

Regulace frekvence a napětí

Ivan Petružela



Osnova

- **Opakování**
- **Blokové schéma otáčkové regulace turbíny**
- **Statická charakteristika (otáčky, výkon) turbíny**
- **Zajištění stability pomocí regulace otáček (frekvence)**
- **Elektrizační soustava a regulace TG**
- **Statická charakteristika (f,P) ES**
- **Statická charakteristika (f,P) obnovení frekvence**

- **Náhrada výkon-napěťových charakteristik**
- **Regulace U a Q**
- **Provozní kritéria pro U a Q**
- **Terciární regulace napětí a jalových výkonů**
- **Princip automatické sekundární regulace napětí ASRU v pilotním uzlu**

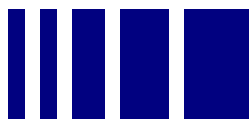


Bilanční rovnice ES

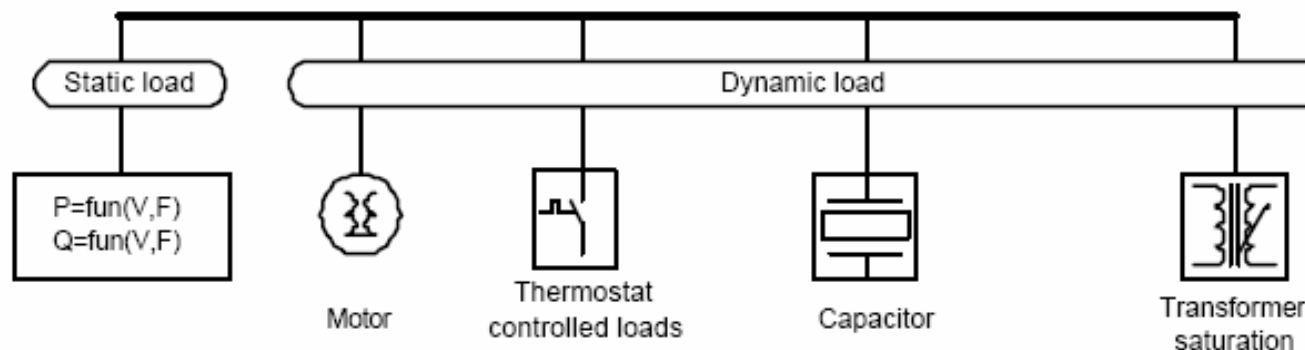
- Jedním ze základních problémů zajištění plynulé dodávky elektrické energie je neskladovatelnost elektřiny. Výroba musí probíhat v době, kdy se uskutečňuje spotřeba. V každý časový okamžik musí být v ES udržována rovnováha mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

$$\vec{S}_v(t) = \vec{S}_s(t) + \vec{S}_z(t) + \vec{S}_a(t)$$

- Určující je bilance činného výkonu, která se promítá do změny kmitočtu. Prvky elektrizační soustavy jsou konstruovány pro provoz při jmenovitém kmitočtu 50 Hz.
- Kvalitu elektrické energie určují provozní parametry kmitočet f a napětí U .



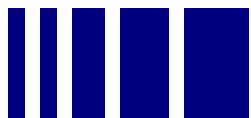
Statická charakteristika (f,P) spotřebičů



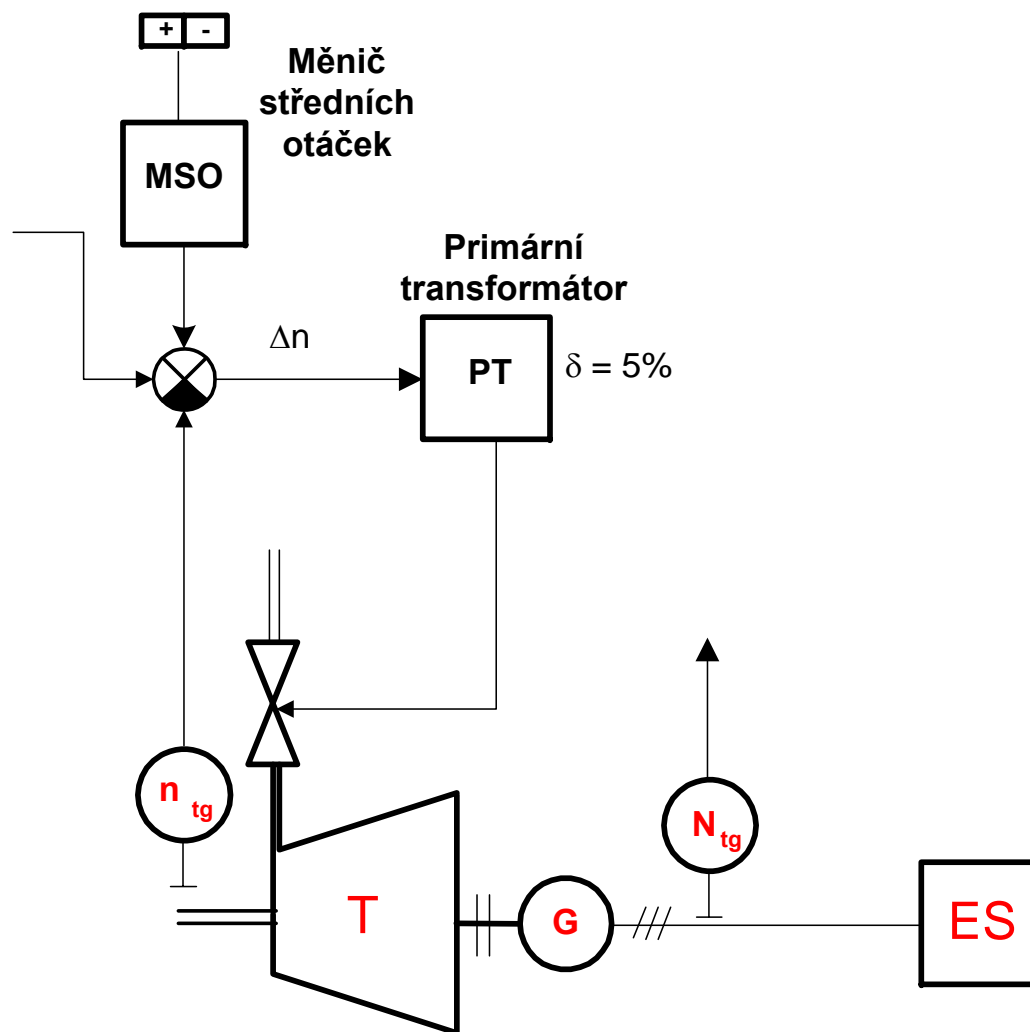
$$P(U, f) = P(U) \cdot [1 + k_{Pf} \cdot (f - f_0)],$$

$$Q(U, f) = Q(U) \cdot [1 + k_{Qf} \cdot (f - f_0)],$$

k_{Pf} a k_{Qf} jsou příslušné citlivostní součinitele na kmitočet



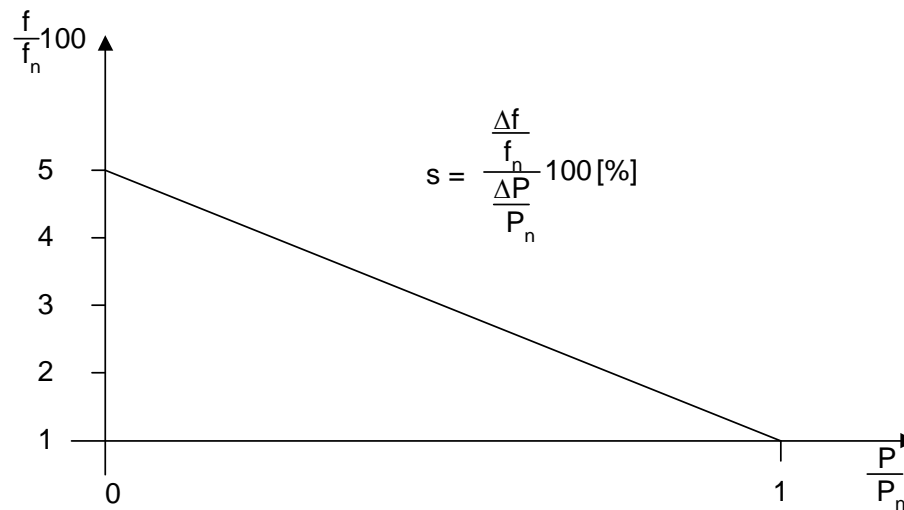
Blokové schéma otáčkové regulace turbíny





Statická charakteristika TG

- Statická charakteristika hydraulické regulace TG je nakreslena na následujícím obrázku.

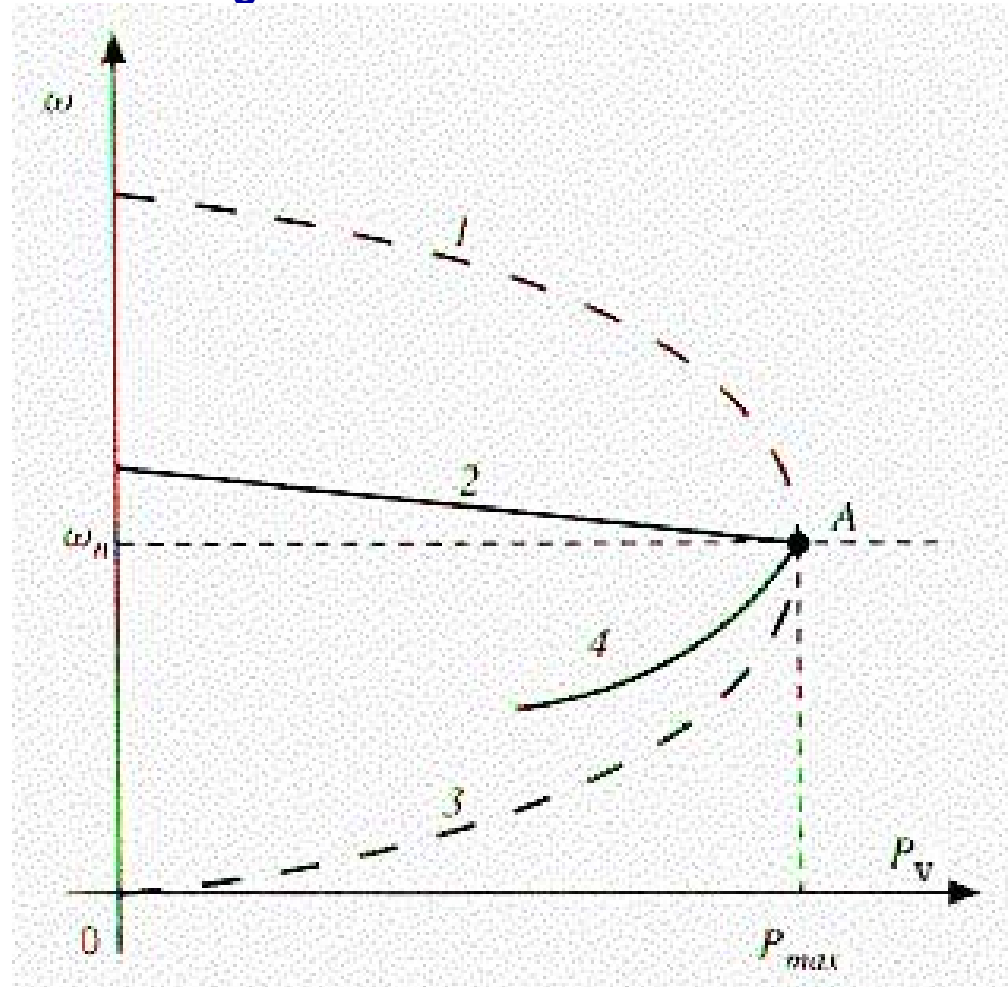


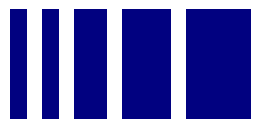
- Z této charakteristiky lze odvodit vliv poruch frekvence v elektrizační soustavě na činný výkon TG.
- Např. porucha frekvence 0,1 Hz vyvolá u TG o výkonu 220 MW s nastavenou statikou 5 % změnu výkonu TG o 8,8 MW.



Statická charakteristika (otáčky, výkon) turbíny

- 1 a 3 ideální turbína bez regulátoru
- 2 a 4 skutečná turbína s regulátorem otáček





Statická charakteristika (otáčky, výkon) regulované turbíny

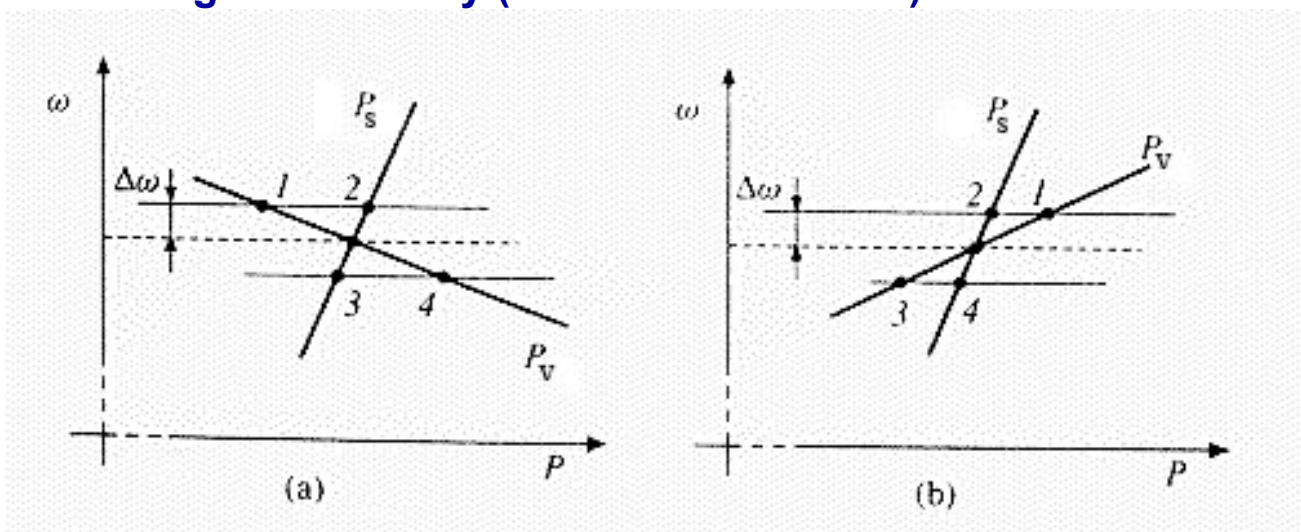
- Obecná pohybová rovnice rotující hmotnosti je dána vztahem

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega = M_h - M_b,$$

- kde J označuje moment setrvačnosti roztočených hmot, B součinitel tlumení, ω úhlovou rychlost, M_h hnací moment a M_b brzdný moment opačného smyslu

A) stabilní regulace turbíny (záporná směrnice P_v)

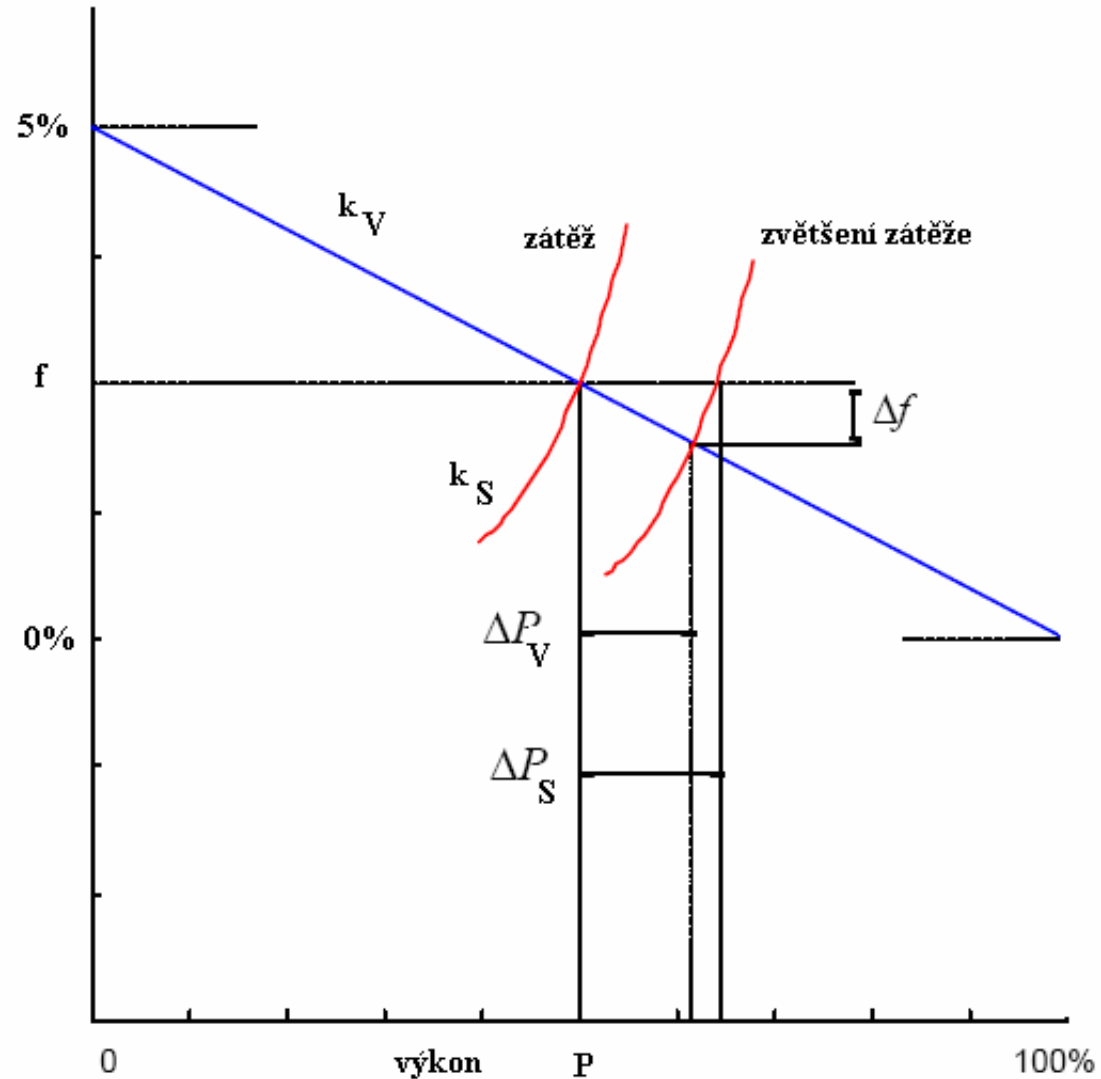
B) nestabilní regulace turbíny (kladná směrnice P_v)





Zajištění stability pomocí regulace otáček (frekvence)

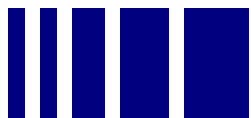
- pracovní bod (f, P)
- zvětšení zátěže
- nový pracovní bod při snížené frekvenci
- zvýšení výkonu nepokrývá celý výpadek
- rozdíl je samoregulační efekt zátěže



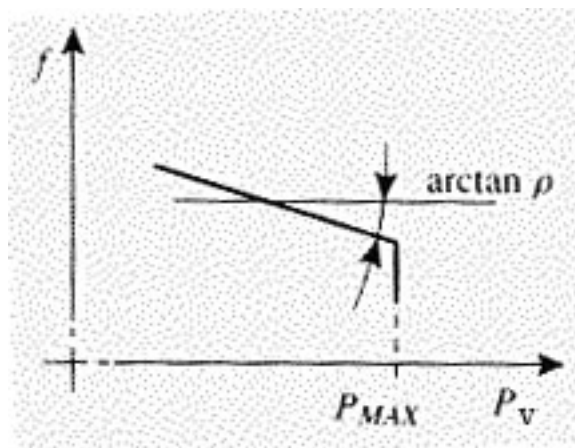
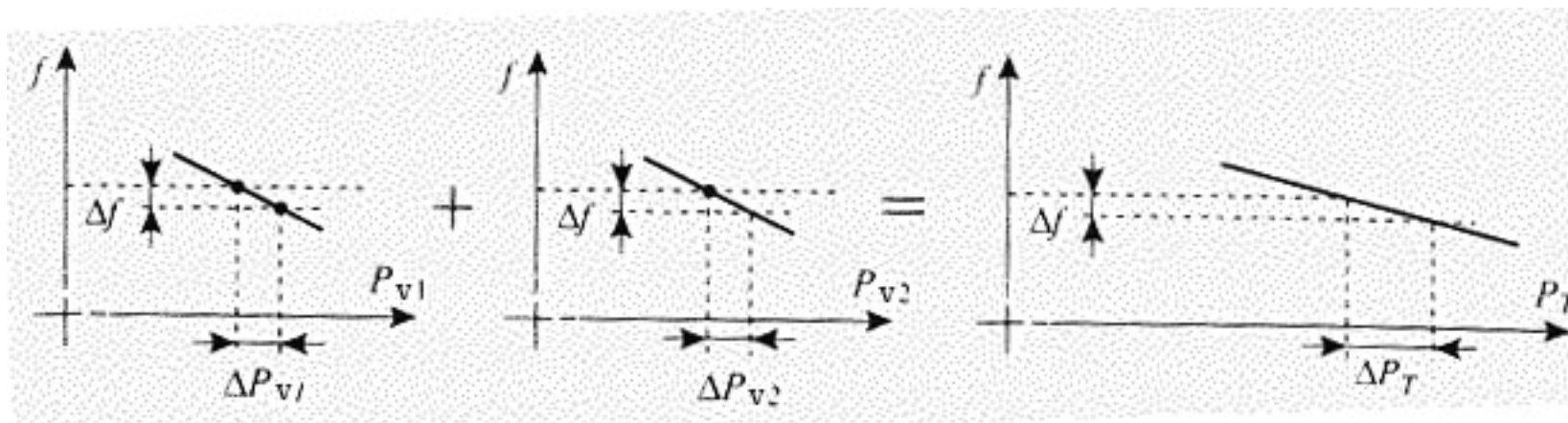


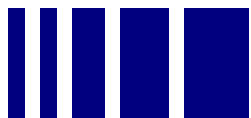
Elektrizační soustava a regulace TG

- **Bezpečný provoz ES zajišťuje princip solidarity, t.j. že v případě výpadku se na kompenzaci podílejí všichni stejným poměrem.**
- **Toho je docíleno tím, že v OP jsou provozovány elektrárny v proporcionální regulaci se stejným zesílením. Vývojem se toto zesílení ustálilo na hodnotě 20 (statika 5%).**
- **To znamená, že při zvýšení frekvence o 2,5 Hz (5% f_n) dojde proporcionálně-integračním regulátorem otáček ke snížení výkonu ze 100% na 0%, resp. výkon vlastní spotřeby.**
- **Výrobci TG tímto způsobem garantují oblast dovolených nadotáček pro interval 50 až 52,5 Hz.**

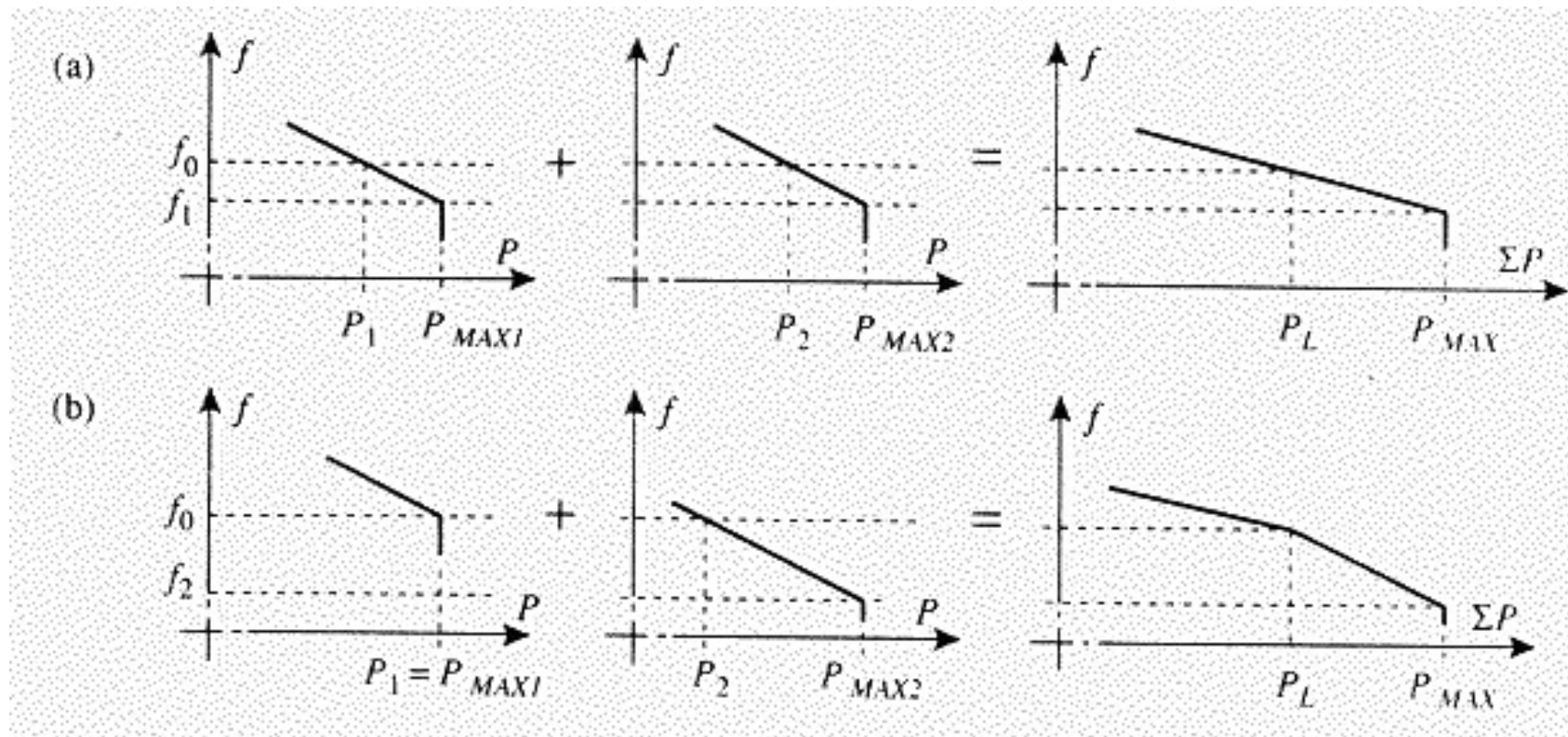


Statická charakteristika (f,P) pro více zdrojů





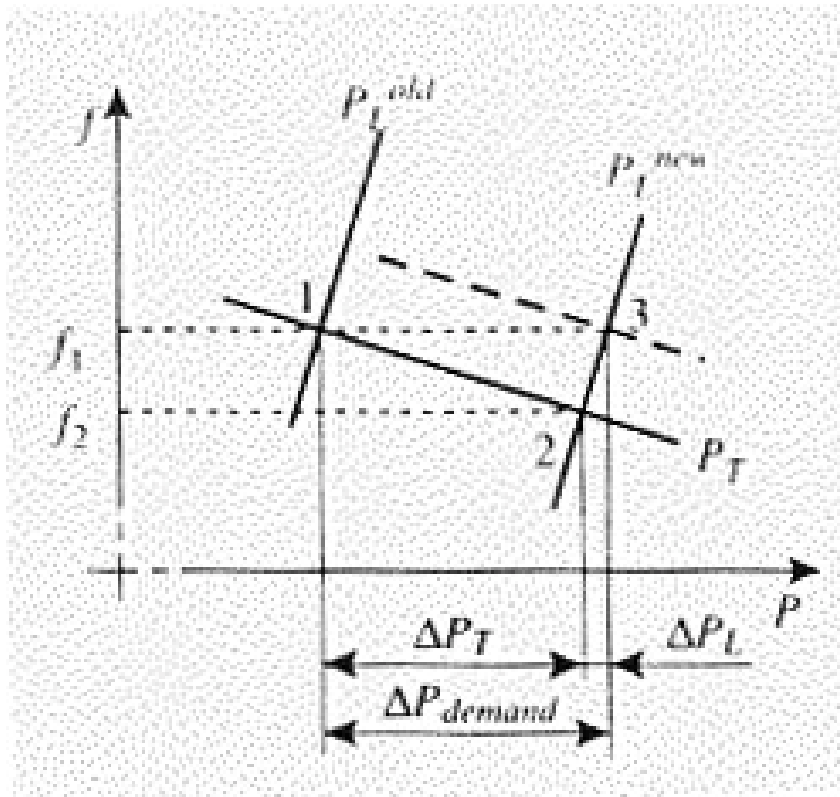
Statická charakteristika (f,P) - více zdrojů s omezením





Statická charakteristika (f,P) - obnovení frekvence

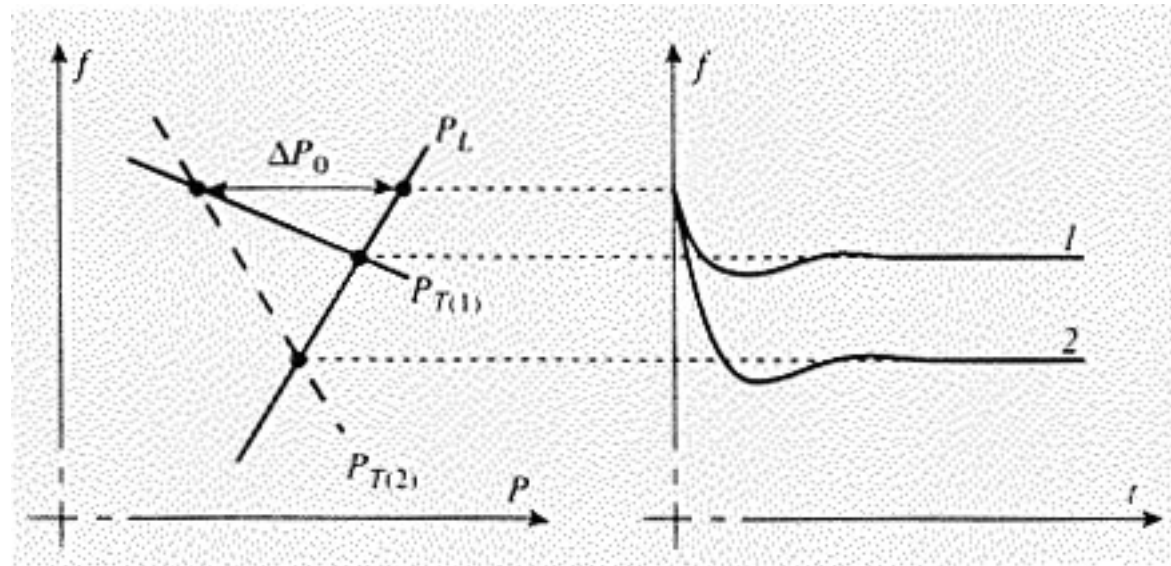
- Obnovení frekvence po výpadku zátěže:
 1. výchozí stav
 2. ustálení po zvýšení zátěže
 3. zvýšení výkonu zdrojů pro obnovení výchozí frekvence



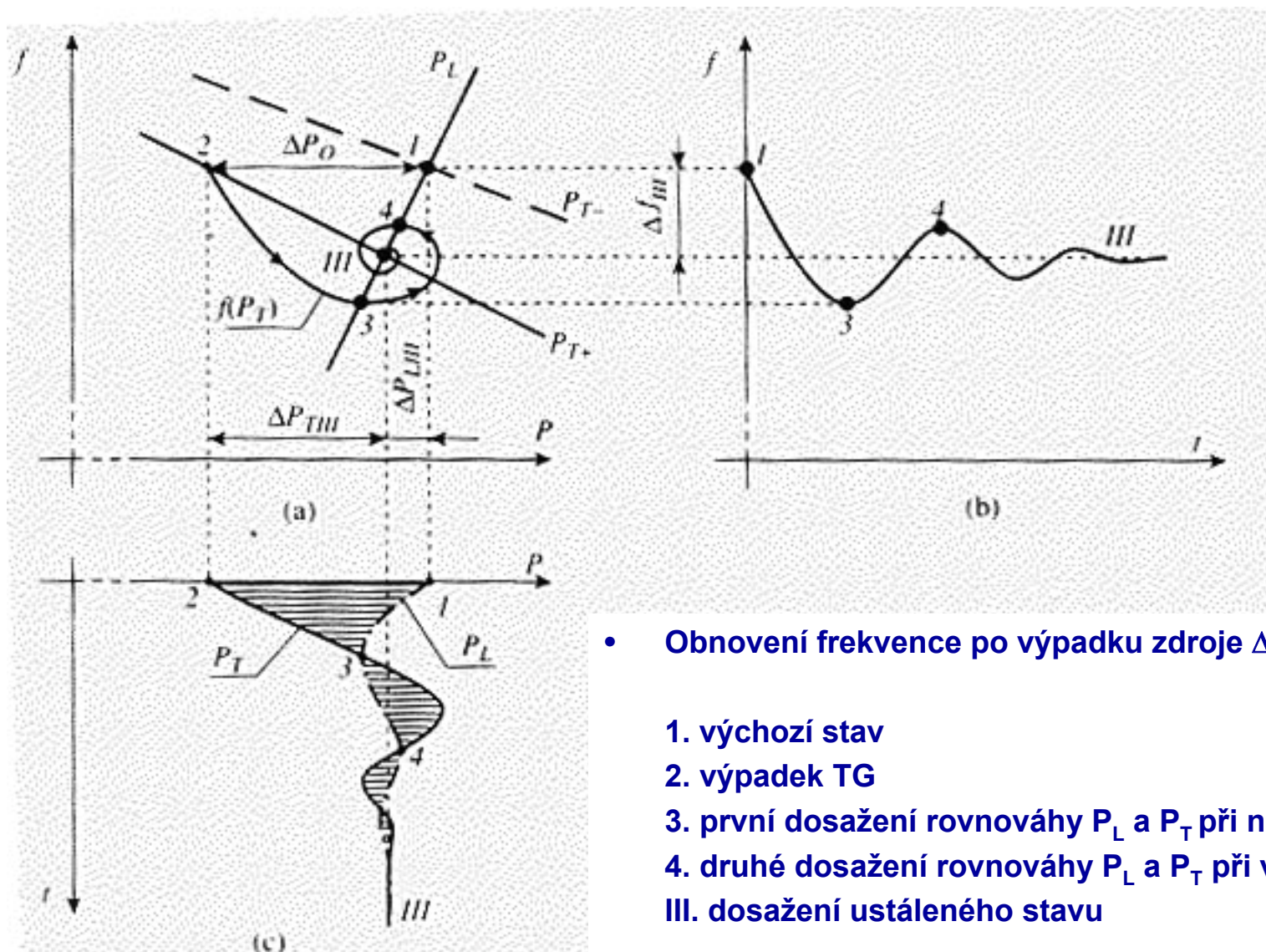


Statická charakteristika (f,P) ES

- Vliv směrnice P_v na velikost odchylky frekvence:

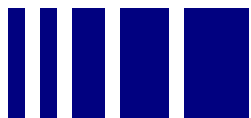


Statická charakteristika (f,P) spotřebičů - graf

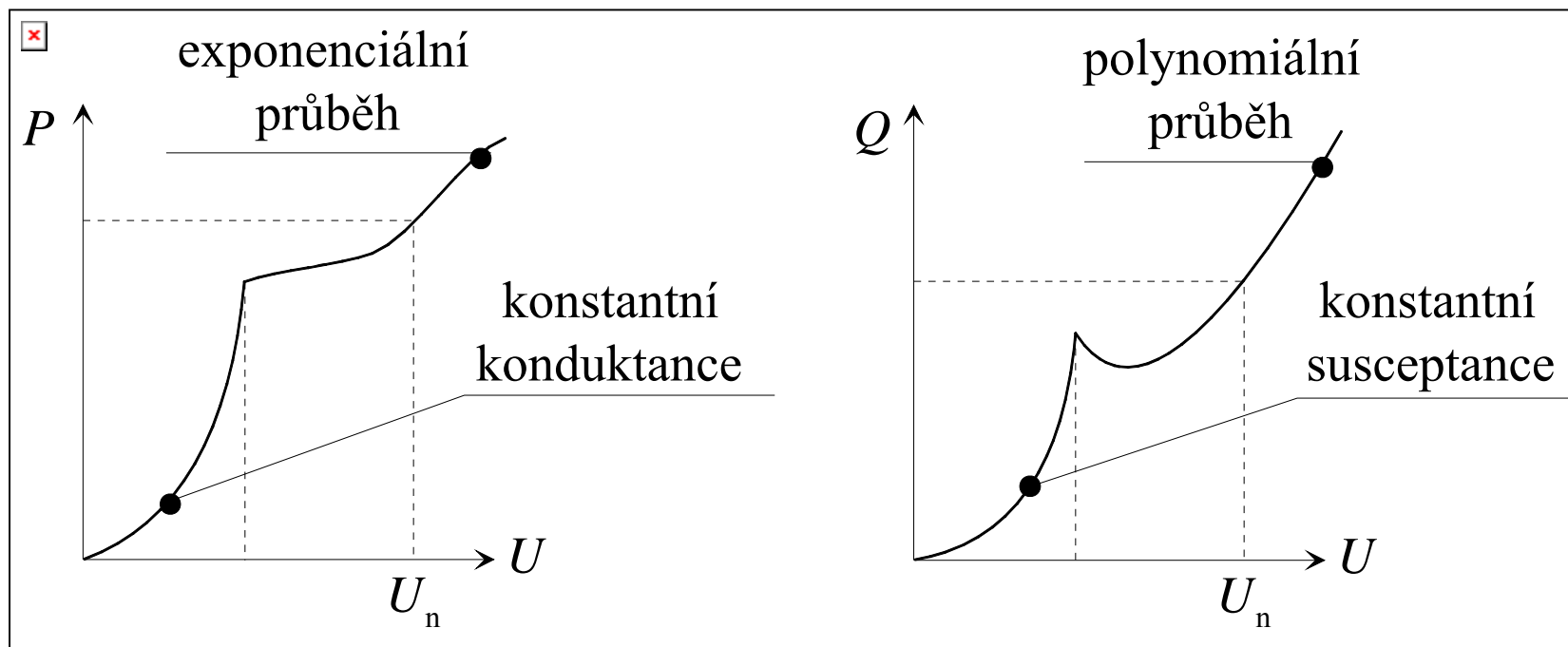


- Obnovení frekvence po výpadku zdroje ΔP_O

1. výchozí stav
2. výpadek TG
3. první dosažení rovnováhy P_L a P_T při nízké frekvenci
4. druhé dosažení rovnováhy P_L a P_T při vysoké frekvenci
- III. dosažení ustáleného stavu



Náhrada výkon-napěťových charakteristik





Regulace U a Q

- Hlavními cíli regulace U a Q jsou
 - snížení technických ztrát v provozované distribuční soustavě a dalších nákladů provozního a investičního charakteru
 - zajištění kvality dodávky elektřiny odběratelům (stabilita napětí)
- V elektrizační soustavě platí silná závislost mezi jalovým výkonem a napětím.
 - další důležitou fyzikální vlastností je lokální charakter napětí
- Prakticky to znamená, že napětí může být v každém uzlu soustavy jiné. Regulátor napětí a jalových výkonů je možné implementovat decentralizovaným způsobem, kdy každý uzel soustavy s možností změny dodávky jalového výkonu má vlastní regulátor.
- Regulace U a Q v elektrizační soustavě obsahuje jednotlivé subjekty, které jsou do této činnosti nějakým způsobem zapojeny.
 - stručně řečeno, změnou dodávky jalového výkonu do uzlu soustavy se dosáhne změny napětí v tomto uzlu a uzlech elektricky blízkých
- Tato změna napětí závisí nejen na velikosti změny dodávky jalového výkonu, ale také na aktuálním zapojení daného uzlu. V této souvislosti se mluví o tzv. elektrické tvrdosti uzlu (KQ), což je množství Q potřebné ke změně napětí o 1kV v daném uzlu.
- Velikost KQ:
 - liší se jednak s ohledem na napěťovou hladinu tak i pro různé uzly stejné napěťové hladiny
 - je dána různou skladbou zatížení v jednotlivých uzlech
 - Skladbou zatížení se rozumí poměrné části zatížení ohmického, induktivního a kapacitního charakteru.



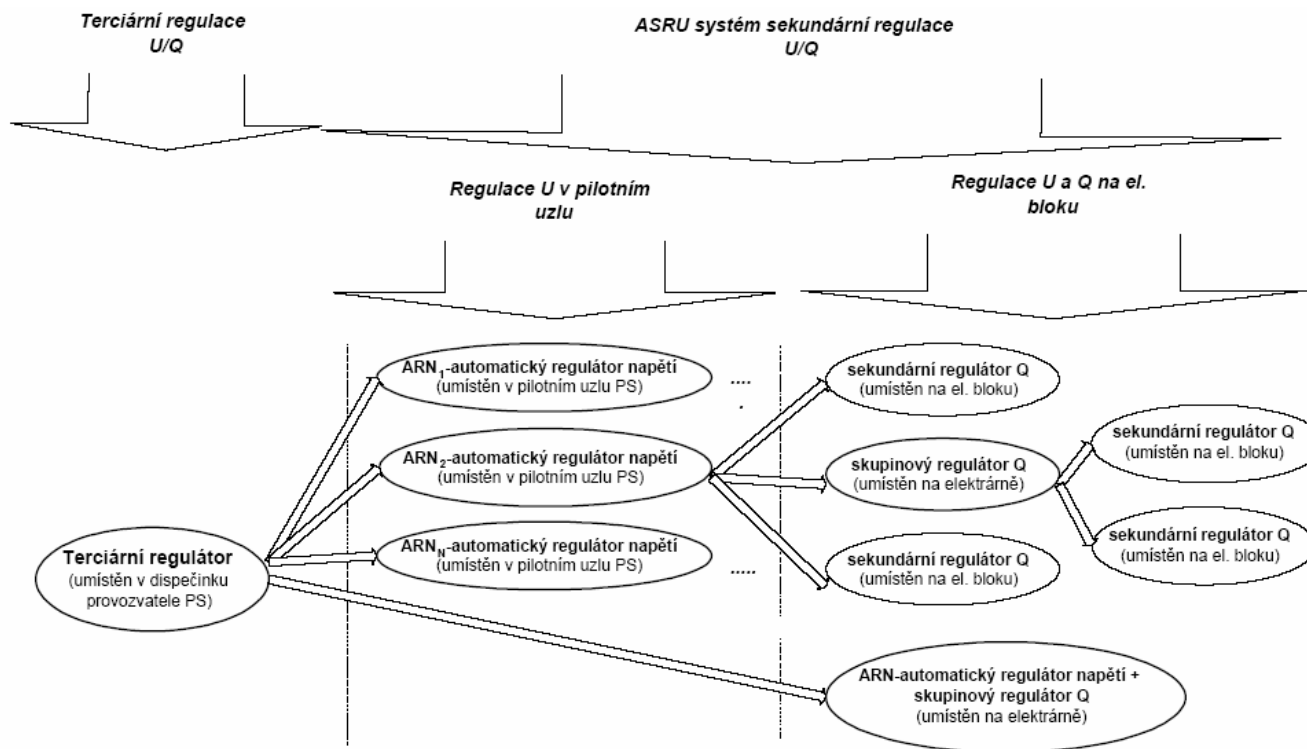
Provozní kritéria pro U a Q

- Napětí v uzlech PS se má pohybovat uvnitř povoleného rozsahu :
- $400 \text{ kV} \pm 5\%$, $220 \text{ kV} \pm 10\%$ a $110 \text{ kV} \pm 10\%$
- Jalové výkony po mezistátních vedeních mají být ve spolupráci tuzemské a zahraniční PS minimalizovány.
- Jalové výkony zdrojů jalového výkonu (synchronizátorů a synchronizátorů) se mají pohybovat uvnitř povoleného regulačního rozsahu, daného provozním P-Q diagramem.
- To vede také k minimalizaci celkových činných ztrát v síti.



Provozní kritéria pro U a Q

- **Koncepce regulace napětí tak, jak je přijatá a aplikovaná v ES ČR, je postavena na třístupňové hierarchii:**
 - **terciární regulace napětí – na úrovni celé regulované soustavy**
 - **sekundární regulace napětí – na úrovni jednoho uzlu soustavy**
 - **primární regulace napětí – na úrovni jednoho bloku výroby (elektrárny, teplárny nebo závodní elektrárny)**





Terciární regulace napětí a jalových výkonů

- Koordinuje zadaná napětí v PILOTNÍCH UZLECH pro bezpečný a ekonomický provoz ES jako celku. Základním kritériem je minimalizace technických ztrát v regulované soustavě. Hlavními omezovacími podmínkami pak jsou:
 - minimální a maximální hodnoty napětí v uzlech soustavy (technická omezení)
 - aktuální hodnoty rezervy regulačního jalového výkonu pro jednotlivé pilotní uzly
 - toky jalového výkonu např. přes hraniční vedení v případě přenosové soustavy nebo přes transformátory PS/110kV v případě distribuční soustavy 110kV atd.
 - další omezovací podmínky podle konkrétních místních podmínek
- Prakticky se jedná o optimalizační výpočet na bázi chodu sítě, kdy se hledá k aktuálnímu stavu sledované soustavy stav optimální při akceptování všech uvedených omezovacích podmínek. Pro řešení této úlohy existuje sice řada výpočetních metod, ale k praktickému využívání v operativním provozu lze využívat pouze dostatečně rychlé a robustní programové nástroje. Navíc je nutné využívat pro výpočty estimovaná data nikoliv data přímo měřená, neboť citlivost optimalizačních výpočtů na kvalitu vstupních dat je extrémně vysoká.
- Je představována optimalizačním programem pracujícím na DISPEČINKU ČEPS. Program koriguje napětí v pilotních uzlech tak, aby v každém pilotním uzlu vznikla rezerva regulačního výkonu pro nepředvídatelné stavy.

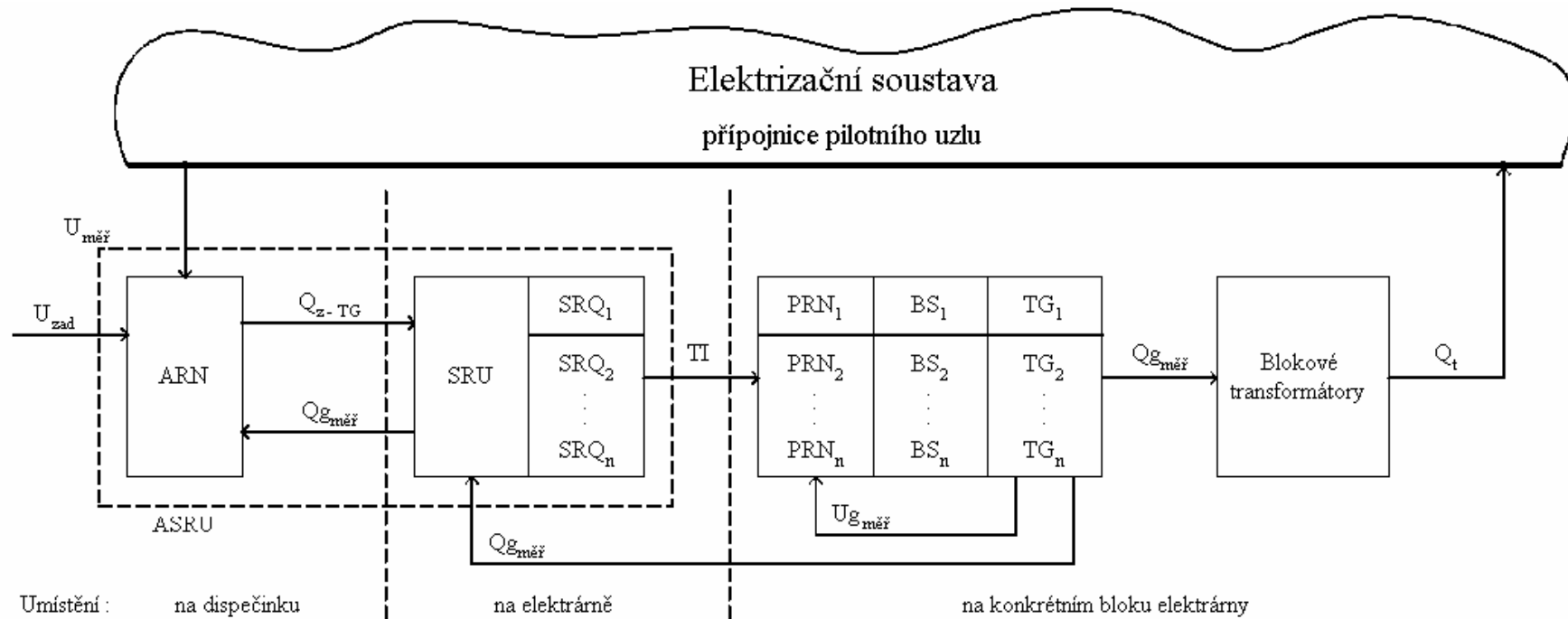


Sekundární regulace napětí a jalových výkonů

- Funkci ASRU lze obecně popsat jako technologický proces, který obnovuje rovnováhu spotřeby a výroby jalového výkonu v pilotním uzlu právě na úrovni požadovaného napětí v tomto sledovaném místě.
- ASRU se skládá z:
 - Automatické regulace napětí (ARN)
 - Skupinové regulace napětí (SRU)
 - Sekundární regulace jalového výkonu (SRQ)
 - Regulátoru odboček transformátoru PS/110kV
- Popis celkové funkce
 - ARN vyhodnotí aktuální regulační odchylku, vypočte celkovou změnu jalového výkonu, která je nutná pro její eliminaci a podle existující regulační rezervy provede rozdělení požadavku na jednotlivé SRU, které má pro regulaci v daném uzlu k dispozici. SRU na elektrárně rozdělí svůj požadavek podle rezervy na jednotlivé SRQ generátorů. SRQ generátorů pak generují velikost impulsu na mechanismus změny zadané hodnoty napětí PRN, který změní velikost jalového výkonu. Tato změna vstupuje přes blokový transformátor zpět do soustavy.



Princip automatické sekundární regulace napětí v pilotním uzlu



ARN ... automatický regulátor napětí
SRU ... skupinový regulátor napětí
SRQ ... sekundární regulátor jalového výkonu
PRN ... primární regulátor napětí
BS ... budící souprava
TG ... turbogenerátor
 $U_{\text{měř}}$... napětí na regulované přípojnici
 U_{zad} ... zadané napětí na regulované přípojnici

$Q_{\text{g měř}}$... jalový výkon měřený na svorkách TG
 $U_{\text{g měř}}$... měřené napětí na TG
 $Q_{\text{z-TG}}$... zadaný jalový výkon pro konkrétní TG
TI ... délka impulzu na PRN
 Q_t ... jalový výkon za blokovým transformátorem



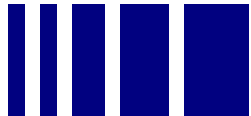
ASRU

- **Automatický regulátor napětí (ARN) provádí tyto operace:**
 - modifikaci zadané hodnoty napětí (U_{zad}) a styk s operátorem
 - získání a verifikaci vstupních měření a signalizací řízeného systému. Určení aktuálního rozsahu UO 110 kV.
 - určení velikosti regulační odchylky napětí: $EU = U_{\text{zad}} - U_{\text{měř}}$
 - výpočet charakteristiky pilotního uzlu v UO 110 kV: $KQ = \Delta Q / \Delta U$ (MVar/kV)
 - proporcionálně integrační transformaci EU na odchylku YQ (změna dodávky jalového výkonu)
 - výpočet příslušných P-I konstant podle aktuálního zapojení UO 110 kV
 - výpočet regulačních zásahů pro jednotlivé SRU podle zadaného kritéria (stejná poměrná rezerva jalového výkonu) a jejich předání na SRU
 - ošetření omezujících podmínek (dodržování technického minima a maxima napětí, atd.)
 - kontrolu funkčnosti celého regulačního systému
- **Skupinový regulátor napětí (SRU) v rámci pokynů ARN zajišťuje na elektrárnách tyto hlavní funkce:**
 - získání a verifikaci vstupních měření a signalizace z technologie výroby
 - získání vstupních požadavků ze strany ARN a zpětné předání informací o svém aktuálním stavu
 - rozdělení požadovaných regulačních zásahů jalového výkonu na jednotlivých strojích regulační smyčky (podle zadaného kritéria) na jednotlivé SRQ
 - povelování změny odbočky transformátoru vlastní spotřeby, příp. blokového transformátoru, v případě, že jsou tyto transformátory vybaveny možností regulace odboček pod zatížením

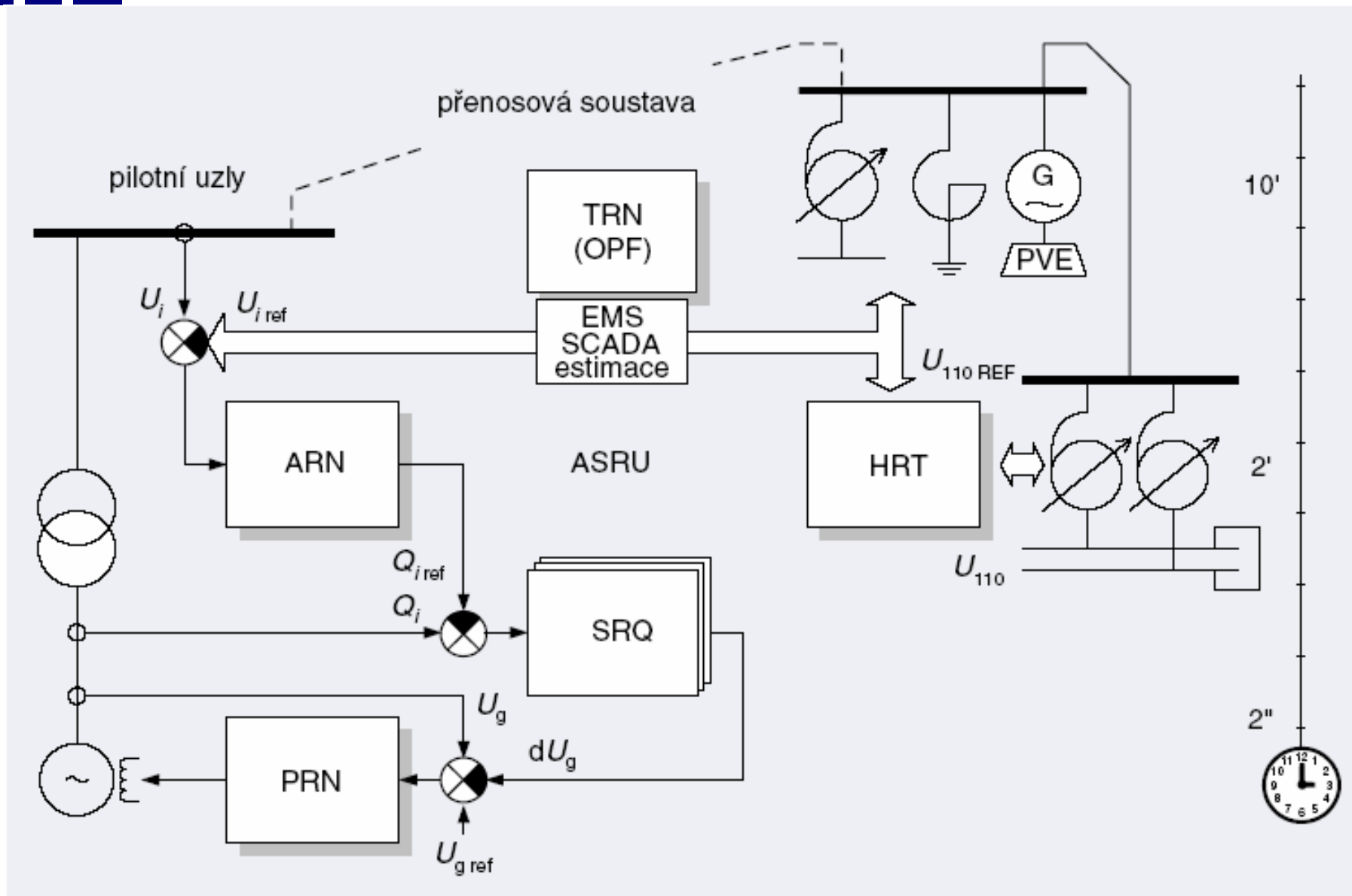


ASRU

- Sekundární regulace jalového výkonu generátoru (SRQ)
 - zajišťuje realizaci povelu SRU pomocí vstupu do primárního regulátoru napětí generátoru (PRN) do bloku mechanismu změny zadané hodnoty generátorového napětí. Pracuje jako impulsní regulátor tzn., že požadavek na velikost změny zadané hodnoty napětí měří časem (délkou impulsu - TI).
- Hlavní technologické operace SRQ:
 - výpočet regulační odchylky: $EQ = Q_{genZad} - Q_{gen}$
 - Q_{genZad} zadaná hodnota jalového výkonu generátoru
 - Q_{gen} jalový výkon generátoru (tvoří zpětnou vazbu pro SRQ)
 - proporciálně-integrační transformace EQ na odchylku YQ
 - výpočet P-I konstant pro jednotlivé stroje (vstupy pro výpočet)
 - výpočet délky impulsu (TI) pro požadovanou velikost regulačního zásahu
 - ošetření všech omezujících podmínek provozu generátoru, včetně vlastních spotřeb bloků a s respektováním funkce automatické regulace činného výkonu turbín
- Generátory
 - do systému ASRU lze připojovat libovolné typy generátorů. Podmínkou je, že tyto generátory musí mít možnost dálkové regulace napětí generátoru. Tuto možnost mají všechny generátory instalované po r. 1965 a tvoří standardní výbavu všech generátorů instalovaných v současnosti.



ASRU





ASRU

- **Primární regulátor napětí (PRN)**
 - zajišťuje v oblasti sekundární regulace napětí nastavení zadané hodnoty generátorového napětí za provozu generátoru. Použitý typ PRN není žádnou omezující podmínkou pro činnost ASRU. Konkrétní typ PRN udává více či méně informací o činnosti a chování generátoru za provozu. Regulační funkce ASRU musí mít tyto informace a konkrétní parametry PRN ve svém algoritmu řízení zahrnuté. V případě, že PRN nejsou vybaveny HMP, OSP a ORP musí být tato zařízení součástí SRQ.
- **Budicí soustavy**
 - budicí soustavy generátorů jsou různé podle typů generátorů a data jejich instalace na výrobní elektrické energie. Použité druhy budičů generátorů, z hlediska jejich zařazení do ASRU, nemají žádný omezující vliv na činnost ASRU.
- **Blokové transformátory**
 - jsou v ES ČR většinou bez možnosti regulace odboček pod zatížením. V těchto případech působí z hlediska ASRU jako pasivní prvky s tím, že ovlivňují velikost použitelných regulačních rozsahů Q (nevhodná volba omezí čerpání regulačního jalového výkonu).