Regulace frekvence a napětí v ES

Motivační faktory

- **Neskladovatelnost elektrické energie**
  - **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.**
  - **bilanční rovnice**

$$S_v(t) = S_s(t) + S_z(t) + S_a(t)$$

- **Kvalitu elektrické energie určují provozní parametry: kmitočet f a napětí U.**
- **Dynamicky proměnný denní diagram zatížení**
- **Poruchy (výpadky) na straně výroby i spotřeby**
- **Poruchy v sítích**
- **Změna f - určující je bilance činného výkonu. Prvky elektrizační soustavy jsou konstruovány pro provoz při jmenovitém kmitočtu 50 Hz.**
- **Změna U – určující je zejména bilance jalového výkonu.**

Význam udržení stabilní frekvence

- **Pokles frekvence může vyvolat vibrační namáhání na lopatkách NT dílů parních turbín → nedovolený provoz elektráren.**

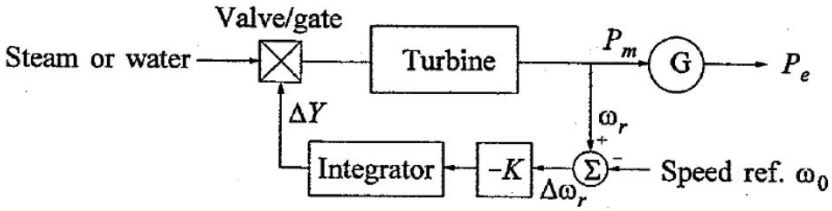
Typ elektrárny / *Provoz*	Uhelné	JE		VE	PVE		Paro-plynové	OZE
		EDU	ETE		turbína	čerpání		
Normální zbez omezení	48.5-50.5	48.5-50.5		48.5-50.5	48.5-50.5	49.5-50.5	48.5-51.5	49-51
Časové omezen	46-48.5 50.5-53	47.5-48.5 50.5-52.5	47.9-48.5 50.5-51.5	46-48.5 50.5-53	46-48.5 50.5-53	49-49.5 50.5-52(53)	48-48.5 51.5-52	47.5-49 51.-51.5
Nepřípustný	f > 53 f < 46	f > 52.5 f < 47.5	f > 51.5 f < 47.9	f > 53 f < 46	f > 53 f < 46	f > 52(53) f < 49	f > 52 f < 48	f > 51.5 f < 47.5
Automatické odpojení od ES	f > 53 f < 47.5	f > 52.5 f < 47.9	f > 51.5 f < 47.9	f>50.2(51.5) f < 47.5	f >50.2(51.5) f < 47.5	f >52(53) f<49.8-49.2	f > 52 f < 48	f > 51.5 f < 47.5

- **Konstantní otáčky motorů (AM) jsou důležité pro spolehlivý provoz elektráren, který silně závisí na funkčnosti pomocných technologických okruhů**
  - **palivo**
  - **napájecí a chladicí voda**
  - **vzduch pro spalování**

    Čerpadla, ventilátory při poklesu f ztrácejí výkon.
- **Pokles frekvence zvyšuje magnetizační proudy AM a TRF.**
- **Frekvence slouží pro časové značky řady zařízení a systémů vyžadující synchronní čas (důležité je regulovat nejen f, ale také její integrál).**

Statické charakteristiky

- **Statická vs. astatická char.**
  - **přesnost**
  - **rozdělení na zdroje**
- **Astatická char.**
  - **regulace na konst. f**



ω_r = rotor speed
P_m = mechanical power
Y = valve/gate position

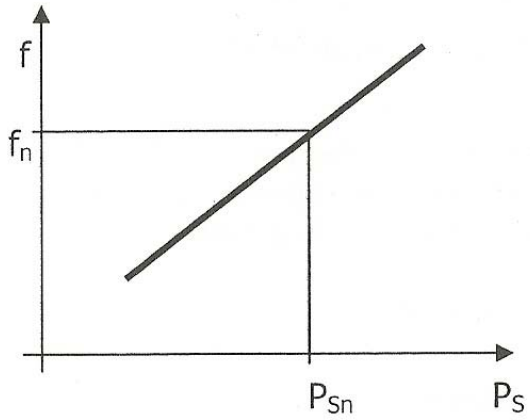


Fig. 4.7 Load frequency characteristic

- **pouze v případě 1 regulovaného zdroje**
- **jinak nelze rozdělit zátěž mezi více zdrojů**
- **nutnost stejného nastavení, jinak by se přetahovaly**

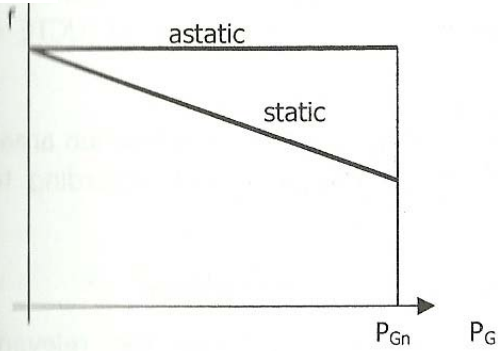


Fig. 4.8 Astatic and static frequency characteristic of the generator

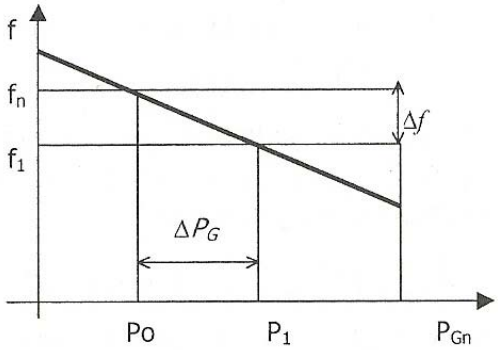
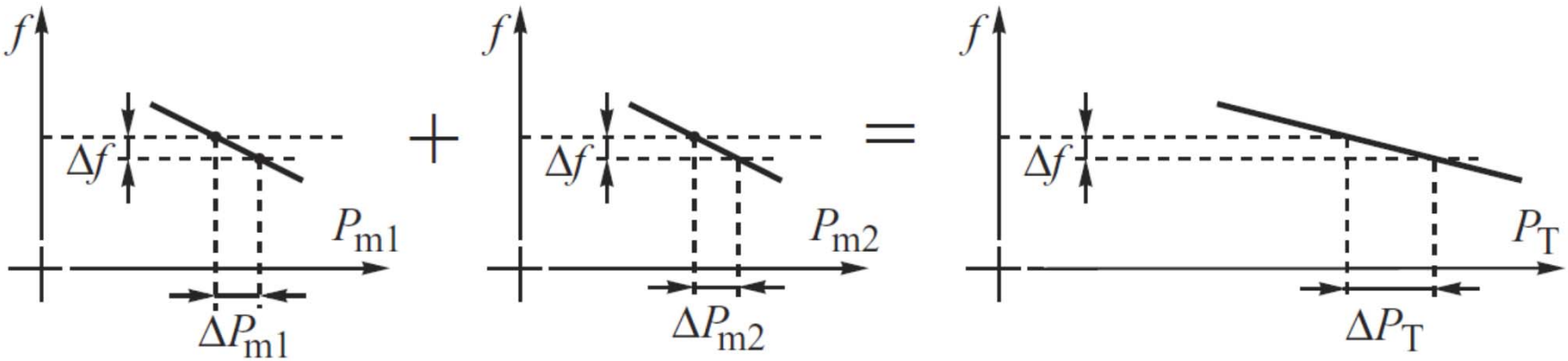
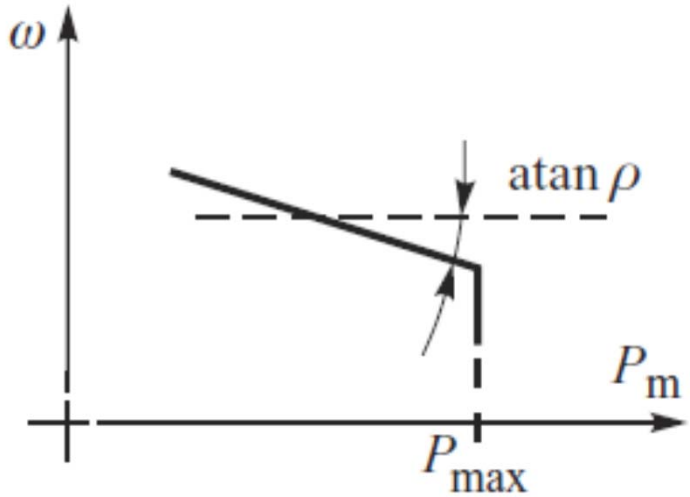


Fig. 4.9 Frequency characteristic of the generator

Statická charakteristika (f,P) pro více zdrojů

- **Umožňuje jednoznačné rozdělení změny zatížení mezí více zdrojů.**





Statika a výkonové číslo

- **Statika – poměrná změna frekvence / poměrná změna výkonu**
  - **Např. porucha frekvence 0,1 Hz vyvolá u TG o výkonu 220 MW s nastavenou statikou 5 % změnu výkonu TG o 8,8 MW.**
- **Výkonové číslo synchronní oblasti/bloku popisuje její frekvenční chování. Odpovídá podílu poruchové změny výkonu ΔP_a a odchylky kmitočtu Δf způsobené touto poruchou (výkonové deficity jsou považovány za záporné hodnoty):**

$$K_u = \frac{\Delta P_a}{\Delta f} \left(\frac{MW}{Hz}\right)$$

- **Výkonové číslo je převrácená hodnota statiky.**

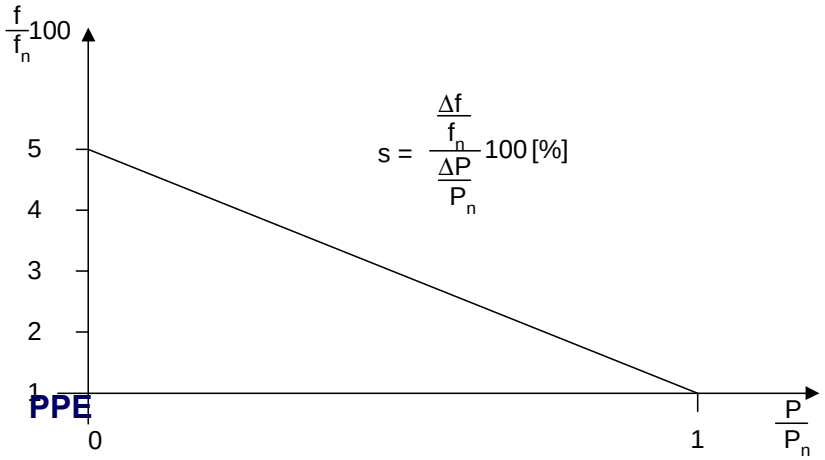
$$K = \frac{1}{S} \left(\frac{MW}{Hz}\right) \qquad k = \frac{1}{s} \; (-)$$

- **Pro více zdrojů se sčítají jejich výkonová čísla.**

$$K_G = \sum K_{Gi}$$

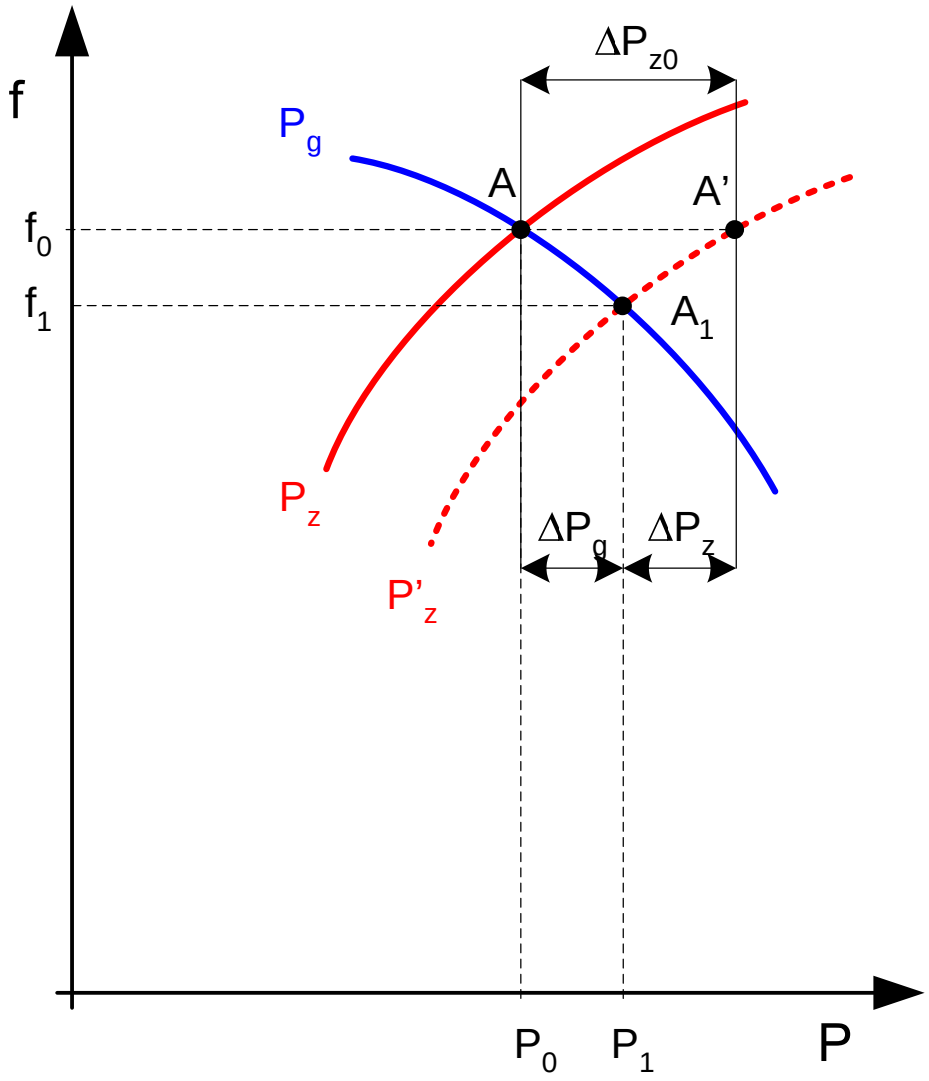
- **Výkonové číslo soustavy je součet čísel zdrojů a zátěže.**

$$K_S = K_G + K_L$$



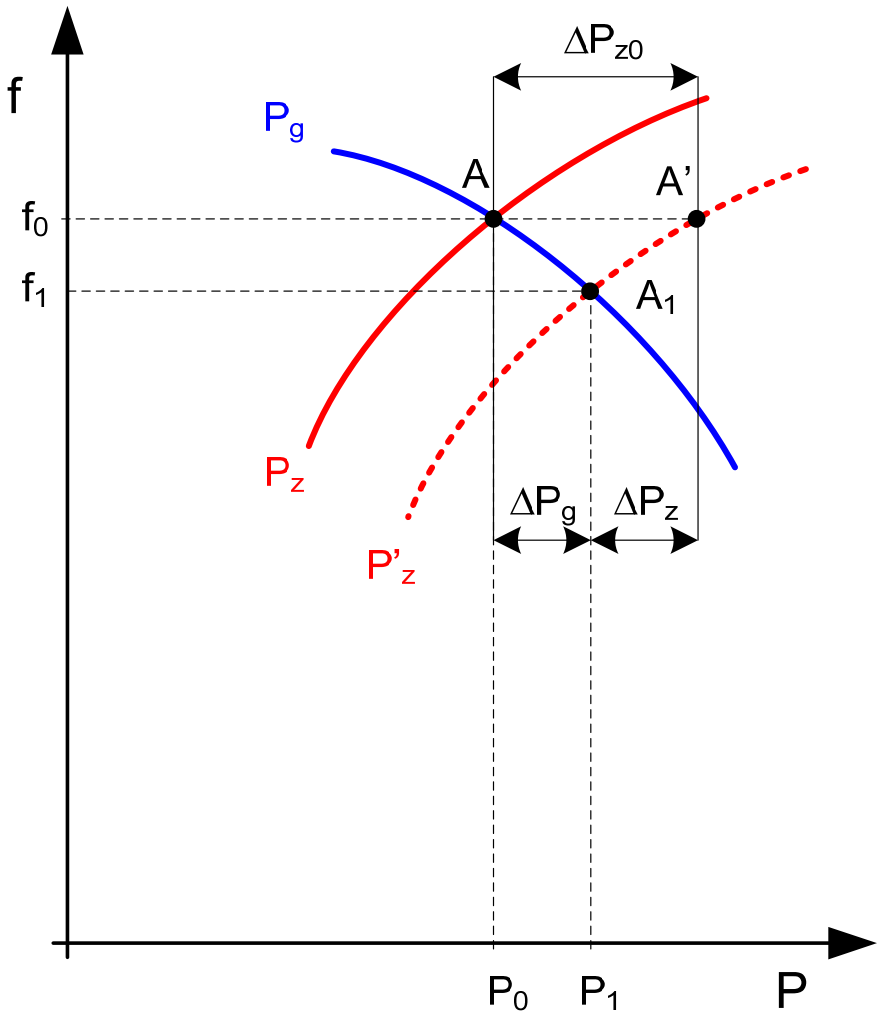
Zajištění stability pomocí regulace otáček (frekvence)

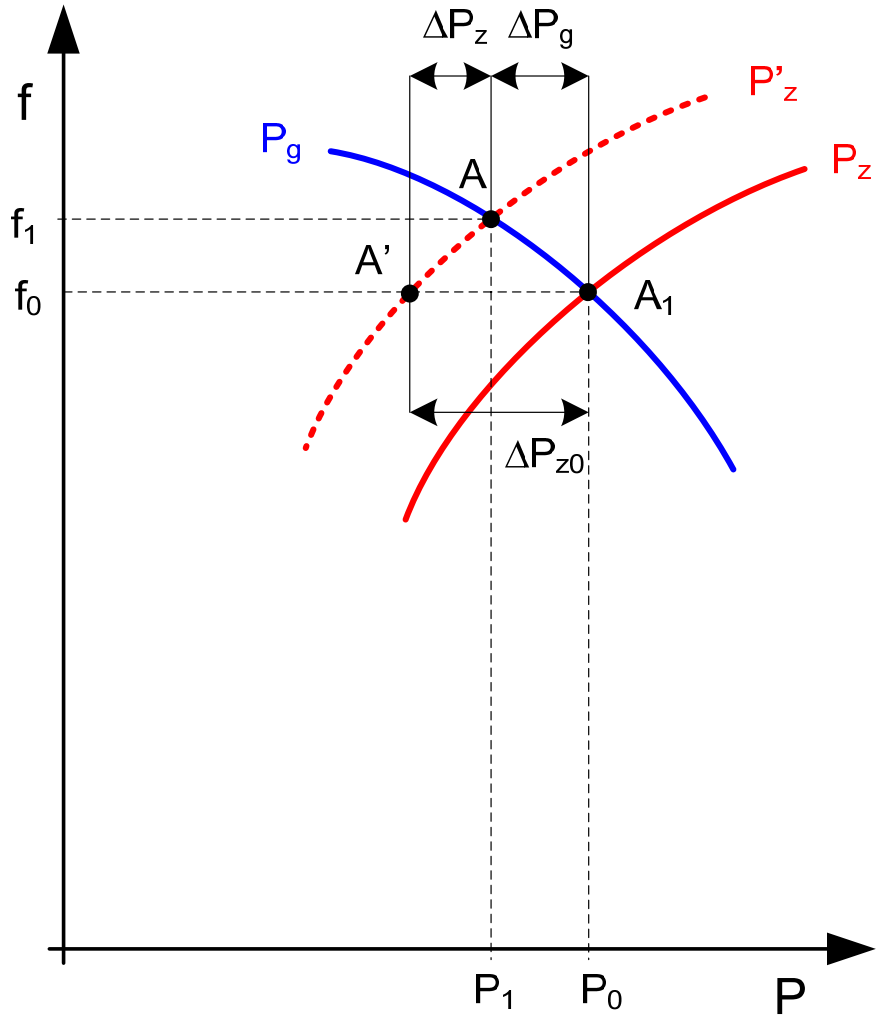
- Pracovní bod (f, P)
- Zvětšení zátěže
- Nový pracovní bod při snížené frekvenci
- Zvýšení výkonu nepokrývá celý výpadek
  - rozdíl je samoregulační efekt zátěže



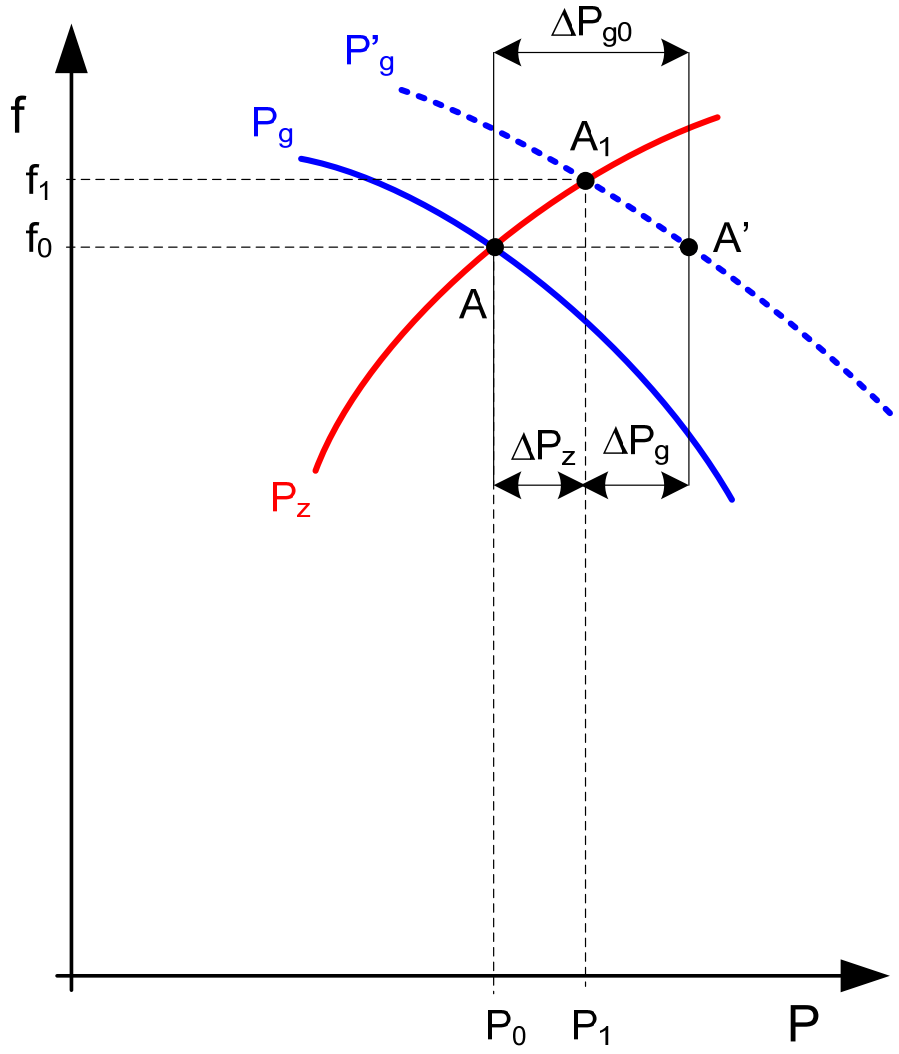
a) nárůst zatížení

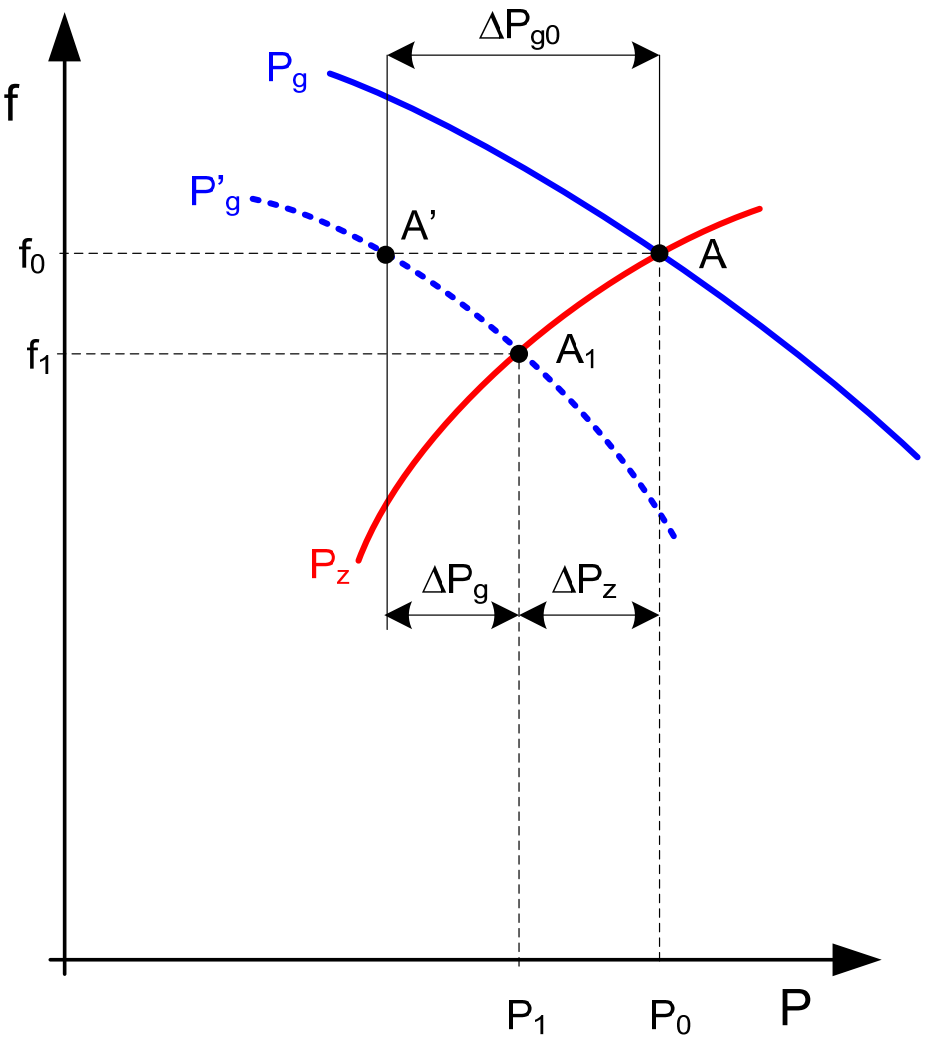
Změny výkonu spotřeby





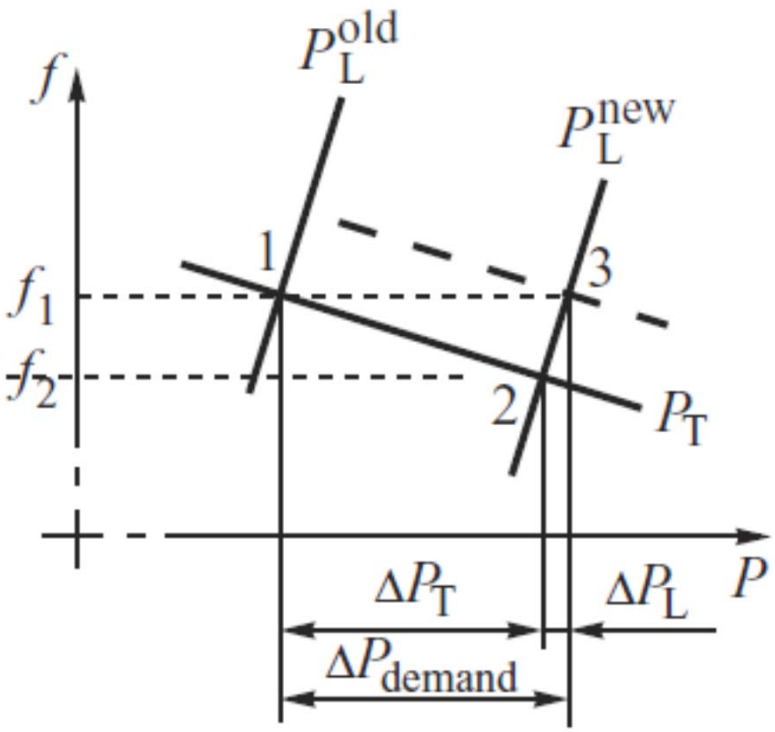
Změny výkonu zdrojů





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 Pv na velikost odchylky frekvence**

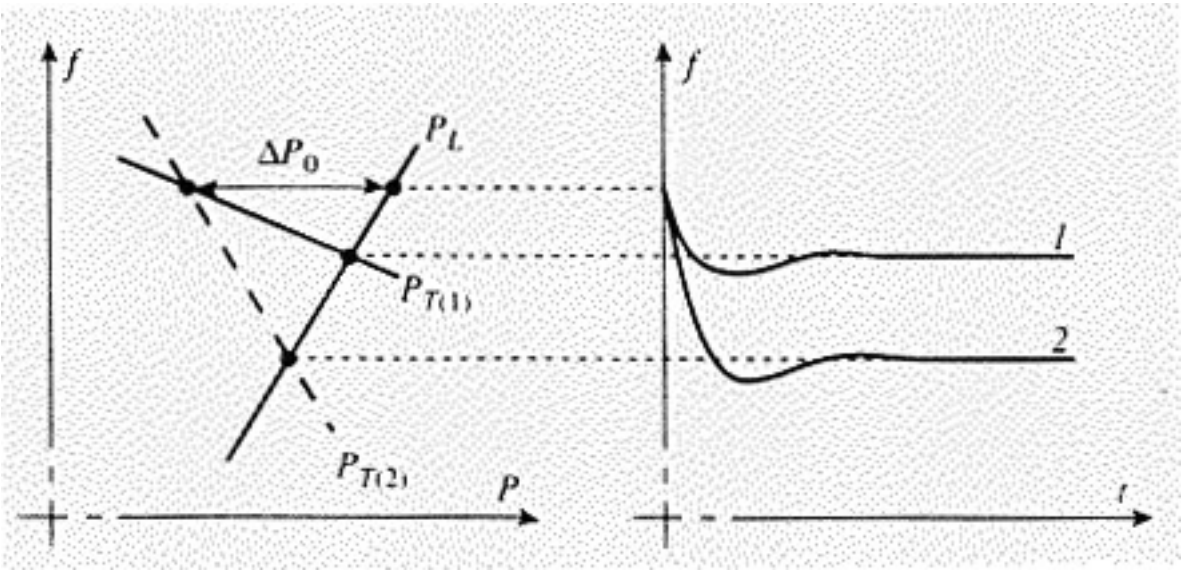
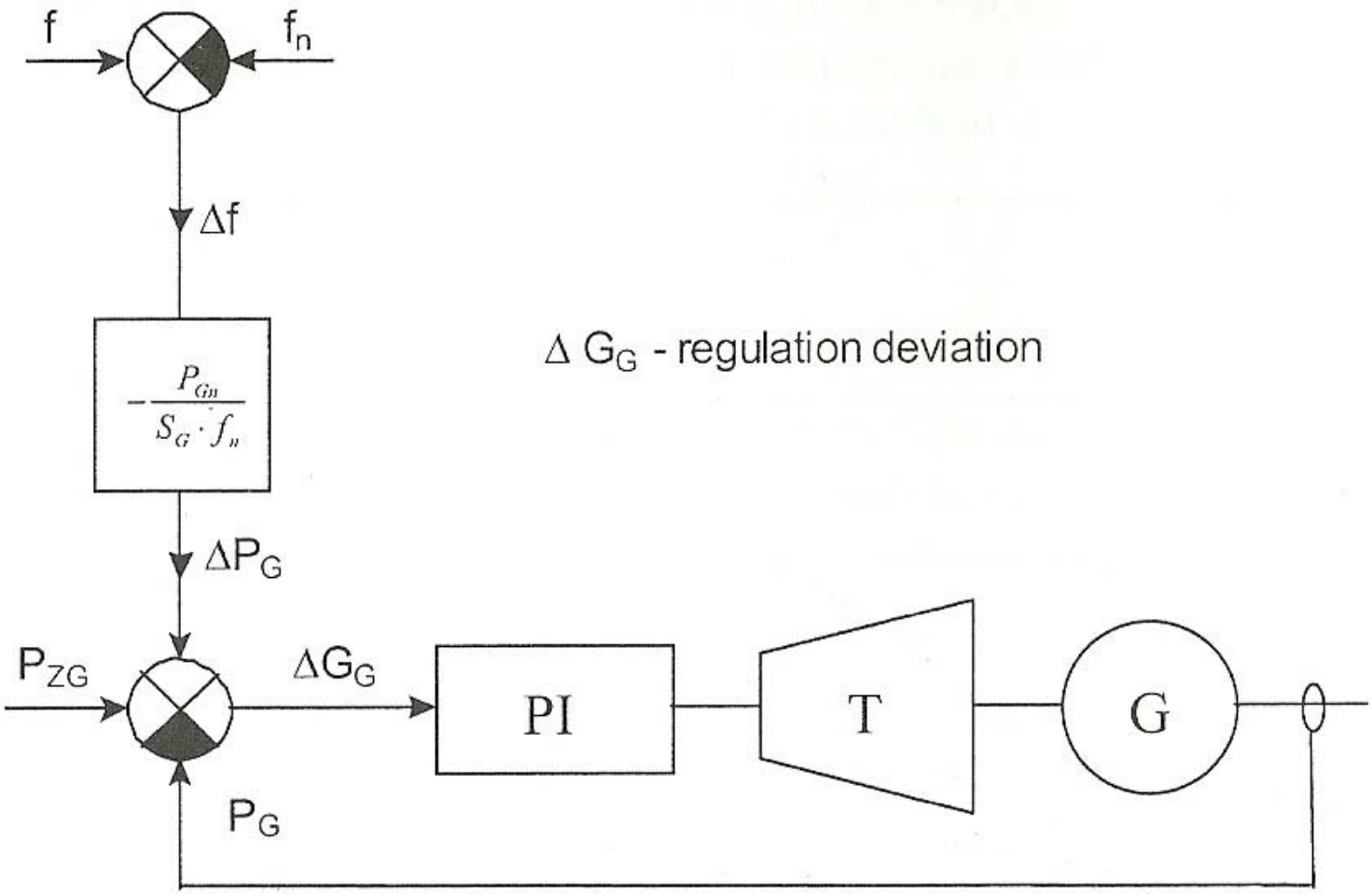


Schéma primární regulace

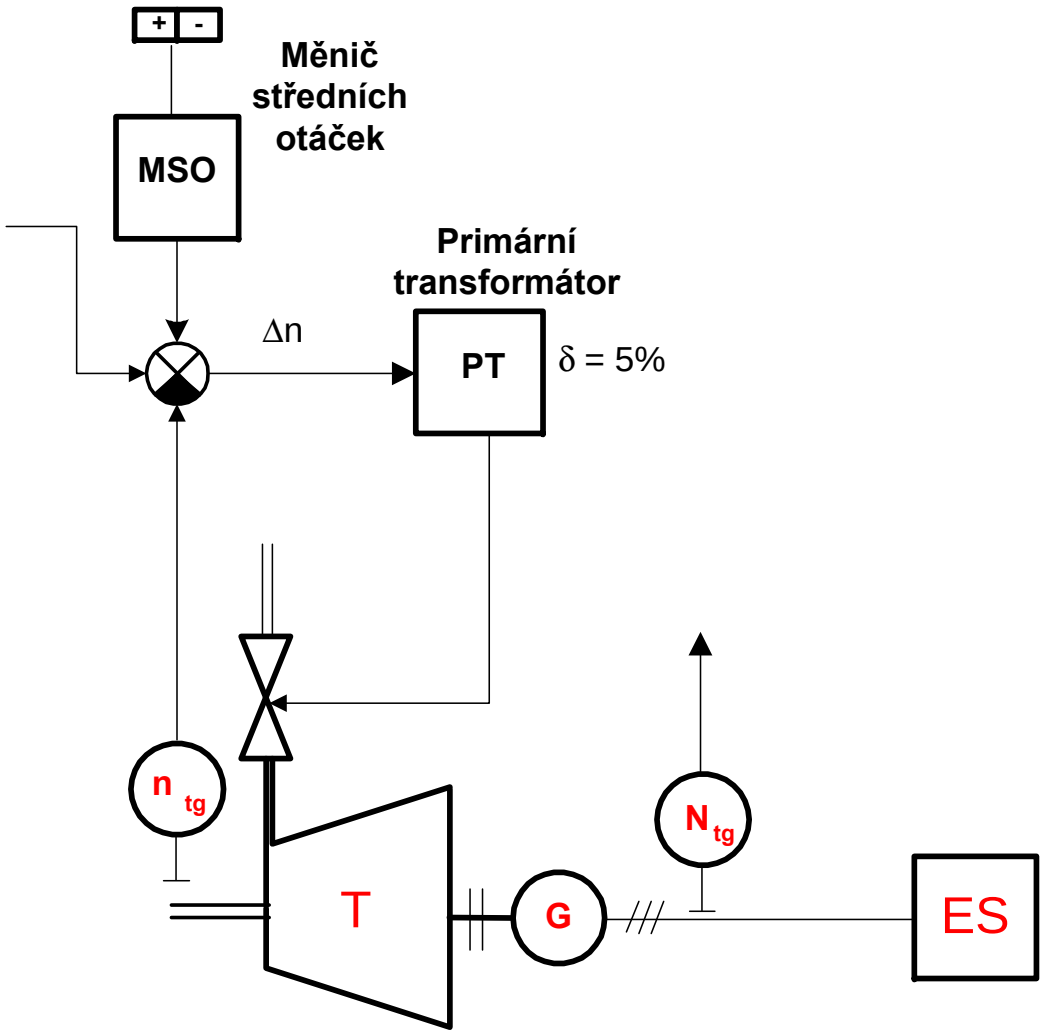


ΔG_G - regulation deviation

Fig. 4.11 Principal diagram of the turbogenerator primary regulation

Blokové schéma otáčkové regulace turbíny

- Proporcionální regulace
- Při odchylce frekvence od 50 Hz o více než 200 mHz
  - ostrovní provoz
- Požadavek na beznárazový přechod z normálního provozu



Propojené soustavy

- Je systém dvou nebo více elektrizačních soustav synchronně propojených pomocí mezisystémových propojení. Typickými příklady jsou propojené soustavy ENTSO-E, CENTREL (střední Evropa), NORDEL (severní Evropa). Hlavními výhodami provozu v propojených soustavách je:
- Efektivní využívání různých typů zdrojů elektřiny
  - možnosti výměn elektřiny z důvodů posunů špiček a sedel diagramu zatížení v různých soustavách
  - snížení záloh pro primární regulaci frekvence v jednotlivých soustavách
  - zvýšená kvalita dodávané elektřiny - zejména stálost frekvence.
    - První tři faktory vedou k snížení nákladů na provoz ES a tím i ke snížení ceny elektřiny pro koncového uživatele.
- Zařízení propojující dvě sousední soustavy nebo oblasti řízení jsou vybavené systémem schopným měřit a předávat měřené údaje, zejména toky činného a jalového výkonu.
- Synchronní propojení jednotlivých soustav je založeno na dvou základních principech
  - princip solidarity
  - princip neintervence

Propojené soustavy

- **Princip solidarity v propojených soustavách znamená:**
  - **že na pokrývání výkonové rovnováhy se v prvních okamžicích (až několika desítek sekund) podílejí všechny elektrárenské bloky zapojené do ES a pracující v režimu primární regulace frekvence.**
    - **Při provozu propojené ES vzniká neustále narušování výkonové rovnováhy mezi zatížením a výkonem zdrojů (např. poruchovým výpadkem elektrárenského bloku nebo změnou zatížení).**
    - **Podle fyzikálních zákonů je nerovnováha v prvním okamžiku hrazena z elektromagnetické energie akumulované v elektrických strojích. Během elektromechanického přechodného děje se nerovnováha hradí z mechanické energie roztočených setrvačných hmot.**
    - **Během tohoto děje se vyrovná frekvence v celé ES. Na odchylku frekvence pak reagují elektrárenské bloky zapojené do primární regulace frekvence.**
- **Princip neintervence v propojených soustavách znamená:**
  - **že na výkonovou nerovnováhu, projevující se změnou frekvence a salda předávaných výkonů, reaguje pouze sekundární regulace f a P postižené soustavy (tedy soustavy, kde k nerovnováze došlo).**
  - **Podle tohoto principu je každá z propojených soustav povinna mít k dispozici takový výkon zdrojů (záložních výkonů), kterým je schopna v každém okamžiku zajišťovat rovnováhu mezi výkonem zdrojů a zatížením příslušné soustavy.**

ACE (Area control error)

- Regulační odchylka sekundárního regulátoru frekvence a předávaných výkonů

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

  - ΔP odchylka předávaných výkonů ES od žádané hodnoty (MW)
  - $\Delta f = f - f0$ odchylka skutečné a žádané frekvence (Hz)
  - K konstanta regulátoru
- Podmínkou správné činnosti SR je, aby konstanta K odpovídala výkonovému číslu soustavy λ. Toto číslo je při zanedbání samoregulačního efektu zátěže dáno sumou výkonových čísel jednotlivých bloků v primární regulaci.

$$\lambda = \sum \frac{P_n}{s \cdot f_n}$$

- Konstanta K se nastavuje vyšší než výkonové číslo (1,1λ) kvůli nejistotě samoregulačního efektu zátěže.

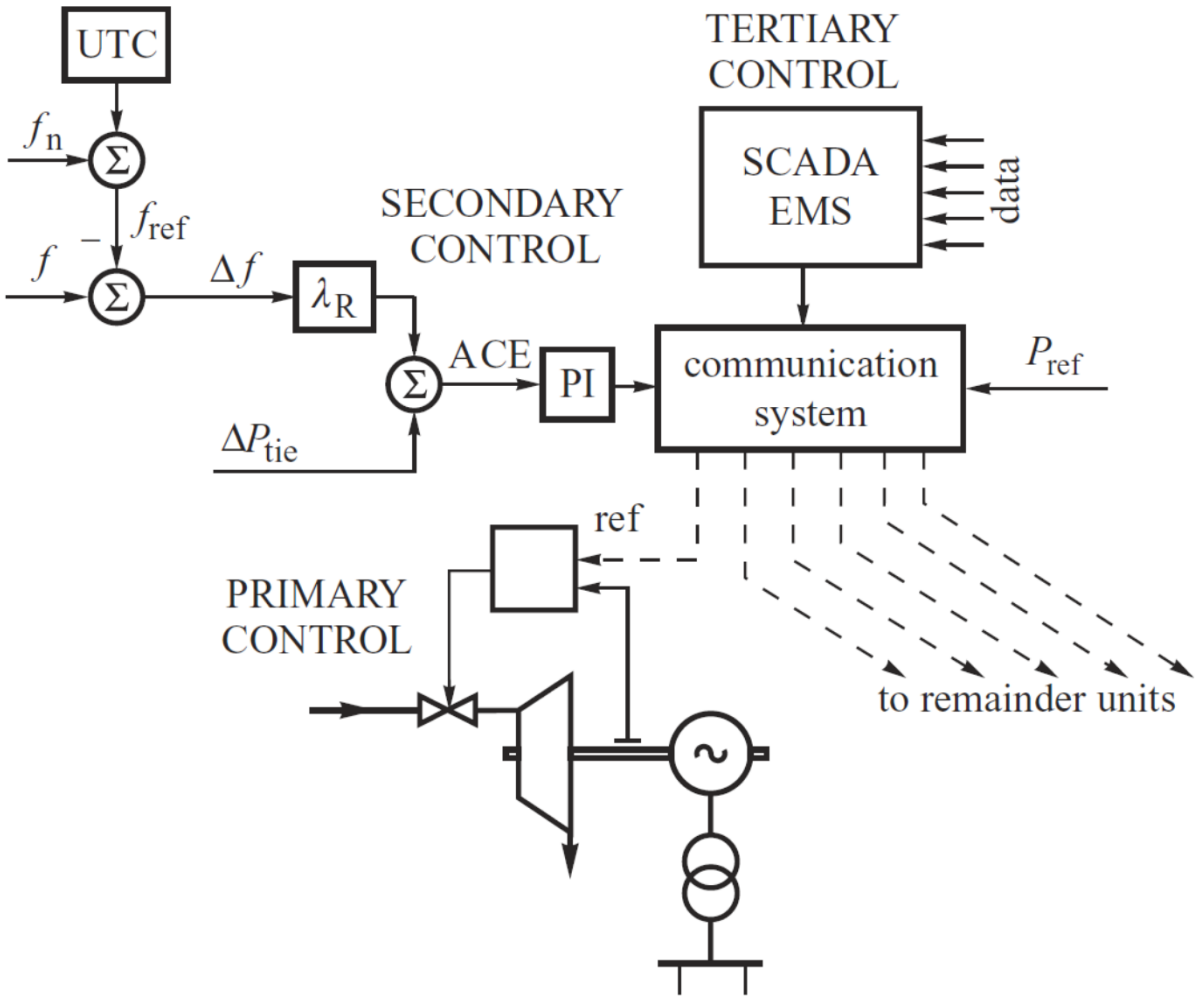
Sekundární regulace f a P

- *(supplementary control)*
- funkce
  - regulovat frekvenci zpět na jmenovitou hodnotu a udržet předávané výkonové toky dle plánu
  - pomocí výstupu vybraných zdrojů
  - celkový výkon SR v oblasti rozdělit (dle nákladů, technických možností)

    → zajištěno centrálním regulátorem
- integrální regulace mnohem pomalejší než PR → efekt až po stabilizaci f pomocí PR

Dispečerské řízení

- **Primární regulace frekvence**
- **Sekundární regulace f a P**
- **Terciární regulace**



Sekundární regulace f a P

- 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. Tato koordinace, prováděná provozovatelem PS, spočívá:
    - ve správném nastavení konstanty sekundárního regulátoru tak, aby se co nejvíce blížila hodnotě výkonového čísla soustavy
    - ve sladění dynamiky sekundární a primární regulace tak, aby sekundární regulační děj proběhl až po odeznění primární
- Rychlosti změn výkonu
  - voda 1,5 – 2,5 % / s
  - olej, plyn 8 % / min
  - uhlí 2 – 4 % / min
  - jádro 1 – 5 % / min

Systémové služby

- Za zajištění systémových služeb pro ES ČR na úrovni přenosové soustavy podle Energetického zákona odpovídá ČEPS, a.s. Systémové služby, které poskytuje, slouží k zajištění bezpečného a spolehlivého provozu PS, kvality přenosu elektrické energie a k zajištění požadavků pro provoz ES ČR vyplývajících z mezinárodní spolupráce v rámci ENTSO-E.
- = služby zajišťující kvalitu, bezpečnost a spolehlivost dodávky elektřiny z ES – definovány v Kodexu přenosové soustavy (i požadavky ENTSO-E RGCE)
  - udržování kvality elektřiny
  - udržování výkonové rovnováhy v reálném čase
  - obnovení provozu
  - dispečerské řízení

Systémové služby

- technicko-organizační prostředky pro zajištění SyS
  - udržování výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence (PR)
  - sekundární regulace frekvence a předávaných výkonů (SR)
  - terciární regulace výkonu
  - využití dispečerské zálohy
  - sekundární regulace napětí (ASRU)
  - terciární regulace napětí
  - zajištění stability přenosu
  - obnovování provozu po úplném nebo částečném rozpadu soustavy (ztrátě napájení)
  - zajištění kvality napěťové sinusovky
- Jsou zajišťovány jednak prostředky PS a jednak prostřednictvím jednotlivých uživatelů PS, kteří poskytují PpS

  ⇒ pro zajištění SyS obstarává PPS podpůrné služby dvěma způsoby:
  - nákupem od zdrojů těchto služeb v ES ČR i v okolních soustavách
  - vlastními prostředky (regulace Q, obrana proti šíření poruch)
- Každý odběratel platí regulovanou cenu za SyS (Kč/MWh) podle sazeb ERÚ
  - 2016: 99,71 Kč/MWh (bez DPH)

Podpůrné služby

- = Služby nutné k provozování ES a pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky el., tj. k zajištění systémových služeb
- Poskytují je jednotlivý uživatelé PS.
- Požadavky na PpS:
  - měřitelnost – se stanovenými kvantitativními parametry a způsobem měření
  - garantovaná dostupnost služby během denního, týdenního a ročního cyklu s možností vyžádat si inspekci
  - certifikovatelnost – stanovený způsob prokazování schopnosti poskytnout služby pomocí periodických testů
  - možnost průběžné kontroly poskytování

Podpůrné služby

- Primární regulace f bloku (PR)
- Sekundární regulace P bloku (SR)
- Minutová záloha (MZt)
- Rychle startující 15-ti minutová záloha (QS15)
- Snížení výkonu (SV30)
- Sekundární regulace U/Q (SRUQ)
- Schopnost ostrovního provozu (OP)
- Schopnost startu ze tmy (BS)

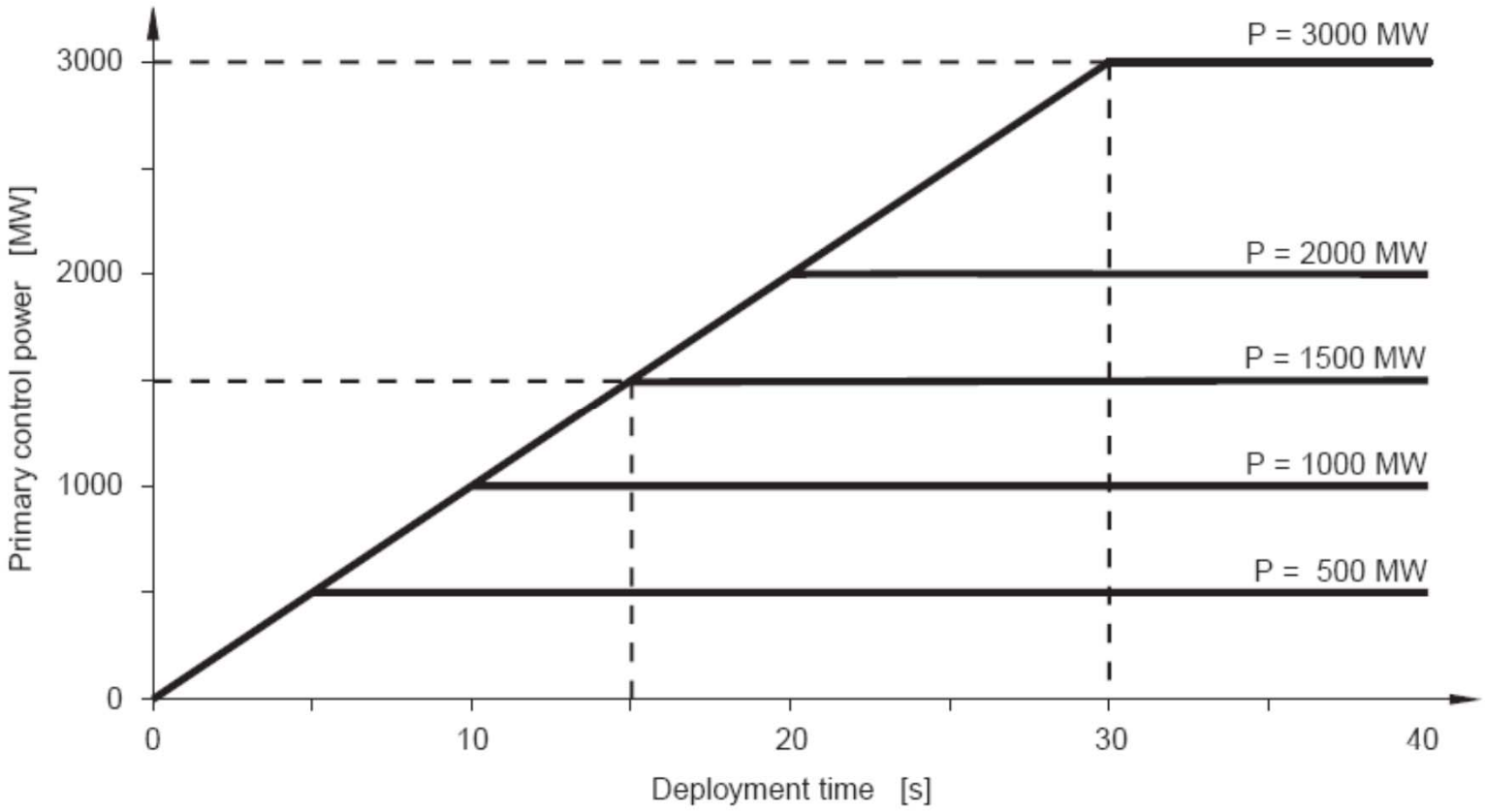
- Kromě podpůrných služeb obstarávaných v ES ČR využívá ČEPS pro systémovou službu Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase dále:
  - regulační energii obstaranou na domácím trhu v ČR
  - regulační energii obstaranou na vyrovnávacím trhu
  - regulační energie ze zahraničí formou operativní dodávky elektřiny ze zahraničí a do zahraničí na úrovni PS
    - havarijní výpomoc ze synchronně propojených PS
    - dodávka negarantované regulační energie ze zahraničí
    - dodávka garantované regulační energie ze zahraničí
    - dodávka regulační energie ze zahraničí v rámci spolupráce na úrovni PPS

SyS – Primární regulace

- Na úrovni propojených soustav RGCE jsou PR a SR základní systémové služby
- Požadavek na PR vychází z návrhové výpadku zdroje 3000 MW, který nesmí způsobit pokles frekvence o více než 200 mHz (cílem je zastavení růstu odchylky frekvence)
- Předepsaná hodnota PR v ES odpovídá podílu vyrobené el. energie dané ES k součtu celkové vyrobené el. energie všech propojených soustav za uplynulý rok
  - na ES ČR připadá cca 84 MW
  - i v okamžiku výpadku zdroje zapojeného v PR → hodnota se zvyšuje o největší jednotkový rozsah zapojené PR (10 MW) ⇒ splnění spolehlivostního kritéria n-1
- PR musí vyregulovat odchylku do 30 s po výpadku
- PR funguje autonomně v regulačních oblastech (daná sumární záloha a statika)
  - generátory zapojené do PR reagují pouze na změnu f nezávisle na dalších vlivech
- Automatická SyS na úrovni RGCE založená na <u>principu solidarity</u>
  - při narušení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou se na vyrovnání odchylky podílejí všechny zdroje propojených soustav, které jsou do systému PR frekvence zapojeny (ostatní regulují na původní výkon)
    - až do doby, kdy soustava, v níž regulační odchylka (ACE) vznikla, tuto odchylku zreguluje

SyS – Primární regulace

- **Rychlost aktivování primární regulační rezervy**



SyS – Primární regulace

- Při bezporuchovém provozu propojené soustavy musí být náhlý výpadek zdrojů o výkonu 3000 MW kompenzován pouze primární regulací, aniž by bylo nutné použít frekvenční odlehčování. Navíc za předpokladu samoregulačního efektu zátěže 1 % / Hz nesmí být absolutní odchylka frekvence větší než 180 mHz. Stejně tak náhlé odlehčení o 3000 MW nesmí vést k absolutní odchylce přesahující 180 mHz. Pokud se nebere v úvahu samoregulační účinek zatížení, tak absolutní odchylka frekvence nesmí být větší než 200 mHz.
- Pro dosažení výše zmíněných cílů je třeba provozovat systém tak, aby se výkonové číslo celé synchronní oblasti v závislosti na zatížení nacházelo v poměrně úzkém rozsahu.
- Uvažovaný samoregulační účinek zátěže je uveden v následující tabulce:

Samoregulační efekt	Výkon soustavy	Výkonové číslo
1 % / Hz	150 GW	16500 MW/Hz
1 % / Hz	300 GW	18000 MW/Hz
2 % / Hz	150 GW	18000 MW/Hz
2 % / Hz	300 GW	21000 MW/Hz

SyS – Sekundární regulace f a salda předávaných výkonů

- Centrálně koordinovaná SyS na úrovni ES ČR, zajišťovaná PPS
- Cílem je udržovat saldo předávaných výkonů s propojenými soustavami na sjednané hodnotě (ACE = 0) a frekvenci na jmenovité hodnotě
- Výše odvozena od max. denní brutto spotřeby a velikosti instalovaného výkonu největšího bloku v soustavě
- Zajišťuje automatický sekundární regulátor frekvence a předávaných výkonů na dispečinku PS prostřednictvím terminálů elektráren a hraničních rozvoden
  - regulační odchylka je rozdělena na všechny zdroje poskytující SR v poměru šířek pásem pro SR
  - odchylka musí být vyregulována do 15 min od svého vzniku
    - do SR se počítá jakýkoliv výkon dostupný do 15 min - točivá záloha, rychle startující studená záloha (VE, PVE, PSE), havarijní výpomoc ze zahraniční soustavy
- V rámci RGCE je založena na <u>principu neintervence</u>
  - vzniklou odchylku dorovná pouze soustava (reg. oblast), v níž odchylka vznikla
  - vyregulováním odchylky dojde k obnově PR zálohy
    - tj. návrat primárních regulátorů turbín na střed regulačního pásma a frekvence na 50 Hz
    - $ACE = \Delta P + K*\Delta f$ (MW) pro ES ČR: K = 808 MW/Hz

SyS – Regulace napětí

- Lokální služba udržování zadaného U v pilotním uzlu PS (DS) prostřednictvím prvků PS (DS)
  - hladinové regulace transformátorů, tlumivky, synchronní kompenzátory, řízení výroby jalové energie ve zdrojích
- Terciární regulace napětí
  - koordinuje zadaná napětí v pilotních uzlech pro bezpečný a ekonomický provoz ES jako celku, dispečink PPS
- Sekundární regulace napětí (ASRU)
  - automaticky udržuje zadané napětí v pilotním uzlu přenosové soustavy. Zadané napětí je určeno terciární regulací napětí.
  - automatický regulátor napětí (ARN) + skupinový regulátor Q (rozděluje na bloky)
    - ARN v elektrárně
    - ARN v rozvodně
      - skupinový regulátor Q v elektrárně
      - sekundární regulátor Q také v rozvodně

SyS – Obnova provozu po úplném nebo částečném rozpadu PS

- **Proces skládající se z dílčích procesů**
  - **najetí zdrojů bez podpory vnější sítě (start ze tmy)**
  - **ostrovní provoz**
  - **postupná obnova napětí sítě**
  - **podání napětí ostatním zdrojům**
  - **sfázování ostrovů se zbytkem ES**
  - **obnova napájení odběratelů dle určených priorit**
- **PPS zajišťuje obnovení provozu podle Plánu obnovy soustavy – provozní instrukce dispečinků**

SyS – další

- Terciární regulace výkonu
  - udržuje potřebnou sekundární regulační zálohu
- Dispečerská záloha
  - slouží pro pokrývání výkonové nerovnováhy, která vzniká tím, že účastníci trhu (subjekty zúčtování odchylek) nejsou dlouhodobě (více než cca 2 hodiny) schopni dodržet plánované odběrové diagramy nebo diagramové body
- Zajištění stability přenosu
  - kontrolní a koordinační činnost spočívající v zajištění stability přenosu činných výkonů a tlumení výkonových kyvů v soustavě (buzení)
- Zajištění kvality napěťové sinusovky
  - funkce pasivního charakteru (monitorovací a kontrolní) i aktivního charakteru (filtry)

PpS – Primární regulace frekvence (PR)

- Rezervování části výkonového rozsahu bloku, zapojení primárního regulátoru na bloku, tj. lokální automatická funkce
- Primární regulátor v závislosti na změnách frekvence v síti automaticky upravuje okamžitý výkon bloku v zadaném rozsahu

$$\Delta P = -\frac{1}{\delta} \cdot \frac{\Delta f}{f_n} P_n$$

  - δ – statika primárního regulátoru nastavená tak, aby celý rozsah primární regulace (jedna polarita, RZPR) stroje odpovídal odchylce frekvence:
    - 200 mHz pro bloky do 300 MW
    - 100 mHz pro bloky nad 300 MW
- Zdroj musí dodat požadované množství regulační zálohy (RZPR) do 30 s od okamžiku vzniku odchylky frekvence
- Max. velikost vykupované RZPR (regulační záloha PR) je 10 MW, min. 3 MW
  - maximum z důvodu omezení vlivu výpadků bloků poskytujících tuto PpS na souhrnnou zálohu
- Symetrické poskytování (RRPR = regulační rozsah PR)

$$\mathrm{RZPR} = \frac{1}{2} \cdot \mathrm{RRPR}$$

PpS – Sekundární regulace výkonu bloku (SR)

- Schopnost změnit výkon bloku na základě signálu automatického regulátoru ústředního dispečinku PPS
- Výkonové pásmo pro SR musí být dosažitelné do 10 min od signálu regulátoru určenou rychlostí
- Min. velikost RRSR na 1 bloku je 20 MW, min. velikost RZSR+ (RZSR-) je 10 MW a max. velikost RZSR na 1 bloku je 70 MW
- Min. rychlost změny je 2 MW/min
- SR je poskytována symetricky (RZSR = ½ * RRSR)
  - základní nasazený výkon bloku je uprostřed pásma rezervovaného pro SR
  - jeden poskytovatel s více bloky na nich může mít SR rozloženou nesymetricky, avšak v součtu musí být poskytovaná SR vždy symetrická
- Využití
  - pro regulování fluktuace zatížení
  - při poruchových výpadcích výrobních zařízení s cílem udržet saldo předávaných výkonů se sousedními propojenými soustavami
- Velikost změny výkonu závisí na regulační odchylce a podílu SR zdroje na celkové SR záloze ES ČR

$$\Delta P_i = \frac{SR_i}{\sum_k SR_k} \cdot ACE$$

PpS – Rychle startující záloha

- **QS15**
  - bloky, které jsou do 15 minut od příkazu Dispečinku ČEPS schopny poskytnout sjednanou zálohu. QS15 se rozumí zvýšení výkonu na svorkách poskytujícího bloku.
  - odstavení do 15 minut od pokynu Dispečinku ČEPS
  - minimální velikost RZQS15 musí být 10 MW, maximálně však 100 MW
  - způsob aktivace určuje ČEPS
  - bloky poskytující QS15 nemohou zároveň poskytovat podpůrné služby SR, MZt

PpS – Minutová záloha (MZt) (t = 5, 15, 30 min)

- zařízení (obvykle elektrárenské bloky), která jsou do t minut od příkazu Dispečinku ČEPS schopna poskytnout sjednanou regulační zálohu RZMZt±.
  - kladná nebo záporná změna výkonu na svorkách
  - RZMZt+ je např. zvýšení výkonu bloku, odpojení čerpání (u PVE), nenajetí programovaného čerpání, odpojení odpovídajícího zatížení od ES ČR
  - RZMZt- je např. snížení výkonu bloku, připojení odpovídajícího zatížení k ES ČR
- Min. velikost RZMZt pro t=15 a t=30 jednoho bloku (zařízení) je 10 MW. Maximální výkon zařízení je 70 MW. Doba aktivace služby není omezena.
- Min. velikost RZMZt pro t=5 u jednoho bloku (zařízení) je 30 MW. Maximální výkon určuje ČEPS, a.s.. Minimální doba garantovaného poskytování RZMZ5 jsou 4 hodiny.

PpS – Snížení výkonu (SV30)

- Bloky, které jsou do 30 min od pokynu dispečinku PPS schopny snížení výkonu o předem sjednanou hodnotu zálohy nebo jsou schopny plného odstavení nebo nenajetí programovaného zdroje
- Služba je využívána pro snížení dodávky do ES a odregulování výkonové nerovnováhy při významné záporné odchylce v soustavě vzniklé nedodržením sjednaných diagramů přesahujícím možnost standardně určených velikostí PpS SR a MZt-
- Min. 30 MW od jednoho poskytovatele a minimální doba garance po aktivaci dispečinkem je 24 hod

PpS – Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

- **Automatická funkce využívající celý certifikovaný (smluvně dohodnutý) regulační rozsah jalového výkonu bloků pro udržení zadané velikosti napětí v pilotních uzlech ES a zároveň rozdělující vyráběný jalový výkon na jednotlivé stroje**
- **Regulační proces má být aperiodický nebo maximálně s jedním překmitem a ukončený do 2 minut**
- **Schopnost generátoru dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí účiníků cos φ = 0,85 ind. a cos φ = 0,95 kap. při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru ±5 % Un**

PpS – Schopnost ostrovního provozu (OP)

- Schopnost provozu elektrárenského bloku do vydělené části vnější sítě tzv. ostrova
- Ostrovní provoz se vyznačuje velkými nároky na regulační schopnosti bloku, značnými změnami systémových veličin – frekvence a napětí, což souvisí s tím, že blok pracuje do izolované části soustavy. Elektrárenský blok přechází automaticky do regulačního režimu ostrovního provozu při poklesu frekvence pod 49,8 Hz a při vzrůstu frekvence nad 50,2 Hz.
- Požadavky na schopnosti bloku
  - přechod do ostrovního provozu
    - přechod na P regulaci otáček, odpojení SR, odpojení ASRU, aperiodický a stabilní přechod otáček na novou hodnotu
  - ostrovní provoz

$$P_{id} = P_0 - \frac{1}{\delta} \cdot \frac{\Delta f}{f_n} P_n$$

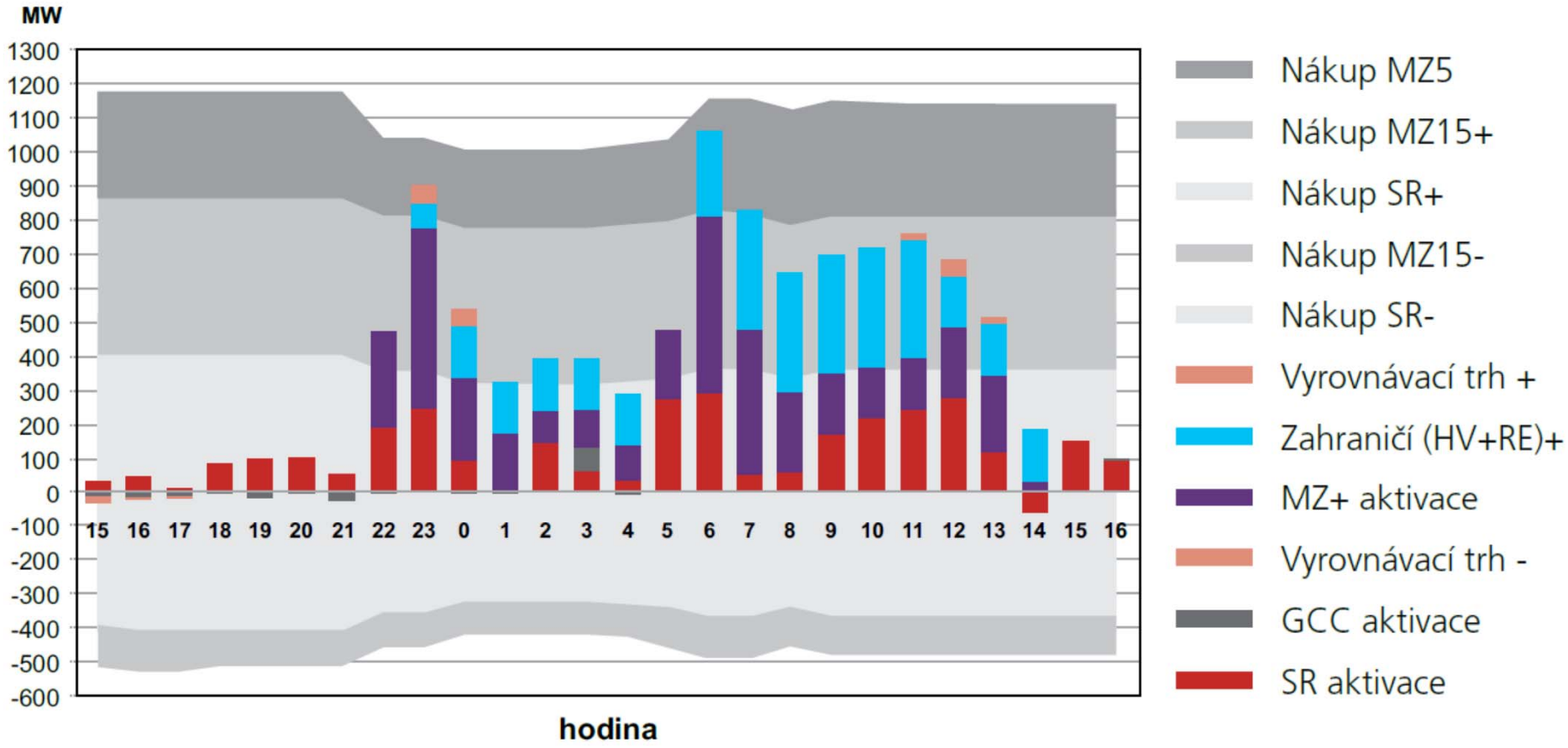
    - doporučení δ 4 – 8 %
  - opětovné připojení ostrova k soustavě
  - dostupnost služby

PpS – Schopnost startu ze tmy (BS)

- Schopnost bloku - najetí bez pomoci vnějšího zdroje napětí na jmenovité otáčky, dosáhnout jmenovitého napětí, připojení k síti a jejího napájení v ostrovním režimu
- Schopnost vybraných bloků je nezbytná pro obnovení dodávky po úplném nebo částečném rozpadu sítě. Výběr bloků provádí ČEPS v dohodě s poskytovatelem této služby

Čerpání podpůrných služeb

- **Dne 10. 9. 2015 ve 22:27 došlo k neplánovanému výpadku bloku 2 jaderné elektrárny Temelín spolu s blokem 3 elektrárny Chvaletice (v celkové výši 1280 MW). Graf znázorňuje hodinové průměry čerpání podpůrných služeb.**



[zdroj: ČEPS]

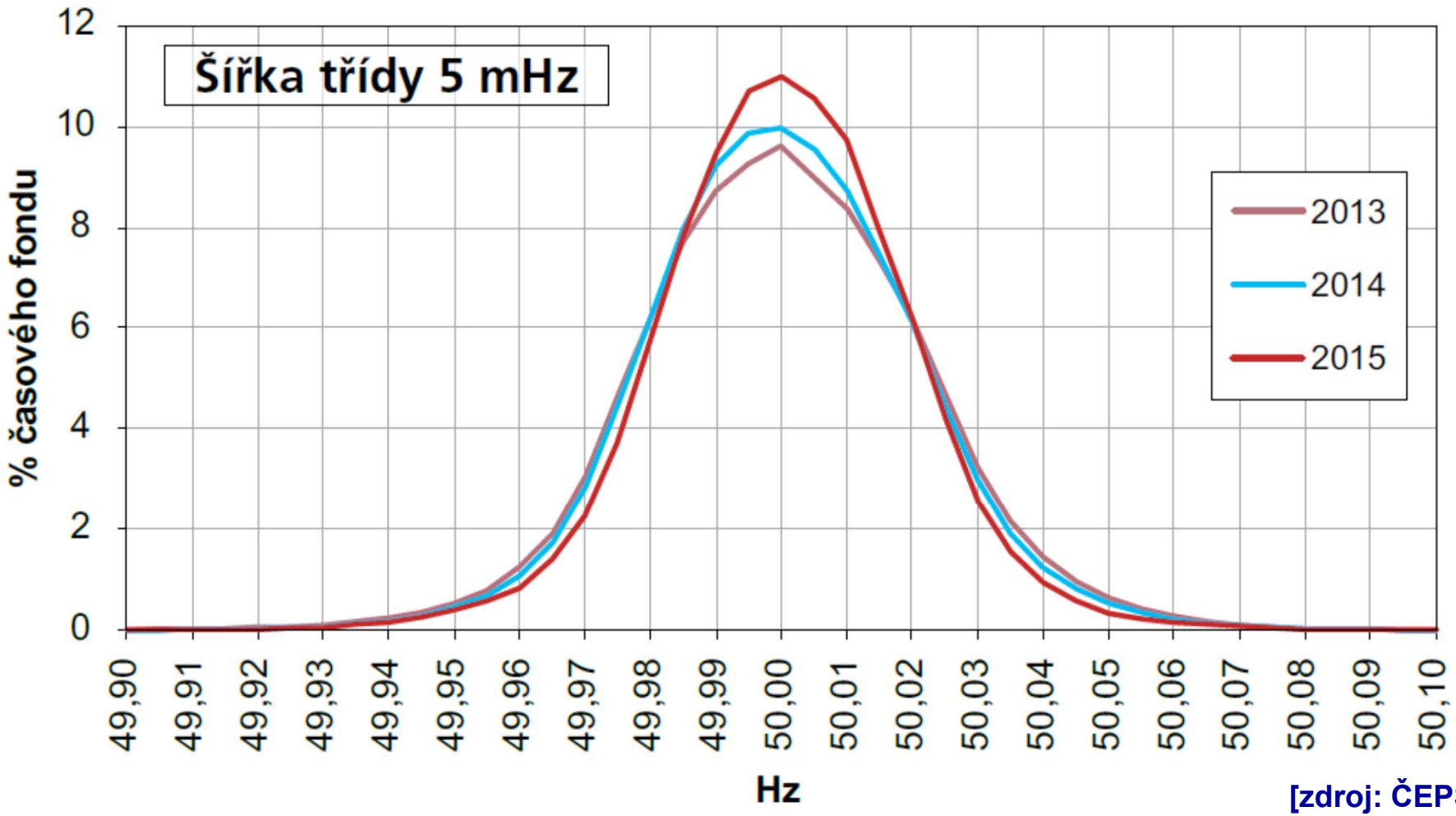
Frekvenční odlehčování

- **Omezení regulace zdrojů při poklesu f**
  - **výkon lze rychle zvýšit jen do výše točivé rezervy**
  - **omezení rychlosti zvýšení výkonu kvůli tepelnému namáhání v turbíně**
    - **cca 10 % P_n zvýšit rychle, pak cca 2 % P_n / min**
  - **rychlost nárůstu tlaku v kotli (a v turbíně) omezena procesem generování tepelného výkonu z paliva**
  - **časové konstanty v regulátorech**
- **ES ČR**
  - **4 stupně odlehčování v rozvodnách 110 kV a 22 kV**
  - **celkem 50 % zatížení**

Stupeň / frekvence [Hz]	1. /49	2. /48.7	3. /48.4	4. /48.1
Objem odlehčované zátěže [%] z netto zatížení na území, na kterém příslušný PDS zajišťuje distribuci	12	12	12	14

Frekvence v ES ČR

Odchylky kmitočtu od nominální hodnoty (50 Hz)



[zdroj: ČEPS]

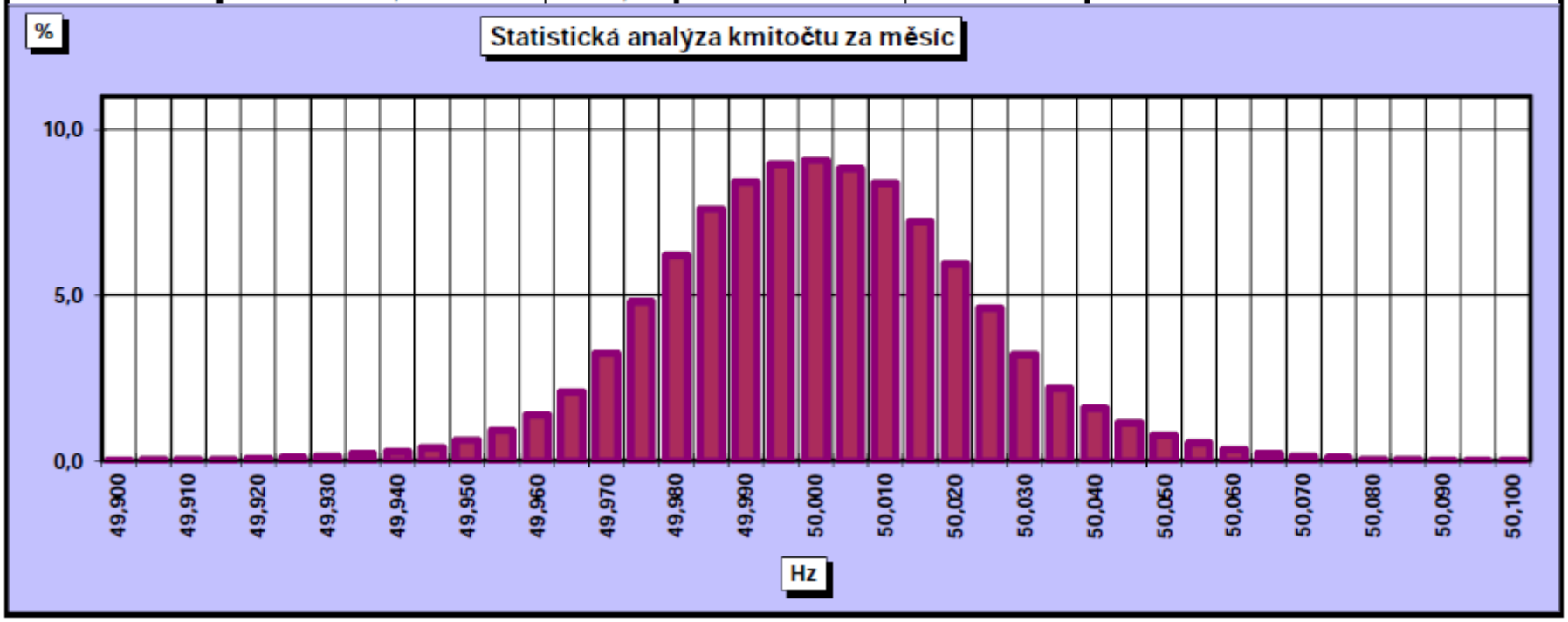
Frekvence v ES ČR

kmitočet (Hz)	% z celkové doby 2013	% z celkové doby 2012	počet hodin 2013	počet hodin 2012
vyšší	0,0	0,0	0,0	0,0
50.100 - 50.150	0,0	0,0	0,0	0,1
50.051 - 50.100	1,4	1,5	10,8	11,2
49.950 - 50.050	97,1	97,1	722,6	722,6
49.900 - 49.950	1,4	1,3	10,3	10,0
49.850 - 49.900	0,0	0,0	0,3	0,1
nižší	0,0	0,0	0,0	0,0
celkem	100,0	100,0	744	744

Statistické vyhodnocení provozu soustavy v 10 / 2013

Soustava ES ČR pracovala s průměr. měsíčním kmitočtem

f = 50,000 Hz



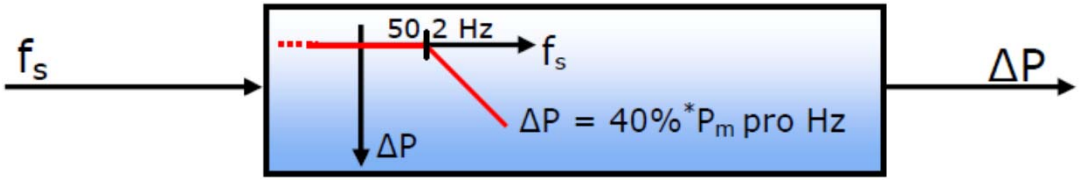
Řízení času

- Řídicí středisko v Laufenburgu (Švýcarsko) je odpovědné za výpočet synchronního času a organizací jeho opravy.
- Rozdíl synchronního času a UTC (universal coordinated time) nesmí překročit 30 s.
- Oprava spočívá v nastavení žádané frekvence pro sekundární regulaci ve všech regulačních oblastech/ blocích na 49,99 Hz nebo 50,01 Hz, v závislosti na směru na opravy, na celé dny (od 0 do 24 hodin).

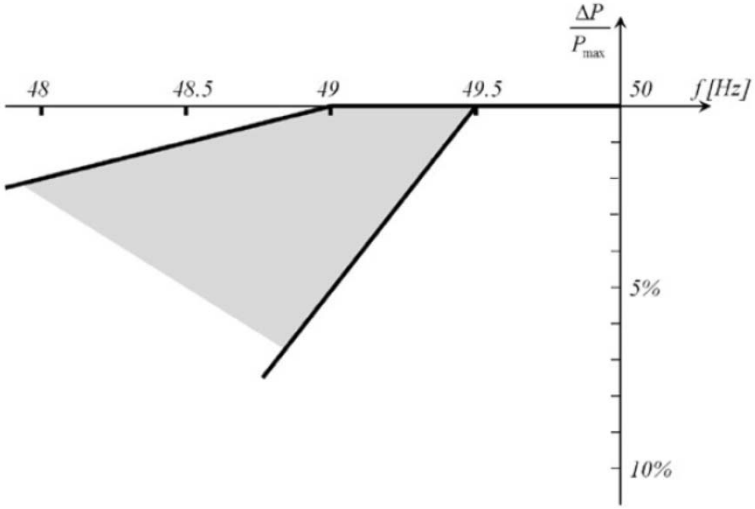
- Kvalita síťového kmitočtu je považována za vyhovující pokud:
  - je směrodatná odchylka za měsíc pro 90 % a 99 % intervalů měření menší než 40 mHz, resp. 60 mHz
  - měsíční počet dnů s nastavenou hodnotou frekvence 49,99 Hz nebo 50,01 Hz nepřesahuje osm.

Řízení P(f) zdrojů v DS

- **Všechny zdroje v DS musí umět snižovat P dle f podle stavu sítě a pokynů z dispečinku, nebo se odpojit od sítě.**
  - **f > 50,2 Hz snižovat P 40% Pn/Hz**
  - **47,5 < f < 50,2 Hz bez omezení**
  - **f <= 47,5 Hz a f >=51,5 Hz odpojit od sítě**



- **Dovolené snížení P z max. hodnoty se snižující se f stanoví PPS.**



Regulace napětí a jalových výkonů

- **V elektrizační soustavě platí silná závislost mezi jalovým výkonem a napětím.**

$$\Delta\hat{U}_f = \hat{Z}\hat{I} = \frac{RP \pm XQ}{3U_f} + j\frac{XP \mp RQ}{3U_f} \quad \begin{matrix} IND \\ KAP \end{matrix}$$

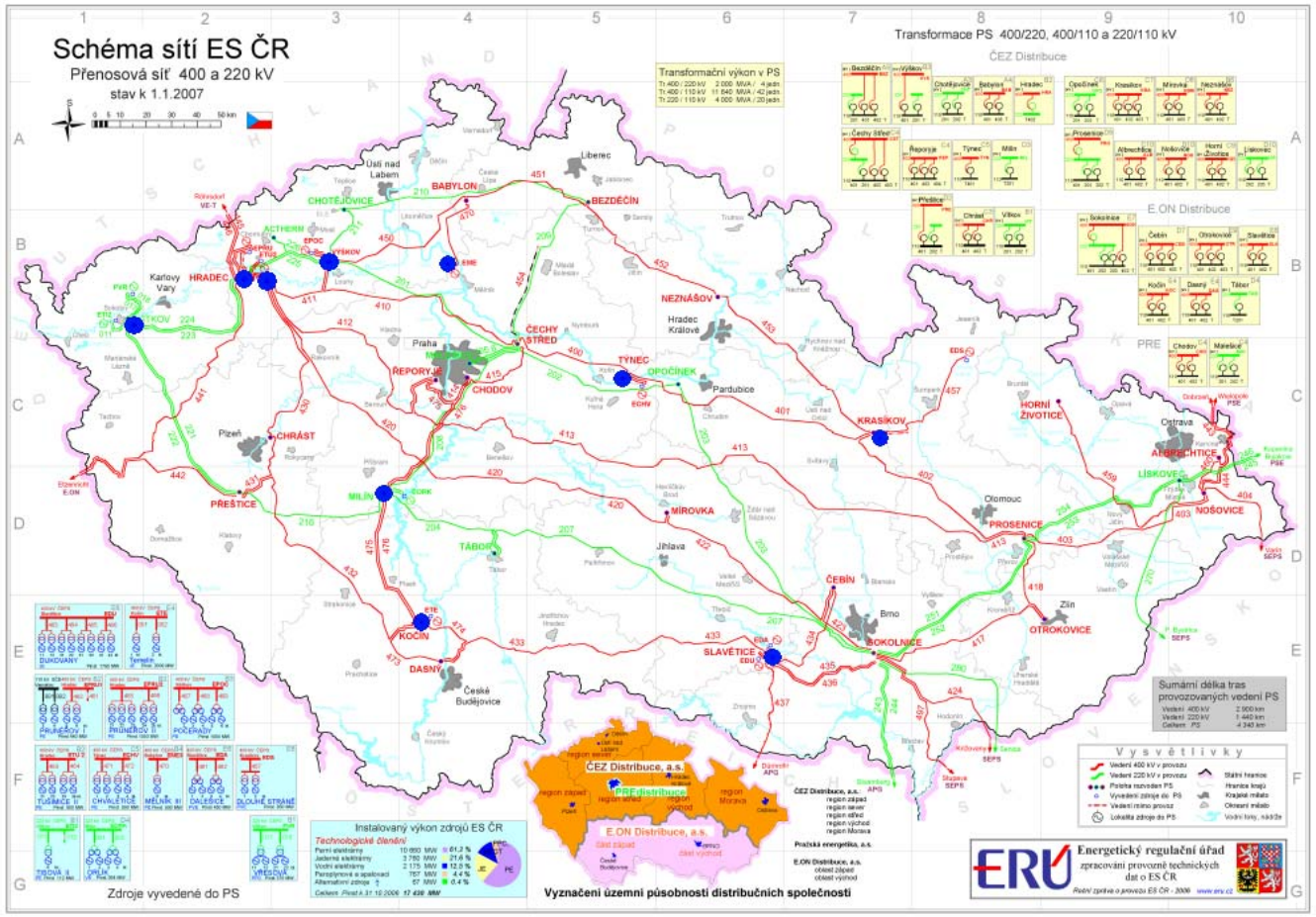
- **Hlavními cíli regulace U a Q jsou**
  - **Snížení technických ztrát v provozované distribuční soustavě a dalších nákladů provozního a investičního charakteru.**
    - **nižší napětí – vyšší proud**
    - **vyšší napětí – izolační systémy**
  - **Zajištění kvality dodávky elektřiny odběratelům (stabilita napětí).**
- **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.**
  - **Stručně řečeno, změnou dodávky jalového výkonu do uzlu soustavy se dosáhne změny napětí v tomto uzlu a uzlech elektricky blízkých.**

Regulace napětí a jalových výkonů

- 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 1 kV v daném uzlu.
- Velikost KQ se liší
  - s ohledem na napěťovou hladinu
  - pro různé uzly stejné napěťové hladiny
  - podle různé skladby zatížení v jednotlivých uzlech
    - Skladbou zatížení se rozumí poměrné části zatížení ohmického, induktivního a kapacitního charakteru.
- Napětí v uzlech PS se má pohybovat uvnitř povoleného rozsahu :
  - 400 kV ± 5 % , 220 kV ± 10 % a 110 kV ± 10 %

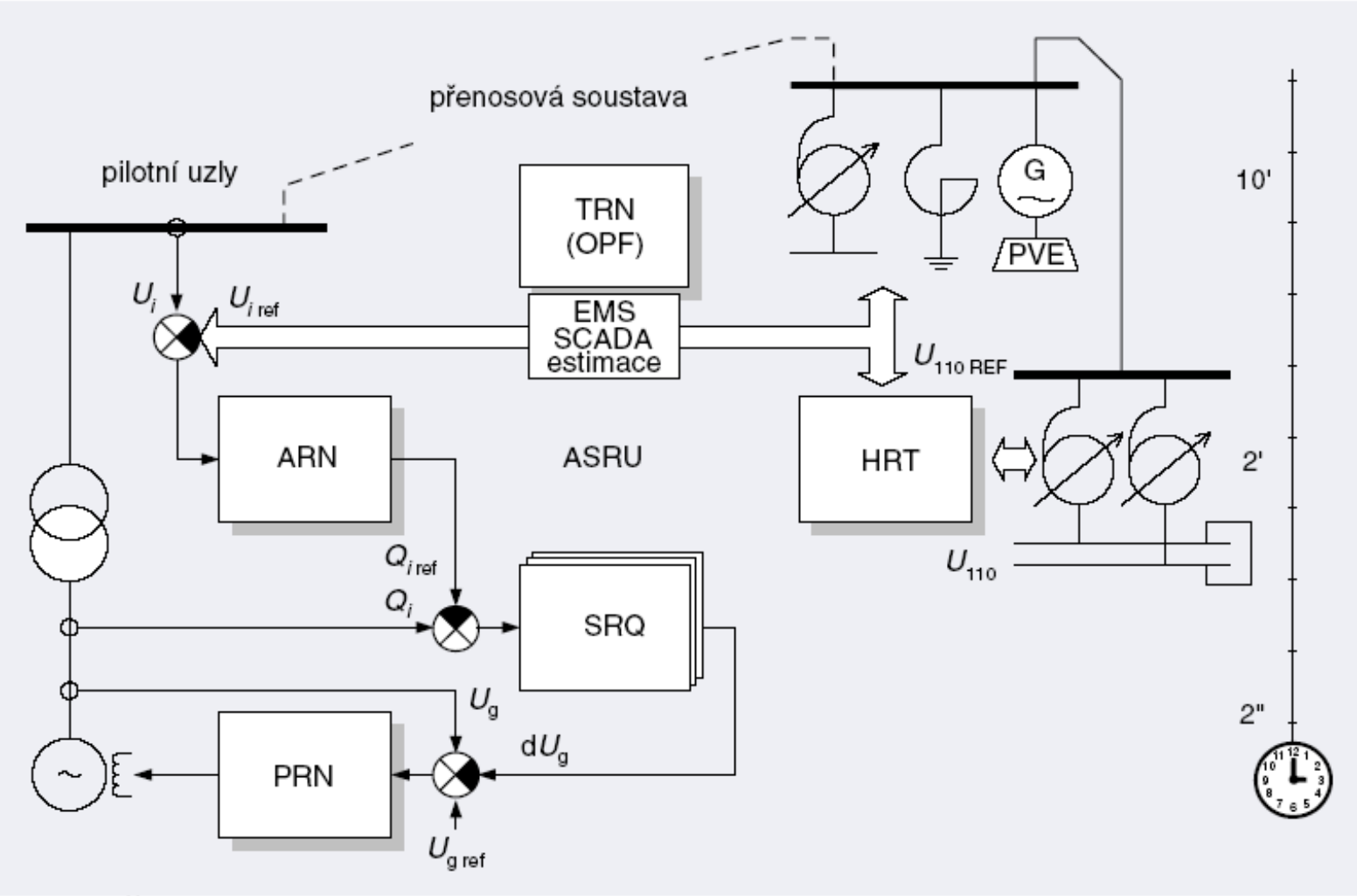
Regulace napětí a jalových výkonů

- **Pilotní uzly v ČR**
  - **8 x 400 kV, 2 x 220 kV**
  - **citlivost cca 40 MVAr/kV na 400 kV, 25-30 MVAr/kV na 220 kV**

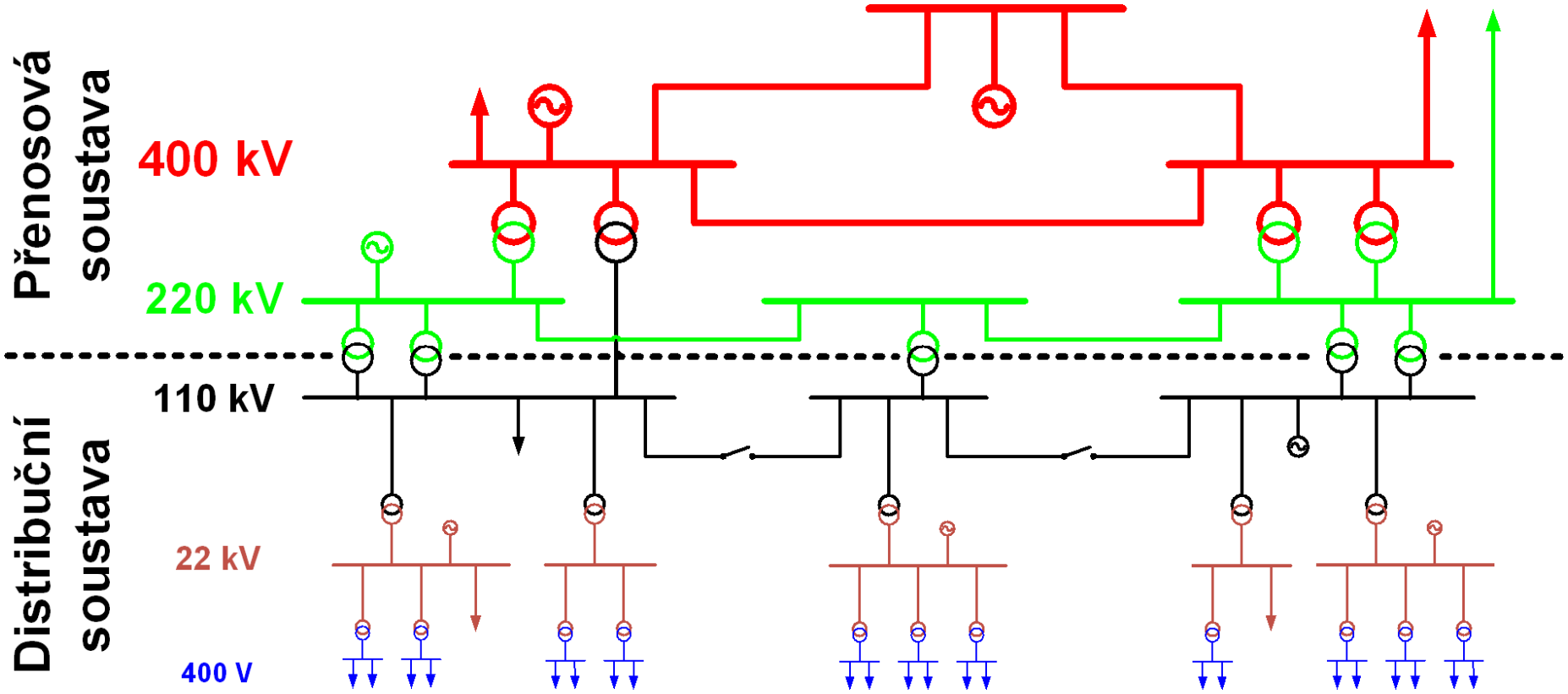


Regulace napětí v PS

- **Způsoby regulace – Q generátorů, tlumivky, přepínače odboček TRF pod zatížením PS/110 kV**

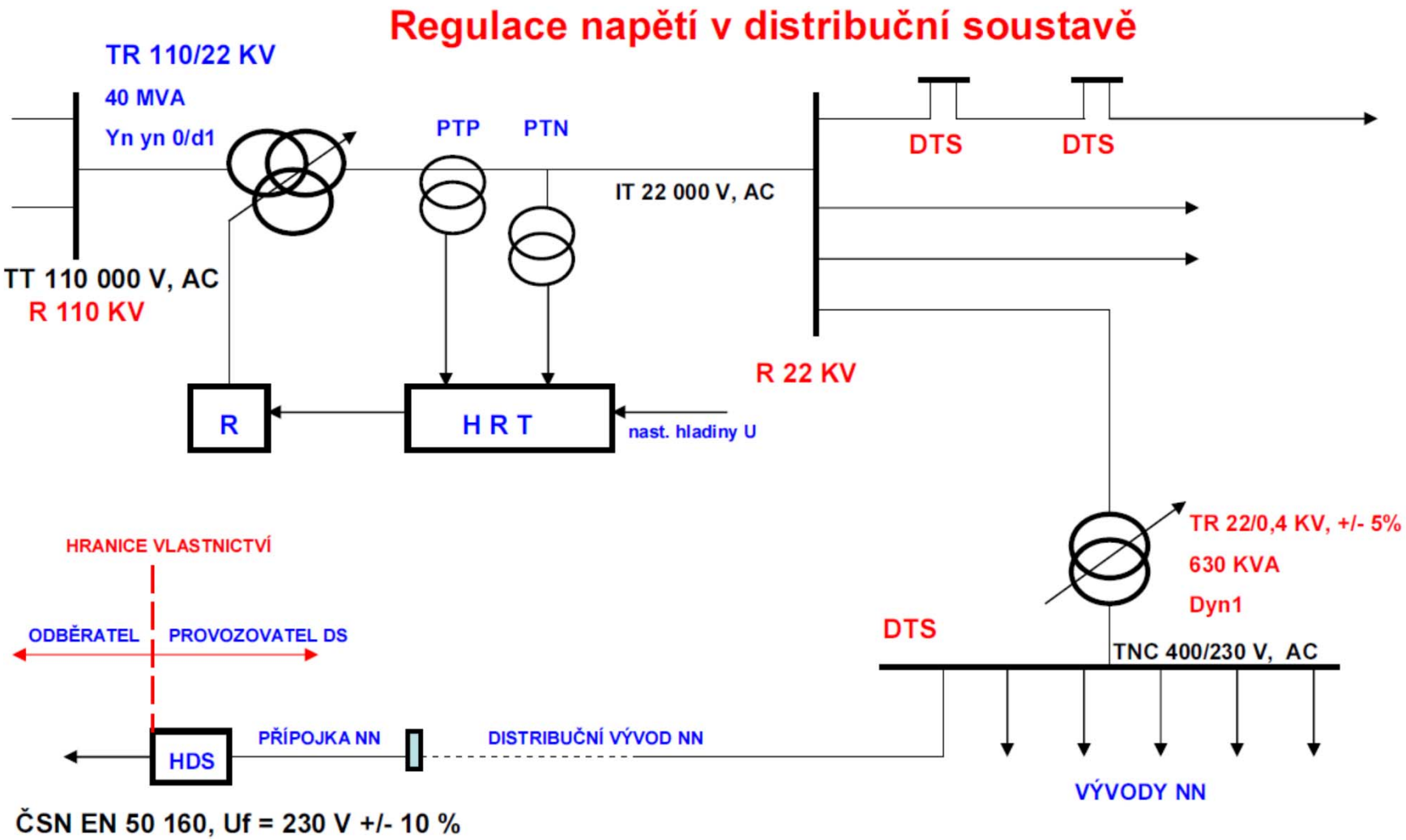


Elektrizační soustava



Regulace napětí v DS

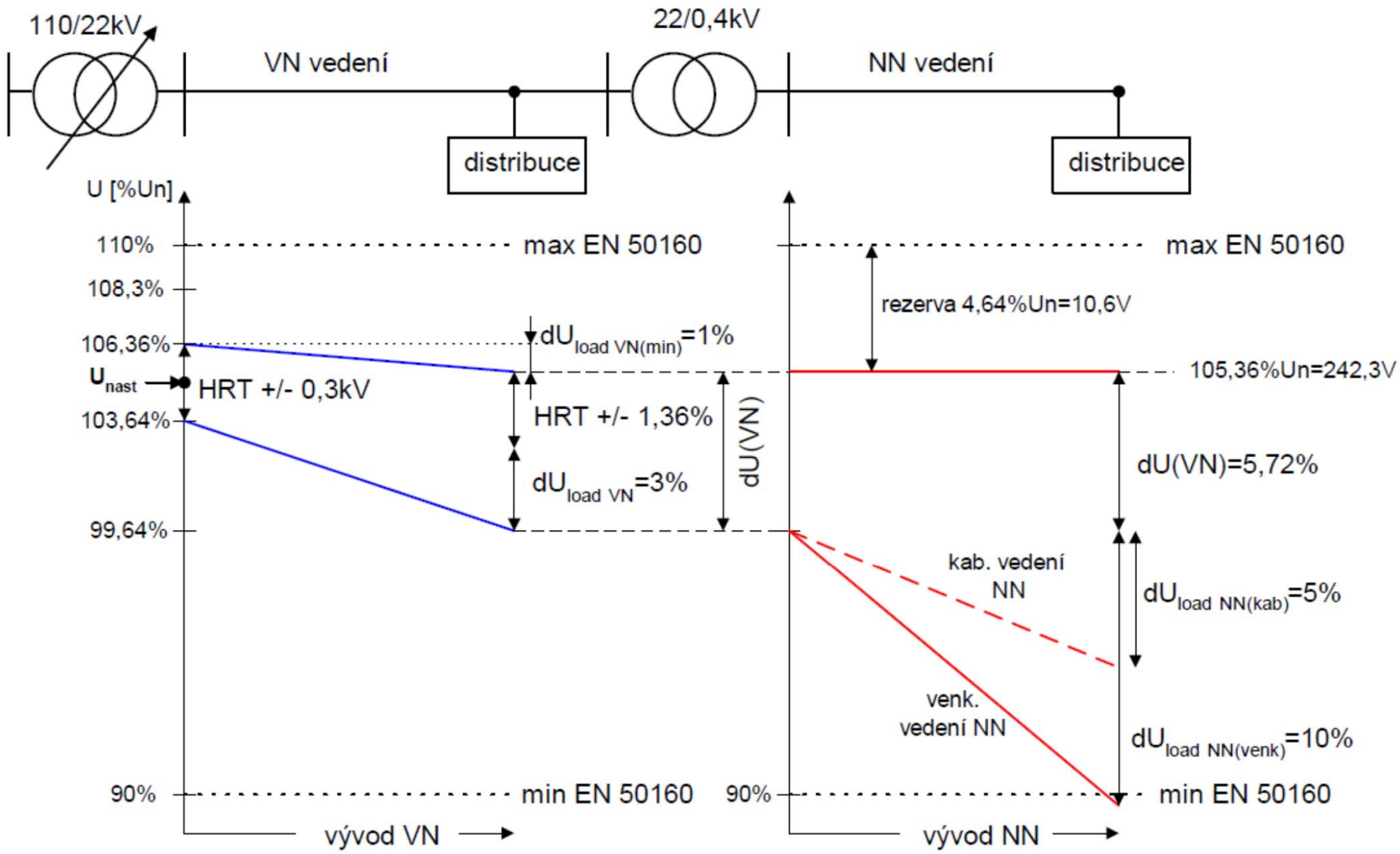
- **Způsoby regulace – Q generátorů, přepínače odboček TRF (pod zatížením 110/vn; bez zatížení vn/nn)**



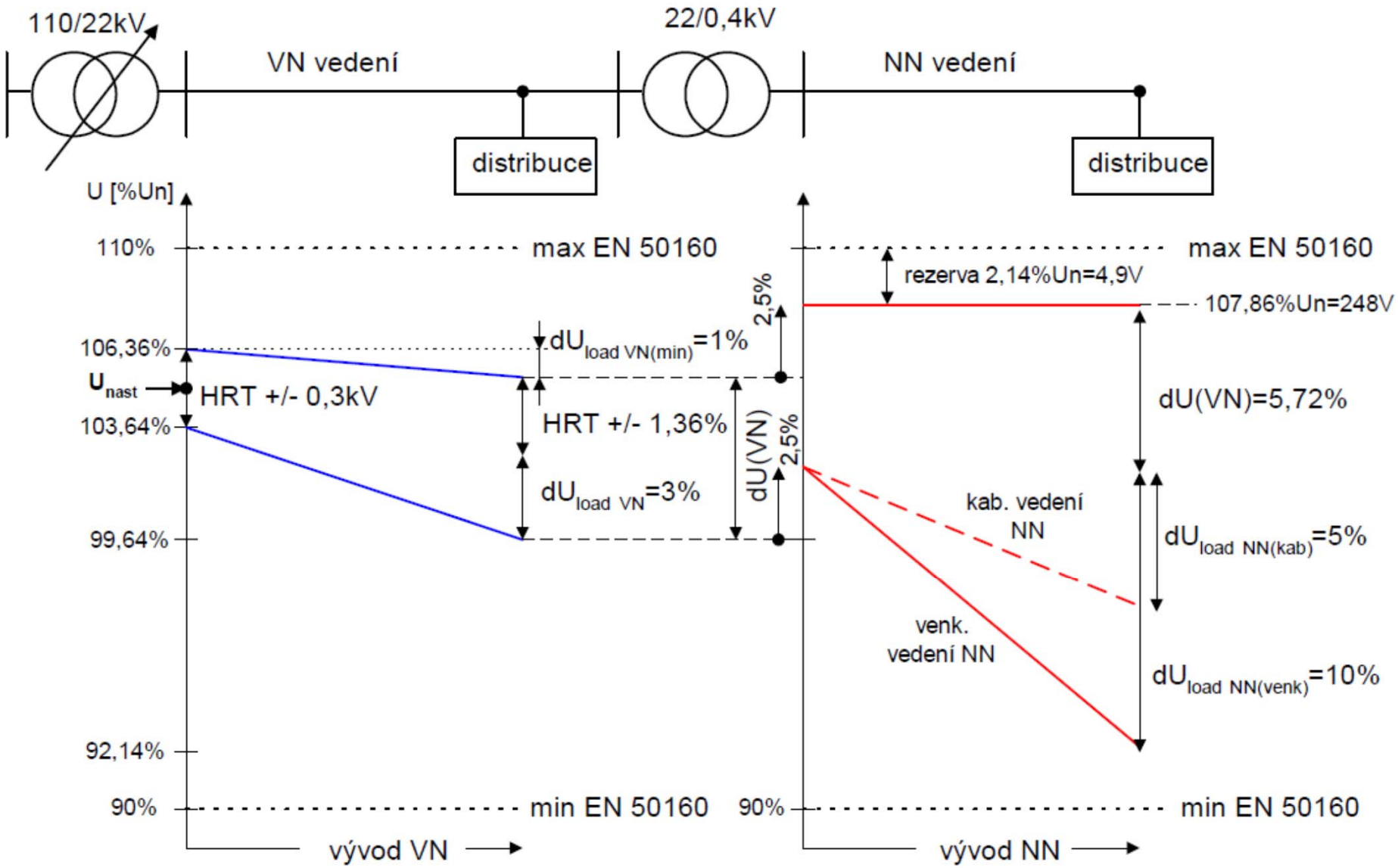
Odbočky transformátorů

- PS/110 kV, PS/PS – při zatížení
  - např. 400/121±8x1,5%/10,5 kV, YNad1, 350 MVA
  - 230/121±6x2%/10,5 kV, YNa0d1, 200 MVA
  - 231/1,73±11x1,45%/121/1,73/10,5 kV, INai0i, 66,6 MVA
  - 400/1,73/231±6x1,48%/1,73/34 kV, INai0i, 166,6 MVA
- 110 kV/vn – při zatížení
  - 110±8x2%/23/6,3 kV, YNyn0/d1, 40 MVA
  - někdy 110±8x1,5%
- vn/nn – bez zatížení
  - 22±2x2,5%/0,4 kV, Dyn1, 630 kVA
  - x nově OLTC (on-load tap changer), např. 400 V: +3x2%, -5x2%

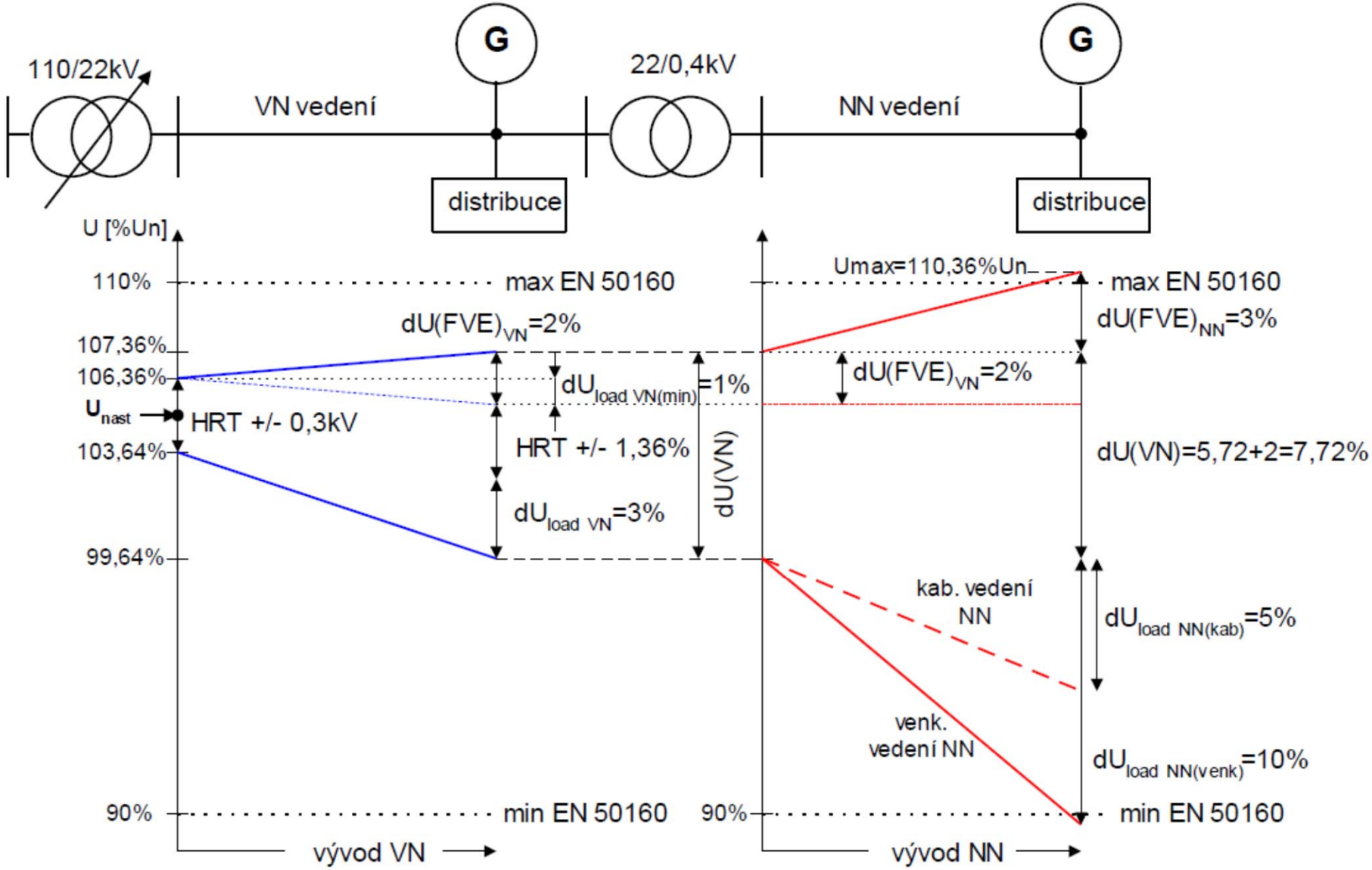
Regulace napětí v DS



Regulace napětí v DS

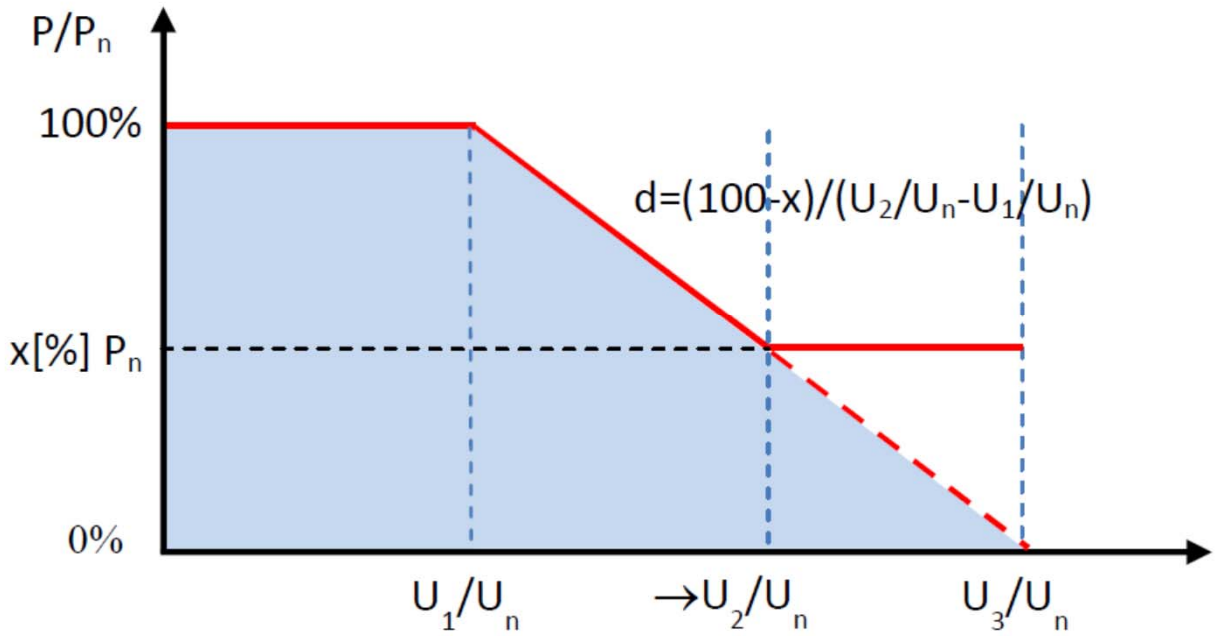


Regulace napětí v DS s RZE, OZE



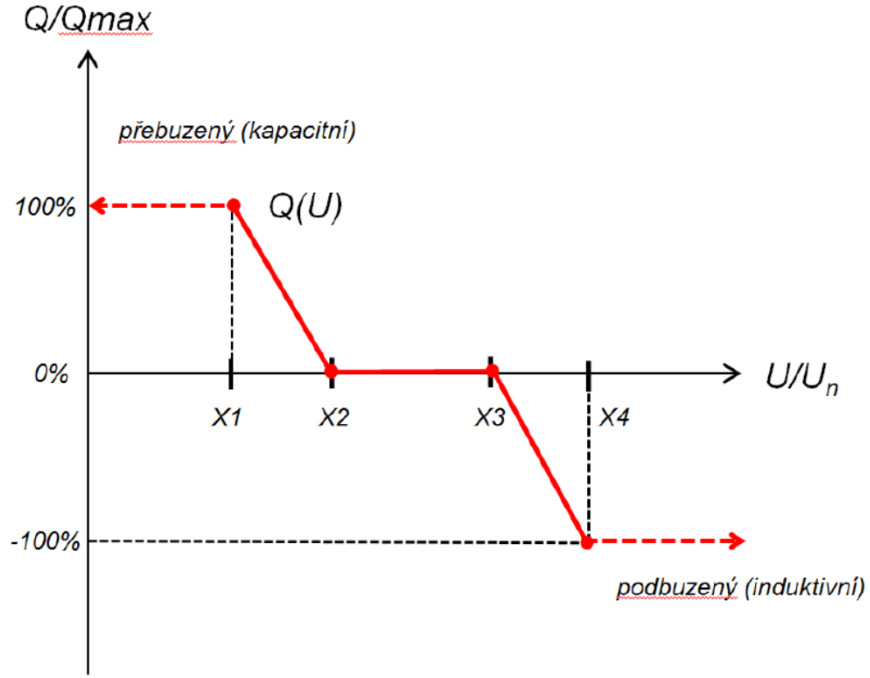
Řízení P(U) zdrojů v DS

- **Všechny zdroje v DS se střídačem do 16 A/fázi + všechny zdroje nad 16 A/fázi na nn.**
  - **Konkrétní hodnoty funkce P(U) stanoví PDS nebo studie připojitelnosti.**
  - **Snaha zabránit odpojení výroben nadpěťovými ochranami.**



Řízení Q(U) zdrojů v DS

- **Tvar křivky určí PDS nebo studie připojitelnosti**



- **Zdroje v sítích nn, vn, 110 kV**
  - za normálních ustálených provozních podmínek při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí musí být mezi 0,90 kapacitní a 0,90 induktivní za předpokladu, že výkon je nad 10 % jmenovitého výkonu zdroje
  - pokud je výkon na výstupu zdroje nižší než 10 % jmenovitého výkonu, nesmí jalový výkon tekoucí ze/do zdroje překročit 10 % jeho jmenovitého výkonu