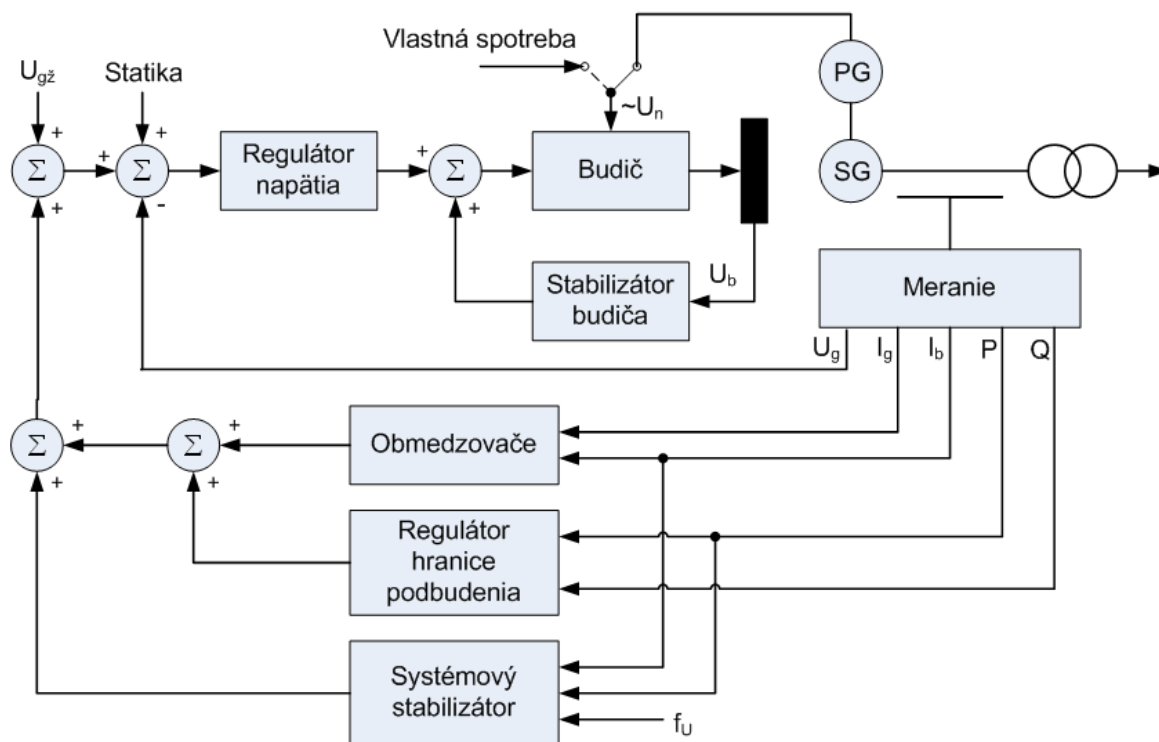


Budiace systémy elektrární na území Slovenskej republiky

Úvod

Veľké tzv. systémové elektrárne sú veľmi zložitú technickú zariadenia mimoriadnej dôležitosti nakoľko sa podstatnou mierou podieľajú na výrobe elektrickej energie. Technologická jednotka generovania výkonu má tri základné časti: synchronný generátor (SG), turbínu (TA) a budiaci systém (BS). V Elektrizáčnej sústave SR prebehli v ostatných rokoch rozsiahle výmeny BS realizované významnými spoločnosťami. Najskôr to boli výmeny BS systémovej elektrárne vo Vojanoch EVO V2 s využitím BS ELIN, potom v jadrových elektrárnach v Jaslovských Bohuniciach a Mochovciach so systémami BRUSH SEM v tepelnej elektrárni v Zemianskych Kostolnoch ENO B, kde bola dodávateľom spoločnosť VÚJE a BS ABB. Len nedávno prebehli výmeny BS vo vodnej elektrárni v Gabčíkove, kde implementátorom bola spoločnosť ZAT.

Budiace systémy výkonných synchronných generátorov určujú mnohé kvalitatívne ukazovatele elektrizačnej sústavy (ES), ako je presnosť udržiavania napätia v uzloch, tlmenie oscilácií rôznych frekvencií, zabezpečenie generátora pred nežiadúcim podbudením a veľkými satorovými prúdmi a pod. Pri nasadzovaní nových budiacich systémov je potrebné analyzovať vplyv budiacich systémov na stabilitu elektrizačnej sústavy a na základné kvalitatívne ukazovatele prechodných procesov. Základné bloky budiaceho systému sú znázornené na obr. 1.



- | | | |
|------------|---|------------------------------------|
| SG | - | hlavný synchronný generátor |
| PG | - | pomocný synchronný generátor |
| U_g, I_g | - | svorkové napätie a prúd |
| U_b, I_b | - | budiace napätie a prúd |
| P, Q | - | činný a reaktančný výkon |
| $U_{gž}$ | - | žiadaná hodnota svorkového napätia |
| U_n | - | striedavé napájacie napätie budiča |
| f_u | - | frekvencia svorkového napätia |

Obr.1 Bloková schéma budiaceho systému SG

Budiče tvoria výkonovú časť budiacich systémov. Najčastejšie sa rozdeľujú na rotačné a statické. Základom starších rotačných budičov sú jednosmerné generátory umiestnené na hriadeli generátora. Na zabezpečenie potrebných dynamických vlastností je do budiaceho systému zahrnutý aj stabilizátor budiča, čo je v podstate derivačná spätná väzba od budiaceho napätia. Novšie typy budičov sú konštruované na báze tyristorových riadených usmerňovačov. Ich najväčšou výhodou je rýchla dynamika a vysoká spoľahlivosť pri menších nárokoch na údržbu. Vzhľadom na rýchle dynamické vlastnosti sa predpokladá zaradenie stabilizátora (PSS) do systému. Napájanie týchto budičov je z vlastnej spotreby, alebo, ak je to možné, z nezávislého zdroja, ktorým môže byť striedavý alternátor umiestnený na hriadelí synchronného generátora.

Bloky ochrán zabezpečujú synchronný generátor pred preťažením nadmerným statorovým alebo rotorovým prúdom, strážia hranicu podbudenia a tiež chránia SG proti preťaženiu jalovým výkonom pri paralelnej prevádzke viacerých strojov. Tento blok sa realizuje rôznymi algoritmi od PID až po logické automaty.

Regulátory napätia (jalového výkonu) slúžia na automatické udržiavanie svorkového napätia (alebo jalového výkonu) na želanej úrovni. V moderných budiacich systémoch sú zásadne len v číslicovej podobe a najčastejšie sa realizujú proporcionálnym (P) alebo proporcionálne-sumačným (PS) algoritmom. Ide o diskretnú podobu známych P a PI algoritmov, ktoré boli realizované v analógových regulátoroch (AVR).

Stabilizátor (Power System Stabilizer – PSS) je blok v budiacom systéme, ktorý zvyšuje útlm v sústave a zabezpečuje tým stabilitu aj pri „veľkých poruchách“. Štruktúra stabilizátorov môže byť rozmanitá. Môžu to byť korekčné články založené na princípe stavovej spätnej väzby, kaskádne zapojené PD články, tzv. dynamické kompenzátory, ktoré sú v zjednodušenej podobe s jedným derivačným členom aj súčasťou normy IEEE. Najnovšie sa stabilizátory navrhujú ako adaptívne, ktoré menia svoje parametre v závislosti od stavu sústavy. Vstupom do stabilizátora je signál zostavený z merateľných veličín generátora (sklz, činný výkon, budiaci prúd, atď.)

Klasifikácia budičov podľa IEEE

Medzinárodná federácia elektrotechnických inžinierov IEEE sa venuje problematike budiacich systémov generátorov v dvoch svojich dokumentoch. Prvý [1] z roku 1968 sa zaoberá rozdelením budiacich systémov, ich nomenklatúrou a riadením. Druhý dokument [2], ktorý bol vydaný v roku 1981 sa zaoberá modelovaním budiacich systémov pre štúdium stability elektrizačného systému. Budiace systémy sa triedia v obidvoch správach do troch skupín :

- jednosmerné budiace systémy (DC) s jednosmerným rotačným generátorom ako zdrojom budiaceho prúdu
- striedavé budiace systémy (AC) s alternátorom a rotačným, alebo statickým usmerňovačom
- statické budiace systémy (ST), v ktorých transformátor napája usmerňovač pre budenie.

Striedavé budiace systémy sú rozdelené do štyroch kategórií: AC1, AC2, AC3, AC4.

AC1 – riadený pomocný synchronný generátor, neriadený usmerňovač, spätná väzba aj od budiaceho prúdu synchronného generátora do rozdielového člena regulátora s uvažovaním nasýtenia,

AC2 – podobne ako AC1, s ohraničením minimálneho budiaceho napätia a budiaceho prúdu,

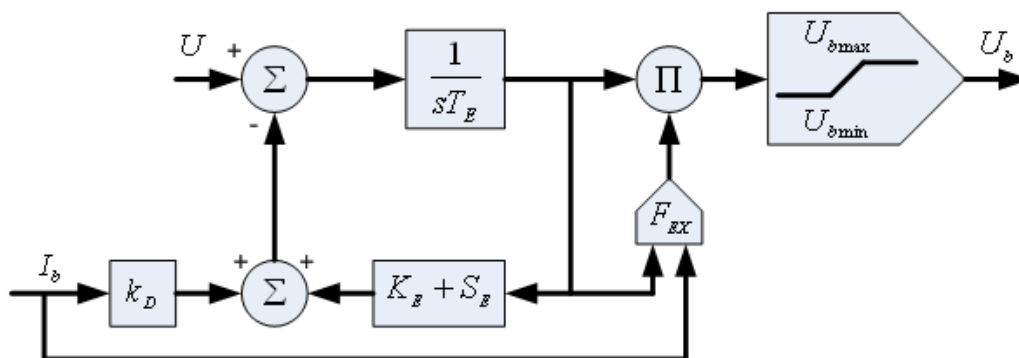
AC3 – podobne ako AC2, ale s ohraničením maximálneho budiaceho napätia synchronného generátora, nelineárna spätná väzba do regulátora budenia od napätia synchronného generátora,

AC4 – konštantné napätie pomocného synchronného generátora, riadený tyristorový usmerňovač cez regulátor budenia synchronného generátora.

Statické budiace systémy sa rozdeľujú do troch kategórií: ST1, ST2, ST3, v ktorých je napájanie zabezpečené z transformátora. Budičom je riadený usmerňovač, regulátor budenia má rôzne spätné väzby, kompaudáciu a stabilizáciu. Všeobecná bloková schéma pre riadenie budenia synchronného generátora je na obr. 2. V systémových elektrárňach slovenskej elektrizačnej sústavy sú použité budiace systémy ST1, AC1 a AC4.

Rotačné synchronné budiče – AC1

Základom tohto typu budiča je pomocný synchronný generátor, ktorý napája diódový neriadený usmerňovač. Regulátor budenia je zapojený tak, že ovláda tyristorový mostík, z ktorého je napájané budiace vinutie pomocného generátora. Bloková schéma riadenia je na obr.2.



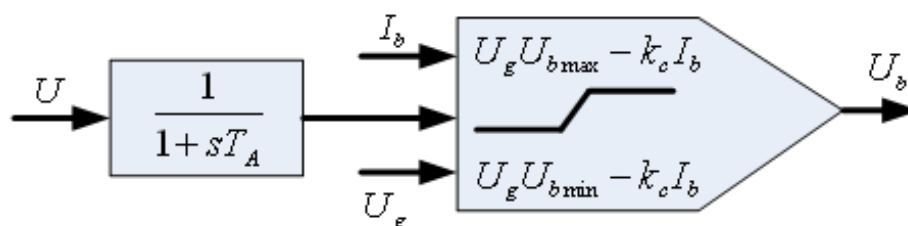
Komutačná funkcia : $F_{EX} = f(I_b)$

Obr.2 Bloková schéma modulu AC 1

Statické budiče závislé – ST1 a nezávislé – AC4

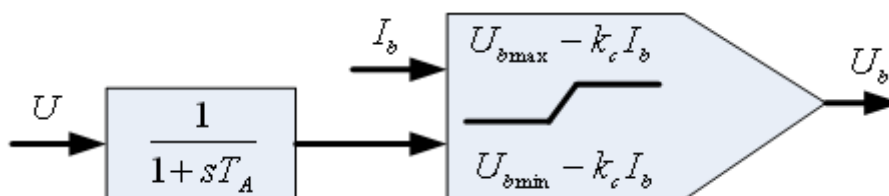
V tomto prípade sa jedná o tyristorové budenie, ktoré predstavuje ďalší vývojový stupeň budiacich systémov.

Závislé budiace systémy ST1 – predstavujú budiče takej koncepcie, kde tyristorový mostík je napájaný cez transformátor priamo z generátora a sú teda závislé na tomto napätí. Výhoda tohto typu spočíva hlavne v tom, že neobsahujú rotujúce zariadenia. Bloková schéma modelu je na obr. 3.



Obr.3 Bloková schéma ST 1

Nezávislé budiace systémy AC4 – základ tvorí riadený tyristorový usmerňovač, ktorý na rozdiel od predošlého spôsobu je napájaný z pomocného synchronného generátora a teda budenie nie je závislé na napätí generátora. Tyristorové budiace systémy plne vyhovujú vysokým požiadavkám na kvalitu a spoľahlivosť. Bloková schéma modelu je na obr. 4.



Obr.4 Bloková schéma modulu AC 4

Regulátory napätia

Regulátory napätia so štruktúrou PI

Ide o najčastejšie používanú štruktúru regulátorov svorkového napätia synchronných generátorov všetkých výkonov. Prenosová funkcia týchto regulátorov v analógovej podobe je

$$G_R(s) = \frac{U_R(s)}{E(s)} = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right)$$

kde U_R je výstupná veličina regulátora – vstup do budiča

E – regulačná odchýlka, $U_{gž} - U_g$

$U_{gž}, U_g$ sú žiadaná hodnota a aktuálne svorkové napätie.

Ak ide o číslicový regulátor, bude jeho diskrétna prenosová funkcia v tvare

$$G_R(z) = \frac{U_R(z)}{E(z)} = \frac{q_0 z^{-1} + q_1 z^{-2}}{1 - z^{-1}}$$

kde

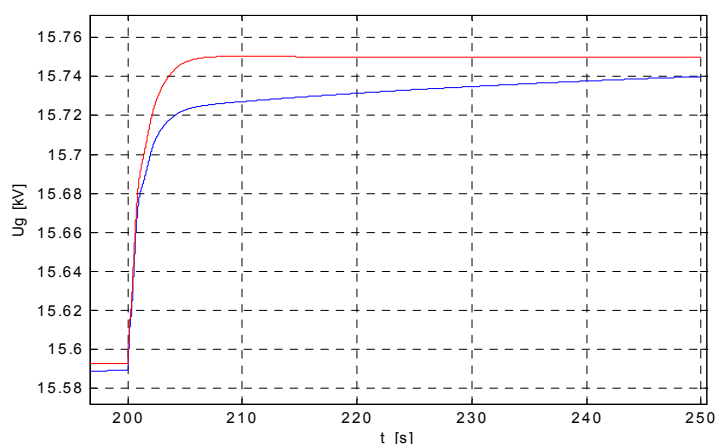
$$q_0 = K, \quad q_1 = -K \left(1 - \frac{T}{T_i} \right)$$

K, T_i sú parametre spojitého PI regulátora a T je perióda vzorkovania, ktorá sa pri regulátoroch napätia často nastavuje na hodnotu 20 ms.

Regulátory napätia musia zabezpečiť požadovanú hodnotu svorkového napätia pri stanovenej kvalite riadenia. Kvalita riadenia napätia pre systémové elektrárne, ktorých výkon je vyvedený do 400kV rozvodní je stanovená v podmienkach pripojenia nasledovne:

- Čas regulácie menší ako 15s
- Maximálne preregulovanie menšie ako 5%.

Podmienky pripojenia sú preverované garančnými meraniami pri výmene budiacich systémov. Na obr.5 sú uvedené dve prechodové charakteristiky regulátora napätia 220 MW SG po výmene BS. Ak je nastavenie parametrov regulátora napätia nesprávne, je proces regulácie pomalý a môže trvať niekoľko minút. Pri správne (optimálne) nastavenom regulátore je spravidla čas regulácie menší ako 10s.



Obr. 5 Prechodové charakteristiky svorkového napätia SG s PI regulátorom napätia

Regulátory napätia so štruktúrou Lead-Lag

Táto štruktúra regulátorov je obľúbená najmä na americkom kontinente ale aj v ES SR sa začína implementovať pri výmenách budenia (ENO). Regulátor napätia budiaceho systému so štruktúrou Lead-Lag doplnený o statické zosilnenie má prenosovú funkciu:

$$G_R(s) = \frac{a_1 T_1 s + 1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{a_2 T_2 s + 1}{T_2 s + 1}$$

kde a_1, T_1, a_2, T_2 sú parametre regulátora. Regulátor napätia Lead-Lag je bez astatizmu a teda reguluje napätie s trvalou regulačnou odchýlkou. Na jej zníženie treba do série zaradiť zosilnenie K , ktoré zvyšuje zosilnenie otvoreného obvodu. Veľkosť zosilnenia otvoreného obvodu určuje veľkosť trvalej regulačnej odchýlky (statická presnosť)

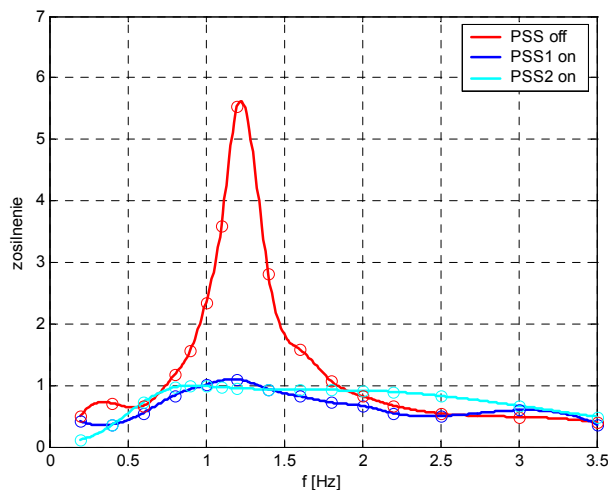
$$e(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \frac{1}{K+1}$$

kde $e(\infty)$ je hodnota trvalej regulačnej odchýlky
 $e(t)$ – časový priebeh regulačnej odchýlky
 K – zosilnenie otvoreného obvodu.

Zosilnenie K by teda nemalo byť menšie ako 100, aby trvalá regulačná odchýlka nebola väčšia ako 1 %.

Systémový stabilizátor

Úlohou systémového stabilizátora (PSS) je zabezpečenie dostatočného útlmu oscilácií činného výkonu. Útlm je preverovaný meraním frekvenčných charakteristík a prechodových charakteristík. Spoľahlivou podmienkou pre zabezpečenie dostatočného útlmu oscilácií činného výkonu je ak amplitúdová frekvenčná charakteristika je pre všetky frekvencie menšia ako jedna. Tvarovanie frekvenčnej charakteristiky činného výkonu SG je možné zabezpečiť optimalizáciou parametrov PSS. Na obr. 6 sú uvedené amplitúdové frekvenčné charakteristiky 220 MW SG získané počas optimalizácie parametrov PSS. Z obr. 6 je zrejmé, že implementáciou PSS možno maximálnu hodnotu amplitúdovej charakteristiky znížiť z hodnoty 5.6 na požadovanú hodnotu 1.0. Charakteristika s PSS1 bola odmeraná počas garančných meraní a charakteristika s PSS2 bola odmeraná po optimalizácii PSS.



Obr. 6 Porovnanie amplitúdových frekvenčných charakteristík TG42 pri zapnutom (PSS1 on) a vypnutom (PSS off) a optimalizovanom (PSS2 on) stabilizátore

Záver

Budiace systémy systémových elektrární slovenskej energetiky sa značnou mierou podieľajú na tom, že z pohľadu elektrizačnej sústavy kontinentálnej Európy národná slovenská sústava nie je zdrojom oscilácií činného výkonu, ktoré by mohli byť jedným z pôvodcov rozpadu sústavy s nepredstaviteľnými následkami. Pomerne tvrdé kritériá na pripojenie elektrární do Prenosovej sústavy SR a to nielen v oblasti kvality regulácie svorkových napätí synchronných generátorov ale aj pri tlmení oscilácií činného výkonu prinútili dodávateľov budiacich systémov venovať veľkú pozornosť tejto oblasti. Pri výmene všetkých budiacich systémov dominantných elektrární ES SR bolo garančnými meraniami

preukázané splnenie podmienok pripojenia z merania prechodových a frekvenčných charakteristík. Posledné garančné merania sa uskutočnili na vodnej elektrárni v Gabčíkove [3].

Literatúra

- [1] Computer Representation of Excitation Systems. IEEE Trans., PAS – 87 (1968), 1460 – 1464.
- [2] Excitation System Models For Power System Stability Studies. IEEE Committee Report. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS – 100, No. 2, 1981, 494 – 509.
- [3] Kontrola dynamických vlastností TG 3,4 EGA. Garančné merania podľa PNE-34-01-2002. Správa, 2011, Systémy priemyselnej informatiky, s.r.o.

prof. Ing. Ján Murgaš, PhD.

Ing. Martin Foltin, PhD.

Ing. Michal Blaho

FEI STU Bratislava

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky

Ilkovičova 3

812 19 Bratislava

E-mail: jan.murgas@stuba.sk, martin.foltin@stuba.sk, michal.blaho@stuba.sk