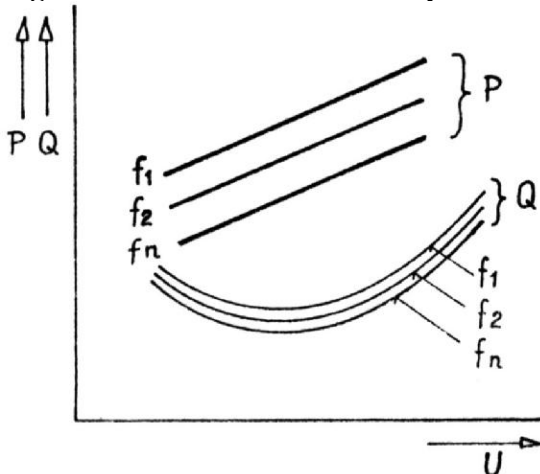


18. Řízení elektrizační soustavy

ES je spojení paralelně pracujících elektráren, přenosových a rozvodných sítí se spotřebiči. Provoz je optimálně spolehlivá hospodárná dodávka kvalitní elektrické energie. Stěžejními parametry jsou frekvence (globální parametr) a velikost napětí (lokální parametr). Další parametry jsou obsah vyšších harmonických a případná nesymetrie napětí.

Regulace frekvence a velikosti napětí



Řízení je spojeno s dodávkou a přenosem činného a jalového výkonu v soustavě.

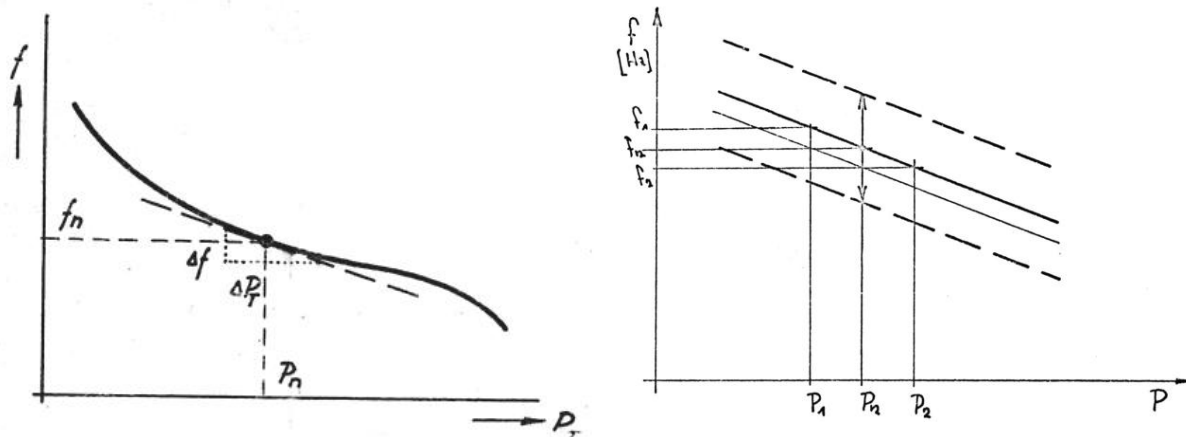
Je zřejmé, že činný výkon je výrazně citlivý na změny frekvence a méně na změny velikosti napětí. U jalového výkonu je to přesně opačně.

Lze tedy analyzovat vliv a vazbu $f \leftrightarrow P$ resp. $|U| \leftrightarrow Q$ odděleně.

Regulace frekvence a předávaných činných výkonů

V neregulované soustavě je změna zatížení nebo velikosti zdrojů spojena se změnou frekvence podle charakteristik zátěží a zdrojů.

Statické charakteristiky zdrojů jsou dány primárními regulátory otáček turbín.



Charakteristika soustavy je pak „součet“ jednotlivých výroben, jejíž průběh lze vzhledem k různému poměrnému zatížení plus necitlivosti a nelinearitě dílčích regulátorů získat pouze experimentálně.

Po linearizaci v pracovním bodě lze definovat výkonové číslo zdrojů:

$$K_A = -\frac{\Delta P_T}{\Delta f} \quad [MW / Hz]$$

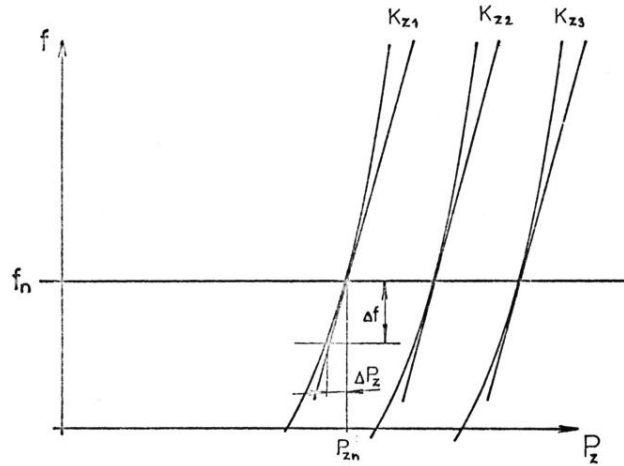
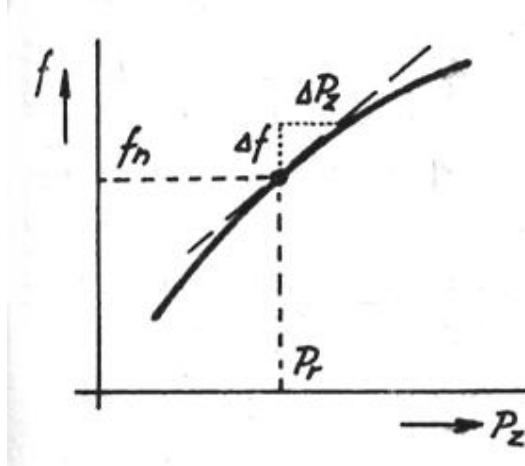
Součinitel statismu zdrojů (statika) je pak: $s_T = \frac{\Delta f [p.j.]}{\Delta P_T [p.j.]} = \frac{\Delta f / f_N}{\Delta P_T / P_{TN}} = \frac{\Delta f}{\Delta P_T} \cdot \frac{P_{TN}}{f_N}$

Výkonové číslo v poměrné hodnotě:

$$k_A = - \frac{\Delta p_T [p.j.]}{\Delta f [p.j.]} = - \frac{1}{s_T}$$

$$K_A = k_A \frac{P_{TN}}{f_N} = - \frac{P_{TN}}{f_N \cdot s_T}$$

Statické charakteristiky zatížení



Opět je možno výslednou charakteristiku zátěže elektrizační soustavy získat jako „součet“ dílčích charakteristik jednotlivých spotřebičů:

- 20 až 25% topná zařízení, osvětlení - odporová zátěž
- 50 až 70 % pohony – motorická zátěž
- 10 až 12 % - zvláštní zatížení a ztráty

Analogicky jako u zdrojů lze po linearizaci v pracovním bodě opět definovat tentokrát výkonové číslo zátěže:

$$K_Z = + \frac{\Delta P_Z}{\Delta f} \quad [MW / Hz]$$

$$s_Z = \frac{\Delta f [p.j.]}{\Delta P_Z [p.j.]} = \frac{\Delta f / f_N}{\Delta P_Z / P_{ZN}} = \frac{\Delta f}{\Delta P_Z} \cdot \frac{P_{ZN}}{f_N}$$

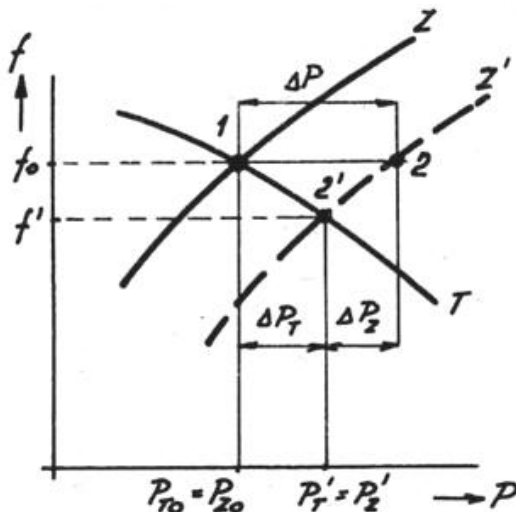
$$k_Z = + \frac{\Delta p_Z [p.j.]}{\Delta f [p.j.]} = \frac{1}{s_Z}$$

$$K_Z = k_Z \frac{P_{ZN}}{f_N} = \frac{P_{ZN}}{f_N \cdot s_Z}$$

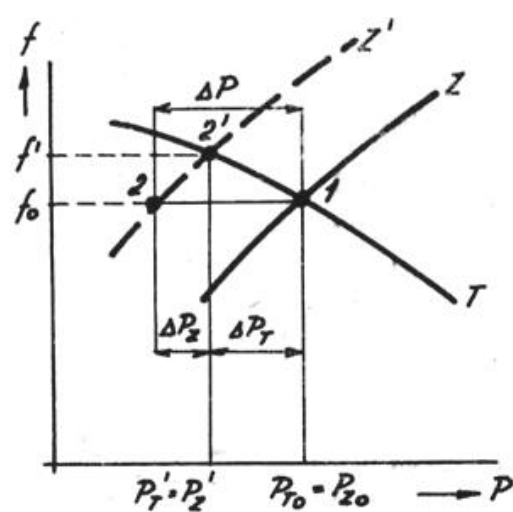
Statická charakteristika elektrizační soustavy

Pracovní bod je určen charakteristikami zdrojů a zátěže a posouvá se při změnách frekvence zapříčiněných změnami velikosti zdrojů a spotřebičů:

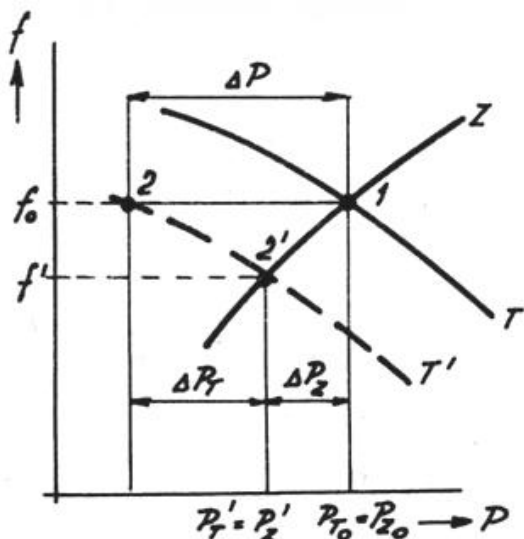
Nárůst zatížení



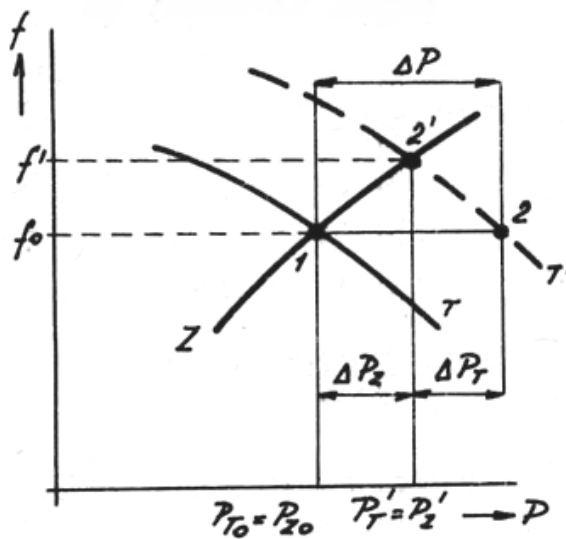
Pokles zatížení



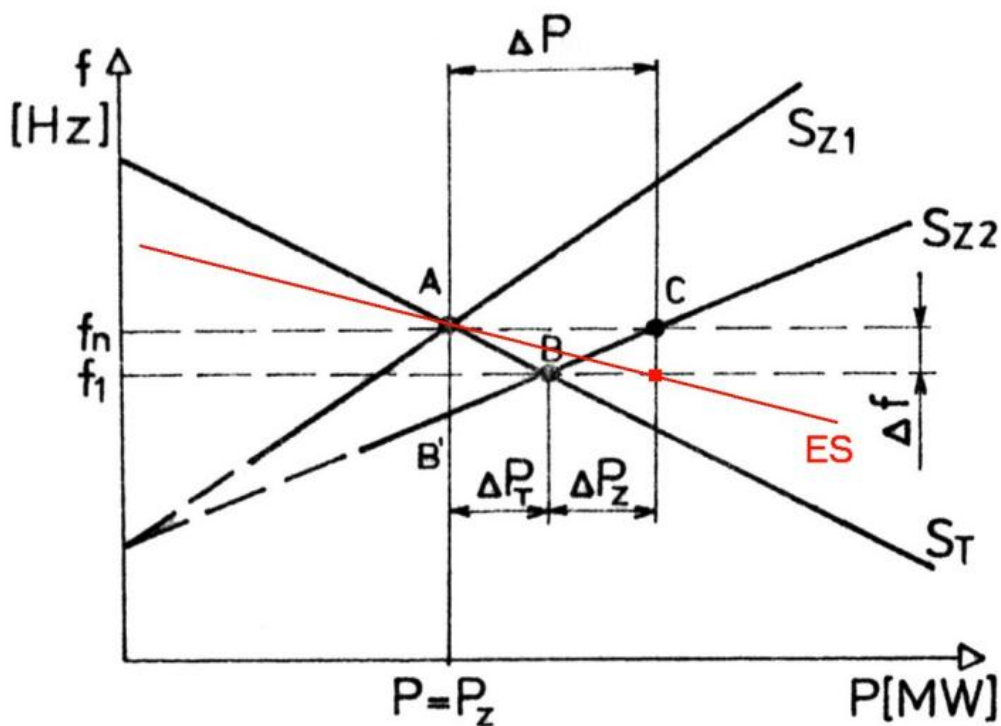
Výpadek zdroje

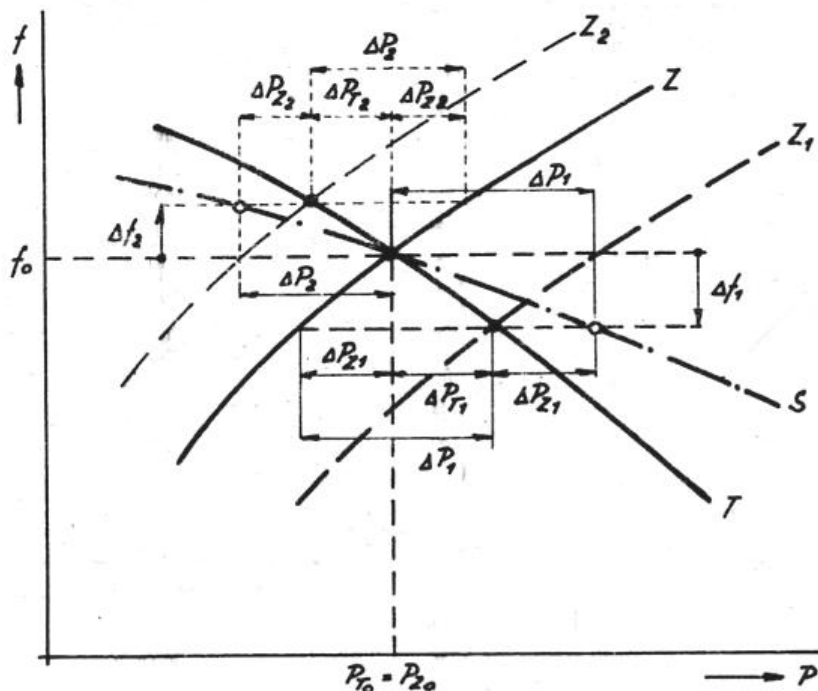


Přírůstek zdroje



Například při nárůstu zatížení o ΔP dochází o zvýšení výkonu zdrojů jen o ΔP_T a zbývající nedostatek je hrazen snížením požadavků zátěže o ΔP_Z při sníženém kmitočtu. Proces se nazývá samoregulační efekt elektrizační soustavy. Kombinovaná charakteristika soustavy je potom:





$$K_{ES} = -\frac{\Delta P}{\Delta f}$$

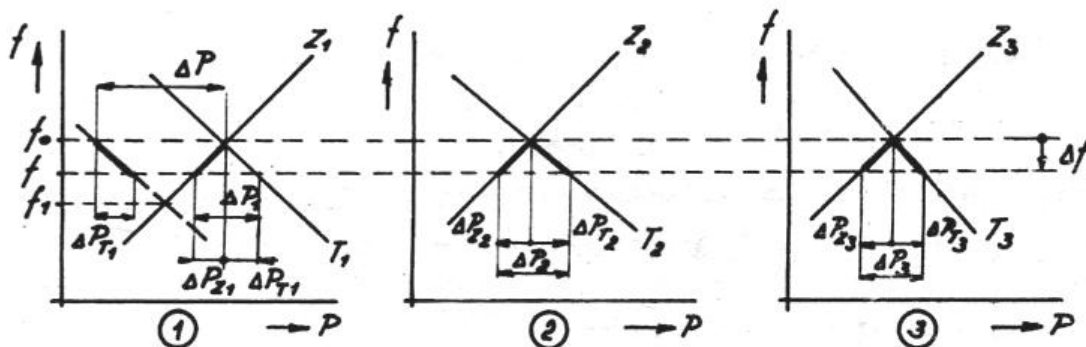
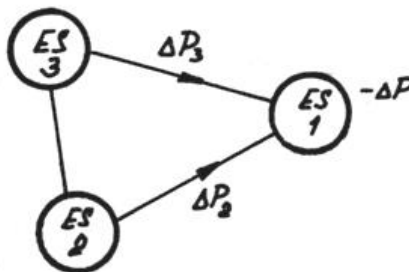
$$\begin{aligned} |\Delta P| &= |\Delta P_T| + |\Delta P_Z| = \\ &= |-K_T \cdot \Delta f| + \\ &+ |K_Z \cdot \Delta f| = \\ &= \Delta f (|K_T| + |K_Z|) \end{aligned}$$

$$K_{ES} = K_T + K_Z$$

Tedy v neregulované elektrizační soustavě se frekvence se zatížením mění: $\Delta f = \frac{\Delta P}{K_{ES}}$

V propojených neregulovaných elektrizačních soustavách se podílejí na doplnění případného deficitu výkonu všechny soustavy podle svých statických charakteristik. Situace u tří propojených soustav, kdy došlo k výpadku zdroje v první soustavě o ΔP :

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = \Delta P$$

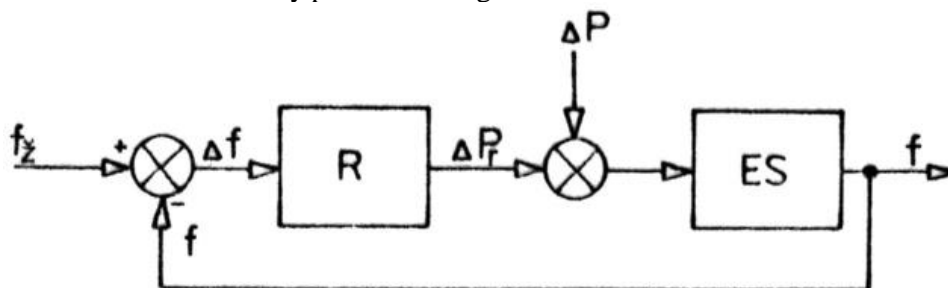


Nadbytečné výkony $\Delta P_2 = \Delta P_{T2} + \Delta P_{Z2}$ a $\Delta P_3 = \Delta P_{T3} + \Delta P_{Z3}$ se předají do soustavy první. Potom $-(K_{ES1} \cdot \Delta f + K_{ES2} \cdot \Delta f + K_{ES3} \cdot \Delta f) = \Delta P$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P}{K_C} \quad K_C = K_{ES1} + K_{ES2} + K_{ES3}$$

Propojením s dalšími soustavami se pokles kmitočtu v případě výpadku zdroje snižuje.

V regulovaných elektrizačních soustavách je nedostatek či nadbytek výkonu a vyrovnáván automatickou tzv. sekundární regulací vybraných regulačních elektráren a je udržována frekvence soustavy právě tak jako činné výkony předávané do ostatních soustav (saldo) posunem statické charakteristiky primárního regulátoru:



Regulace musí co rozdělovat zatížení mezi zdroje při zachování salda a respektování regulačních možností zdrojů. Algoritmus vychází obvykle z proporcionálního či integračního principu.

Metoda statických charakteristik určuje pro každý zdroj: $\Delta P_{Ri} = -K_{Ri} \cdot \Delta f$, kde

$$\Delta f = f_z - f \quad \text{a} \quad \Delta P_{Ri} = P_{Ri} - P_{Rži}$$

Regulátor bude měnit žádanou hodnotu výkonu dokud nebude platit: $\Delta f + \frac{1}{K_{Ri}} \Delta P_{Ri} = 0$

resp. $\Delta f + S_{Ri} \cdot \Delta P_{Ri} = 0$. Rozdělení výkonů je potom v poměru:

$$P_{R1} : P_{R2} : \dots : P_{Rn} = \frac{1}{S_{R1}} : \frac{1}{S_{R2}} : \dots : \frac{1}{S_{Rn}}$$

To znamená, že rozdělení výkonů je pevné (dané nastavením statick zdrojů) a závislé pouze na frekvenci, což je příznivě jednoduché bez nutnosti informačních pojítek mezi zdroji.

Nevýhodou je, že nedojde k úplnému odstranění odchylky frekvence a není respektována případná hospodárnost provozu. Součinitel statismu se u elektráren volí:

- základní elektrárny – 4 až 6 %
- regulační elektrárny – 0.5 až 1.5 %

Metoda zdánlivě statických charakteristik zavádí informaci o odchylce zdroje od jeho podílu na celkovém výkonu regulačních zdrojů:

$$\Delta f + S_{R1} \left(P_{R1} - a_1 \sum_{k=1}^n P_{Rk} \right) = 0$$

...

$$\Delta f + S_{Ri} \left(P_{Ri} - a_i \sum_{k=1}^n P_{Rk} \right) = 0$$

...

$$\Delta f + S_{Rn} \left(P_{Rn} - a_n \sum_{k=1}^n P_{Rk} \right) = 0$$

Součet výkonů všech regulačních zdrojů:

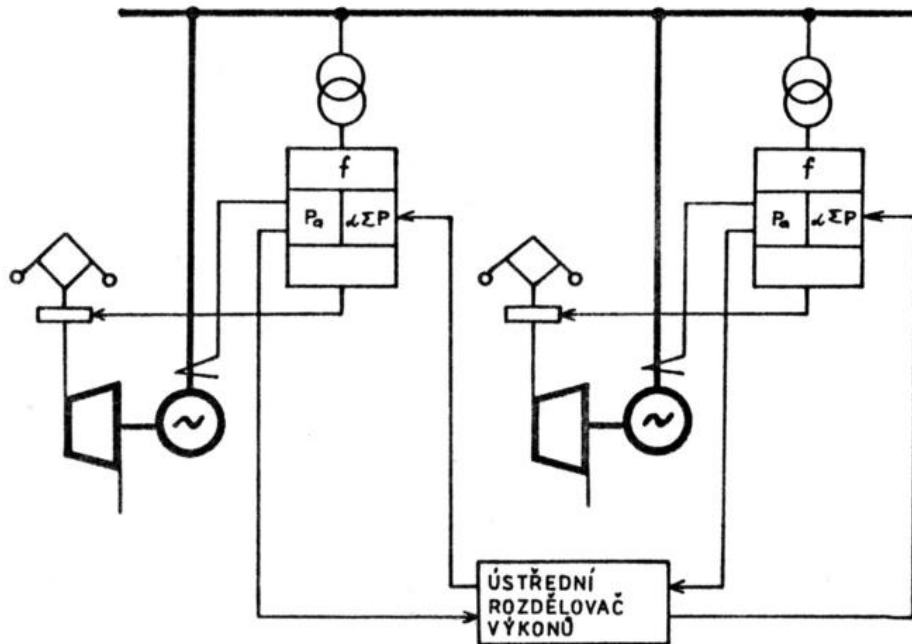
$$\sum_{k=1}^n P_{Rk}$$

Nutně musí platit:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1$$

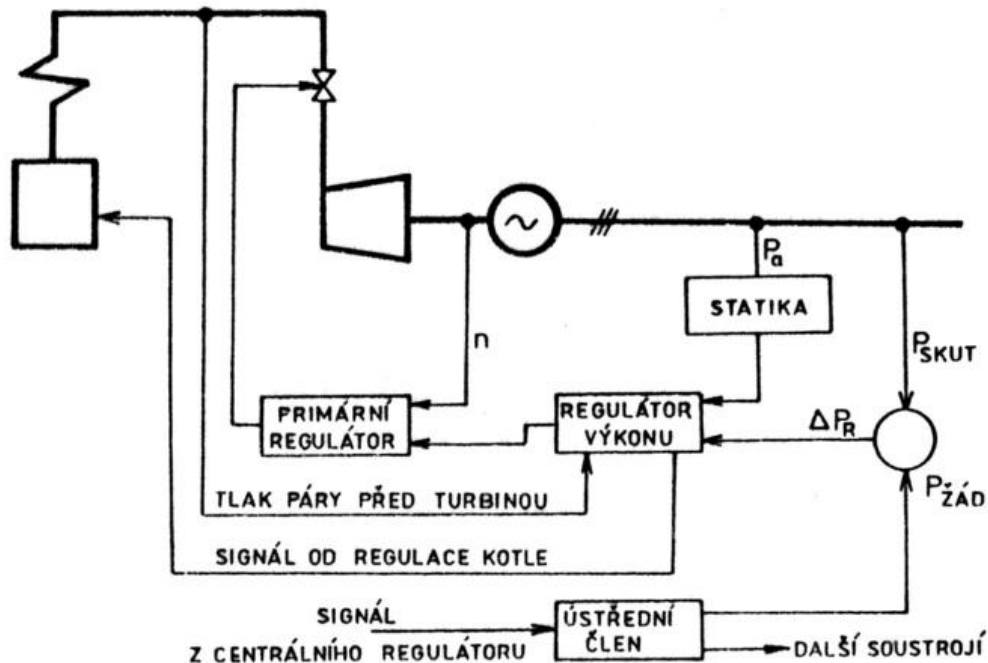
Metoda rozděluje výkony stále pevně, což není obecně hospodárné. Navíc při omezení výkonu některého regulačního zdroje je třeba přestavit podílové koeficienty.

Pro dvě soustrojí je princip spojení:



Při regulaci frekvence a příslušných předávaných výkonů v propojených elektrizačních soustavách je nutno zabránit reakci všech zdrojů ve všech soustavách a reagují pouze zdroje v soustavě, která odchylku frekvence způsobila (metoda síťových charakteristik), jinak by došlo k změnám předávaných výkonů a k případné nestabilitě přenosových cest. Předávané výkony jsou regulovány podle smluvních dohod pro saldo, nebo podle optimalizace hospodárnosti v propojených soustavách jako celku.

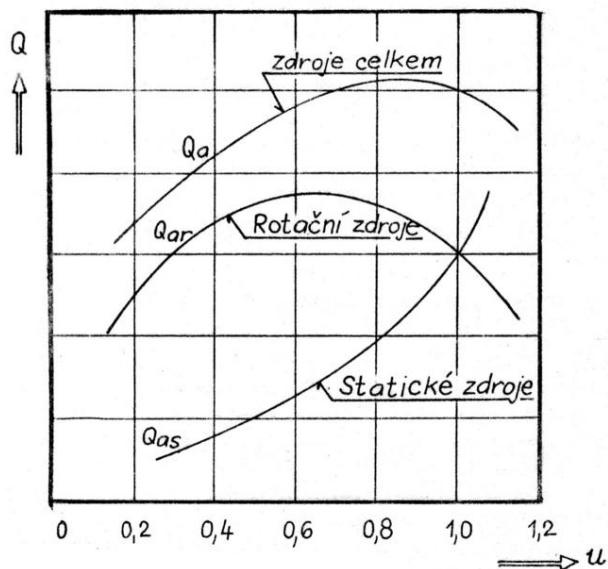
Pro regulaci jsou výhodnější vodní elektrárny, kde lze měnit cca 1% P_N / sec. Případné další potřebné změny výkonu je nutno zajistit konvenčními tepelnými elektrárnami, které mají ale omezenou rychlost i rozsah regulace. Dle odchylky žádaného výkonu se mění regulačními ventily množství páry do turbíny zprostředkovaně přes primární regulátor otáček. Současně jde signál i na kotel pro rychlejší a stále změny výkonu turbosoustrojí:



Regulace velikosti napětí a předávaných jalových výkonů

Regulace napětí je určena rovnováhou mezi dodávaným a spotřebovávaným jalovým výkonem v jednotlivých místech elektrizační soustavy. Udržení velikosti napětí v předepsaných mezích (běžně $\pm 5\%$) je nutné pro zachování správné funkce a životnosti spotřebičů (nepřetěžování asynchronních pohonů, neomezení výkonu tepelných spotřebičů, životnost osvětlovacích soustav) a udržení stability přenosu výkonu v soustavě. Jalový výkon se samovolně šíří od míst s vyšším k místům s nižším napětím, s tím že jeho přerozdělování chceme maximálně omezit aby nedocházelo k případnému navýšení jouleových ztrát popř. přetížení linek. U neregulované soustavy je změna jalového zatížení nebo velikosti jalových zdrojů spojena se změnou velikosti napětí podle charakteristik zátěží a zdrojů.

Zdroji jalového výkonu v elektrizační soustavě jsou synchronní alternátory, synchronní kompenzátory a synchronní motory (v přebuzeném stavu), nezatížená vedení vvn a kondenzátorové baterie.



Závislost jejich dodávaného jalového výkonu na velikosti napětí sítě:

Synchronní stroje:

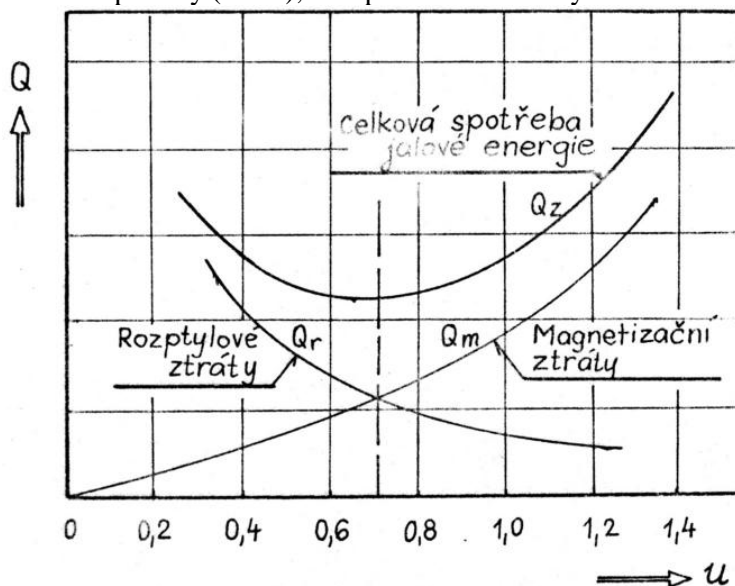
$$Q_{AR} = \frac{U_S \cdot E_V}{X_d} \cos J - \frac{U_S^2}{X_d}$$

Baterie a vedení:

$$Q_{AS} = w \cdot C \cdot U_S^2$$

(nevýhodný charakter, protože příspěvek klesá při snížení napětí).

Spotřebiči jalového výkonu v elektrizační soustavě jsou transformátory (60 až 70 %), indukční pohony (20 %), kompenzační tlumivky a zatížená vedení.



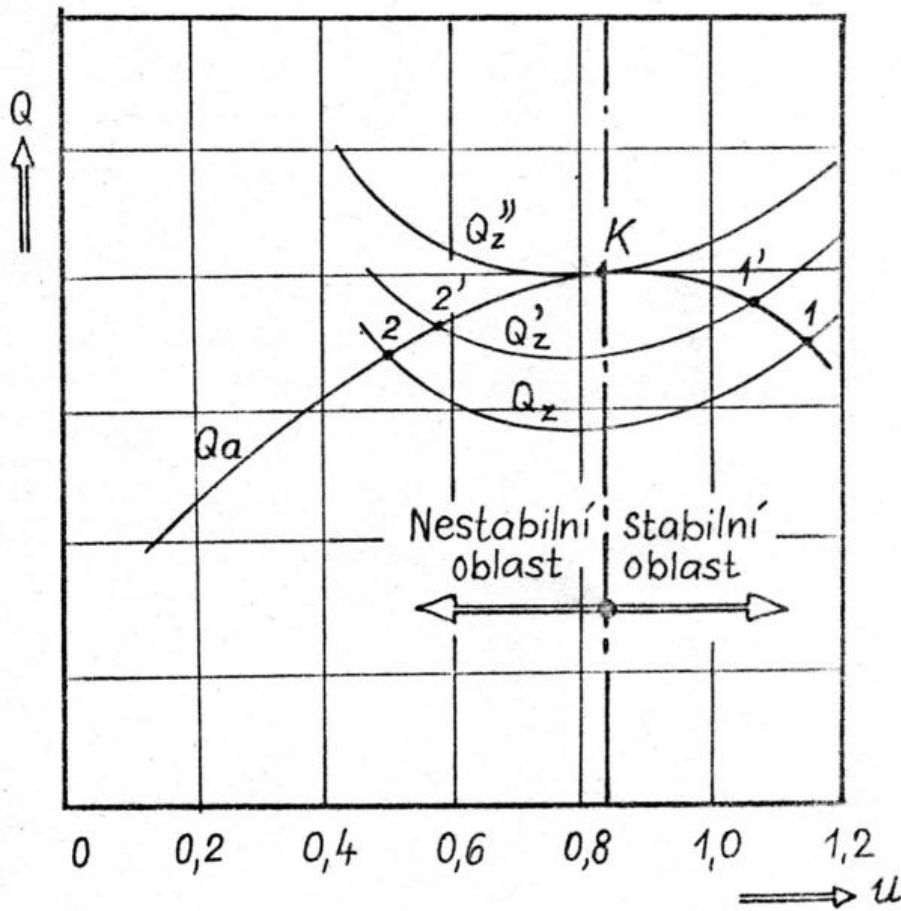
Závislost jejich odebraného jalového výkonu na velikosti napětí sítě:

Magnetizační ztráty::

$$Q_M = \frac{U_S^2}{X_m}$$

(snížení U_S o 1% způsobí snížení Q_M o 2 až 3 %)

Rozptylové ztráty jsou nepřímo úměrné U_S a snížení U_S o 1% způsobí zvýšení Q_R o 2 %.



Ustálený stabilní provozní stav soustavy je dán průsečíkem výsledných charakteristik zdrojů a zátěží:

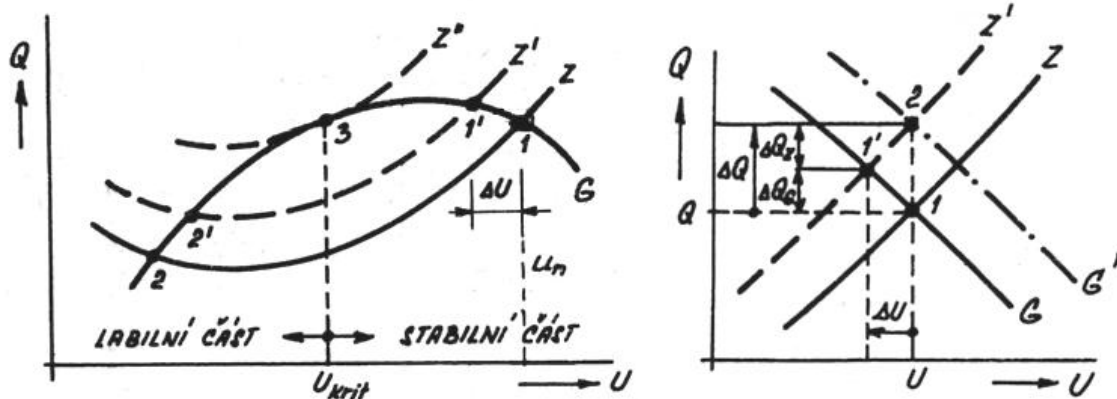
Bod „1“ je stabilním bodem, protože při snížení napětí navýšením jalové zátěže z charakteristiky Q_z na Q_z' se adekvátně zvyšuje dodávaný jalový výkon zdrojů s ustálením v bodě „1“

Naopak bod „2“ je nestabilní, protože dochází k lavinovitému poklesu velikosti napětí.

V neregulované soustavě tedy dochází při změně jalového zatížení ke kolísání velikosti napětí. Regulaci velikosti dodávaného jalového výkonu lze provádět pomocí:

- změny buzení synchronních strojů
- nasazováním statických kondenzátorových baterií
- změnou odboček transformátorů (pouze přerozdělení, které nevytváří jalový výkon)

Na velikost jalového výkonu má vliv i míra zatížení vedení vzhledem jejich přirozenému přenášenému výkonu. Regulace je na rozdíl od frekvence decentralizovaná vzhledem k místnímu charakteru velikosti napětí.



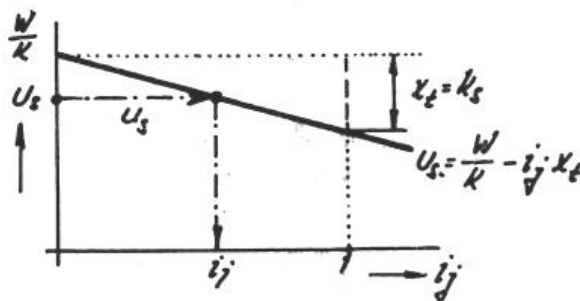
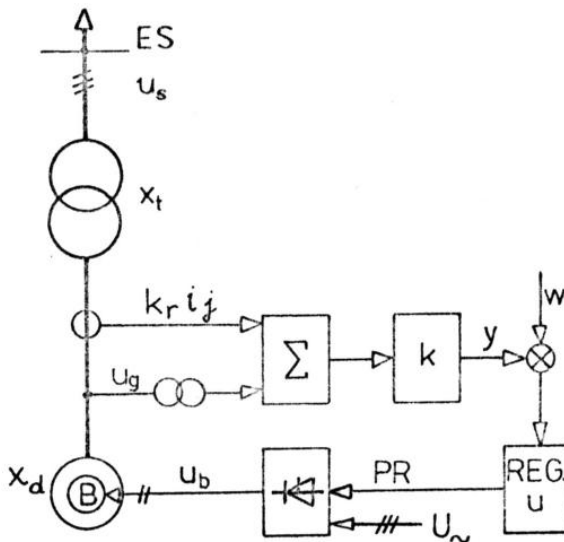
Při zvýšení jalového zatížení o ΔQ z charakteristiky „Z“ na „Z“ dojde ke snížení velikosti napětí o ΔU , přičemž se částečně sníží požadavek jalové zátěže ΔQ_Z a vzroste výkon zdrojů o ΔQ_G analogicky jako u činného výkonu při zvýšení zatížení a poklesu frekvence. Pokud chceme zcela vyrovnat schodek velikosti napětí, je třeba u zdrojů přejít na charakteristiku „G“. Realizace je pak na napětíových hladinách následující:

- Sítě vn (22 kV) využívají regulaci napětí změnou odboček transformátorů 110/22 kV (další transformace jsou nastaveny pevně) s cílem udržení velikosti napětí v mezích nutných pro spotřebitele.
- Sítě vvn 110 kV jsou také převážně distribuční s jistým podílem zdrojů, takže hlavním prostředkem regulace je změna dodávky jalového výkonu elektráren a doplňující je změna odboček transformátorů 440/110 kV resp. 220/110 kV.
- Sítě vvn 400 a 220 kV jsou především přenosové, regulace je prováděna změnou výkonu elektráren a případných kompenzátorů v terciálním vinutí transformátorů s cílem udržení především stability soustavy.

Dalším cílem regulace napětí je optimalizace hospodárnosti přenosu energie. Pro řízení regulace se využívá vyhodnocování vyrobeného jalového výkonu podle předepsaného diagramu, nebo častěji udržování velikosti napětí ve vybraných kontrolních uzlech soustavy.

Regulace napětí alternátorů

U alternátorů je prvotním úkolem dodávka činného výkonu při jistém účinnu dle provozního diagramu, teprve druhotným úkolem je zajištění případných požadavků soustavy na jalový výkon. Regulátor napětí musí sledovat kromě dodávky jalového výkonu především statickou stabilitu soustrojí a velikost napětí na svorkách při poruchových stavech, popřípadě respektovat dodávku jalového výkonu okolních strojů.



Pracuje-li alternátor do soustavy přes blokový transformátor, potom přibližně:

$$u_S + x_T i_J = u_G$$

Pro žádanou regulační veličinu w pak platí:

$$w - y = w - (u_G + k_R i_J) k = 0$$

Dosazením získáme:

$$w = (u_S + x_T i_J + k_R i_J) k$$

$$u_S = \frac{w}{k} - i_J (x_T + k_R)$$

Výsledná stabilizace je tedy:

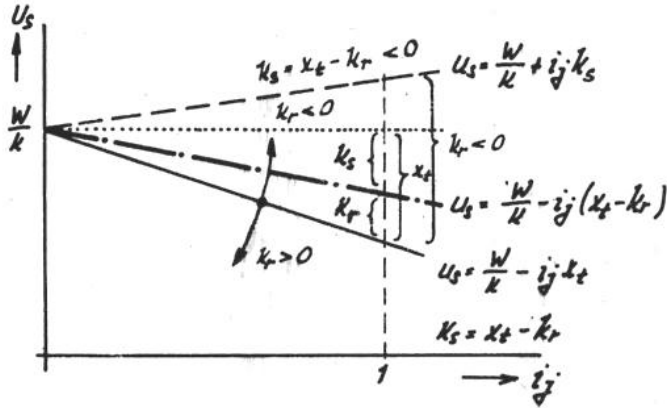
$$k_S = x_T + k_R$$

Při nulové informaci o jalovém proudu je:

$$k_S = x_T \approx 0.1$$

Provoz je sice stabilizován, projevuje se tzv. stabilizační účinek blokového transformátoru, který je ale příliš silný (pro provoz postačuje hodnota:

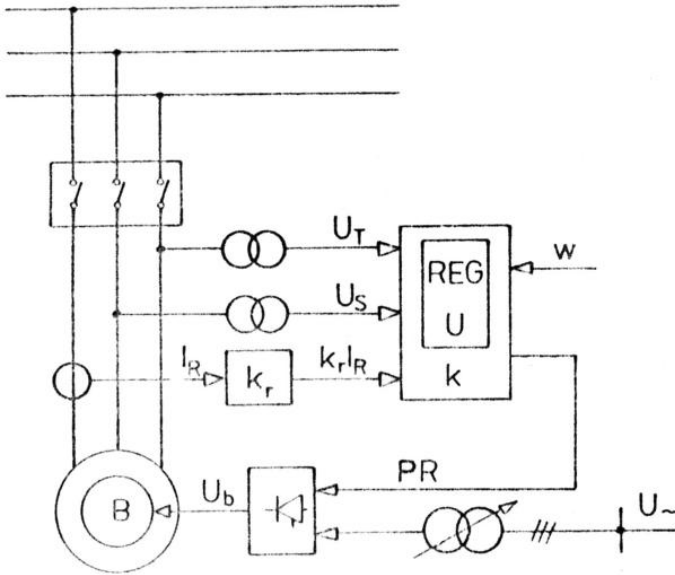
$$k_S \approx 0.03 \div 0.07$$



Zavedeme-li údaj o jalovém proudu, se zápornou zpětnou vazbou, potom je:

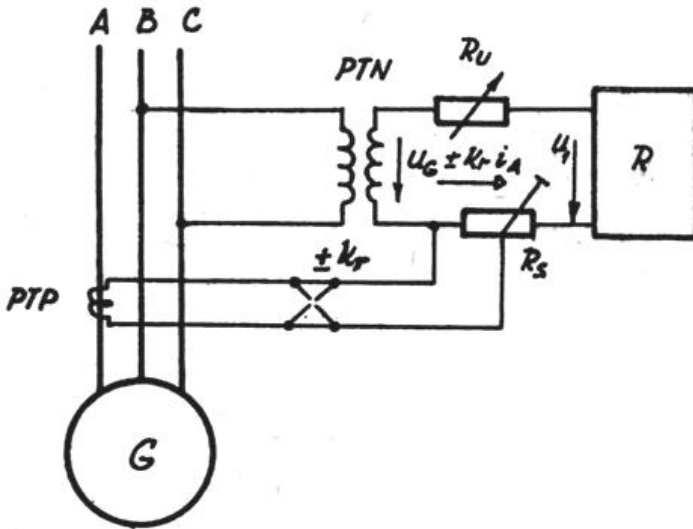
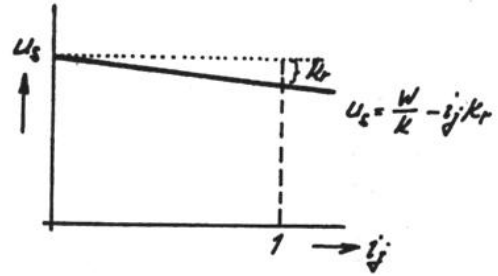
$$u_S = \frac{w}{k} - i_J(x_T - k_R)$$

a výsledná kompaundace snižuje stabilizační účinek blokového transformátoru.

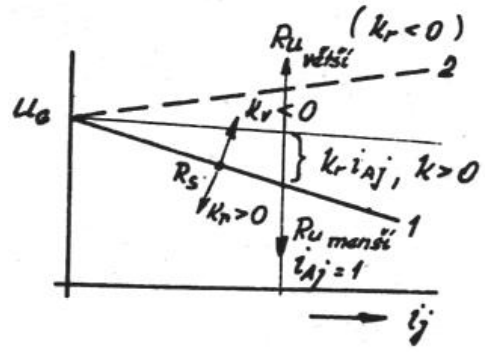
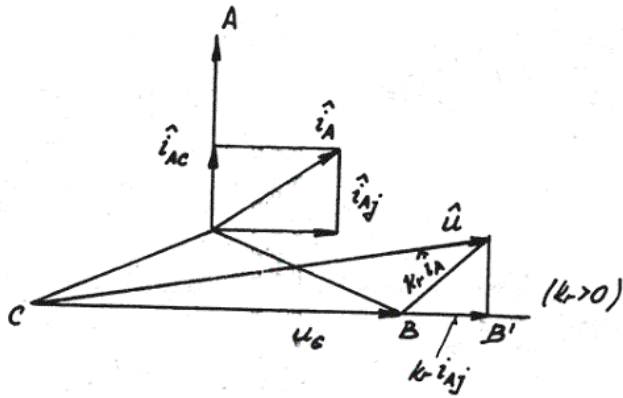


Pracuje-li alternátor do soustavy přes přímo potom zavádíme kladnou stabilizující zpětnou vazbu:

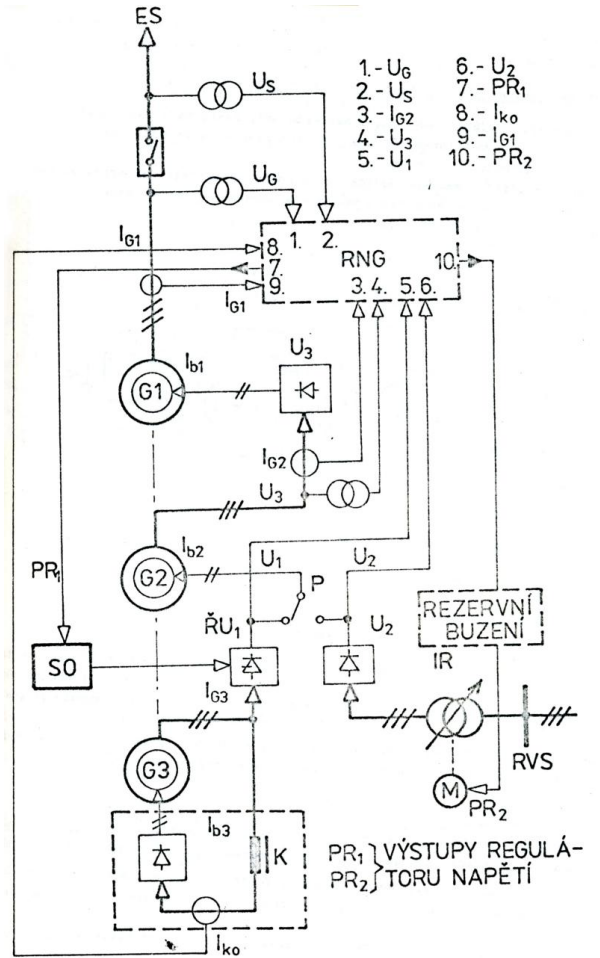
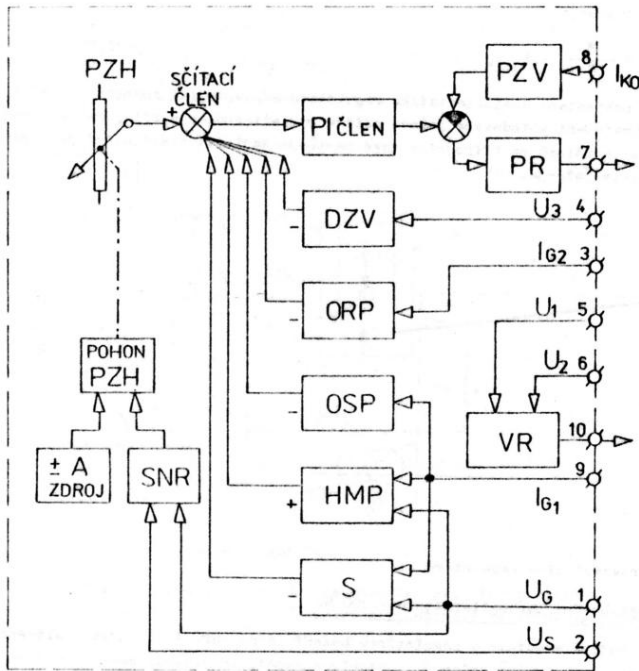
$$u_S = \frac{w}{k} - i_J k_R$$



Zapojení stabilizace vychází z informace proudu jedné fáze a rozdílu sdružených napětí dalších dvou fází, kdy regulujeme na velikost napětí \hat{u} , která přibližně odpovídá velikosti $u_1 = u_G \pm k_R i_J$.



Reálný regulátor buzení bloku 200 MW:



PR₁ } VÝSTUPY REGULÁTORU
PR₂ } TORU NAPĚTÍ