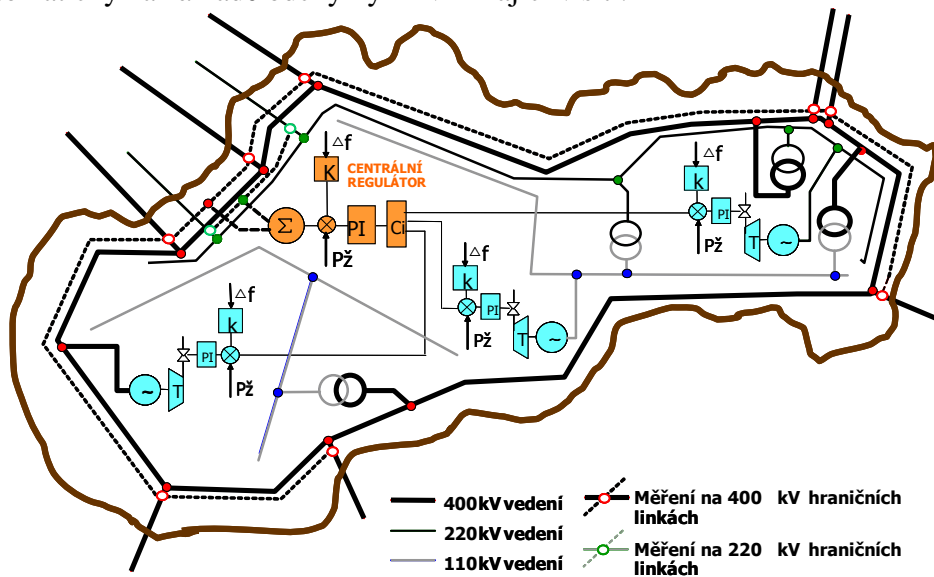


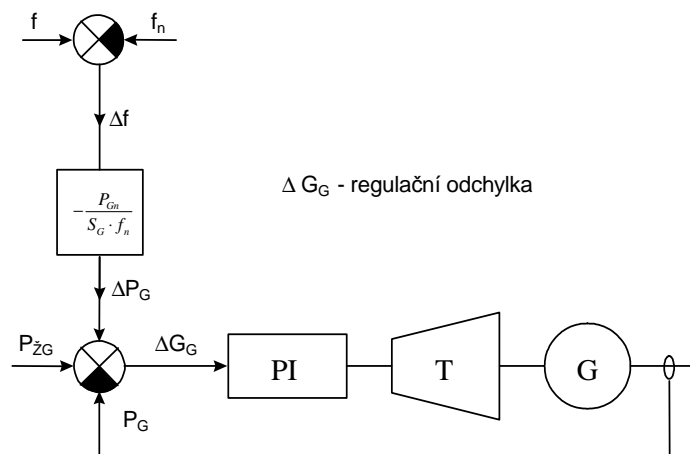
## Regulace f v propojených soustavách

Zopakování principu primární a sekundární regulace f v izolované soustavě si ukážeme obr. ,kde je znázorněna PS Slovenské Republiky. Modře jsou vyznačeny bloky, které jsou zařazeny do regulace f. Na těchto blocích jsou korektory frekvence a PI regulátory turbín (reprezentované měničem nerovnoměrnosti – proporciální regulace (nastavuje se statika regulátoru) a měnič středních otáček – integrační složka (mění přiřazení výkonu jednotlivým otáčkám) měněny výkony generátorů pracujících v regulaci f. Primární regulace na těchto blocích pracuje automaticky na základě odchylky  $\Delta f$  vznikající v síti.

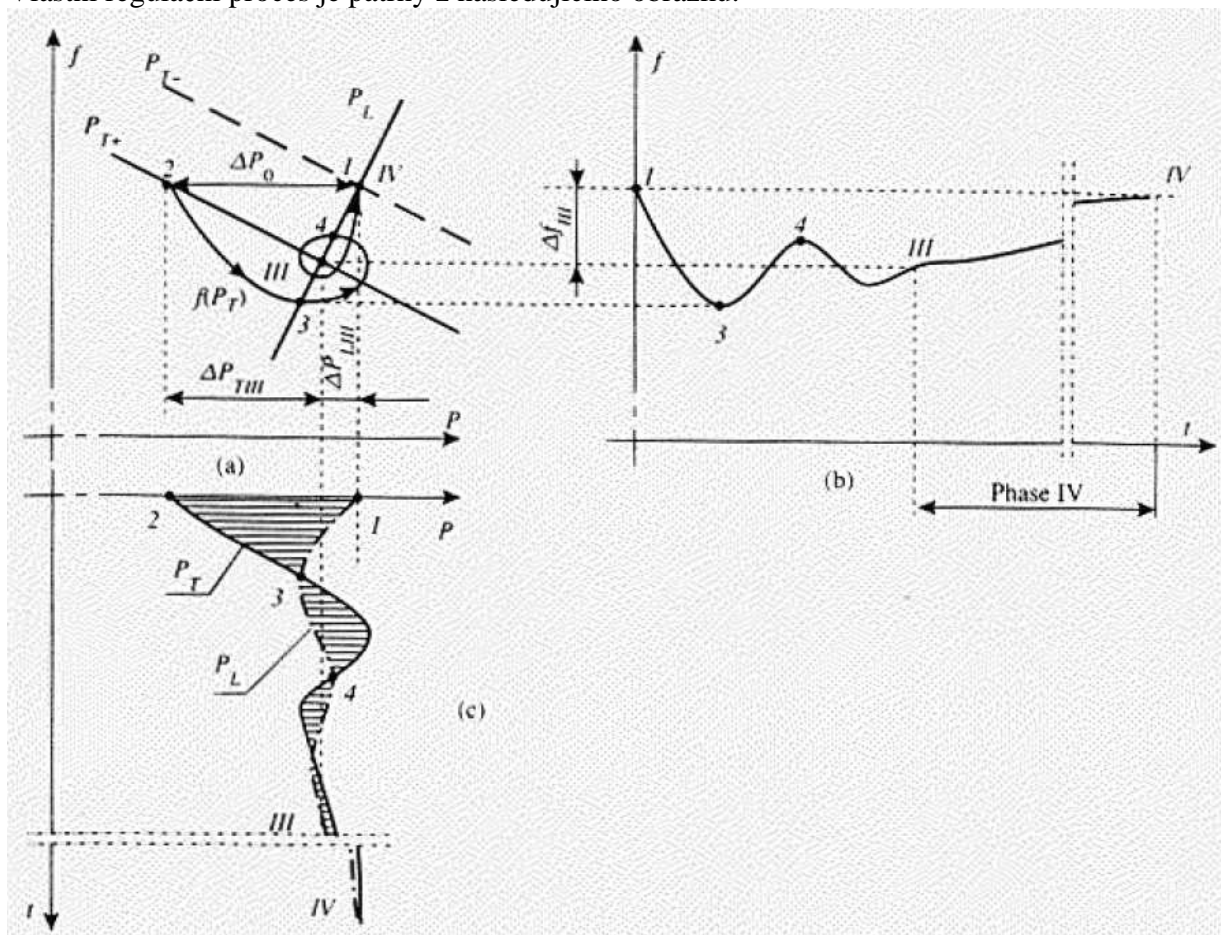


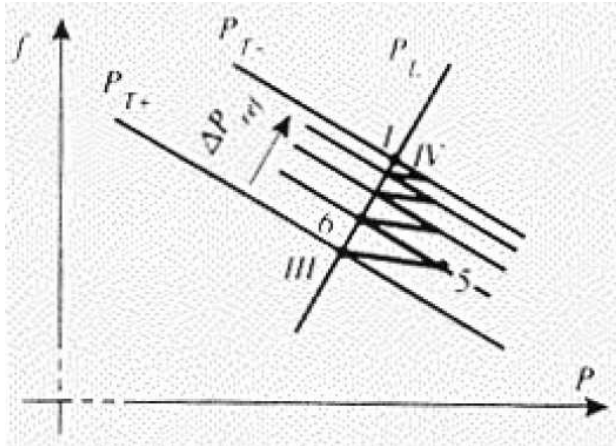
Po odeznění primární regulace začne působit sekundární regulace – vzniklou ACE (kvazistatickou frekvenční odchylku) centrální regulátor vyhodnotí a pošle impulzy na jednotlivé sekundární regulátory, aby zvýšily nebo snížily výkon dodávaný do ES.

Detailnější provedení regulační smyčky na jednotlivých blocích je vidět na následujícím obrázku:



Kde:  $s$  – nastavená statika proporcionální regulátoru výkonu turbíny.  
 Vlastní regulační proces je patrný z následujícího obrázku:





Zvýšením zátěže dojde k přesunu statické charakteristiky zátěže z bodu 2 do bodu 1. Primární regulátory generátorů podle svých statických charakteristik dorovnájí výkonovou bilanci do bodu 4. Vlastní regulační proces probíhají změny výkonů a frekvence je vidět na spodním a pravém obrázku.

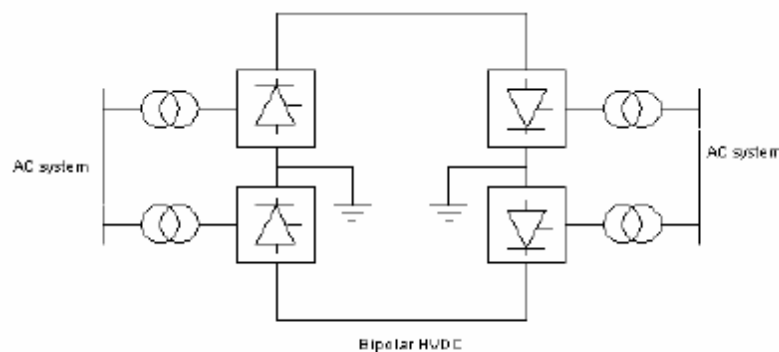
Po ukončení působení primární regulace začne působit sekundární regulace, která zvýší výkon generátorů a posune jejich statickou charakteristiku do bodu 1. Z grafu jsou vidět jednotlivé výkony poskytnuté v primární a sekundární regulaci  $f$ .

## Propojené soustavy

Soustavy lze propojovat přes DC spojení nebo synchronně AC vedením. Tj. tzv. *nesynchronním propojením* nebo *synchronním propojením*.

### Stejnoseměrná spojka (DC – direct current).

Tato zařízení je složeno z usměrňovačů, střídačů, transformátorů, filtrů a kompenzačních prostředků sloužících k propojení nesynchronně pracujících soustav stejnosměrným přenosem na nulovou vzdálenost. Principiální jednopólové schéma je uvedeno na obrázku:



Používá se v případech, kde vlivem dlouhých přenosů nelze zajistit stabilitu provozu nebo pro připojení soustav, které nejsou schopny zajistit standardy provozování propojeného provozu, zejména pak principy solidarity a neintervence.

## Synchronně propojené soustavy

Jsou prostřednictvím pomoci mezi-systémových propojení. V Evropě je nejvíce národních soustav je propojeno v systému propojených soustav UCTE (dříve UCPTÉ - západní Evropa). V rámci této soustavy je organizační jednotka CENTREL (střední Evropa – Česko, Slovensko, Maďarsko a Polsko). Další soustavou je NORDEL (severní Evropa). – viz. *Obrázky v příložených souborech*.

Jak bylo řečeno v předcházející přednášce jedna z hlavních výhod je zvýšená kvalita dodávané elektřiny - zejména stálost frekvence.

V této přednášce bude tedy diskutována problematika

Synchronní propojení jednotlivých soustav je založeno na dvou základních principech:

- princip solidarity
- princip neintervence

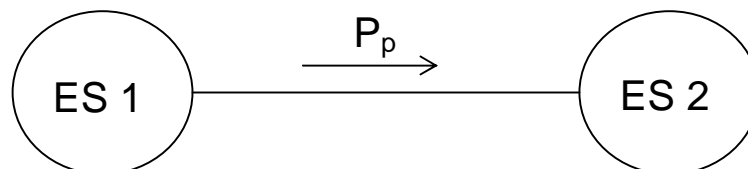
Soustava (nebo soustavy) ohraničená mezi-systémovými propojeními musí být schopna regulovat vyráběný výkon tak, aby udržovala plánovanou výměnu elektřiny se sousedními přenosovými soustavami a přispívat k regulaci frekvence v propojené soustavě.

Při obnovování výkonové rovnováhy v příslušné soustavě - oblasti řízení navazuje sekundární regulace  $f$  a  $P$  na primární regulaci frekvence tak, aby postupně nahradila výkon, který jí byl poskytnut na principu solidarity v propojené soustavě.

Z toho vyplývá, že podmínkou efektivního a účinného fungování obou regulací je jejich vzájemná koordinace.

## Primární a sekundární frekvence v propojených soustavách

Činnost primární a sekundární regulace  $f$  v propojených soustavách si ukážeme na příkladu dvou propojených soustav:



kteří jsou propojeny jedním vedením (přeshraničním vedením).

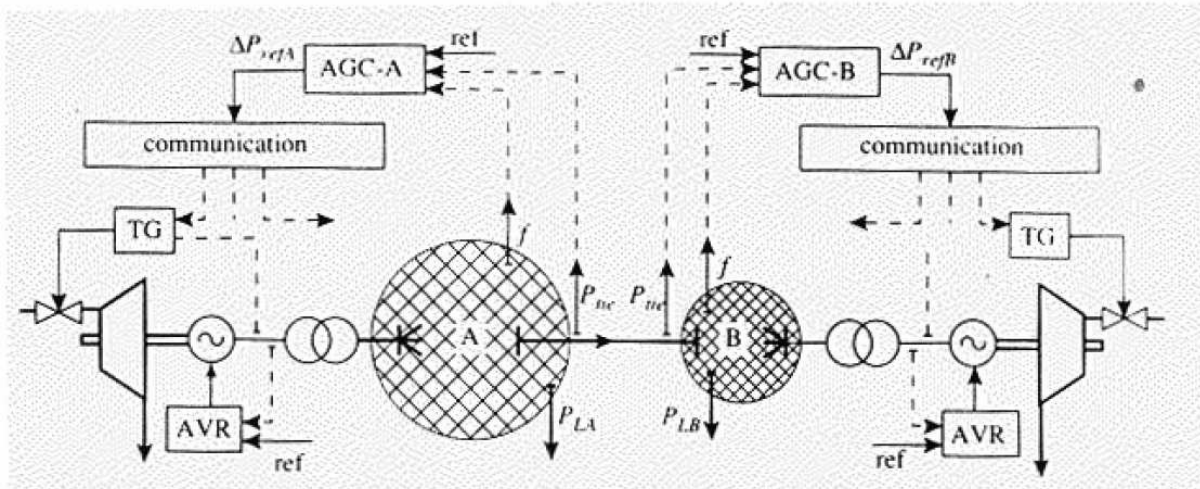
Předpokládejme že v ustáleném stavu regulační oblast 1 dodává do regulační oblasti 2 výkon  $P_p$ . Dále předpokládejme, že v regulační oblasti 2 došlo k nárůstu zatížení. Důsledkem toho bude snížení frekvence v obou soustavách, což aktivuje primární regulaci na všech elektrárnách a zároveň se změní přenášený výkon mezi regulačními oblastmi. Sekundární regulace v regulační oblasti 1 nám dále zvýší přenášený výkon, čím můžeme překročit maximálně dovolený přenášený výkon, který je možné přenášet po propojovacím vedením. Tak může být ohrožena stabilita provozu a tím dojít i k havarijnímu odpojení mezi-systémového vedení.

Takovýmto stavům, které by nám z hlediska působení sekundární regulace mohly spolehlivost provozu zhoršit, se snažíme pochopitelně zabránit. Proto je v propojených soustavách zachován **princip neintervence**, tj. konečné vyregulování frekvence na jmenovitou hodnotu musí být provedeno soustavou ve které došlo k porušení výkonové bilance. Tím je zároveň dodržena dojednaná hodnota dodávaného výkonu ze soustavy 1 do soustavy 2.

Proto musí být permanentně měřen výkon mezi soustavami a jeho hodnota vyhodnocována v centrálních regulátorech sekundární regulace frekvence jednotlivých soustav (AGC – area grid control).

Provedení v jednotlivých soustavách je patrné z obrázku ES Slovenska, kde jsou měřeny výkony v jednotlivých propojovacích vedeních.

*Pozn. v následujícím obrázku je ještě kromě automatických regulátorů frekvence ještě nakreslen princip automatická regulace (primární) napětí (AVR – automatic voltage regulation) v jednotlivých soustavách. Je autonomní, v každé soustavě pracuje nezávisle na druhé soustavě. Jednotlivé regulační elektrárny dorovnávají regulátor hodnotu napětí v referenčním uzlu na jmenovitou hodnotu.*



Regulátory vyhodnotí regulační odchylku (kvazistatickou – ACE), která má hodnotu.

$$ACE = \Delta P + K \Delta f$$

Kde:

$\Delta f$  – odchylka od jmenovité frekvence

$K$  – konstanta regulátoru [MW/Hz]

Podmínkou správného fungování regulátoru je, aby konstanta byla na stavena na hodnotu odpovídající výkonovému číslu dané soustavy, který je dáno součtem výkonových čísel jednotlivých elektrárenských bloků zařazených do primární regulace  $f$ :

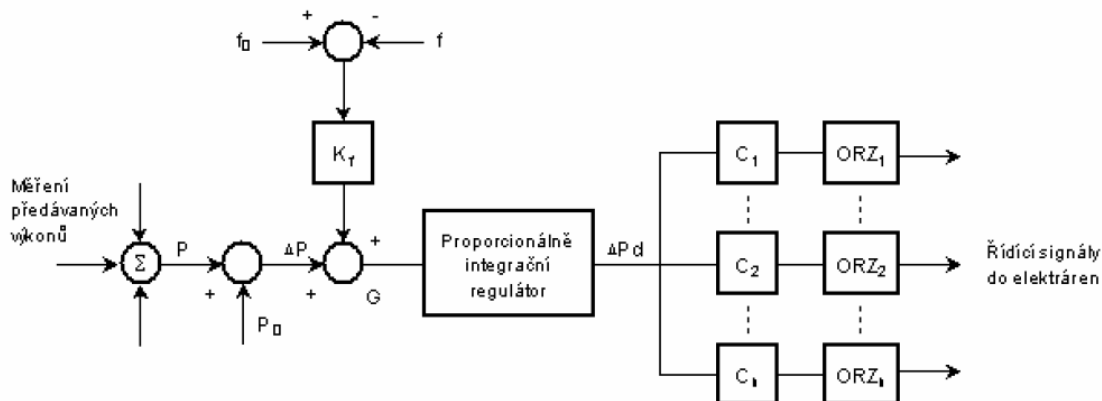
$$\lambda = \sum \frac{100}{\delta} \frac{P_n}{f_n}$$

Kde.

$\delta$  je statika primárních regulátorů  $f$  - [%]

Konstanta regulátoru se podle pravidel propojených soustav v UCTE nastavuje na hodnotu  $1,1 \lambda$ .

Prostřednictvím komunikačních kanálů jsou posílány impulzy na elektrárny které jsou zařazené do sekundární regulace  $f$ , aby dorovnaly výkon v příslušné soustavě, tak aby byla dodržena referenční hodnota výkonu (dohodnutá) mezi soustavami.



Nastavení konstanty sekundárního regulátoru musí být provedeno tak, aby se co nejvíce blížila hodnotě výkonového čísla soustavy. Dále musí být sladěna dynamika sekundární a primární regulace tak, aby sekundární regulační děj proběhl až po odeznění primární. Vlastní provedení regulace frekvence a přenášených výkonů (sald mezi soustavami) je na základě síťových charakteristik. Samotný regulátor pracuje podle metody *síťových charakteristik*.

### **Regulace frekvence metodou síťových charakteristik v propojených soustavách.**

Tato metoda spočívá v tom, že regulační odchylka sekundárního regulátoru ACE je tvořena součtem dvou složek - odchylky frekvence od zadané hodnoty násobené konstantou a odchylkou předávaných výkonů od plánované hodnoty.

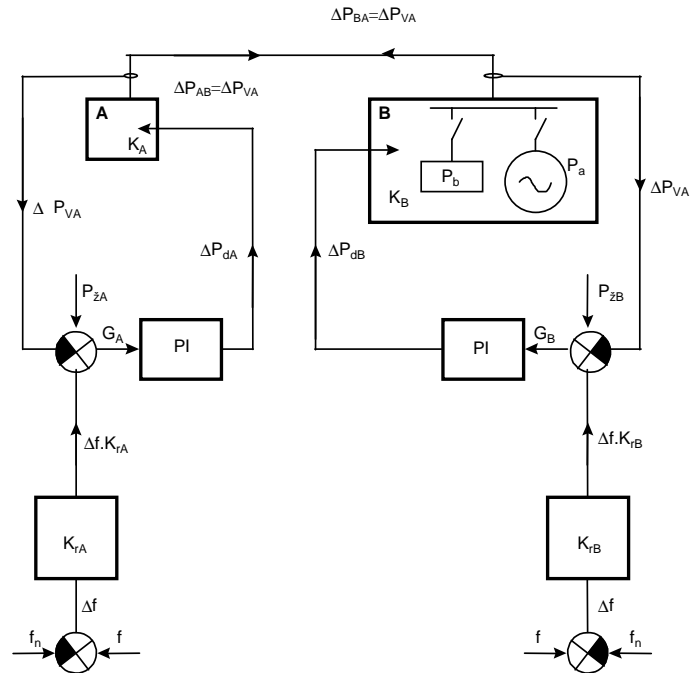
- Pokud nastavená konstanta odpovídá přesně výkonovému číslu regulované soustavy, nereaguje regulátor při vzniku výkonové nerovnováhy mimo regulovanou soustavu, a tím je zajištěn princip neintervence.
- Proces sekundární regulace  $f$  a  $P$  je realizován vysíláním žádané hodnoty výkonu ze sekundárního regulátoru na regulační bloky.
- Činnost sekundární regulace  $f$  a  $P$  by měla obnovit zadané hodnoty frekvence a předávaných výkonů ( $ACE=0$ ) do 15 min. od vzniku nerovnováhy.

Vyregulování poruchy si pro jednoduchost ukážeme na opět dvou propojených soustavách A a B přibližně stejné velikosti. Pokud je výkonový rozdíl soustav řádově odlišný, tak výpadky v malé soustavě prakticky velkou soustavu ovlivní málo.

Regulační odchylka regulátoru turbíny  $\Delta G_G$  je dána:

$$\Delta G_G = P_G + P_{zG} - P_G = - \frac{\Delta f \cdot P_{G_n}}{S_G \cdot f_n}$$

$$\Delta P_d = -k \cdot G - \frac{1}{T_r} \int G \cdot dt \quad [\text{MW}; \text{MW}, \text{min}]$$



### 1) Regulační proces primární regulace při výpadku výkonu zdrojů v soustavě B na hodnotě $P_b$

Výpočet je proveden na principu solidarity, tj. při výpadku v soustavě B zdroje o velikosti  $P_a$ . je snížení frekvence úměrné součtu výkonových čísel jednotlivých soustav. Pokles zjistíme ze vztahu:

$$\Delta f = \frac{-P_a}{K} = \frac{-P_a}{K_A + K_B} \quad [1]$$

Kde:

$$K = K_A + K_B$$

Je součet výkonových čísel regulačních oblastí A a B.

Výkon aktivovaný jednotlivými regulačními oblastmi je dán součtem výkonu, který byl aktivován regulátory primární frekvence v jednotlivých oblastech:

$$\Delta P_{VA} = \Delta P_{AG1} + \Delta P_{AG2} + \dots + \Delta P_{AG_K}$$

$$\Delta P_{VB} = \Delta P_{BG1} + \Delta P_{BG2} + \dots + \Delta P_{BG_K}$$

Pomocí vztahu jímž je definováno výkonové číslo jde vztah přepsat:

$$\Delta P_{VA} = -\Delta f \cdot (K_{AG1} + K_{AG2} + \dots + K_{AG_K}) = -\Delta f \cdot K_A = \frac{P_a}{K_A + K_B} \cdot K_A \quad [2]$$

$$\Delta P_{VB} = -\Delta f \cdot (K_{BG1} + K_{BG2} + \dots + K_{BG_K}) = -\Delta f \cdot K_B = \frac{P_a}{K_A + K_B} \cdot K_B \quad [3]$$

Příspěvek primární regulace v propojených soustavách (výkon o který se zvýší výroba v elektrárnách zapojených do primární regulace)

$$\Delta P_V = \Delta P_{VA} + \Delta P_{VB} = -\Delta f \cdot (K_A + K_B)$$

Dosazením za  $\Delta f$  z výrazu [1] dostaneme:

$$\Delta P_V = - \left( - \frac{P_a}{K_A + K_B} \right) \cdot (K_A + K_B) = P_a$$

Kde:

$\Delta P_V$  se rovná výkonu, který ze soustavy A vypadnul a má výkonovou hodnotu  $P_a$

### Regulační proces sekundární regulace frekvence v propojených soustavách při výpadku výkonu $P_a$ v soustavě B

Výpočtem by se měl prokázat princip sekundární regulace v propojených soustavách, tj. *princip neintervence*.

v ES ČR se používá následující značení:

výkon tekoucí ze soustavy se značí (-)

výkon tekoucí do soustavy se značí (+)

Regulátor regulační oblasti pro regulaci činného výkonu/frekvence musí být proporcionalně – integračního charakteru podle následující rovnice:

$$\Delta P_d = -k \cdot G - \frac{1}{T_r} \int G \cdot dt \quad [\text{MW}; \text{MW}, \text{min}]$$

Pro regulační odchylky sekundárních regulátorů obr. můžeme psát:

$$G_A = -(-\Delta P_{VA}) \cdot \Delta f \quad [\text{MW}]$$

Pro regulační odchylku sekundárního regulátoru v oblasti A tedy po úpravě platí:

$$G_A = \Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_{rA}$$

Kde:

$\Delta P_{VA}$  - výkon, který aktivovala primární regulace v soustavě

Při rovnovážném stavu v soustavě A teče výkon aktivovaný primární regulací do místa nedostatku (do soustavy B).

Na regulátoru můžeme nastavit konstantu regulátoru rovnou výkonovému číslu soustavy  $K_{rA} = K_A$ , potom platí:

$$G_A = \Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_A$$

$\Delta P_{VA}$  - výkon, který aktivovala primární regulace v soustavě A

- při rovnovážném stavu v soustavě A teče výkon aktivovaný primární regulací do místa nedostatku (do soustavy B)

- na regulátoru můžeme nastavit  $K_{rA} = K_A$ , potom platí:

$$G_A = \Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_A$$

Pokud  $\Delta f$  nahradíme výrazem [1] dostáváme:

$$G_A = \Delta P_{VA} + \left( - \frac{P_a}{K_A + K_B} \right) \cdot K_A$$



Za  $\Delta P_{VA}$  použijeme výraz [2], pak můžeme psát:

$$G_A = \frac{P_a}{K_A + K_B} \cdot K_A + \left( -\frac{P_a}{K_A + K_B} \right) \cdot K_A = \Delta P_{VA} - \Delta P_{VA} = 0$$

Z tohoto výrazu je patrné, že na výpadek v soustavě B nereaguje sekundární regulace v soustavě A (regulační odchylka  $G_A=0$ ).

Pro regulační odchylku v soustavě B můžeme psát:

$$G_B = -\Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_{rB}$$

Na regulátoru můžeme nastavit  $K_{rB} = K_B$ , potom platí:

$$G_B = -\Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_B$$

$\Delta f$  nahradíme výrazem z rovnice [1] a dostaneme:

$$G_B = -\Delta P_{VA} + \left( -\frac{P_a}{K_A + K_B} \right) \cdot K_B$$

Porovnáním s výrazem [3] dostáváme:

$$G_B = -\Delta P_{VA} - \Delta P_{VB} = P_a$$

Regulační odchylku  $G_B$  dosadíme do rovnice sekundárního regulátoru.

$$\Delta P_d = -kG - \frac{1}{T_r} \int G dt$$

a dostaneme:

$$\Delta P_{dB} = -\beta_B \cdot (-P_a) - \frac{1}{T_{rB}} \int (-P_a) dt$$

Po úpravě této rovnice dostáváme:

$$\Delta P_{dB} = \beta_B \cdot P_a + \frac{1}{T_{rB}} \int P_a dt$$

$$\Delta P_{dB} = P_a \left( \beta_B + \frac{1}{T_{rB}} \right)$$

Z poslední rovnice je patrné, že za určitý čas dojde ke zvýšení výkonu o hodnotu  $P_a$  podle nastavených konstant  $\beta$  a  $T$

## 2) Regulační proces primární regulace při výpadku zatížení $P_b$ v soustavě B

Předpokládejme nyní, že v soustavě B došlo k výpadku spotřeby o výkonové hodnotě  $P_b$ . Tím dojde ke zvýšení frekvence v propojených soustavách:

$$\Delta f = \frac{P_b}{K} = \frac{P_b}{K_A + K_B}$$

Kde:

$$K = K_A + K_B$$

je součet výkonových čísel jednotlivých regulačních oblastí.

Výkon aktivovaný jednotlivými regulačními oblastmi v primární regulaci pak bude součtem výkonů příspěvků všech elektrárenských bloků, které jsou zapojeny do systému primární regulace:

$$\Delta P_{VA} = \Delta P_{AG1} + \Delta P_{AG2} + \dots + \Delta P_{AG_k}$$

$$\Delta P_{VB} = \Delta P_{BG1} + \Delta P_{BG2} + \dots + \Delta P_{BG_k}$$

Tyto výkony lze pomocí vztahu pro výkonové číslo přepsat do tvaru:

$$\Delta P_{VA} = -\Delta f \cdot (K_{AG1} + K_{AG2} + \dots + K_{AG_k}) = -\Delta f \cdot K_A = \frac{P_a}{K_A + K_B} \cdot K_A \quad [2]$$

$$\Delta P_{VB} = -\Delta f \cdot (K_{BG1} + K_{BG2} + \dots + K_{BG_k}) = -\Delta f \cdot K_B = \frac{P_a}{K_A + K_B} \cdot K_B \quad [3]$$

Celkový příspěvek primární regulace v propojených soustavách tj. výkon o který se zvýší výroba v elektrárnách zapojených do primární regulace bude:

$$\Delta P_V = \Delta P_{VA} + \Delta P_{VB} = -\Delta f \cdot (K_A + K_B)$$

dosazením za  $\Delta f$  z výrazu rovnice [1] pak dostaneme:

$$\Delta P_V = -\left(\frac{P_a}{K_A + K_B}\right) \cdot (K_A + K_B) = -P_b$$

Kde:

$\Delta P_V$  se rovná výkonu, který ze vypadnul ze soustavy B a má hodnotu  $P_b$

### Regulační proces sekundární regulace při výpadku výkonu na straně zátěže v soustavě B o hodnotě $P_b$

Výpočtem by se měl prokázat princip sekundární regulace v propojených soustavách, tj. *princip neintervence*.

Pro regulační odchylku sekundárního regulátoru v oblasti A platí:

$$G_A = -\Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_{rA}$$

Kde:

$\Delta P_{VA}$  je výkon, který aktivovala primární regulace v soustavě A.

V soustavě B došlo k výpadku spotřeby (nastane přebytek výkonu), primární regulace začne snižovat výkon a přebytečný výkon teče do soustavy A. Na regulátoru můžeme nastavit  $K_{rA} = K_A$ , a potom platí:

$$G_A = -\Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_A$$

Pokud kvazistatickou regulační odchylku  $\Delta f$  nahradíme výrazem [1] dostáváme:

$$G_A = -\Delta P_{VA} + \left(\frac{P_b}{K_A + K_B}\right) \cdot K_A$$

za  $\Delta P_{VA}$  můžeme dosadit výraz [2], a pak můžeme psát:

$$G_A = \left(-\frac{P_a}{K_A + K_B}\right) \cdot K_A + \left(\frac{P_a}{K_A + K_B}\right) \cdot K_A = -\Delta P_{VA} + \Delta P_{VA} = 0$$

z tohoto výrazu je patrné, že na výpadek v soustavě B nereaguje sekundární regulace v soustavě A (regulační odchylka sekundárních regulátorů je  $G_A=0$ )

Pro regulační odchylku v soustavě B můžeme psát:

$$G_B = \Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_{rB}$$

Na regulátoru můžeme nastavit  $K_{rB} = K_B$ , a potom platí:

$$G_B = \Delta P_{VA} + \Delta f \cdot K_B$$

Za  $\Delta f$  opět nahradíme výrazem z rovnice [1] čímž dostaneme:

$$G_B = \Delta P_{VA} + \left( \frac{P_b}{K_A + K_B} \right) \cdot K_B$$

Porovnáním s výrazem [3] dostáváme:

$$G_B = \Delta P_{VA} + \Delta P_{VB} = P_b$$

Regulační odchylku  $G_B$  dosadíme do rovnice sekundárního regulátoru:

$$\left( \Delta P_d = -k \cdot G - \frac{1}{T_r} \int G dt \right)$$

a dostaneme:

$$\Delta P_{dB} = -\beta_B \cdot P_b - \frac{1}{T_{rB}} \int P_b dt$$

Po úpravě této rovnice dostáváme:

$$\Delta P_{dB} = -\beta_B \cdot P_b - \frac{1}{T_{rB}} \int P_b dt$$

$$\Delta P_{dB} = -P_a \cdot \left( \beta_B + \frac{1}{T_{rB}} \right)$$

Z poslední rovnice je patrné, že za určitý čas dojde ke zvýšení výkonu o hodnotu  $P_a$  podle nastavených konstant  $\beta$  a  $T$ .