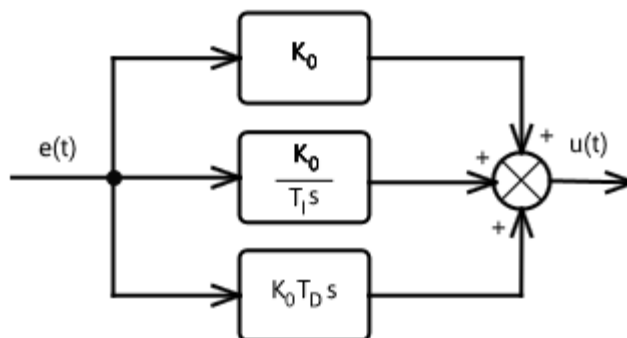
kterou upravíme pomocí Laplaceovy transformace do proměnné s :

$$U(s) = K_0 \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] E(s)$$

a vyjádříme si přenosovou funkci regulátoru:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_0 \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right]$$

Z výsledného vztahu získáváme finální konstanty regulátoru, které ovlivní přenos samotného regulátoru. Aby se složky regulátoru neovlivnily navzájem, je třeba je realizovat paralelně vůči sobě jak je uvedeno na Obr. 5.



Obr. 5 Realizace složek PID regulátoru

3.2.1 Proporcionální člen

Proporcionální člen regulátoru určuje, o jakou hodnotu se musí změnit vstupní signál regulátoru, aby se akční člen přestavil z původní hodnoty 0 % do koncové hodnoty 100 %. Reprezentuje tedy zesílení regulátoru. Proporcionální složka reaguje okamžitě na stav regulační odchylky $e(t)$.

3.2.2 Integrovní člen

Integrovní časová konstanta T_I vyjadřuje čas, který potřebuje samotný I regulátor do polohy, které dosáhne PI regulátor v čase $t = 0$ vlivem své proporcionální složky. Pracuje pouze s přechodnou složkou regulační odchylky $e(t)$ a zajišťuje tím stabilitu regulačního obvodu. Integrovní složka vyjadřuje, jak moc zasahuje regulační odchylka do regulačního děje.

Regulátory, které obsahují integrovní člen je potřeba doplnit o tzv. „anti-windup zapojení“ proti jevu zvanému „windup“ efekt. Jedná se o jev, kdy integrovní složka může narůstat za konečný rozsah hodnot regulátoru. Nastává v případě, kdy se na vstupu regulátoru objeví větší hodnota regulační odchylky $e(t)$. Než regulační odchylka $e(t)$ klesne na nulovou hodnotu, integrovní složka narůstá bez vlivu na výstup regulátoru. Až v případě změny znaménka regulační odchylky začne velikost integrovní složky klesat.

Pokles této integrační složky je pak natolik pomalý, že se neprojeví na hodnotě akční veličiny. Tím vznikne velký překmit a regulační pochod je pak kmitavý. Vlivem windup efektu můžeme docílit i nestability regulačního obvodu.

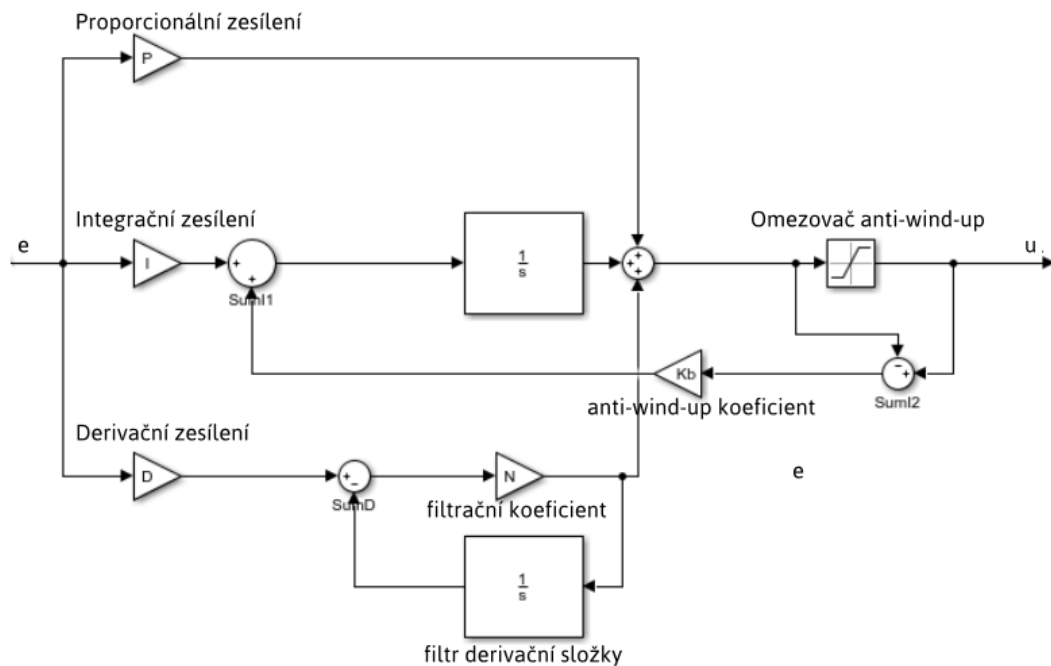
3.2.3 Derivační člen

Derivační časová konstanta T_D vyjadřuje čas, který potřebuje samotný P regulátor do polohy, které dosáhne PD regulátor v čase $t = 0$ vlivem své derivační složky. Derivační složka předpovídá chování regulační odchylky $e(t)$. Regulátor se samotnou D složkou není schopen samostatné funkce.

Regulátor s D složkou je často doplněna o filtr, který zabraňuje zesílení šumu nebo vyšších harmonických.

3.2.4 PID regulátor

Obr. 6 zobrazuje úplné schéma PID regulátoru. Vstupem do regulátoru je regulační odchylka, která pokračuje do samotných složek PID regulátoru. Integrační složka je vybavena anti-windup opatřením realizovaným omezovačem a sumačním bodem, kde je rozdíl vstupu a výstupu omezovače porovnán. Případný záporný výsledek pokračuje do sumačního uzle integračního členu, kde je přesah integrační meze zpětně odečten. Anti-windup koeficient K_b je obvykle nastaven jako integrační konstanta T_I . Derivační složka je vybavena filtrem $1/s$ a filtračním koeficientem N proti vlivu případného šumu nebo vyšších harmonických. Výstupem regulátoru je již zmíněný akční člen $u(t)$.

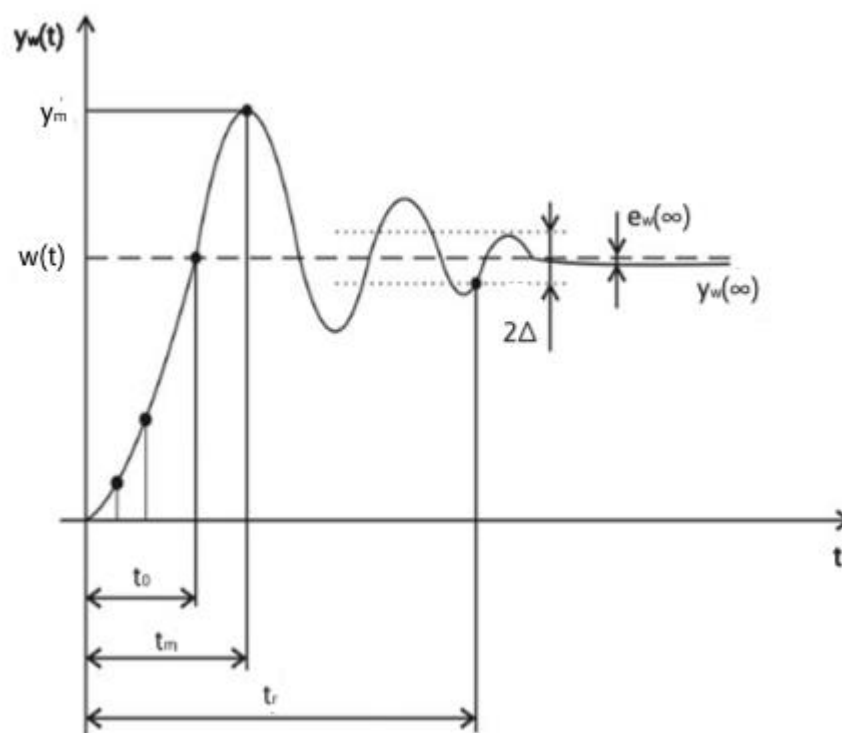


Obr. 6 Schéma PID regulátoru s anti-windup, převzato a upraveno z [15]

3.3 Kvalita regulace

Od regulované soustavy očekáváme co nejrychlejší a nejpřesnější sledování požadované veličiny s požadavkem na stabilitu regulačního děje. Tyto požadavky jsou v praxi však často protichůdné. Zrychlením regulace můžeme docílit nestability regulační smyčky, neboť u přechodných stavů nelze předpokládat budoucí vývoj.

Kvalitu regulace lze posoudit např. podle průběhu přechodové charakteristiky systému (reakce systému v čase na jednotkový skok – Heavisideův skok). Na Obr. 7 je uveden příklad odezvy systému na jednotkový skok regulované veličiny $y_w(t)$.



Obr. 7 Přejchodová charakteristika

Hodnota $w(t)$ zobrazuje požadovanou hodnotu, na které má regulátor udržovat regulovanou veličinu $y_w(t)$.

Kvalitu regulace z přechodové charakteristiky určíme z několika ukazatelů, kterými jsou:

- t_r – doba, za kterou proběhne ustálení regulované hodnoty do tzv. tolerančního pásma regulace 2Δ . Hodnota tolerančního pásma se pohybuje maximálně do 5 % $y_w(\infty)$,
- y_m – maximální hodnota regulované veličiny. Z veličiny můžeme určit samotný překmit, což je $y_m - w(t)$,
- t_m – doba, za kterou dosáhne regulovaná veličina maximální hodnoty,
- $e_w(\infty)$ – trvalá regulační odchylka,
- čas, za který naroste veličina z 10 % na 90 % $w(t)$.

Jiné regulační děje mohou také zobrazovat zpoždění reakce regulátoru. Kvůli nárokům budících systémů se udává doba ustálení regulace t_r . Měla by být co nejrychlejší s přijatelným překmitem. Překmit by měl být v ideálním případě maximálně 15 % velikosti požadované hodnoty $w(t)$. Trvalá regulační odchylka $e_w(\infty)$ by měla být nulová.

3.4 Automatický regulátor napětí (AVR)

Moderní mikroprocesorové regulátory napětí jsou dnes řízeny zcela automaticky. Jsou propojeny s centrálním řídicím systémem a systémem řízení elektrizační soustavy. Komunikace a obsluha regulátoru probíhá pomocí různých hardwarových rozhraní. Samotný název regulátoru napětí je obecně zavádějící, jelikož se v dnešní době nejedná pouze o primární funkci regulace napětí na svorkách alternátoru. Takové označení je používáno spíše z důvodu dřívější terminologie. Dnešní regulátory již obsahují řadu nejen řídicích a kontrolních funkcí, ale je kladen důraz zejména na ochranné funkce regulátoru. Automatický regulátor napětí musí zajistit přenos pomocí digitální komunikace všech měřených a řízených veličin. V moderních AVR jsou také zahrnuty automatické fázovače, které optimalizují připojení synchronního stroje na síť, aby nedošlo připojením k poklesu napětí sítě nebo ovlivnění stability. Mimo zmíněné regulace napětí pomocí budicího proudu alternátoru existují i další možnosti zahrnující kontrolu a řízení regulátoru.

Mezi základní regulační funkce řadíme:

- regulaci budicího proudu generátoru ručním řízením,
- regulaci napětí v chodu naprázdno,
- regulaci napětí v ostrovním provozu,
- regulaci napětí se statikou (kompenzace úbytku napětí způsobenou jalovým proudem) v paralelním provozu,
- regulaci účinníku $\cos \varphi$.

- regulaci jalového výkonu Q .

Ochranné funkce regulátoru pro samotný alternátor jsou realizovány pomocí tzv. omezovačů. Jejich úkolem je pevně a rychle omezit kontrolovanou hodnotu v případě překročení stanovené meze na určenou mezní hodnotu. Aby byla zajištěna spolehlivá ochrana alternátoru, nesmí být tyto funkce ovlivněny činností jiného zařízení.

Mezi základní ochranné funkce řadíme:

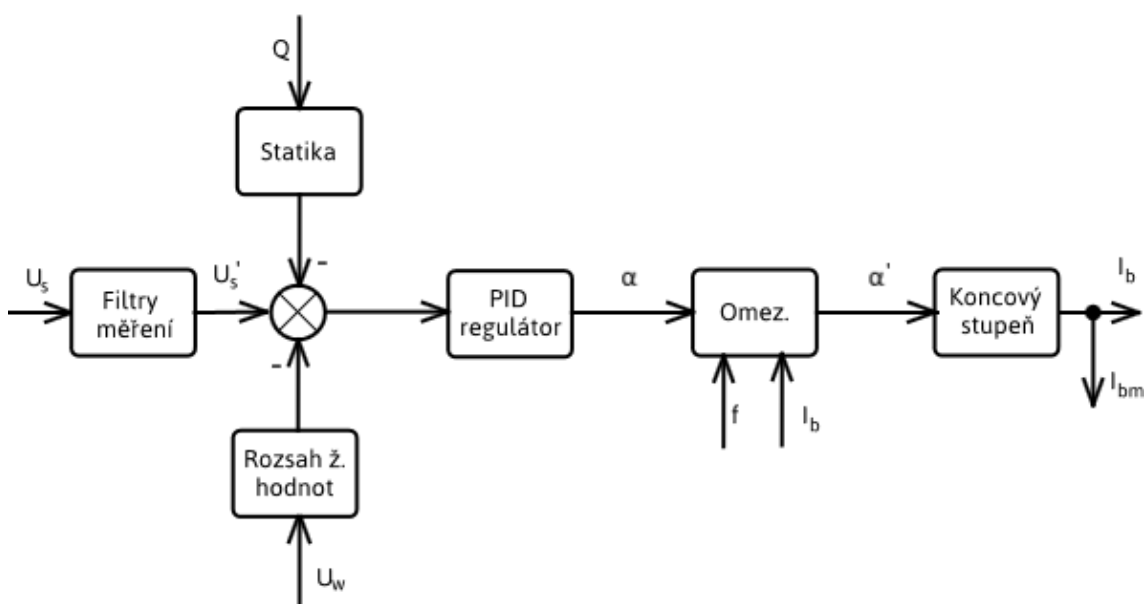
- omezovač rotorového proudu,
- omezovač statorového proudu,
- hlídač meze podbuzení,

- podfrekvenční ochranu U/f ,
- stabilizaci výkonu systémovým stabilizátorem (PSS – power system stabilizer)

3.4.1 Regulační smyčky AVR TE 5403

Regulátor buzení AVR TE 5403 je mikroprocesorový regulátor firmy TENEL s typovým označením TE 5403. Jeho základem je mikroprocesor Texas Instrumental TMS320S28355. Regulátor je vybaven sériovou komunikační linkou RS 485, paměti EPROM (mazatelná paměť ke čtení údajů) a EEPROM (elektricky mazatelná paměť ke čtení údajů) pro firemní programové vybavení a pro uložení parametrů regulátoru.

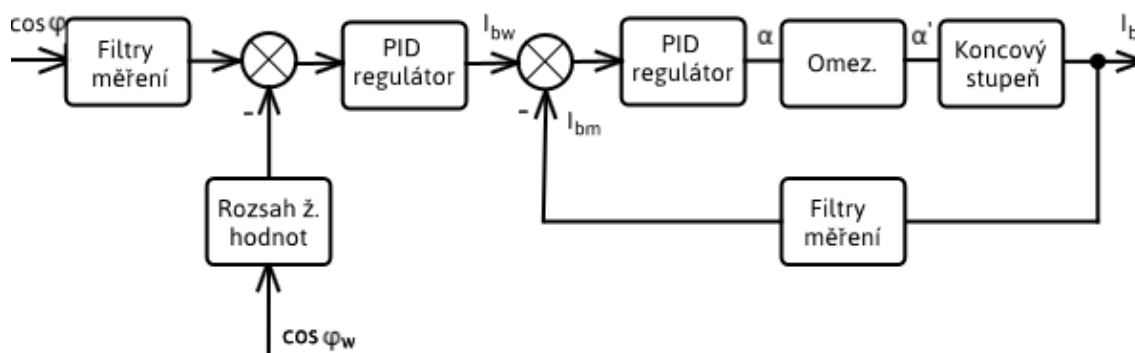
Na Obr. 8 je uvedeno blokové schéma regulátoru napětí AVR TE 5403 ve smyčce napětí. Měřené napětí na svorkách alternátoru U_s je porovnáváno se žádanou hodnotou napětí U_w a získáváme regulační odchylku pro PID regulátor. V ustáleném stavu by tato odchylka byla rovna nule. Blok statiky zajišťuje kompenzaci úbytku napětí na blokovém transformátoru vlivem průchodu jalového proudu. Výsledkem smyčky je napětí na svorkách alternátoru, které mění budicí proud I_b tekoucí do rotorového vinutí alternátoru. Ten je samostatně kontrolován regulátorem budicího proudu.



Obr. 8 Blokové schéma AVR TE 5403 ve smyčce napětí se statikou, převzato a upraveno z [3]

Obr. 9 zobrazuje regulaci účinníku $\cos \varphi$. Regulační smyčka kromě hlavní regulace účinníku obsahuje podřízenou regulační smyčku pro dodávaný budicí proud. Ochrany

jsou zajištěny pomocí omezovačů, které musí nehledě na žádanou hodnotu udržovat nastavenou stropní hodnotu.



Obr. 9 Blokové schéma AVR TE-5403 ve smyčce účinníku $\cos \varphi$, převzato a upraveno z [3]

3.4.2 Ochranné funkce

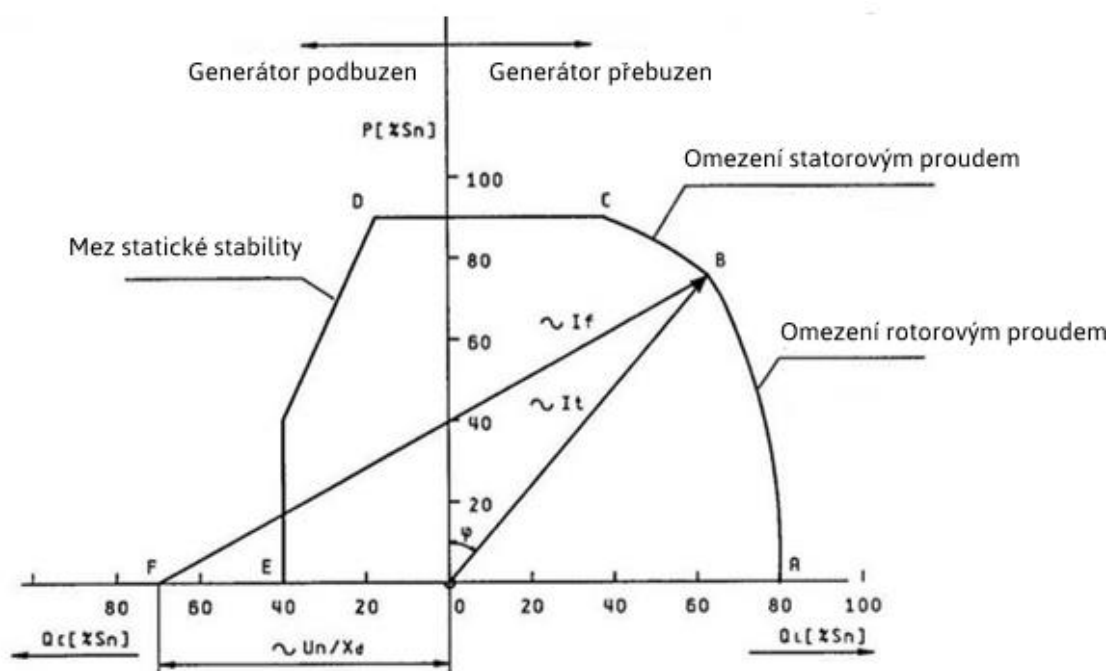
Automatický regulátor napětí zajišťuje primárně ochranné funkce proti poškození samotného alternátoru, respektive jeho částí. Nutno podotknout, že mimo regulátor buzení existují také samotné digitální ochrany v případě, kdy AVR ochranu nezajistí. Tyto ochrany mají obvykle za úkol alternátor úplně odstavit. Mezi takové ochrany patří nejčastěji:

- ochrana proti vnitřním zkratům – rozdílová ochrana, nadproudová ochrana,
- ochrana proti vnějším zkratům – nadproudová zkratová ochrana,
- ochrana proti zemnímu spojení statoru – napěťově-kmitočtová ochrana,
- ochrana proti přepětí,
- ochrana proti ztrátě buzení – impedanční ochrana,
- ochrana proti zpětnému výkonu – wattová ochrana,
- ochrana proti nesymetrickému zatížení,
- ochrana proti ložiskovým proudům – průvlekový transformátor proudu.

Některé poruchy lze pouze signalizovat. V takovém případě musí obsluha vykonat potřebnou činnost k odstranění poruchy. Jedná se o zemní spojení rotoru alternátoru kvůli poškozené izolaci. Takový problém lze pouze signalizovat, neboť neexistuje ochrana, která by jej odstranila. Podobný problém nastává i u trvalého proudového přetížení, které může svým vlivem poškodit izolaci a způsobit zkrat.

Potřebné meze, před kterými je nutné alternátor hlídat, jsou uvedeny v provozním diagramu. Provozní diagram generátoru, tzv. P - Q diagram, je závislostí činného P a jalového Q výkonu synchronního generátoru. Udává podmínky omezení těchto výkonů samotného stroje a zobrazuje aktuální provozní stav stroje, jenž je charakterizován pracovním bodem. Provozní diagram musí být povinně obsažen v každé dokumentaci stroje od výrobce.

Příklad provozního diagramu je uveden na Obr. 10.



Obr. 10 P - Q Diagram synchronního stroje, převzato a upraveno z [5]

Provozní diagram je rozdělen na pravou a levou část podél svislé osy. Pokud se pracovní bod nachází v pravé části diagramu, je generátor v přebuzeném stavu a vyrábí jalový výkon Q . Pokud se nachází v levé části, je v podbuzeném stavu a jalový výkon Q odebírá. Provozní diagram je charakterizován několika úseky:

- **úsek A-B** charakterizuje omezení maximálním budícím proudem I_f , který stroj nesmí překročit vzhledem k dovolenému oteplení rotorového vinutí. Tento úsek kružnice je deformován vlivem syčení magnetického obvodu.
- **úsek B-C** charakterizuje omezení maximálním proudem statoru I_t , který stroj nesmí překročit vzhledem k dovolenému oteplení statorového vinutí.

- **úsek C-D** charakterizuje maximální činný výkon, který nesmí překročit hodnotu pohonného stroje.
- **úsek D-E** charakterizuje mez statické stability stroje, kterou stroj nesmí překročit, aby nevypadl ze synchronismu. Tato mez je překročena v případě, kdy tzv. zátěžný úhel (úhel mezi magnetizačním a budicím proudem) stroje přesáhne hodnotu $\sin \delta > 90^\circ$. Do oblasti meze stability zahrnujeme i potřebný jalový výkon, který odebírá při nulovém budicím proudu (přímka ze směru od osy Q).

3.4.2.1 Omezovač rotorového proudu (ORP)

Omezovač hlídající velikost budicího (rotorového) proudu alternátoru chrání rotorové vinutí před nadměrným oteplením vlivem protékajícího proudu. Funguje na dvoustupňovém principu. První stupeň je realizován časovačem, který připouští dočasné přetížení stroje elektrickým proudem při pomalých změnách. Regulátor je v tomto stupni schopen udržet požadované svorkové napětí alternátoru i v případě výjimečných stavů (pokles napětí sítě). Druhý stupeň reaguje okamžitě po přesáhnutí definované mezní hodnoty budicího proudu. Tato hodnota je okamžitě snížena na definovanou mezní hodnotu a po uplynulé době snížena na nižší mezní hodnotu. To je dáno tím, že už se jedná o kritickou hodnotu a její dlouhodobé působení by mělo nepříznivý vliv na vinutí rotoru. Čas snížení na limitní mezní je dán mírou převýšení mezní hodnoty. Čím vyšší je tato hodnota, tím rychleji bude reagovat časové zpoždění. Tento stupeň je realizován pomocí časového členu nebo také integrátoru.

3.4.2.2 Omezovač statorového proudu (OSP)

Omezovač hlídá velikost statorového proudu alternátoru a tím chrání stator před tepelným přetížením. Statorový proud se mění v závislosti na činném výkonu. Omezovač má za úkol držet pracovní bod alternátoru uvnitř pracovní oblasti. Omezovač statorového proudu je podobně jako omezovač rotorového proudu realizován dvoustupňově. První stupeň toleruje zvýšené přebuzení, aby generátor udržel svorkové napětí. Druhý stupeň reaguje v případě, kdy je překročena definovaná mezní hodnota činného proudu, tedy pokud alternátor pracuje mimo svou pracovní oblast. V okamžiku překročení mezní hodnoty omezovač udržuje hodnotu jalového výkonu nulovou. Tento člen je také realizován pomocí **integrátoru**, který snižuje stropní hodnotu následně na danou limitní hodnotu.

3.4.2.3 Hlídač meze podbuzení (HMP)

Hlídač zajišťuje pracovní stav alternátoru nepřesahující mez statické stability. Při překročení meze statické stability by vypadl ze synchronismu. V případě jeho reakce dochází ke zvýšení svorkového napětí alternátoru tak, aby se pracovní bod dostal zpět na limitní charakteristiku. Omezovač je realizován bez časového zpoždění, aby zamezil reakci ochran proti podbuzení alternátoru, které by vedly k zastavení alternátoru proti nežádoucímu stavu. Mez statické stability zobrazuje P - Q diagram stroje popsany v kapitole 3.4.2. Je realizován pomocí PI regulátoru.

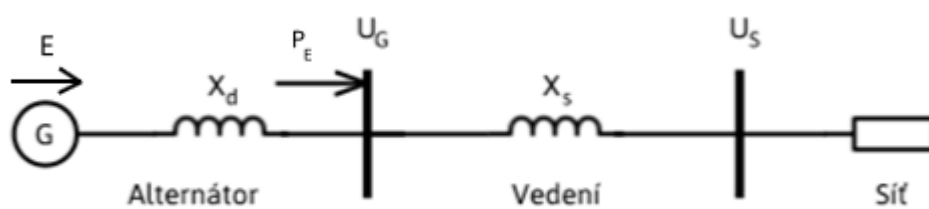
3.4.2.4 Podfrekvenční ochrana U/f

Podfrekvenční ochrana U/f chrání alternátor i blokový transformátor před nasycením magnetického obvodu. Nasycením magnetického obvodu měníme magnetické vlastnosti použitého materiálu. V důsledku kolísání kmitočtu v síti může dojít k výpadku velkých transformátorů vlivem tepelného přetížení vzniklými vířivými proudy. Omezovač funguje na principu kontroly limitního poměru $U/f = \text{konst.}$, který v případě přesáhnutí tohoto poměru sníží napětí generátoru, aby nedošlo k výpadku generátoru ze sítě vlivem nárazového kmitočtu. Je realizován podobně jako omezovače proudu pomocí časového členu, který sníží napětí současně s kmitočtem pod definovanou mez.

3.4.2.5 Power System Stabilizator (PSS)

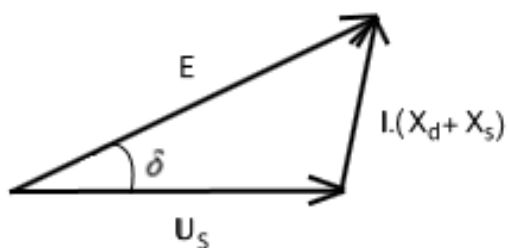
Systémový stabilizátor slouží k tlumení kyvů mezi blízkými generátory (2-3 Hz), k tlumení lokálních kyvů způsobených rotorem synchronního generátoru (0,8-2 Hz) a k tlumení kyvů systémových (0,1-0,8 Hz). Nedostatečné tlumení oscilací snižuje schopnost stabilně přenášet činný výkon v síti. V případě poruchy PSS obvykle nezajišťuje kompletní utlumení kmitů, ale snaží se udržet alternátor v přijatelném stavu rovnováhy. Rozvoj a rozsah komplikovaného PSS bývá know-how každé firmy specializující se na budicí systémy.

Pro základní popis principu systému PSS vyjdeme ze zjednodušeného schématu alternátoru dodávajícího činný výkon P_E do sítě, jak je načrtnuto na Obr. 11.



Obr. 11 Zjednodušené schéma vedení

Pro zjednodušené schéma vedení sestavíme fázorový diagram:



Obr. 12 Fázorový diagram zjednodušeného schématu vedení

Pro činný výkon dodávaný alternátorem P_E pak platí:

$$P_E = \frac{E U_S}{X_d + X_s} \sin \delta ,$$

kde E je vnitřní napětí generátoru a δ zátěžný úhel stroje.

Činnost PSS je značně ovlivněna činností budicího systému, jelikož změnou budicího proudu, tedy udržováním svorkového napětí alternátoru, můžeme docílit i krátkodobé změny dodávaného elektrického výkonu P_E . Princip systémového stabilizátoru spočívá v tvorbě složky elektrického momentu, která působí proti změnám otáček rotoru.

4. Nastavení regulátoru buzení

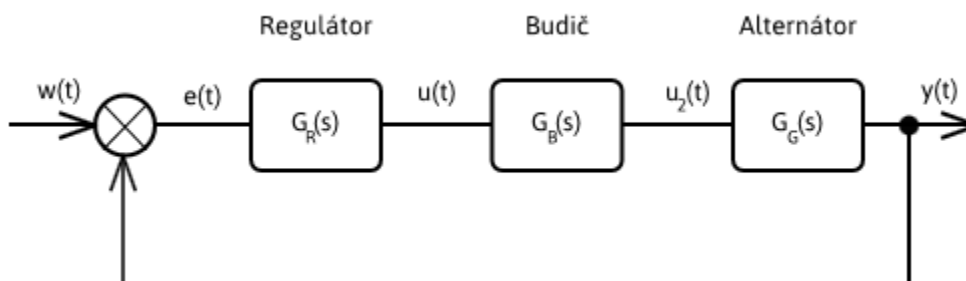
4.1 Výpočet konstant regulátoru

Seřízení konstant regulátoru je složitý úkol, ke kterému potřebujeme znát mnoho parametrů celého regulovaného systému. Ze základních parametrů uvedme vlastnosti regulované soustavy (použitý generátor, budicí systém), požadovaný průběh regulačního průběhu, provozní podmínky a požadavky na jakost regulace. Pro teoretický odhad konstant regulátoru existuje řada empirických metod. Mezi známější patří metoda Zieglerova-Nicholsova, metoda Whiteleyho, metoda Naslina nebo metoda optimálního modulu.

K odhadu konstant lze využít i frekvenční metody. Frekvenční metodou upravujeme frekvenční charakteristiky otevřené regulační smyčky, abychom splnili dané ukazatele kvality regulace:

- šířku přenášeného pásma,
- rezonanční zesílení,
- amplitudová a fázová bezpečnost.

Na Obr. 13 je uveden zjednodušený model uzavřené regulační smyčky pro odhad konstant regulátoru regulační smyčky napětí naprázdno U_{g0} . Uvažujeme statický budicí systém s přenosovou funkcí $G_B(s)$, regulátor typu PID s přenosovou funkcí $G_R(s)$ a buzený alternátor s přenosovou funkcí $G_G(s)$. Model využijeme k výpočtu celkového přenosu systému $G_s(s)$.

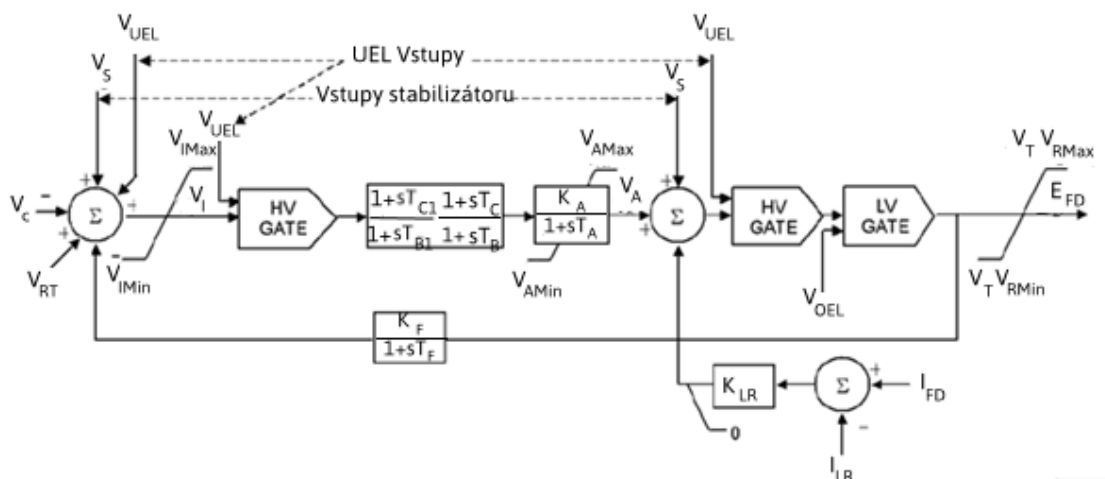


Obr. 13 Výpočet přenosu systému

Pro přenos regulátoru platí:

$$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$$

Přenos budiče $G_B(s)$ určíme pomocí zjednodušeného modelu statického budičeho systému ST1A [9] uvedeném na Obr. 14.



Obr. 14 Model ST1A statického budičeho systému, převzato a upraveno z [9]

Přenos budičeho systému $G_B(s)$ získáme zjednodušením modelu:

$$G_B(s) = \frac{K_A}{1+sT_A} \frac{1+sT_C}{1+sT_B} = \frac{195}{1+0.067s} \frac{1+0.58s}{1+1.25s} = \frac{113,1s+195}{0,084s^2+1,317s+1}$$

Přehled dosazených konstant pro konkrétní typ budičeho systému nalezneme v Tab. 1

Pro výpočet přenosu generátoru využijeme odvozeného vztahu dle [10]:

$$G_G(s) = G_0 \frac{1+sT_{kd}}{(1+sT_{d0}')(1+sT_{d0}'')}$$

Pomocí parametrů generátoru od výrobce vypočteme zbylé konstanty dle [11]:

$$T_{d0}'' = \frac{X_d}{X_d''} T_d'' = \frac{0,88}{0,056} 0,017 = 0,265 \text{ s}$$

$$G_0 = \frac{U_{gn}}{U_{gbn}} = \frac{400}{46} = 8,7$$

potom přenos synchronního generátoru je:

$$G_G(s) = G_0 \frac{1+sT_{kd}}{(1+sT_{d0}')(1+sT_{d0}'')} = 8,7 \frac{1+0,046s}{(1+1,879s)(1+0,265s)} = \frac{0,4s+8,7}{0,498s^2+2,144s+1}$$

Pak pro celkový přenos soustrojí platí:

$$G_s(s) = G_B(s)G_G(s) = \frac{113,1s + 195}{0,084s^2 + 1,317s + 1} \frac{0,4s + 8,7}{0,498s^2 + 2,144s + 1}$$

Pro celkový přenos řízení celého systému můžeme pak psát:

$$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)}$$

$$G_w(s) = \frac{\frac{r_0s + r_{-1} + r_1s^2}{s} \frac{45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5}{0,042s^4 + 0,836s^3 + 3,406s^2 + 3,461s + 1}}{1 + \frac{r_0s + r_{-1} + r_1s^2}{s} \frac{45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5}{0,042s^4 + 0,836s^3 + 3,406s^2 + 3,461s + 1}}$$

K počáteční syntéze automatického regulátoru napětí typu PID využijeme algebraickou metodu kritického zesílení regulátoru (metoda Ziegler-Nicholse) a pro porovnání metodu standartních tvarů (metoda Whiteleyho). Syntézou rozumíme vhodnou optimalizaci konstant přenosu regulátoru pro dodržení dané jakosti regulačního pochodu.

K_A	195	T_{B1}	0
T_A	0.067	T_{C1}	0
T_B	1,25	K_F	0
T_C	0,58	T_F	0
V_{RMAX}	60	V_T	0
V_{RMIN}	0	K_C	0
I_{LR}	0	K_{LR}	0

Tab. 1 Konstanty budicího systému

4.1.1 Metoda kritického zesílení regulátoru

Metoda kritického zesílení (Ziegler-Nichols) je jednou z algebraických metod syntézy regulátoru. Jedná se o metodu uzavřené smyčky. Základním principem metody je přivedení regulačního obvodu na mez stability. V takovém stavu začne regulovaná veličina regulačního obvodu kmitat s konstantní amplitudou. Získáme kritické zesílení r_{0k} a periodu kritických kmitů T_k . Pro daný typ regulátoru využijeme empirických vztahů uvedených v Tab. 2 výpočet konstant regulátoru.

Regulátor pracuje pouze s proporcionalní složkou r_0 . Složky integrační r_{-1} a derivační r_1 jsou vyřazeny úpravou časových konstant:

$$r_{-1} = 0 \text{ a } r_1 = 0$$

Ze vztahu pro přenos řízení získáme pak tvar:

$$G_w(s) = \frac{\frac{r_0 s}{s} \frac{45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5}{0,042s^4 + 0,836s^3 + 3,406s^2 + 3,461s + 1}}{1 + \frac{r_0 s}{s} \frac{45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5}{0,042s^4 + 0,836s^3 + 3,406s^2 + 3,461s + 1}}$$

Po úpravách dostáváme:

$$G_w(s) = \frac{r_0(45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5)}{r_0(45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5) + 0,042s^4 + 0,836s^3 + 3,406s^2 + 3,461s + 1}$$

Pro určení kritického zesílení r_{0k} využijeme Hurwitzova kritéria z charakteristického polynomu (tj. jmenovatele přenosu):

$$H = \begin{pmatrix} 0,836 & 3,461 + 1061,97r_0 & 0 & 0 \\ 0,042 & 3,406 + 45,24r_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,836 & 3,461 + 1061,97r_0 & 0 \\ 0 & 0,042 & 3,406 + 45,24r_0 & 0 \end{pmatrix}$$

Z Hurwitzova kritéria vypočteme subdeterminanty:

$$H_1 = 0,836$$

$$H_2 = \begin{pmatrix} 0,836 & 3,461 + 1061,97r_0 \\ 0,042 & 3,406 + 45,24r_0 \end{pmatrix} = 2,702 - 6,78r_0$$

, poté z výsledného subdeterminantu H_2 získáme kritické zesílení r_{0k} :

$$0 = 2,702 - 6,78r_0$$

$$r_0 = r_{0k} = 0,398$$

Periodu kritických kmitů T_k spočteme podle vztahu:

$$T_k = \frac{2\pi}{\omega_k}$$

,kde ω_k je kritická úhlová rychlost. Jelikož se jedná o periodický děj na mezi stability, musí existovat ryze imaginární sdružené kořeny charakteristického polynomu:

$$s_{1,2} = \pm j\omega_k$$

Dosazením $r_0 = r_{0k}$ a $s = j\omega_k$ do charakteristického polynomu přenosu řízení získáme kritickou úhlovou rychlost ω_k :

$$0,042\omega_k^4 - 0,836j\omega_k^3 - 21,4126\omega_k^2 + 426,125j\omega_k + 676,207$$

Protože se jedná o ryze imaginární sdružené kořeny, položíme reálnou část $\text{Re}(\omega_k) = 0$:

$$0,042\omega_k^4 - 21,4126\omega_k^2 + 676,207 = 0$$

$$\omega_{k1,2} = \pm 5,816; \omega_{k3,4} = \pm 21,817$$

Z kritické úhlové rychlosti dopočteme T_k ze vztahu $T_k = 1,08$ a využijeme empirických vztahů uvedených v Tab. 2. Výsledné složky regulátoru jsou pak:

$$r_0 = 0,239$$

$$r_{-1} = 0,2$$

$$r_1 = 0,024$$

Typ regulátoru	$G_R(s) = K_0 \left[1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right]$			$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$		
	K_0	T_I	T_D	r_0	r_{-1}	r_1
P	$0,5k_{pk}$	-	-	$0,5r_{0k}$	-	-
PI	$0,45k_{pk}$	$\frac{T_k}{1,2}$	-	$0,45r_{0k}$	$\frac{0,54r_{0k}}{T_k}$	-
PD	$0,5k_{pk}$	-	$0,05T_k$	$0,5r_{0k}$	-	-
PID	$0,6k_{pk}$	$0,5T_k$	$0,12T_k$	$0,6r_{0k}$	$\frac{0,54r_{0k}}{T_k}$	$0,075r_{0k}T_k$
nekmitavý proces, tj. pro překmit $k = 0\%$						
P	$0,25r_0$	-	-	$0,25r_{0k}$	-	-
I	-	$4T_{Ik}$	-	-	$0,5r_{-1}$	-

Tab. 2 Vztahy metodou kritického zesílení, převzato z [1]

4.1.2 Metoda standartních tvarů

Metoda standartních tvarů (Whiteley) je podobně jako metoda kritického zesílení algebraická metoda syntézy regulátoru. Metoda vychází ze standartních tvarů přenosové funkce, o kterých víme, že dávají vyhovující regulační pochod. Podle těchto tvarů se nastavují parametry regulátoru tak, aby se hodnoty koeficientů přenosové funkce a vzorové funkce navzájem rovnaly. Standartní tvary zaručují při správném dodržení předepsaných koeficientů maximální překmit, dobu ustálení a další veličiny regulačního pochodu.

Přenos řízení se upraví na standartní tvar, z něhož zjistíme jednotlivé koeficienty $\alpha_n \dots \alpha_0$ charakteristického polynomu. Vzniklé koeficienty $\alpha_n \dots \alpha_0$ se porovnají se standartními koeficienty $A_n \dots A_0$ zadaných v a vypočtou konstanty regulátoru.

Standartní tvar přenosu řízení získáme následujícími kroky:

- 1) vydělení přenosu hodnotou a_0
- 2) zavedením a použitím substituce:

$$s = \left(\frac{a_0}{a_n} \right)^{\frac{1}{n}} q$$

Pro výpočet konstant regulátoru Whiteleyho metodou vyjdeme ze vztahů uvedených v kapitole 4.1.

Pro celkový přenos řízení $G_w(s)$ můžeme psát:

$$G_w(s) = \frac{G_R(s)G_S(s)}{1 + G_R(s)G_S(s)}$$

$$G_w(s) = \frac{\frac{r_0 s + r_{-1} + r_1 s^2}{s} \cdot \frac{45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5}{0,042s^4 + 0,836s^3 + 3,406s^2 + 3,461s + 1}}{1 + \frac{r_0 s + r_{-1} + r_1 s^2}{s} \cdot \frac{45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5}{0,042s^4 + 0,836s^3 + 3,406s^2 + 3,461s + 1}}$$

Po úpravách platí pro přenos řízení:

$$G_w(s) = \frac{(r_0 s + r_{-1} + r_1 s^2)(45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5)}{(r_0 s + r_{-1} + r_1 s^2)(45,24s^2 + 1061,97s + 1696,5) + 0,042s^5 + 0,836s^4 + 3,406s^3 + 3,461s^2 + s}$$

Výsledný přenos upravíme na standartní tvar vydělením $a_0 = 1696,5 r_0$ a substitucí:

$$s = \left(\frac{1696,5 r_{-1}}{0,042} \right)^{\frac{1}{5}} q$$

Koeficienty standartního tvaru $\alpha_5 \dots \alpha_0$ porovnáme se vzorovými koeficienty z

$$A_5 = \alpha_5 \rightarrow 1=1$$

$$A_4 = \alpha_4 \rightarrow 18 = \left(\frac{0,836 + 45,24r_1}{1696,5r_{-1}} \right) \left(\frac{1696,5r_{-1}}{0,042} \right)^{\frac{4}{5}}$$

$$A_3 = \alpha_3 \rightarrow 69 = \left(\frac{3,406 + 45,24r_0 + 1061,97r_1}{1696,5r_{-1}} \right) \left(\frac{1696,5r_{-1}}{0,042} \right)^{\frac{3}{5}}$$

$$A_2 = \alpha_2 \rightarrow 69 = \left(\frac{3,461 + 1061,97r_0 + 45,24r_{-1} + 1696,5r_1}{1696,5r_{-1}} \right) \left(\frac{1696,5r_{-1}}{0,042} \right)^{\frac{2}{5}}$$

$$A_1 = \alpha_1 \rightarrow 18 = \left(\frac{1 + 1696,5r_0 + 1061,97r_{-1}}{1696,5r_{-1}} \right) \left(\frac{1696,5r_{-1}}{0,042} \right)^{\frac{1}{5}}$$

$$A_0 = \alpha_0 \rightarrow 1 = 1$$

Vyřešením 3 předešlých rovnic získáme jedno z řešení pro konstanty regulátoru pomocí metody Whiteleyho:

$$r_0 = 0,643$$

$$r_{-1} = 0,457$$

$$r_1 = 0,076$$

Obecně může vyjít více variant nastavení parametrů regulátoru, což platí i v našem případě. Pro odlazení regulátoru nezbyvá než vyzkoušet varianty řešení k nalezení potřebných konstant regulátoru. Náš odhad nejbližšího řešení byl brán s ohledem na výsledky metodou Ziegler-Nichols uvedené v kapitole 4.1.1.

Stupeň	Koeficienty							Charakteristické hodnoty regulačního pochodu		
	A ₆	A ₅	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	t ^{tab} [s]	t _r ^{tab} [s]	Δy _{max}
3				1	6,7	6,7	1	3,5		10
4			1	7,9	15	7,9	1	5,4		15
5		1	18	69	69	18	1	6,5		20
6	1	36	251	485	251	36	1	8		20

Tab. 3 Standartní tvar přenosové funkce, převzato z [1]

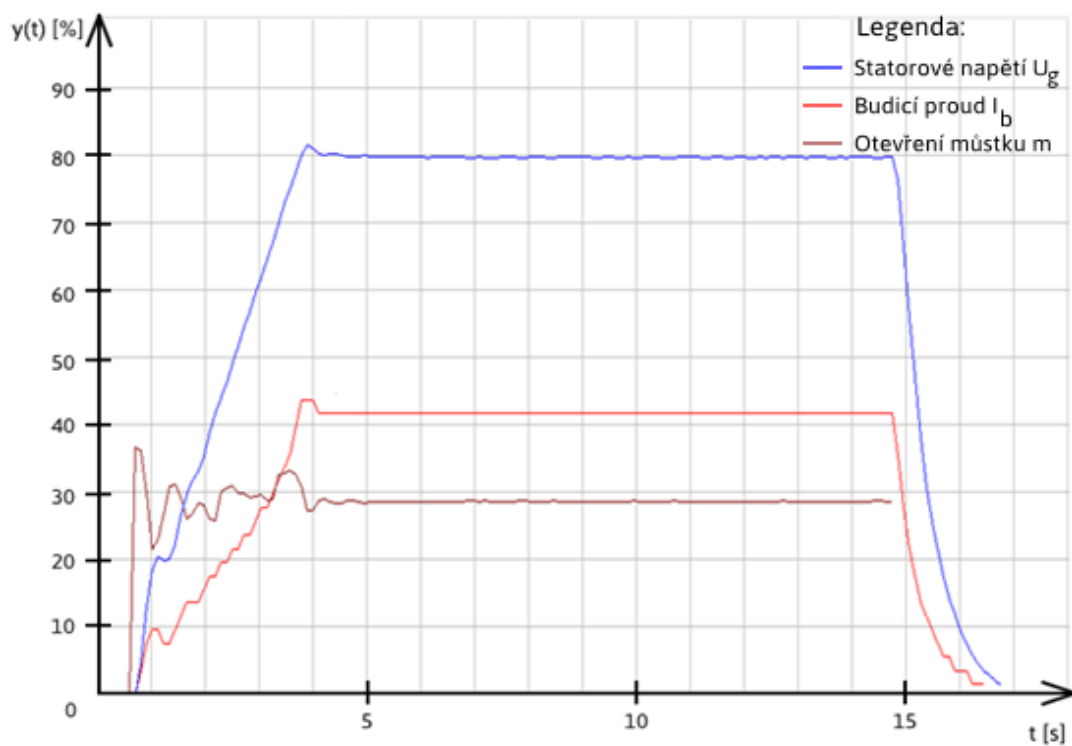
4.2 Ladění regulačních smyček

Počáteční ladění regulačních smyček bez předchozího odhadu spočívá v přivedení regulačního obvodu na mez stability s vyřazenou integrační a derivační složkou. Po dosažení meze stability proporcionalní složkou je hodnota snížena na 50 % původní hodnoty. Regulační obvod na mezi stability proporcionalní složkou je na Obr. 17. Kritické zesílení bylo změřeno $K_{or} = 0,6$. Porovnáním vypočtené hodnoty kritického zesílení v kapitole 4.1.1 získáváme přibližně dvakrát nižší hodnotu. Regulační obvod nyní dostaneme na mez stability pomocí integrační složky. Po dosažení meze stability snížíme hodnotu na 70 % z původní hodnoty a doladíme derivační složku. Veškeré ladění konstant probíhá vyhodnocením přechodových charakteristik. Regulátor AVR TE-5403 obsahuje pět regulačních smyček, které je potřeba naladit:

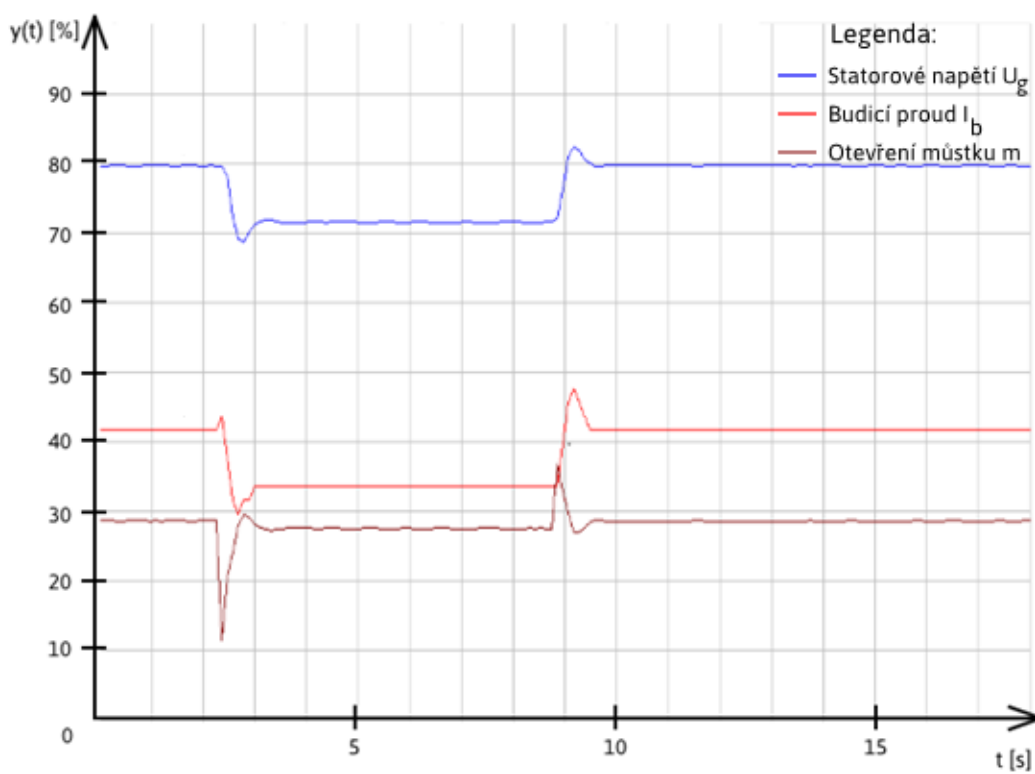
- regulaci napětí na svorkách alternátoru naprázdno U_{g0} ,
- regulaci napětí na svorkách alternátoru na síti U_g ,
- regulaci budicího proudu I_b ,
- regulaci účinníku $\cos \varphi$,
- regulaci jalového výkonu Q .

V kapitole 4.1.1 jsme uvedli výpočet regulační smyčky napětí naprázdno U_{g0} , která je využita pro počáteční nastavení konstant regulátoru. Takové nastavení však nebylo dostačující na požadovaný regulační pochod a muselo být následně optimalizováno. Po nastavení regulační smyčky napětí naprázdno ladíme regulační smyčku napětí U_g na síti. Regulační smyčky $\cos \varphi$ a Q jsou nastaveny po připojení alternátoru na síť.

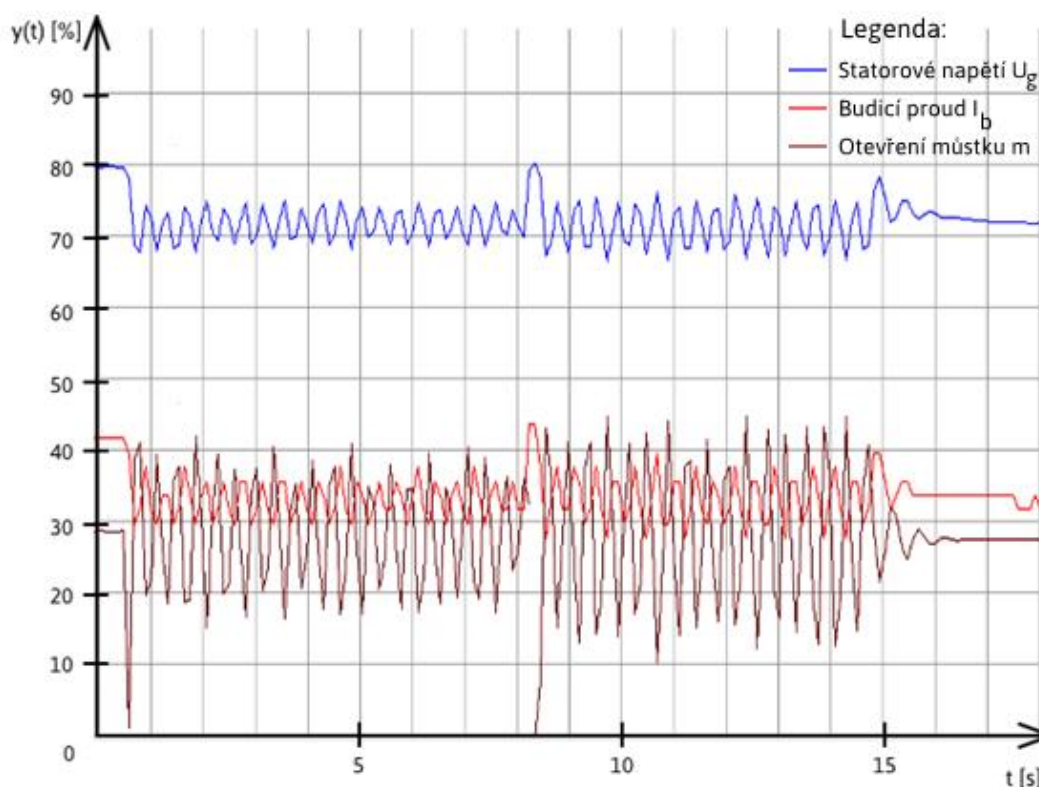
Výsledné regulační pochody odladěných smyček zobrazují obrázky Obr. 15 a Obr. 16. Při změně veličiny statorového napětí o +10 % si můžeme všimnout většího překmitu, který je zhruba 105% jmenovité hodnoty budicího proudu. Kapitola 3.3 uvádí podmínky pro vhodnou regulaci. Maximální překmit je uveden hodnotou 15% od regulované jmenovité hodnoty, čímž náš regulační pochod splňuje tyto podmínky. Překmit při nabuzení a odbuzení generátoru je u budicího proudu i statorového napětí minimální. Otevření tyristorového můstku m nelze přesně regulovat a proto můžou být děj v přechodovém stavu kmitavý s velkým překmitem.



Obr. 15 Záznam z měření - nabuzení a odbuzení synchronního generátoru



Obr. 16 Záznam z měření - skok žádané hodnoty U_g o 10%



Obr. 17 Záznam z měření - regulační obvod na mezi stability

	P [-]	T_I [ms]	T_D [ms]
smyčka I_b	0,1	400	5
smyčka U_{g0}	0,3	600	3
smyčka U_g	0,12	600	10
smyčka $\cos \varphi$	0,01	500	0
smyčka Q	0,015	350	5

Tab. 4 Nastavení regulačních smyček

4.3 Nastavení ochranných funkcí

Regulátor AVR TE 5403 zajišťuje řadu ochranných funkcí k ochraně celého soustrojí. Mezi základní ochranné funkce zmíněné v kapitole 3.4.2 obsahuje také omezovač tyristorového můstku (OTM) a omezovač rampy (OR). Regulátor obstarává také ochranu při fázování alternátoru na síť, automatické odbuzení a nabuzení alternátoru a omezovače proti uživatelskému zadání nereálných či kritických hodnot. Jako sekundární ochrana jsou realizovány ochrany reagující na nastavené mezní hodnoty (havarijní hodnoty), které reagují na definované kritické hodnoty, kterých by mohl budicí systém dosáhnout.

4.3.1 ORP, OSP a podfrekvenční ochrana U/f

Proudové omezovače i podfrekvenční ochrana U/f zajišťují ochranu před ohřevem rotorového nebo statorového vinutí a jádra magnetického obvodu. Nastavení probíhá pomocí technických parametrů stroje dodávané výrobcem. Většina generátorů dovoluje pracovat při přetížení na omezenou dobu, jelikož teplota částí stroje se nemění skokově. Rychlost reakce těchto ochranných funkcí jsou proto přizpůsobeny ke krátkodobému přetížení alternátoru při dosažení maximální hodnoty. Druhý stupeň ochran již reaguje okamžitě bez časového zpoždění při dosažení stanovené mezní hodnoty. Nastavené hodnoty zmíněných ochranných funkcí nalezneme v Tab. 5.

	ORP	OSP	Podfrekvenční ochrana U/f
Min [%]	0	-	98
Max [%]	100	110	-
Mez [%]	200	150	-
Rychlost [s]	6	6	1
K [% / 2s]	8	1	2

Tab. 5 Nastavení ORP, OSP, podfrekvenční ochrany

4.3.2 Hlídač meze podbuzení (HMP)

Hlídač meze podbuzení zajišťuje danou pracovní oblast alternátoru. Mez statické stability alternátoru je udávána výrobcem a nastavení probíhá podle technických parametrů stroje a podle parametrů sítě. Nastavení hlídače meze podbuzení nalezneme v Tab. 6.

AP 0-75 % RP [%]	30
AP 75-100 % RP [%]	20
Rychlost [ms]	100
Integrace ms]	500
Hysteréze [%]	2
Statika U [%]	0

Tab. 6 Nastavení HMP

4.3.3 Omezení zadávaných rozsahů

Tato ochranná funkce zajišťuje správné zadávání hodnot uživatelům. V případě překročení stanovené meze je požadavek na změnu hodnoty odmítnut.

	I_b	U_x	$\cos \varphi$	Q
min [%]	1	20	80	-9,99
max [%]	120	115	130	20
krok [%]	1	0,25	1	0,25

Tab. 7 Nastavení zadávaných rozsahů

4.3.4 Havarijní hodnoty

Sekundární ochrana alternátoru automatickým regulátorem napětí. V případě dosažení uvedených hodnot v Tab. 8 dochází k okamžitému omezení hodnot na stanovenou mez.

min I_b [%]	0,05
max I_b [%]	140
U_x [%]	125
I_x [%]	110
čas nabuzení [s]	120
čas odbuzení [s]	5

Tab. 8 Nastavení havarijních hodnot

4.3.5 Ochrany fázování

Fázování je proces připojení alternátoru na síť, kdy roztočený alternátor odpovídá parametrům sítě. Pokud by nebyly dodrženy stejné parametry připojovaného alternátoru k síti, mohlo by dojít v okamžiku připojení k velkému proudovému nárazu nebo k vyrovnávacímu elektromechanickému pochodu. Souhrn podmínek, které zajišťují správné přifázování obsahuje:

- stejný sled fází alternátoru a sítě,
- stejná velikost napětí alternátoru a sítě,
- stejná frekvence alternátoru a sítě,
- nulový fázový posun mezi napětím.

Automatický regulátor napětí zajišťuje podmínky přifázování v daných tolerančních mezích uvedených v Tab. 9. Pokud je některá hodnota alternátoru odchýlena víc než o danou toleranční hodnotu, regulátor zablokuje možnost přifázování.

Shoda U_x [%]	1
Shoda f [%]	0,02
Shoda fáze [°]	10
Vypínač [s]	0,9

Tab. 9 Nastavení ochran přifázování

5. Primární a sekundární zkoušky

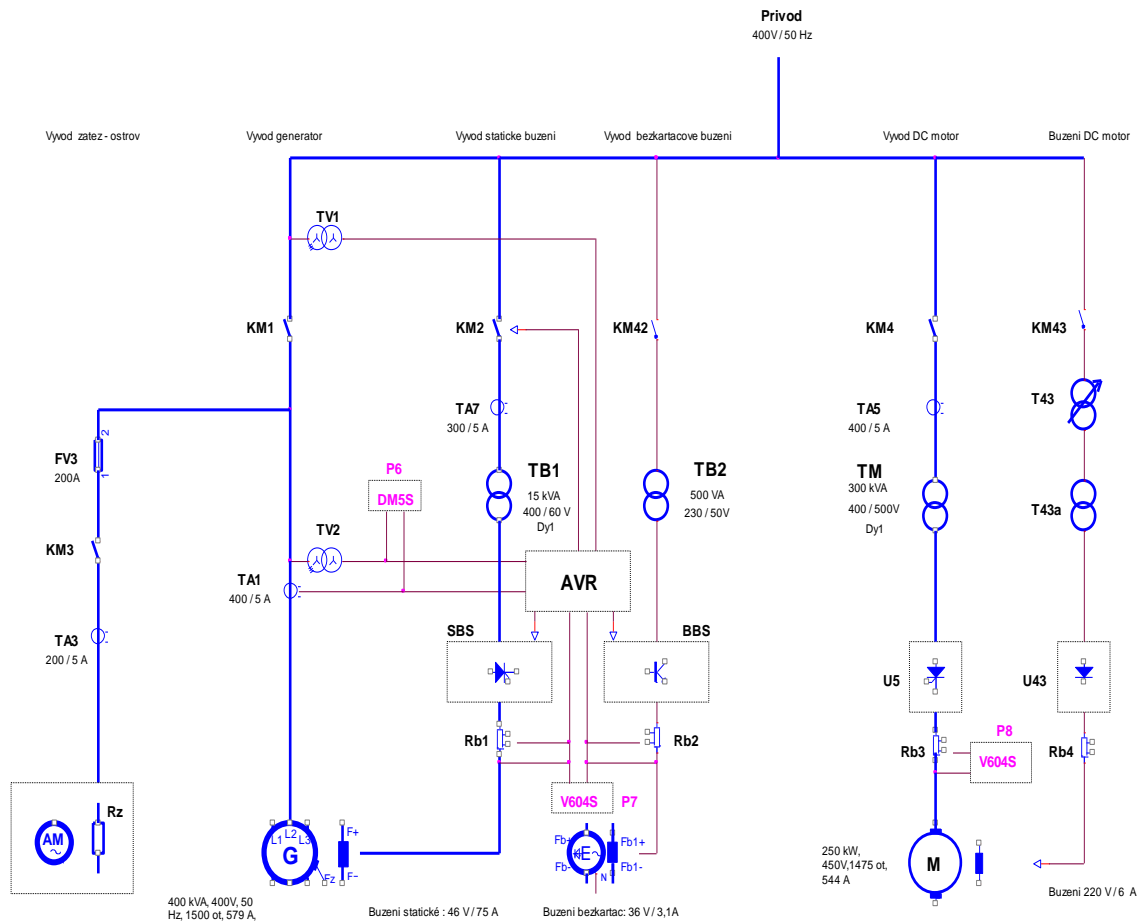
Primární i sekundární zkoušky se provádí před uvedením do provozu. Jedná se o soubor zkoušek, které testují ochranné funkce AVR, ochrany soustrojí a ověřují regulační pochody všech regulačních smyček AVR. Cílem zkoušek je zajistit bezporuchovou správnou činnost (tedy regulaci napětí na svorkách alternátoru, činného výkonu a účinníku) kompletní budicí soustavy i buzeného alternátoru.

5.1 Popis měřeného pracoviště

Primární zkoušky byly provedeny na synchronním generátoru Siemens 1FC2 353-4 o výkonu $P = 320$ kW poháněného stejnosměrným motorem ČKD o výkonu $P = 250$ kW. Jejich základní parametry nalezneme v Tab. 10 a Tab. 11. Generátor je vybaven statickým budicím systémem s tyristorovým můstkovým usměrňovačem, který je řízený automatickým regulátorem napětí AVR TE 5403. Regulátor je možné ovládat pomocí sériové komunikační linky skrz počítač se speciálním softwarem, nebo pomocí HMI displeje firmy Weintek MT8070iE umístěným na dveřích rozvaděče. Regulátor i HMI displej je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí 24 V. Fotografie regulátoru (horní část skříně) z místa pracoviště je uvedena na Obr. 19.

K měření elektrických veličin na vývodu generátoru je využit převodník Camille Bauer Sineax DM5F, který má připojení přes USB do notebooku. Stejnosměrný budicí proud a napětí jsou měřeny napěťovým převodníkem DVL 150 od firmy LEM, který funguje na principu Hallovy sondy. Napájení pomocných a regulačních obvodů je provedeno ze spínaného zdroje TRACO 230 V AC (střídavých) / 24 V DC (stejnosměrných).

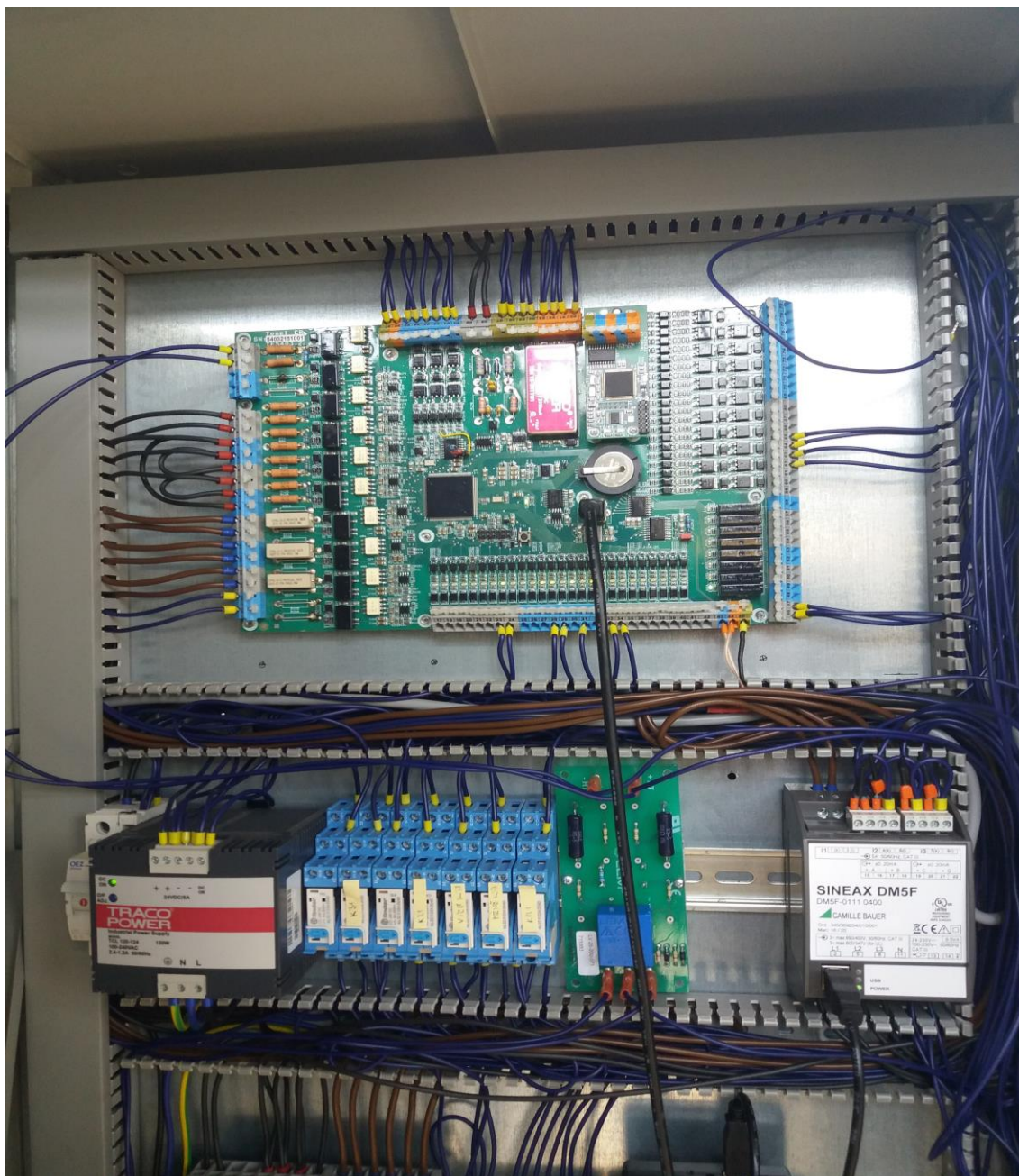
Schéma pracoviště je zobrazeno na Obr. 18.



Obr. 18 Schéma pracoviště

Generátor je vybaven i bezkartáčovou budičí soustavou BBS, která je reprezentována budičem Siemens BD520M o výkonu $P = 3$ kW umístěném na hřídeli ssynchronního stroje. V našem měření nebyla tato soustava využita.

Hlavní přívod je jištěn nadproudovou a zkratovou ochranou OEZ BA511G3.



Obr. 19 Fotografie pracoviště

Mimo zmíněný regulátor v horní části najdeme na Obr. 19 také (zleva) zdroj stejnosměrného napětí 24 V, spínací relé, pomocnou měřicí kartu a převodník DM5F pro měření elektrických veličin.

Typ	1FC2 353-4	Výrobce	Siemens
Jmenovitý činný výkon (kW)	320	Budící napětí / proud :	
Jmenovitý zdánlivý výkon (kVA)	400	- naprázdno	15 V/25 A
Jmenovitý účinník ($\cos \varphi$)	0,8	- jmenovité	46 V/75 A
Jmenovité napětí (V)	400	- maximální 10 sec	105V/172A
Jmenovitý proud (A)	577		
Jmenovitá frekvence napětí (Hz)	50		
Jmenovité otáčky (ot / min)	1500		
Odpor statoru (Ω)		Odpor buzení (Ω) stud /teplý	0,48/ 0,62
Podélná synchronní reaktance x_d (%)	220	Příčná synchr, reaktance x_q (%)	117
Podélná přechodná reaktance x_d' (%)	16,5	Příčná přech. reaktance x_q' (%)	117
Podélná rázová reaktance x_d'' (%)	14,1	Příčná ráz. reaktance x_q'' (%)	17,9
Nulová reaktance x_0 (%)	7,1	Zpětná reaktance x_2 (%)	
Časová konstanta T_{d0}' (sec)	1,879	Časová konstanta T_d' (sec)	0,141
Časová konstanta T_{d0}'' (sec)	0,017	Časová konstanta T_a (sec)	0,026

Tab. 10 Parametry synchronního generátoru

Jmenovitý činný výkon (kW)	250	Budící napětí / proud :	
Jmenovité napětí (V)	450	- naprázdno	
Jmenovitý proud (A)	544	- jmenovité	220 V / 6 A
Jmenovité otáčky (ot / min)	1500	- odpor buzení	

Tab. 11 Parametry pohonného stejnosměrného motoru

5.2 Primární zkoušky

5.2.1 Provoz do stojícího stroje

Při stojícím stroji se provádí zkoušky návaznosti buzení, ochran, řídicího systému, vypínače a ostatní technologie. U buzení se odzkouší funkčnost akčního členu regulátoru tj. tyristorového můstkového usměrňovače, nebo v případě bezkartáčových budicích systému IGBT pulsního měniče. Dále se odzkouší měření velikosti budicího proudu I_b a poté se odladí regulační smyčka budicího proudu. Vyzkouší se rozsah žádané hodnoty budicího proudu a funkčnost omezovačů budicího proudu. U statických buzení se nesmí dlouho zatěžovat uhlíky a kroužky generátoru, aby nedošlo k jejich poškození. Při delších

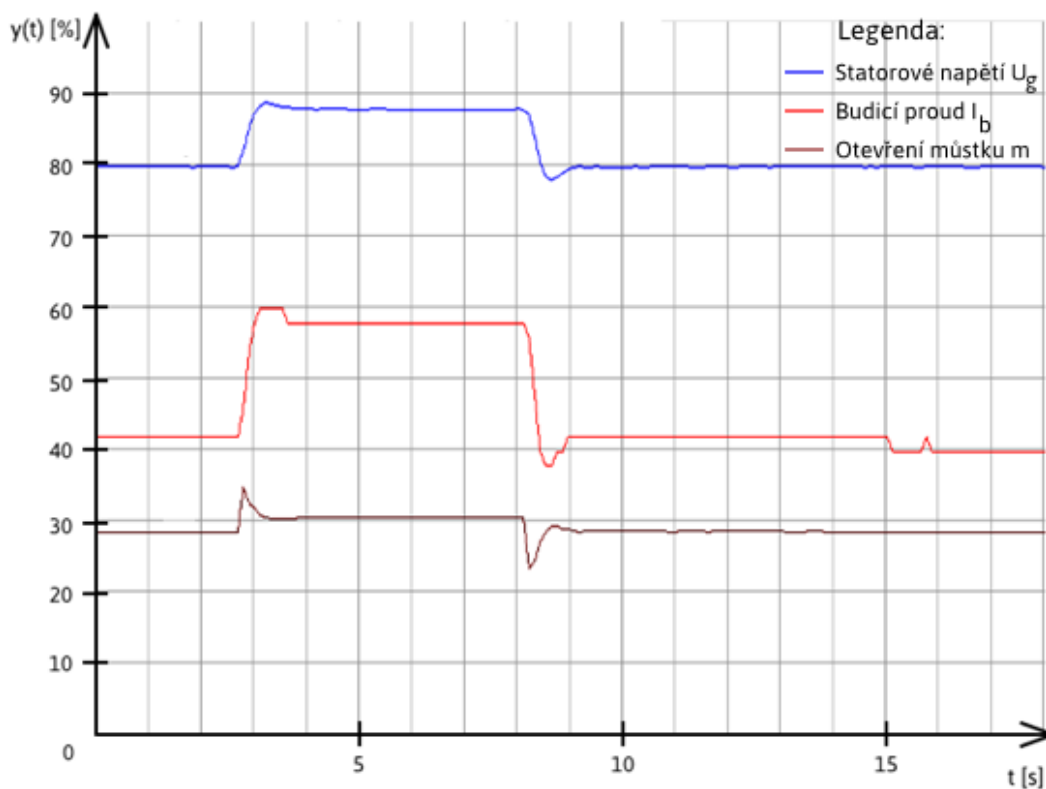
zkouškách a vyšších budicích proudech se nechá soustrojí protáčet na malých otáčkách, což zamezí poškození uhlíků a kroužků. V případě bezkartáčového buzení není tento krok potřebný.

Pokud nejsou nastaveny konstanty regulační smyčky budicího proudu, postupujeme dle zmíněného popisu ladění uvedeném v kapitole 4.2. V regulační smyčce budicího proudu se otestují ochranné signalizace jako výpadek či pokles budicího proudu, sepnutí přepěťové ochrany, výpadek jističů, Poslední zkouškou je kontrola teploty jednotlivých komponentů po ustálení teplot dodáváním jmenovitého budicího proudu.

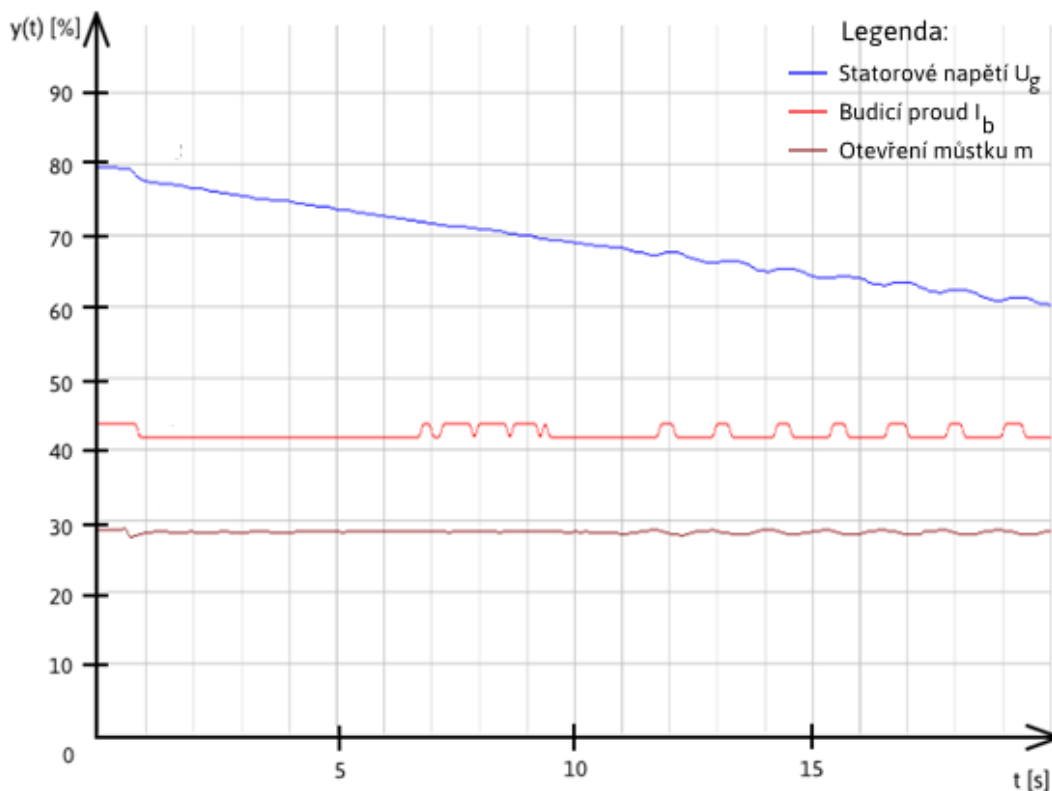
5.2.2 Chod naprázdno

V chodu naprázdno změříme a zkontrolujeme charakteristiku naprázdno. Poté ověříme funkci správného nabuzení alternátoru regulační smyčkou budicího proudu. Podle kvality regulace zmíněné v kapitole 3.3 případně doladíme parametry regulátoru. Proveďte se kontrola správného měření statorového napětí U_g a provede optimalizace napěťové regulační smyčky naprázdno U_{g0} . Posledním krok v chodu naprázdno je ověření ochranné funkce podfrekvenční ochrany U/f a omezovače budicího proudu.

Záznam ze zapůsobení podfrekvenční ochrany U/f nalezneme na Obr. 21. Hodnota napětí generátoru je postupně snižována na úkor udržení $U/f = \text{konst}$. Toto snížení probíhá každou sekundu o 1 % z jmenovité hodnoty napětí U_{gn} . Na Obr. 20 lze vidět zapůsobení omezovače budicího proudu I_b . Hodnota byla téměř okamžitě omezena na mezní hodnotu 58% z jmenovitého budicího proudu.



Obr. 20 Záznam z měření - zapůsobení omezovače proudu ORP



Obr. 21 Záznam z měření - zapůsobení podfrekvenční ochrany U/f

5.2.3 Fázování generátoru

Před fázováním generátoru se zkontroluje zapojení měřících transformátoru napětí při rozpojené nule generátoru a sepnutém vypínači generátoru. Odzkouší se sepnutí generátorového vypínače. Po spojení nuly zpět se generátor přifázuje na síť pomocí synchronoskopu v režimu regulace budicího proudu. Při fázování se zkontroluje funkce automatického fázovače v AVR. Souhrn podmínek pro správné přifázování byl uveden v kapitole 4.3.5.

5.2.4 Chod na síti

V chodu na síti je potřeba zkontrolovat správnost měření účinníku $\cos \varphi$ a jalového výkonu Q pro optimalizaci regulačních smyček. Pokud není správně měřen účinník $\cos \varphi$, je potřeba ho zkalibrovat měřením V-křivky stroje, tj. závislost budicího proudu na statorovém proudu.

V režimu regulační smyčky napětí U_g se hlídá po dobu jedné hodiny kvalita a stabilita regulačního pochodu požadované hodnoty napětí. Nedílnou součástí zkoušek je otestování všech ochranných funkcí uvedených v kapitole 3.4.2. Při správné funkci je tato událost okamžitě signalizována a ochranná funkce omezí stanovenou hodnotu na danou mez. Po otestování ochranných funkcí probíhá ladění regulačních smyček pro $\cos \varphi$ a Q .

Poslední zkouškou je odpojení od sítě a odbuzení. Odbuzení regulátoru ověříme nejdříve pomocí odbuzování regulátorem a poté otestujeme provozní a havarijní odbuzení. Provozní odbuzení je otestováno odpojením nabuzeného stroje ze sítě. Havarijní buzení je otestováno vypnutím zdroje napětí 24 V, který napájí ochrany a regulátor.

5.2.5 Provozní najetí a odstavení soustrojí

Synchronní stroj se rozběhne ze stojícího stavu, přifázuje a následně odstaví. Provedou se provozní zkoušky spínání a odpínání zátěží. Poslední zkouškou je havarijní odpojení od sítě a odbuzení ochranami generátoru. Při tomto procesu se definuje z jakého napětí a výkonu bude stroj odpojen. Kontroluje se překmit napětí a průběh otáček soustrojí s generátorem. Při havarijním odbuzení zareaguje odbuzovací vypínač, který odpojí

alternátor neprodleně od budicí soustavy a připojí budic vinuti paralelně k odbuzovacímu odporu. V odbuzovacím odporu se zmaří veškerá energie.

5.3 Sekundární zkoušky

Sekundární zkoušky jsou zkoušky, kterými se kontroluje regulátor buzení a jeho ochranné funkce generátoru. Zkoušky se provádí za pomoci externích zdrojů a na stojícím generátoru. Externím zdrojem napětí a proudu připojeného do měřících vstupů buzení nebo ochran se odzkouší veškeré ochranné funkce. Tyto kontroly se provádí při periodických revizích, po dlouhodobých odstávkách stroje nebo po opravách generátoru. Mezi důležité sekundární zkoušky patří i zkratové zkoušky, jelikož testování zkratů v primárních zkouškách je fyzikálně náročné a hrozí při nich poškození synchronního stroje.

Obr. 22 zobrazuje pracoviště sekundárních zkoušek.



Obr. 22 Pracoviště při sekundárních zkouškách

6. Závěr

V práci jsem shrnul typy používaných budicích systémů a jejich výhod i nevýhod. Pro svou nenáročnou údržbu a nižší poruchovost jsou i přes horší regulační vlastnosti využívány více bezkartáčové budicí systémy. Popsal jsem základní teoretické poznatky regulátorů buzení a jejich vlastnosti. Aplikoval jsem metody syntézy regulace k určení parametrů regulátoru buzení TE-5403 pro konkrétní zkušební soustrojí. Seznámil jsem se s regulačními a ochrannými funkcemi ve zmíněném regulátoru.

Provedl jsem sekundární zkoušky nastaveného regulátoru buzení a ověřil funkčnost ochranných funkcí a regulačních smyček. Poté jsem provedl primární zkoušky, při kterých jsem naladil regulační smyčky a otestoval ochranné funkce.

Porovnáním výpočtů parametrů regulátoru buzení vychází vhodnější metoda kritického zesílení oproti metodě standardních tvarů. Porovnáním vypočtených a odladěných parametrů regulátoru buzení jsem dospěl k podobným výsledkům. Jako optimální metoda nastavování regulátoru buzení je vhodný prvotní výpočet parametrů na modelu a jejich konečné doladění na generátoru ve všech provozních stavech.

Seznam obrázků

Obr. 1 Bezkartáčová budicí soustava napájená ze sítě vlastní spotřeby, převzato a upraveno [3].....	11
Obr. 2 Statická budicí soustava napájená ze sítě vlastní spotřeby, převzato a upraveno [3]	12
Obr. 3 Blokové schéma regulace napětí na svorkách alternátoru, převzato a upraveno z [4].....	13
Obr. 4 Blokové schéma nepřímého regulátoru, převzato a upraveno z [1]	15
Obr. 5 Realizace složek PID regulátoru.....	17
Obr. 6 Schéma PID regulátoru s anti-windup, převzato a upraveno z [15].....	19
Obr. 7 Přechodová charakteristika.....	20
Obr. 8 Blokové schéma AVR TE 5403 ve smyčce napětí se statikou, převzato a upraveno z [3].....	22
Obr. 9 Blokové schéma AVR TE-5403 ve smyčce účinníku $\cos \varphi$, převzato a upraveno z [3].....	23
Obr. 10 P - Q Diagram synchronního stroje, převzato a upraveno z [5]	24
Obr. 11 Zjednodušené schéma vedení	27
Obr. 12 Fázorový diagram zjednodušeného schématu vedení	27
Obr. 13 Výpočet přenosu systému	28
Obr. 14 Model ST1A statického budicího systému, převzato a upraveno z [9]	29
Obr. 15 Záznam z měření - nabuzení a odbuzení synchronního generátoru	36
Obr. 16 Záznam z měření - skok žádané hodnoty U_g o 10%	36
Obr. 17 Záznam z měření - regulační obvod na mezi stability.....	37
Obr. 18 Schéma pracoviště	42
Obr. 19 Fotografie pracoviště	43
Obr. 20 Záznam z měření - zapůsobení omezovače proudu ORP	46
Obr. 21 Záznam z měření - zapůsobení podfrekvenční ochrany U/f	46
Obr. 22 Pracoviště při sekundárních zkouškách.....	48

Seznam tabulek

Tab. 1 Konstanty budicího systému	30
Tab. 2 Vztahy metodou kritického zesílení, převzato z [1]	32
Tab. 3 Standartní tvar přenosové funkce, převzato z [1]	34
Tab. 4 Nastavení regulačních smyček	37
Tab. 5 Nastavení ORP, OSP, podfrekvenční ochrany	38
Tab. 6 Nastavení HMP	38
Tab. 7 Nastavení zadávaných rozsahů	39
Tab. 8 Nastavení havarijních hodnot	39
Tab. 9 Nastavení ochran přifázování	40
Tab. 10 Parametry synchronního generátoru	44
Tab. 11 Parametry pohonného stejnosměrného motoru	44

Seznam zkratek

AVR	Automatic Voltage Regulator	Automatický regulátor napětí
BBS	Bezkartáčová Budicí Soustava	
SBS	Statická Budicí Soustava	
ORP	Omezovač Rotorového Proudů	
OSP	Omezovač Statorového Proudů	
HMP	Hlídač Meze Podbuzení	
PSS	Power System Stabilizator	Systémový stabilizátor
OTM	Omezovač Tyristorového můstku	
OR	Omezovač Rampy	
PMG	Pernament Magnet Generator	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
USB	Universal Serial Bus	
Hmi	Human Machine Intergace	
P	Proporcionální	
PI	Proporcionálně Integrační	
PD	Proporcionálně Derivační	
PID	Proporcionálně Integračně derivační	
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory	Mazatelná paměť pro čtení
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-only Memory	Elektricky mazatelná paměť pro čtení
ČSN	Česká Státní Norma	

Seznam použitých symbolů

$w(t)$	Požadovaná hodnota v čase	
$e(t)$	Regulační odchylka v čase	
$u(t)$	Akční veličina v čase	
$u_2(t)$	Vstupní hodnota v čase	
$y(t)$	Výstupní hodnota v čase	
$d(t)$	Poruchová veličina v čase	
$G(s)$	Přenosová funkce v Laplaceově transformaci	
$U(s)$	Vstupní obraz přenosové funkce	
$Y(s)$	Výstupní obraz přenosové funkce	
$E(s)$	Odchylový obraz přenosové funkce	
$y_w(t)$	Výstupní hodnota požadované veličiny v čase	
y_m	Maximální hodnota výstupní veličiny	
t_r	Doba ustálení regulované hodnoty	s
Δ	Toleranční pásmo	%
$e_w(\infty)$	Trvalá regulační odchylka veličiny	
t_m	Doba dosáhnutí požadované hodnoty	s
$G_r(s)$	Přenosová funkce regulátoru	
$G_g(s)$	Přenosová funkce generátoru	
$G_b(s)$	Přenosová funkce budiče	
$G_s(s)$	Přenosová funkce soustavy	
$G_w(s)$	Přenos řízení soustavy	
K_0	Zesílení regulátoru	
T_I	Integrační časová konstanta	s
T_D	Derivační časová konstanta	s
P	Činný výkon	P
Q	Jalový výkon	Var
U	Elektrické napětí	V
f	Frekvence	Hz
$\cos \phi$	Účinnost	
X_d	Podelná reaktance	Ω
X_s	Reaktance soustavy	Ω
U_s	Napětí sítě	V
r_0	Proporcionální složka	
r_{-1}	Integrační složka	
r_1	Derivační složka	
t	čas	s
U_n	Jmenovité napětí	V
N	Filtrační koeficient	
s	Laplaceův operátor	
$\sin \delta$	Zátěžný úhel generátoru	$^\circ$

P_e	činný výkon sítě	W
E	Vnitřní napětí generátoru	V
U_w	Požadovaná hodnota napětí	V
T_{kd}	Časová konstanta	s
T_{d0}	Časová konstanta	s
T_{d0}'	Časová konstanta	s
T_{d0}''	Časová konstanta	s
T_d''	Časová konstanta	s
X_d''	Rázová podélná reaktance	Ω
X_d'	Přechodná podélná reaktance	Ω
X_{d0}''	Rázová podélná reaktance naprázdno	Ω
X_{d0}'	Přechodná podélná reaktance naprázdno	Ω
G_0	Zesílení generátoru	
U_{gn}	Jmenovité napětí generátoru	V
U_{gbn}	Jmenovité budicí napětí generátoru	V
T_k	Perioda kritických kmitů	s^{-1}
r_{0k}	kritické zesílení	
n	stupeň polynomu	
q	proměnná standartního tvaru	
m	Otevření tyristorového můstku	°
V_{rmax}	Konstanta modelu ST1A	
V_{rmin}	Konstanta modelu ST1A	
I_{lr}	Konstanta modelu ST1A	
T_{b1}	Konstanta modelu ST1A	
T_{c1}	Konstanta modelu ST1A	
K_F	Konstanta modelu ST1A	
T_f	Konstanta modelu ST1A	
V_t	Konstanta modelu ST1A	
K_c	Konstanta modelu ST1A	
K_{lr}	Konstanta modelu ST1A	
K_a	Konstanta modelu ST1A	
T_a	Konstanta modelu ST1A	
T_c	Konstanta modelu ST1A	
T_b	Konstanta modelu ST1A	
t^{tab}	Okamžik maximálního přeregulování	s
t_r^{tab}	Doba ustálení regulace	s
Δy_{max}	Maximální přeregulování	%
U_{g0}	Napětí generátoru naprázdno	V
K_{0r}	Změřené kritické zesílení	
K_b	Anti-windup koeficient	

Seznam použité literatury

- [1] Balátě, J.: Automatické řízení, BEN - technická literatura, Praha, 2003
- [2] Hora, O., Navrátil, S. a kol.: Regulace elektrických strojů, SNTL, Praha, 1976.
- [3] Instrukční manuál regulátoru TE-5403, Tenel s.r.o.
- [4] Norma ČSN 35 0255: Budicí systémy turboalternátorů, hydroalternátorů a synchronních kompenzátorů. Technické požadavky a metody zkoušení
- [5] Internetové stránky <http://www.egu-prg.cz/synchronous-generators>
- [6] Pavelka J., Zdeněk J.: Elektrické pohony a jejich řízení, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2010
- [7] Internetové stránky <https://www.mathworks.com/help/simulink/examples/anti-windup-control-using-a-pid-controller.html>
- [8] Internetové stránky http://www.stanislav-misak.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=23:ms3&id=4:model-site&Itemid=1044
- [9] IEEE 421.5: Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, New York 2006
- [10] Kundur, P.: Power system stability and control, McGraw-Hill Education, Inc., 1994
- [11] Internetové stránky <http://www.ee.uidaho.edu/ee/power/jlaw/COURSES/ECE523/F07/HANDOUTS/SG/s21b.pdf>
- [12] IEEE: A generator transfer function regulator for improved excitation control, , The Institute of Electrical and Electronics Engineers ,USA, 1998
- [13] Juan A. Martinez-Velasco: Power system transients parameter determination, CRC Press, 2009
- [14] Ibler, Z., Beran M.: Elektrárny 2, VŠSE, Plzeň, 1982
- [15] Internetové stránky <https://www.mathworks.com/help/simulink/examples/anti-windup-control-using-a-pid-controller.html>

Seznam příloh

Příloha 1: Protokol o primárních zkouškách buzení a ochran

Přílohy

Příloha 1- Protokol o primárních zkouškách buzení a ochran

Protokol o primárních zkouškách buzení a ochran

Základní údaje o zkoušce

Zkoušené zařízení : Mikroprocesorový regulátor buzení TE-5403
Soubor ochran generátoru na zkušebním soustrojí
Tenel 400 kVA / 400V
Datum zkoušek : 14 - 18. 5. 2018
Vedoucí zkoušek : Ivo Janeba
Zkušební technik : Jakub Fišera

Parametry zkušebního soustrojí

Parametry generátoru - štítek :

Jmenovitý činný výkon (kW)	320	Budící napětí / proud :	
Jmenovitý zdánlivý výkon (kVA)	400	- naprázdno	25 V / 15 A
Jmenovitý účinník (cos φ)	0,8	- jmenovité	46 V / 75 A
Jmenovité napětí (V)	400	- maximální	105 V / 172 A
Jmenovitý proud (A)	579		
Jmenovitá frekvence napětí (Hz)	50		
Jmenovité otáčky (ot / min)	1500		

Parametry DC motoru :

Jmenovitý činný výkon (kW)	250	Budící napětí / proud :	
Jmenovité napětí (V)	450	- naprázdno	
Jmenovitý proud (A)	544	- jmenovité	220 V / 6 A
Jmenovité otáčky (ot / min)	1500	- odpor buzení	

Ovládání soustrojí a navazující technologie :

Zkušební soustrojí je ovládáno z rozvaděče RMG s výrobním číslem 50 274. Dokumentace k rozvaděči RMG s ozančením 274 - tpl obsahuje :

- obvodová schémata
- specifikaci přístrojů
- popis ovládání zkušebního soustrojí

- manuály k ochranám
- projekční návaznosti rozvaděč

Program primárních zkoušek

Kontrola vnější kabeláže a návazností na technologii

Provedené zkoušky :

- kontrola vstupů a výstupů AVR a ochran
- kontrola napájecích obvodů
- kontrola zapojení měřicích transformátorů
- kontrola parametrů AVR
- kontrola návazností AVR a ochran

Kontrola havarijních obvodů na stojícím stroji

Provedené zkoušky :

- kontrola budicího můstku s AVR v servisním provozu
- kontrola a sladění smyčky Reg Ib
- kontrola vypnutí buzení od ochran - havarijní odbuzení
- kontrola provozního odbuzení od ochran
- kontrola odstavení okolní technologie výstupem Budič Havárie

Zkoušky nakrátko - proudové zkoušky:

- sekundární zkoušky ochrany P211
- zapojíme zkrat za MTP na vývodu generátoru
- roztočíme soustrojí na jmenovité otáčky
- stáhneme nadproudovou ochranu generátoru pod jmenovitou hodnotu a
- odzkoušíme náběh ochrany, odstavení a odbuzení generátoru
- vrátíme nadproudovou ochranu generátoru na správnou hodnotu a
- odzkoušíme náběh proudové ochrany
- pomalu nabuzujeme a měříme charakteristiku nakrátko
- průběžně kontrolujeme teploty a vibrace soustrojí
- po ukončení zkoušek odstraníme zkratovou spojku

Zkoušky naprázdno - Napět'ové zkoušky

Provedené zkoušky :

- zkouška napět'ových ochran a vypnutí generátorového vypínače v režime Reg Ib
- kontrola měření napětí AVR
- sladění nabuzovacího procesu a smyčky regulace napětí naprázdno AVR
- rozsah a stabilita regulace napětí naprázdno
- kontrola odbuzení provozního
- kontrola odbuzení havarijního

Zkoušky fázovače

Na stojícím stroji se rozpoj'í nula generátoru. Roztočí se generátor a poté se zapne gen. vypínač generátoru, zajistí se (vyjme z patice) fázovací relé, ev.se odpoj'í vodiče na zapínací cívku vypínače

- kontrola měření napětí sítě a generátoru ve všech fázích
- kontrola sledu fází napětí sítě a generátoru

- kontrola nulového fázového úhlu na svorkovnici, na synchro-checku, na synchroskopu a v AVR,

Po kontrole měřících traf a funkce fázovacích přístrojů (AVR, synchrocheck, synchroskop) se zapojí nazpět ovládání generátorového vypínače a provede se :

- zkouška fázování ručně gen. vypínače
- zkouška automatického fázovače generátorového vypínače

Zkoušky generátoru se zatížením

Provedené zkoušky :

- nejprve nafázujeme generátor v režimu regulace budícího proudu a zkontrolujeme měření AVR a Ochrán -, $\cos \varphi$, činný a jalový výkon
- poté najedem na cca 30 % výkonu turbíny ve smyčce Reg Ib
- kontrola a sladění měření I_x , $\cos F$, P , Q
- sladění regulační smyčky U se statikou
- sladění regulační smyčky $\cos \varphi$
- kontrola funkce omezovače I_b , podbuzení
- kontrola beznárazového přechodu mezi regulacemi
- změříme V-křivku stroje

Zkoušky omezovačů regulátoru buzení

Provedené zkoušky :

- prověřeny všechny omezovací funkce, tj regulačních a žádaných hodnot I_b, U, I při 100% výkonu

Zkoušky provozního najetí a odstavení

Provedené zkoušky :

prověřeny všechny funkce, tj roztočení, nabuzení, nafázování, najetí na výkon, regulace napětí, zadávací meze a rozsahy regulací, funkce omezovačů, dále odstavení a odbuzení TG

Vypínací zkouška :

Vypínací zkouška se provede z definovaného činného a jalového výkonu generátoru. Jejím cíle je prověřit nastavení regulátoru otáček turbíny a regulátoru buzení generátoru. Při zkoušce se sejmou časové průběhy otáček, napětí na svorkách generátoru a budícího proudu generátoru. Vyhodnotí se jakost změřených průběhů - překmit a doba ustálení napětí a otáček. Pokud při zkoušce naběhnou ochrany generátoru. Hodnotí se zapůsobení ochran, doba odbuzení generátoru a doba zastavení soustrojí.

Tabulky kontrol a měření :

1. Ochrany generátoru :

Název ochrany	Typ	Kód	Nastavení	Měření.	Výsl.
Nadproudá zkratová	Micom P211	50V	2 In - 0 sec	1152 A	O.K.
Nadproudá čas.závislá	Micom P211	51	1,2 In - 30 sec	690 A - 28 sec	O.K.
Proudová nesymetrie	Micom P211	46	10% In	* 56 A	O.K.
Přepětí statoru	BU1	59	1,2 Un	485 V	O.K.
Podpětí statoru	BU1	27	0,8 Un	321 V	O.K.
Sled fází a výpadek fáze	BU1	59	0,2 Un	Vypnutí pojistky	O.K.
Podfrekvence	BF1	81U	48 Hz	47,9 Hz	O.K.
Nadfrekvence	BF1	81O	52 Hz	51,9	O.K.

* zkoušeno sekundárně

2. Regulátor buzení TE-5403 :

Parametry jsou uvedeny ve výstupním formuláři regulátoru buzení TE-5402 - příloha protokolu

Výsledek zkoušek

Výsledek zkoušek		
Zkoušené zařízení, tj. regulátor buzení TE-5403 a ochrany generátoru vyhovují bez omezení požadovaným normám a podmínkám. Zařízení může být uvedeno do provozu.		
Místo :	Datum	Razítko :
Úvaly	18.5.2018	
Kontroloval :	Podpis :	
Jakub Fišera		

Příloha 2 – referenční listina budicích systému firmy Tenel s.r.o

Rok	Místo	Stát	Kusů	Výrobek	Výkon stroje
1994	Kemekod	Nigeria	1	SBS1 / G	1,5 MW
1995	Třinecké železářny	ČR	1	SBS1 / M	3,5 MW
1996	Nová Huť	ČR	3	SBS1 / M	1,5 MW
1996	Chemopetrol Litvínov	ČR	2	SBS 1/ M	6 MW
1997	MVE	Kostarika	1	SBS1 / G	1,5 MW
1998	Transgas	ČR	1	SBS1 / G	3 MW
1999	VE Chaloupky Labe	ČR	1	SBS1 / G	1,6 MVA
1999	MVE	Norsko	2	BBS / G	1,3 MVA
2000	MVE Husinec	ČR	1	BBS / G	1, 3 MVA
2000	MVE Kostelec nad Labem	ČR	1	SBS0 / G	1,3 MVA
2000	MVE Pastviny	ČR	1	SBS2 / G	4 MVA
2000	Karima	Sudán	1	BBS / G	3,3 MVA
2000	MVE Kalná	Slovensko	5	BBS / G	650 kVA
2000	MVE	Bulharsko	3	BBS / G	650 kVA
2000	SOUAS Vřesová	ČR	1	BBS3 / G	125 MVA
2001	ČEZ Poříčí	ČR	1	SBS3 / G	75 MVA
2001	VE Práčov	ČR	1	SBS2 / G	15 MVA
2001	ČEZ Dvůr Králové	ČR	2	SBS2 / G	15 a 6 MVA
2001	Prehova	Slovinsko	2	BBS / G	1,3 MVA
2001	MVE Polka	ČR	2	BBS / G	350 VA
2001	Lisičansk	Ukrajina	2	BBS / M	3 MW
2002	VE Rakowice, Zielivsko	Polsko	5	BBS / M	1,2 MVA
2002	TG	Bělorusko	2	BBS / M	4 MVA
2002	DG Jabloňov	Slovensko	2	BBS / M	2 MVA
2002	TG Magnitogorsk	Rusko	2	BBS / M	4 MVA
2002	VE Libčice	ČR	2	BBS / M	3 MVA
2003	VE	Portugalsko	2	BBS / M	630 kVA
2003	VE Štvanice	ČR	3	SBS1 / M	2 MVA
2003	TE Holešovice	ČR	1	BBS / M	3 MVA
2003	VE	Norsko	2	BBS / M	1 MVA
2003	VE	Řecko	2	BBS / M	1 MVA
2003-5	TE Trmice	ČR	3	SBS2 / M	20 MVA
2004-5	TE Karviná	ČR	2	BBS / G	15 MVA
2004	VE Přelouč	ČR	4	BBS / G	2 MVA
2004	Tisová	ČR	1	SBS3 / G	75 MVA
2004,5	VE	Itálie	4	BBS/G	2 MVA
2004,5	VE	Potrugalsko	2	BBS/G	2 MVA
2004	VE	Srbsko	1	BBS/G	2 MVA
2004	VE Uda Valawe	Srí Lanca	1	SBS1 / G	2,2 MVA
2005	Lovochémie	ČR	2	SBS2 / G	6 + 15 MVA
2005	Magnitogorsk	Rusko	2	BBS / G	5 MVA
2005	Armand	Egypt	2	BBS / G	6 MVA
2005	Temešvár	Rumunsko	1	BBS2 / G	30 MVA

2005	VE Les Království	Rumunsko	2	SBS1 / G	2 MVA
2005	Tisová	ČR	1	SBS3 / G	75 MVA
2005,6	Chemopetrol	ČR	4	SBS3 / G	31 MVA
2005	VE	Filipíny	1	BBS / G	1 MVA
2005	VE	Indonézie	2	BBS / G	1 MVA
2005	TG Saturn	Rusko	4	BBS / G	6 MVA
2005	Košice	Slovensko	1	BBS / G	91 MVA
2005	VE Kalimanci	Makedonie	2	SBS2 / G	15 MVA
2006	Nobaria	Egypt	2	BBS / G	6 MVA
2006	Borken	Německo	1	BBS / G	5 MVA
2006	Al-Ghab	Sýrie	2	BBS / G	5 MVA
2006	Bratislava	Slovensko	1	SBS3 / G	31MVA
2006	Lisičansk	Ukrajina	2	BBS / M	3 MVA
2007	VE Sapuncica	Makedonie	2	SBS1 / G	2 MVA
2007	VE Pena	Makedonie	2	SBS1 / G	2 MVA
2007	VE Pesocani	Makedonie	2	SBS1 / G	2 MVA
2007	VE Bogova	Albánie	1	SBS1 / G	2 MVA
2007	VE Hradištsko, Kostomlátky	ČR	4	SBS1 / G	1 MVA
2007	VE Spálov	ČR	2	SBS1 / G	1 MVA
2007	Anama	Belgie	1	SBS1 / G	6 MVA
2007	PL Introl	Polsko	1	SBS1 / G	4 MVA
2007	Anwil	Polsko	2	BBS / G	6 MVA
2007	Tábor	ČR	1	BBS / G	10 MVA
2007	Obrřitství	ČR	2	BBS / G	10 MVA
2007	PTAS Mělník	ČR	2	SBS3 / G	75 MVA
2007	Chemopetrol	ČR	2	SBS3 / G	31 MVA
2007	PL Introl	Polsko	1	SBS 1 / G	4 MVA
2007	Anwil	Polsko	2	BBS / G	6 MVA
2007	Tábor	ČR	1	BBS / G	10 MVA
2007	Obrřitství	ČR	2	BBS / G	1 MVA
2007	PTAS Mělník	ČR	2	SBS 3 / G	75 MVA
2007	VE Gumati	Gruzie	1	SBS 2 / G	10 MVA
2008	ČEZ,Tisová	ČR	1	SBS 3 / G	75 MVA
2008	VE Troja	ČR	2	BBS / G	2 MVA
2008	VE Gumati	Gruzie	2	SBS 2 / G	10 MVA
2008	TE Bratislava	Slovensko	1	SBS 2 / G	20 MVA
2008	VE Znojmo	ČR	1	SBS 0 / G	675 kVA
2008	VE Litice	ČR	1	SBS 0 / G	800 kVA
2008	VE Dosnica	Makedonie	3	SBS 1 / G	2 MVA
2008	Teplárna Ostrava	ČR	1	SBS 2 / G	20 MVA
2008	VE Kostelec n. Labem	ČR	2	BBS / G	1 MVA
2008	TE Michle	ČR	1	OD 2 / G	7 MVA
2008	VE Nymburk	ČR	2	SBS 0 / G	400 kVA
2009	VE Předměřice	ČR	1	SBS 1 / G	2 MVA
2009	TE Košice	Slovensko	1	SBS 4 / G	125 MVA
2009	VE Nymburk	ČR	3	BBS / G	600 kVA
2009	VE Spytihněv	ČR	2	BBS / G	2,5 MVA

2009	VE Meziboří	ČR	1	BBS / G + OD	5 MVA
2009	TE České Budějovice	ČR	1	SBS 2 / G	15 MVA
2009	Zrnovci	Makedonie	2	SBS 1 / G	3 MVA
2009	Znojmo	ČR	2	SBS 1 / G	675 kVA
2009	La Nicoliere	Mauritius	1	BBS / G	550 kVA
2010	Žilina	Slovensko	1	SBS 2 / G	15 MVA
2010	ČEZ, Dvůr Králové	ČR	1	BBS / G	5 MVA
2010	Grodno	Bělorusko	5	BBS / G	3 MVA
2010	VE Seč	ČR	1	SBS 1 / G	3,9 MVA
2011	VE Mířejovice	ČR	5	SBS 0 / G	1,4 MVA
2011	Cukrovar České Meziříčí	ČR	1	SBS 1 / G	5,5 MVA
2011	Bioelektrárna Kutná Hora	ČR	1	BBS / G	8 MVA
2011	TE Dwory Polsko	ČR	1	BBS / G	35 MVA
2011	TE Mydlovary	ČR	1	BBS / G	3,4 MVA
2011	Siemens - Stonava	ČR	1	BBS / G	6,3 MVA
2011	Badin	ČR	1	BBS / G	8,3 MVA
2011	VE Pardubice	ČR	1	BBS / G	2,4 MVA
2012	VE Ilava	Slovensko	1	BBS / G	12, 5 MVA
2012	VE Lipovec	Slovensko	1	BBS / G	16 MVA
2012	Cukrovar Trenčín	Slovensko	1	SBS 1 / G	7,5 MVA
2012	VE Midland	Mauritius	1	BBS / G	550 kVA
2012	Žilina	Slovensko	1	SBS 2 / G	15 MVA
2012	Bioelektrárna Kolín	ČR	1	BBS / G	7,5 MVA
2012	TE Bacau	Rumunsko	1	BBS / G	5 MVA
2012	TE Dej	Rumunsko	1	BBS / G	12 MVA
2012	VE Rudolfovo	ČR	1	SBS 0 / G	400 kVA
2012	Litoměřice	ČR	2	BBS / G	3,8 MVA
2012	VE Sokolský ostrov	ČR	3	BBS / G	500 kVA
2012	TE Elbląg	Polsko	1	BBS / G	31 MVA
2012	TE Domoradice	ČR	1	BBS / G	12 MVA