

# Propojené elektrizační soustavy

Ivan Petružela



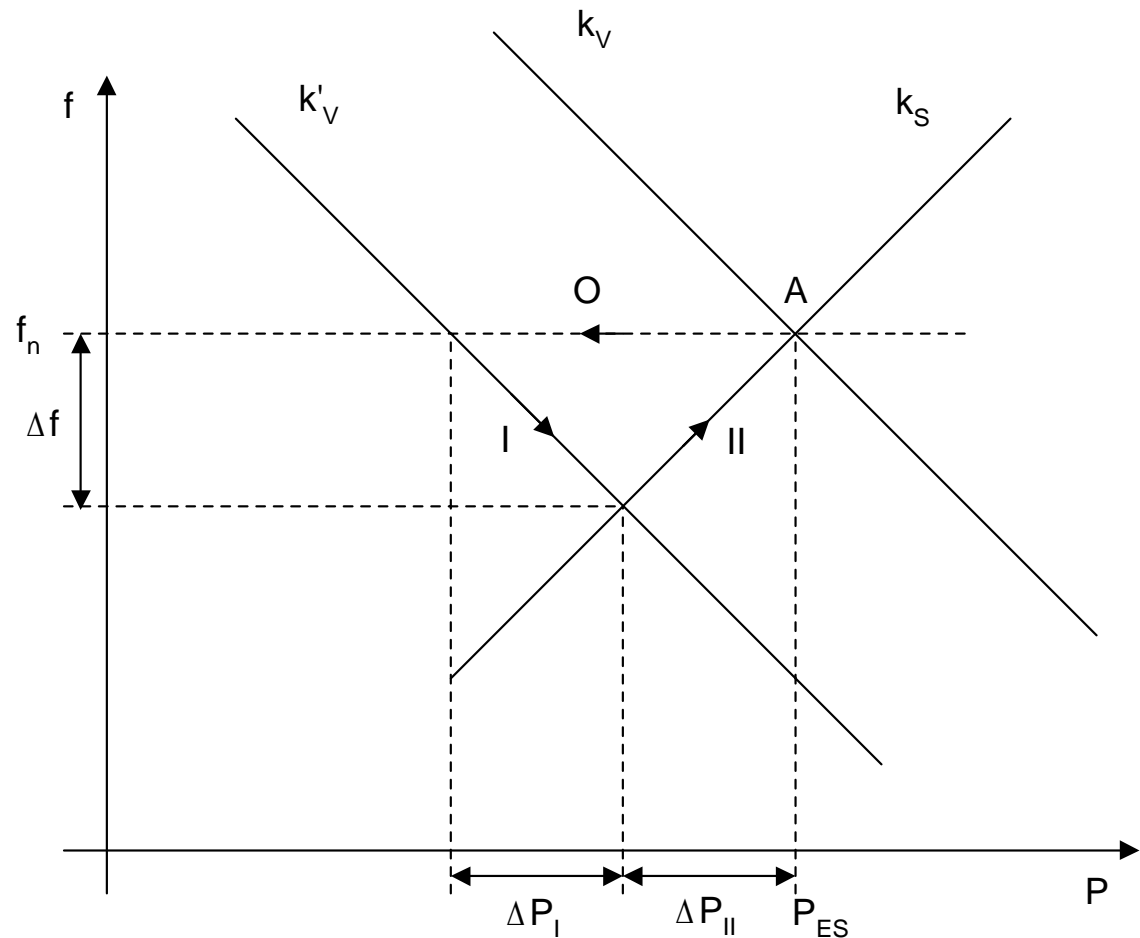
## Osnova

- **Opakování**
  - **zajištění stability pomocí regulace otáček (frekvence)**
- **Propojené soustavy**
  - **princip solidarity**
  - **princip neintervence**
  - **plán obrany proti šíření poruch**
  - **výpočty nutné pro spolehlivý chod ES**
- **Dispečerské řízení**
  - **ACE (Area control error)**
  - **centrální regulátor**
  - **sekundární regulace f a P**
- **Připojení ES ČR k UCPTE**
  - **technické podmínky propojení se soustavou UCPTE**
  - **provoz v ES do roku 1991**
  - **připojení k UCPTE v říjnu 1995**
- **Zadání analytické úlohy**
  - **vznik paralelního provozu dvou generátorů a zátěže**



## Zajištění stability pomocí regulace otáček (frekvence)

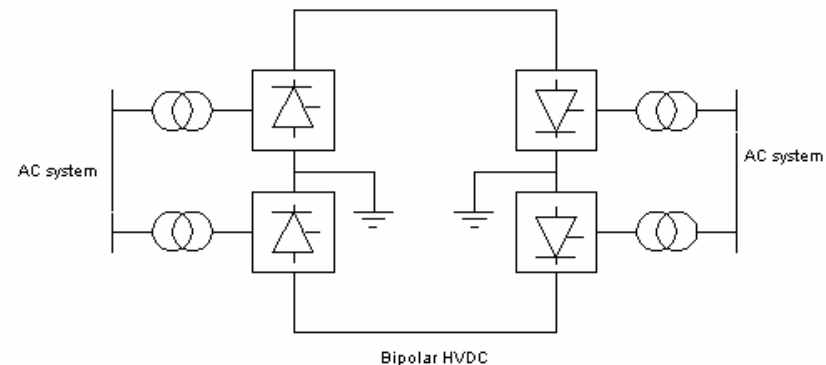
- A - pracovní bod ( $f_n$ , P ES)
- O - výpadek výroby
- I - nový pracovní bod při snížené frekvenci
- II - návrat na nominální hodnoty





## Propojené soustavy

- **Sousední přenosová soustava**
  - přenosová soustava, která má s danou přenosovou soustavou přímé synchronní elektrické propojení. Pro přenosovou soustavu ČR tvoří sousední soustavy sítě společností VE-T a E.ON (Německo), APG (Rakousko), SEPS a. s. (Slovensko) a PSE (Polsko).
- **Stejnoseměrná spojka**
  - je zařízení sestávající 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.





## Propojené soustavy

- Jedná se o systém dvou nebo více elektrizačních soustav synchronně propojených pomocí mezisystémových propojení. Typickými příklady jsou propojené soustavy UCTE (dříve UCPTÉ - západní Evropa), CENTREL (střední Evropa), NORDEL (severní Evropa). Hlavními výhodami provozu v propojených soustavách jsou:
  - **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 ke 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**

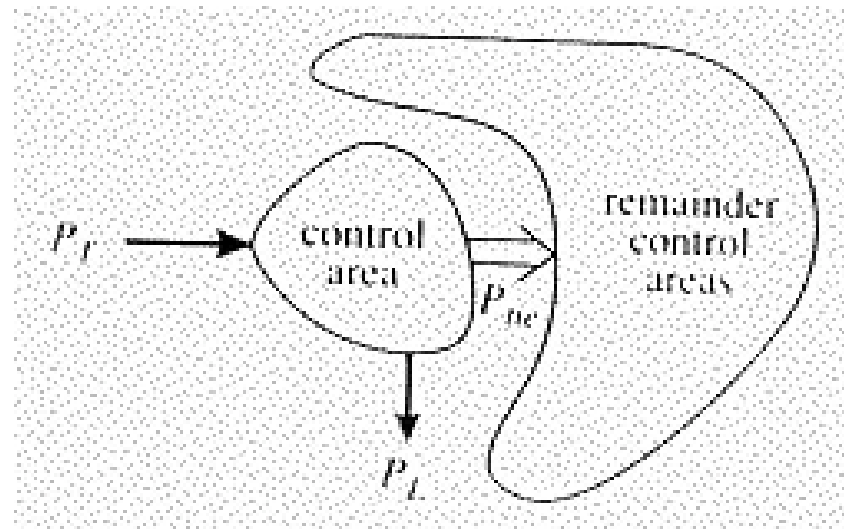


## Propojené soustavy

- **Princip solidarity v propojených soustavách znamená, že:**
  - na pokrývání výkonové rovnováhy se v prvních okamžicích (až několik 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 vyrovnává 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



## Propojené soustavy





## Plán obrany proti šíření poruch

- Souhrn technicko-organizačních opatření zajišťujících bezpečnost provozu přenosové soustavy. Plán obsahuje opatření proti:
  - poklesu a vzrůstu frekvence (frekvenční kolaps)
  - poklesu a vzrůstu napětí (napěťový kolaps)
  - kývání (mezisystémové kyvy)
  - ztrátě synchronismu (dynamická a statická stabilita)
  - přetížení (překročení přenosové kapacity)
- V případě vzniku přetížení vedení je dispečink provozovatele PS oprávněn podle stupně přetížení využít následující opatření:
  - dát pokyn ke snížení výkonu elektráren v přebytkové části soustavy při současném najetí rychle startujících bloků v nedostatkové části
  - přerušit práce na přenosových vedeních s cílem zapnout tato vedení
  - v případě možnosti zvýšit napětí v soustavě
  - využít možnosti vypínacího plánu pro odlehčení zatížení
- Plán obrany tvoří součást tzv. havarijního plánu, který je držitel autorizace povinen vypracovat a předložit Ministerstvu průmyslu a obchodu podle energetické legislativy.





## Výpočty nutné pro spolehlivý chod ES

- Způsob a rozsah výměny údajů pro plánování provozu a rozvoje přenosové soustavy. Kromě dat vyměňovaných mezi provozovatelem a uživatelem PS v reálném čase v rámci dispečerského řízení je nutné, aby provozovatel PS měl k dispozici nezbytná data pro provádění analytických výpočtů. Účelem těchto výpočtů je prověřování splnění kritéria N-1 jako základního prostředku pro zajištění bezpečnosti provozu. Mezi základní typy výpočtů patří:
  - sestavení výpočtového modelu ES
  - výpočty chodu sítě
  - výpočty zkratových proudů
  - výpočty stability
- Pravidla ve formě formulářů pro jednotlivé typy uživatelů jsou součástí Kodexu PS.
- Přenosová schopnost
  - analytickými výpočty stanovený činný výkon, který může být přenesen přes přenosový profil, aniž by byla narušena bezpečnost provozu při dodržení kritéria N-1. Přenosová schopnost je dána maximálním přenášeným výkonem zmenšeným o zálohy pro přenos regulační výpomoci na základě principu solidarity o spolehlivostní zálohu. Maximální přenášený výkon je omezen nejmenší hodnotou z:
    - dovolené tepelné meze vedení
    - jmenovitých hodnot přístrojového vybavení vedení
    - maximální hodnoty fyzikálně přenositelného výkonu přes vedení
- Zálohy se určí na základě výpočtu chodu sítě a stability.



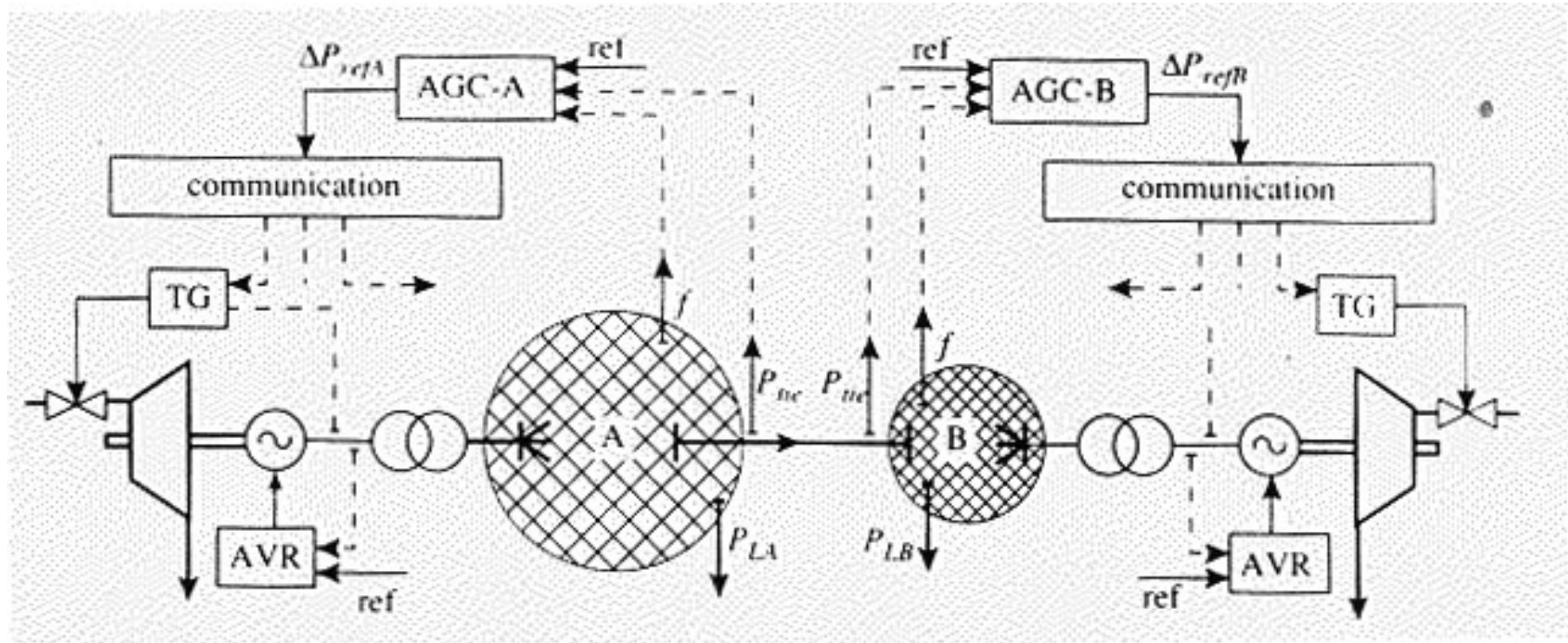
## Dispečerské řízení

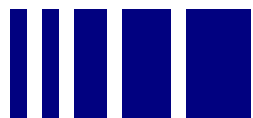
- V ES tímto pojmem rozumíme řízení, jehož cílem je zajištění rovnováhy mezi zdroji a potřebou elektřiny při dodržení předepsané bezpečnosti, spolehlivosti a kvality dodávky.
  - Součástí dispečerského řízení je ekonomická optimalizace.
  - Jednou z hlavních úloh dispečerského řízení bývá i předcházení havarijním stavům a jejich řešení pokud k nim dojde.
  - Další důležitou úlohou dispečerského řízení je hodnocení provozu z hlediska spolehlivosti a bezpečnosti, analýza vzniklých havarijních a pohavarijních stavů, způsobů jejich likvidace a návrh opatření k minimalizaci počtu i rozsahu těchto stavů.
- Z hlediska času zahrnuje dispečerské řízení širokou oblast, od dlouhodobé přípravy až po operativní řízení provozu, přičemž hlavním úkolem je právě operativní řízení.
  - Velmi často je pojem dispečerské řízení považován přímo za synonymum pojmu "operativní řízení", což obecně není zcela přesné, neboť operativní řízení je obvykle jen částí dispečerského řízení.
  - Mezi hlavní úkoly dispečerského řízení patří mimo jiné řízení toků výkonů v síti, zajišťování dostatečné velikosti a optimální struktury záložních výkonů apod.
  - Dispečerské řízení se uskutečňuje na několika hierarchických úrovních od úrovně celostátní až po dispečerské řízení jednotlivých distribučních soustav.



## Dispečerské řízení

- **Soustava (nebo soustavy) ohraničená mezisystémovými 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.**





## ACE - Area control error

Regulační odchylka sekundárního regulátoru frekvence a předávaných výkonů. Regulační odchylka se spočítá ze vztahu:

$$ACE = \Delta P + K \cdot \Delta f, \text{ kde}$$

$\Delta P$  ... odchylka předávaného výkonu soustavy od žádané hodnoty [MW]

$\Delta f = f - f_0$  ... odchylka skutečné frekvence  $f$  od požadované hodnoty  $f_0$  [Hz]

$K$  ... konstanta regulátoru [MW/Hz] “frequency bias”

Podmínkou správné činnosti sekundární regulace  $f$  a  $P$  je, aby konstanta odpovídala výkonovému číslu soustavy  $\lambda$ . Toto číslo je při zanedbání samoregulačního efektu zatížení dáno sumou výkonových čísel jednotlivých bloků v primární regulaci:

$$\lambda = \sum \frac{100 \cdot P_n}{\delta \cdot f_n}, \text{ kde}$$

$P_n$  ... jmenovitý výkon bloku [MW]

$\delta$  ... statika primární regulace [%]

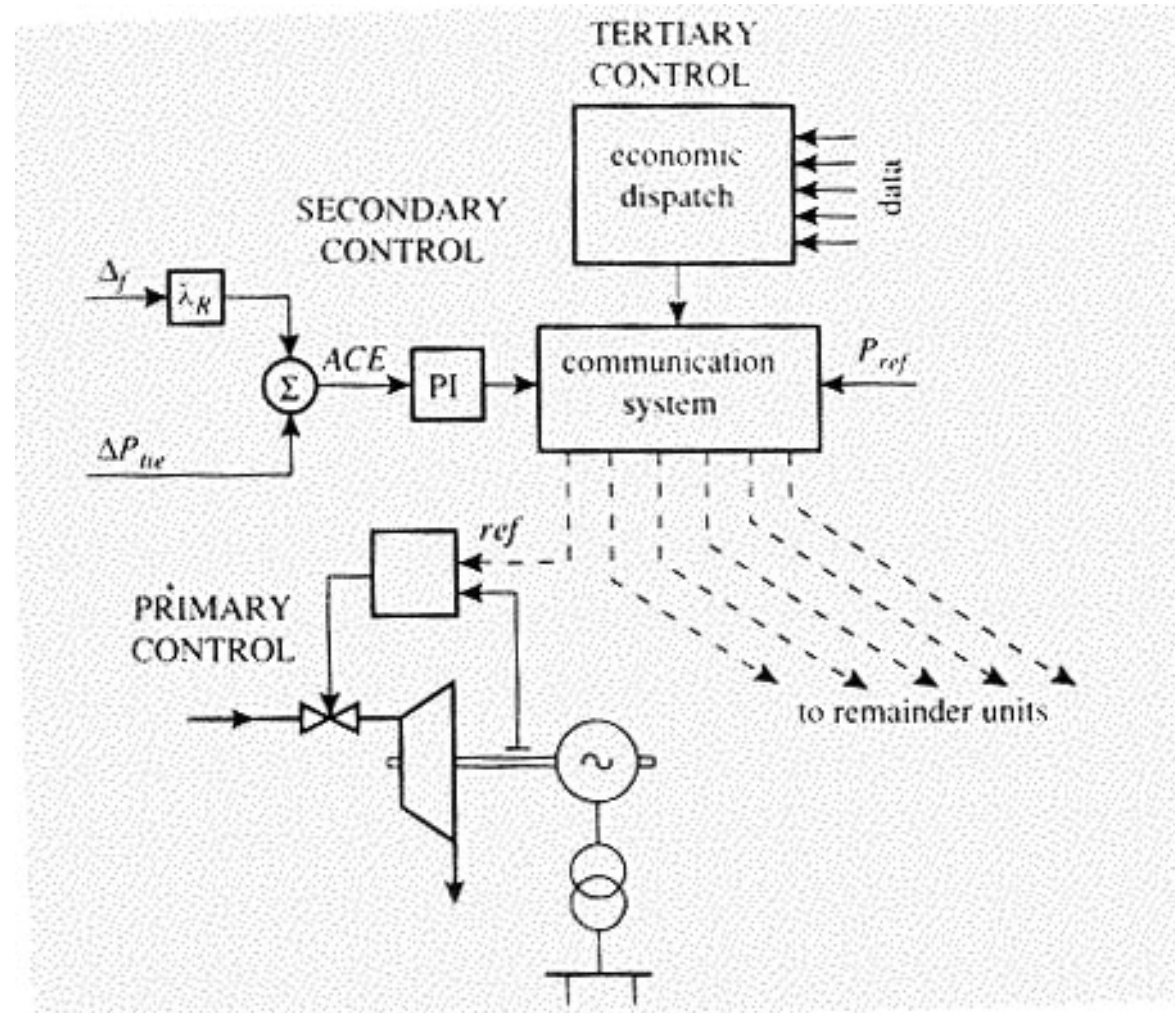
$f_n$  ... jmenovitá frekvence 50 Hz

Podle pravidel UCPTÉ se konstanta  $K$  nastavuje na hodnotu  $1,1 \lambda$ .



## Dispečerské řízení

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

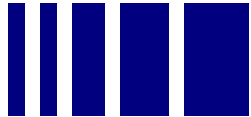




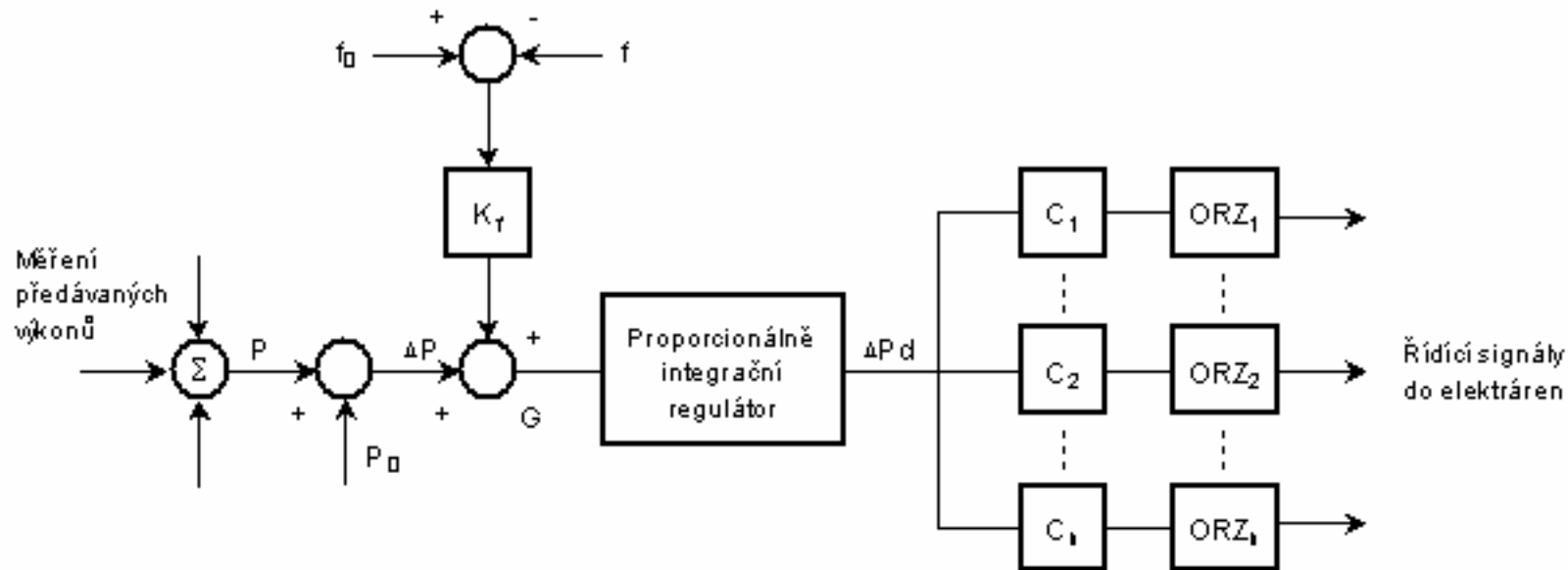


## Sekundární regulace f a P

- Sekundární regulace f a P je na úrovni příslušné soustavy zajišťována automaticky sekundárním regulátorem frekvence a předávaných výkonů.
  - regulátor je umístěn na dispečinku provozovatele PS a jeho terminály v regulovaných elektrárnách a v hraničních rozvodnách. Samotný regulátor pracuje podle metody síťových charakteristik.
- Metoda síťových charakteristik
  - 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 vysláním 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.



## Centrální regulátor



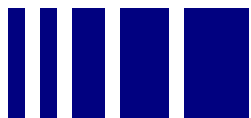
P	Celkový předávaný výkon
$P_0$	Žádaná (plánovaná) hodnota předávaného výkonu
f	Skutečná frekvence
$f_0$	Žádaná hodnota frekvence (50 Hz)
$\Delta P$	Odchylka předávaného výkonu od žádané hodnoty
$K_f$	Výkonové číslo regulátoru
G	Celková regulační odchylka (ACE)
$\Delta P_d$	Řídicí signál
$C_1, C_2, C_n$	Participační (rozdělovací) koeficienty
ORZ <sub>n</sub>	Omezovače rychlosti zatížení



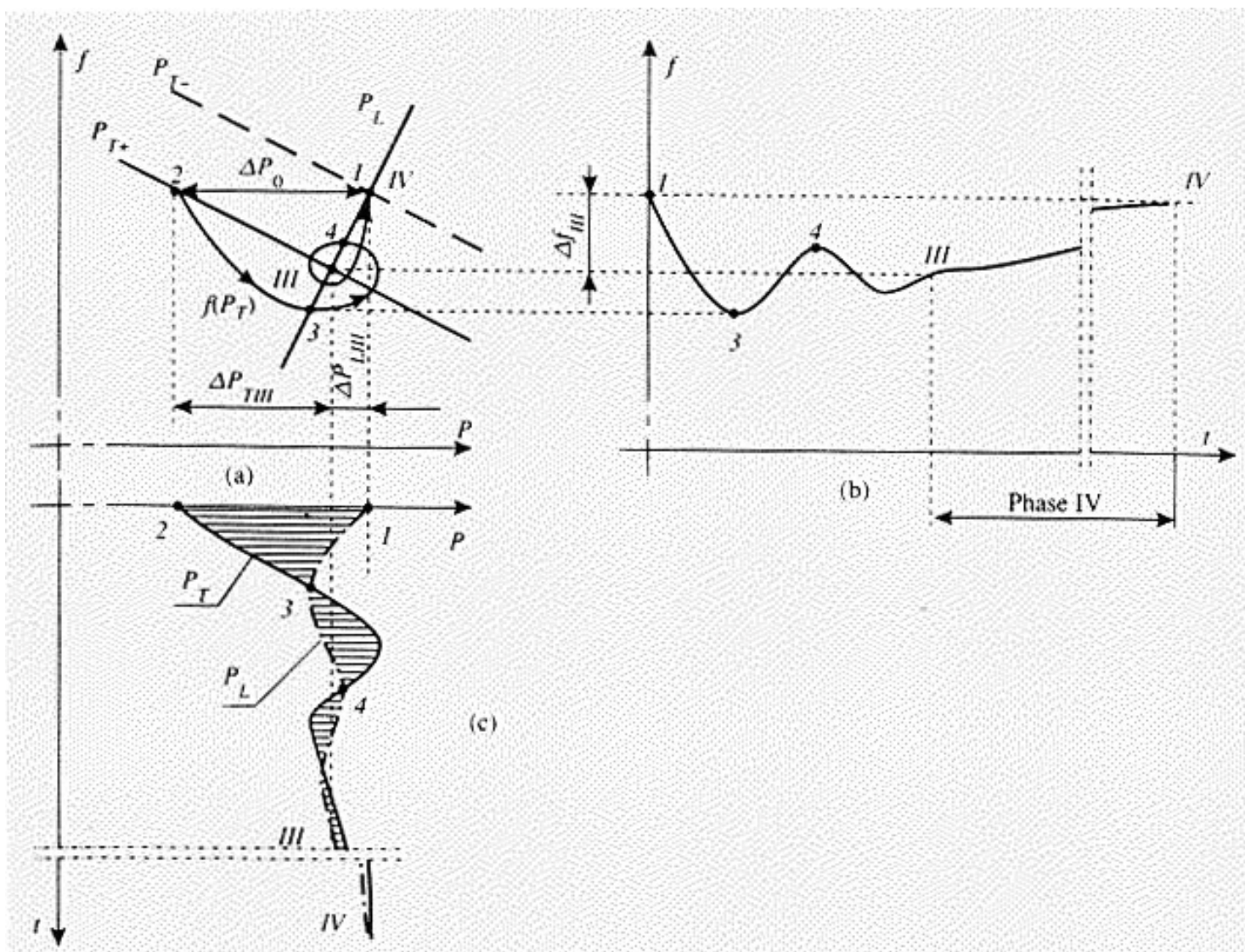
## Sekundární regulace f a P

- 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
- Dálkově řízený blok
  - elektrárenský blok, jehož činný výkon je řízen z dispečinku provozovatele PS. Elektrárenský blok, který je zapojen do sekundární, případně terciární regulace f a P a pracuje v režimu automatického dálkového řízení. Výkon takového bloku je pak určován systémovými požadavky.



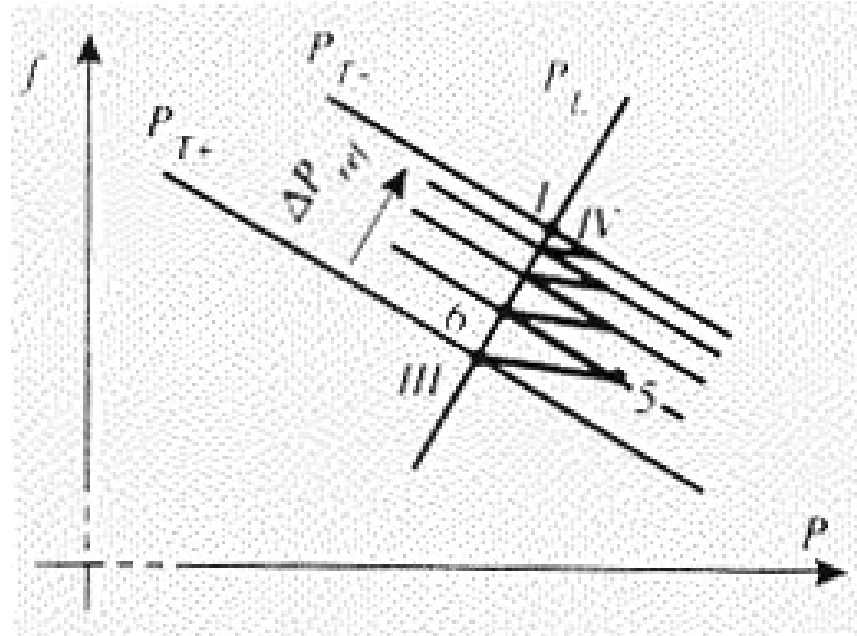


## Sekundární regulace f a P





## Sekundární regulace f a P





## Připojení ES ČR k UCPTÉ

- **Elektrizační soustava České republiky byla dříve synchronně propojena se státy východní Evropy. Propojení se státy západní Evropy bylo realizováno pomocí tzv. krátkých stejnosměrných spojek na vedeních 400 kV.**
- **Objem vzájemně přenášené elektrické energie mezi státy střední a západní Evropy neustále roste a naopak velikost přenášených výkonů mezi Polskem, Českou republikou, Slovenskem a Maďarskem na jedné straně a státy východní Evropy na straně druhé se podstatně zmenšila. Kromě kvality elektrické energie je tato skutečnost jedním z hlavních důvodů, které vedly státy střední Evropy ke společnému úsilí včlenit své ES synchronním propojením do UCPTÉ (Union for the Co-ordination of Production and Transmission of Electricity) – dnes UCTE.**



## Technické podmínky propojení se soustavou UCPTÉ

- Lze je rozdělit do oblastí:
  - bilance elektrických výkonů a elektrické práce. Vyrovnaná bilance výkonů včetně rezervních výkonů a vyrovnaná bilance elektrické energie pro každý okamžik v dlouhodobém časovém intervalu jsou nezbytné pro úspěšné synchronní propojení ES.
  - přenosová schopnost vedení 400 kV a 220 kV
    - Meziúzemní propojení se uskutečňuje vedeními této napěťové úrovně. Jejich dostatečná kapacita odpovídající plánovaným přenosům výkonů i neplánovaným přenosům a dynamickým změnám při poruchách a při různých provozních režimech ES je nezbytnou podmínkou synchronního propojení. S dostatečnou přenosovou schopností těsně souvisí i problematika spolehlivých a účinných ochran a různých síťových automatik a odlehčovacích relé (v přenosové soustavě vvn, v distribučních soustavách a u velkých spotřebitelů).
  - přenos informací, metodika a technika dispečerského řízení soustavy, sjednocení výkaznictví a statistických ukazatelů, metodika bilancování, legislativa atd.
  - prevence šíření poruch
  - řízení činných výkonů zdrojů
  - řízení výroby a přenosu jalových výkonů, řízení napětí



## Provoz v ES do roku 1991

- **Propojení ES ČR s Jednotným Energetickým Systémem (JES) bývalého SSSR bylo realizováno trasami 750 kV z Ukrajiny a z Moldávie.**
- **Zatížení Lvovského profilu bylo automaticky hlídáno proti překročení limitu 3200 MW do 10 min a 3500 MW do 1,5 s. Časté rozpojování této linky bylo jedním z problémů spolupráce s JES. Např. při dodávce z Ukrajiny ve výši 3200 MW a současném výpadku většího bloku v naší soustavě docházelo k rozpojení a k následným havarijním situacím, výkonovým deficitům, hlubokým poklesům frekvence a frekvenčnímu odlehčování.**
- **Tyto rozpady vznikaly více jak 30-krát za rok a k frekvenčnímu odlehčování docházelo až v 25 případech na dobu 30 min. 1. stupeň frekvenčního odlehčování vypínal v Čechách 264 MW, na Moravě 159 MW a na Slovensku 187 MW.**
- **Velkým problémem systému PES - CDO bylo také velké kolísání frekvence způsobené netypickými provozními pravidly. Výkonová nesouměrnost soustav střední Evropy a SSSR znemožňovala primární regulace a frekvence byla určována soustavou JES. Docházelo tak trvale k překračování limitních hranic. Tento způsob regulace frekvence je v západních soustavách nemyslitelný, neboť způsobuje značné technologické problémy na straně odběratelů. U citlivých zařízení dochází vlivem kolísání frekvence k drastickému zkrácení životnosti.**



## Provoz v ES do roku 1991

- Na základě iniciativy ČSFR se 23. 5. 1992 uskutečnila konference generálních ředitelů energetických společností Rakouska, Německa, Jugoslávie a Řecka, na níž byla projednána možnost propojení států střední Evropy s UCPTE. Byl připraven katalog opatření a podmínek, které bylo nutno splnit pro připojení.
- Základní listina samostatného energetického seskupení států střední Evropy CENTREL byla podepsána v Praze 11. října 1992 nejvyššími představiteli členských zemí. (Česká republika, Slovensko, Polsko, Maďarsko). Nejvyšším řídicím orgánem CENTREL je Rada CENTREL. Cílem vzniku tohoto systému bylo:
  - podporovat spolupráci a rozvíjet propojení ES účastnických zemí
  - zlepšit provozní podmínky elektroenergetických systémů na úroveň standardu UCPTE a uvést je do souladu s technickými, ekonomickými a organizačními doporučeními UCPTE
  - připravit propojení do synchronního provozu CENTREL s UCPTE
  - sledovat kvalitu a spolehlivost dodávky elektrické energie



# Systémové testy

Test excitation - switching off the exchange/generator/pumping power, resp.					Initial system states						Power system control behaviour									
					Σ countries		VEAG				VEAG				Σ countries					
1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12		13	14	15	16	17	18	19
Test run No.:	Date	Time	Location		Loss of generation	Nominal power	Load	Nominal power	Load	Power reserve primary control	Power reserve secondary control	Exchange power		Frequency		Power-frequency charact.	System droop	Power-frequency charact.	System droop	
i		t [h:m:s]			$\Delta P_Z$ [MW]	$P_N$ count. [GW]	$P_L$ count. [GW]	$P_N(t<0)$ [GW]	$P_L(t<0)$ [GW]	$\Delta P_{pr} \pm$ [MW]	$\Delta P_{sec} \pm$ [MW]	$P_E(t<0)$ [MW]	$\Delta P_{E, st}$ [MW]	$\Delta f_{st}$ [mHz]	$\Delta f_{max}$ [mHz]	$K_{VEAG}$ [MW/Hz]	$\%VEAG$ [%]	$K_{Icount.}$ [MW/Hz]	$\%Icount.$ [%]	
1	29.9.93	08:30:03	750kV line (H)		-378	47,3	41,7	12,7	11,0	366	+275/-235	128	-107,7	41	70	2627	9,53	9220	10,26	
2	"	11:30:01	Dunamenti (H)		257	46,8	41,5	12,9	11,0	366	+230/-380	138	50,3	-22	-47	2286	11,25	11682	8,02	
3	"	12:30:26	Zernowiec (PL)		-390	46,5	40,8	12,7	10,6	366	+315/-195	94	-120,8	39	65	3123	8,13	10000	9,31	
4	"	14:30:03	Markersbach (D)		-397	46,7	38,8	13,2	10,1	366	+236/-374	162	286,9	30	60	3670	7,21	13233	7,06	
5	"	15:30:03	Cerny Veg (SQ)		406	45,4	38,7	12,3	9,9	366	+155/-155	153	99,4	-44	-63	2259	10,89	9227	9,83	
6	"	16:30:03	Melnik (CR)		390	45,3	39,1	12,2	9,7	366	+155/-155	183	128,3	-43	-67	2984	8,19	9070	9,99	
7	30.9.93	08:30:05	Kosenice (PL)		373	46,3	41,5	12,8	10,8	366	+277/-233	178	67,6	-45	-66	1502	17,06	8289	11,16	
8	"	09:30:03	Boxberg (D)		478	46,4	41,1	13,0	10,7	366	+350/-260	188	-371,0	-47	-82	2277	11,44	10170	9,13	
9	"	10:30:03	Cerny Veg (SQ)		-394	46,4	41,1	12,7	10,7	366	+275/-235	144	-121,2	42	66	2886	8,77	9381	9,89	
10	"	06:40:30	Reuter Block D(D)		273	44,2	38,3	12,3	9,9	366	+205/-205	108	-71,6	-28	-50	3621	6,79	9750	9,07	

$P_N$  = Sum of the Nominal power of the operating units

$P_L$  = Load

$P_E$  = Exchange power

$\Delta P_E(t)$  = Exchange power deviation } from the stationary initial state  
 $\Delta f(t)$  = frequency deviation }

$\Delta P_{E, st}$  = Exchange power deviation } in the range of 20 - 30s ("steady state")  
 $\Delta f_{st}$  = frequency deviation }

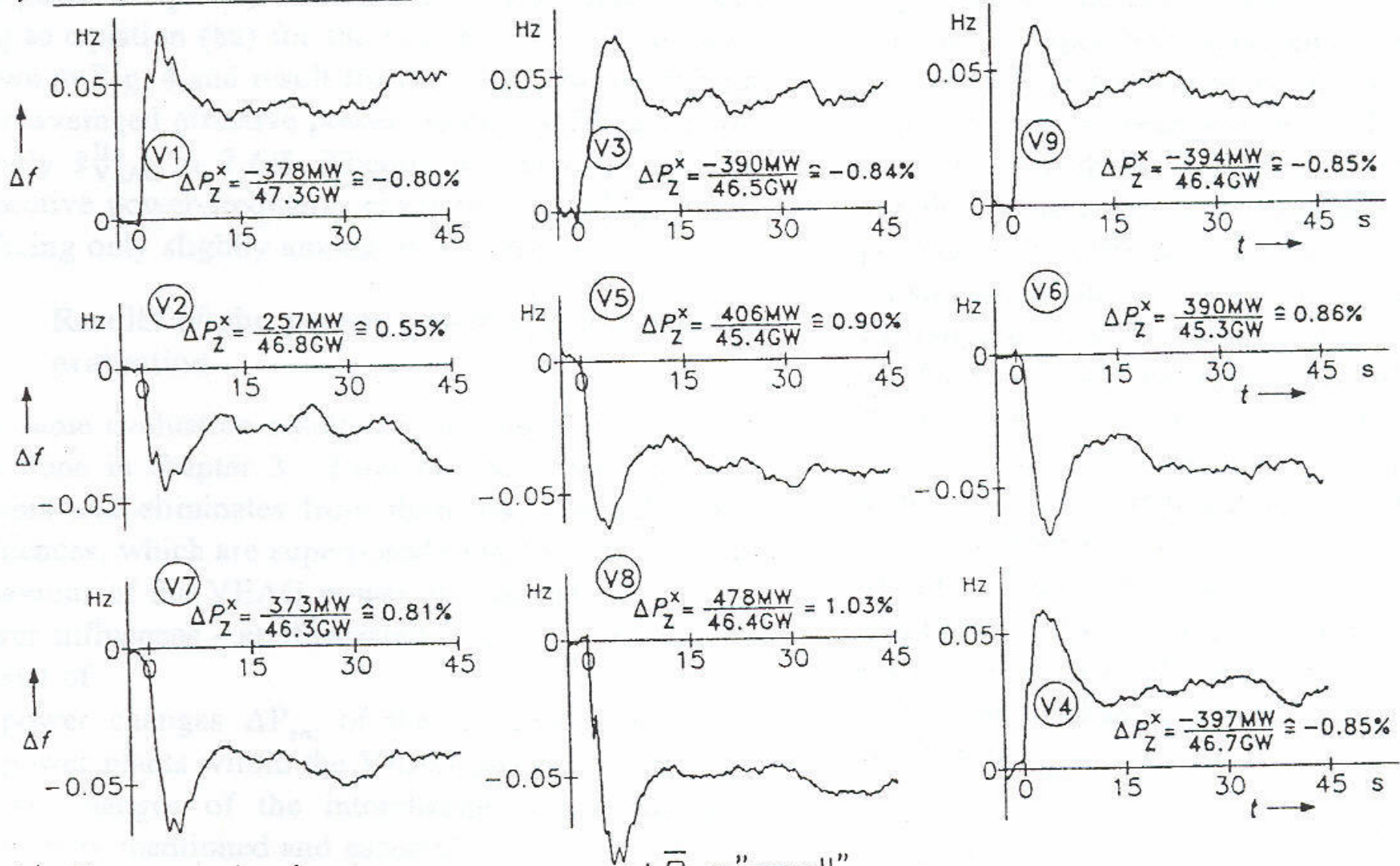
$\Delta f_{max}$  = maximum frequency deviation

Fig. 3 Evaluation results of the experimental power system tests



# Systemové testy

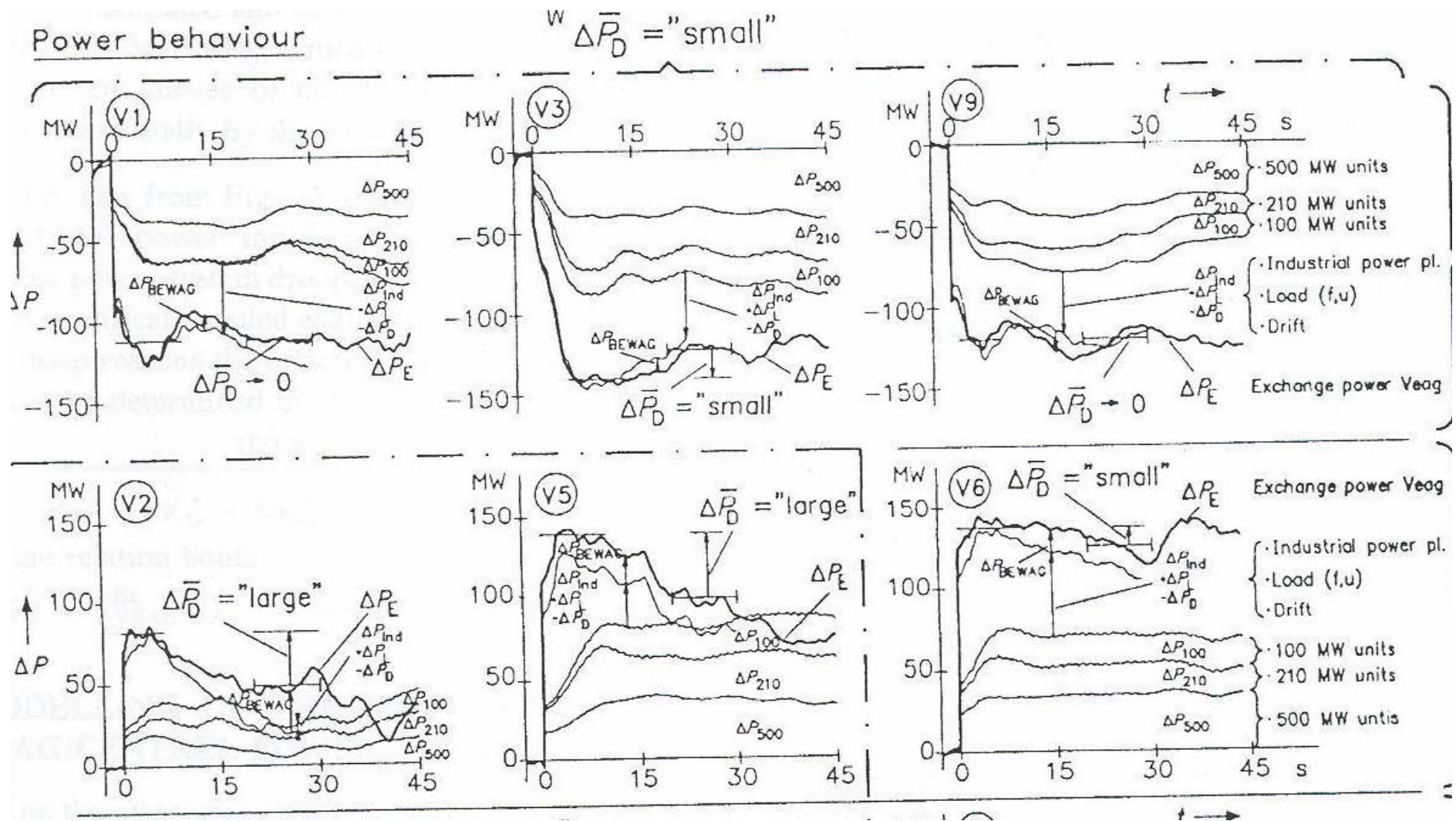
## a) Frequency behaviour (e.g. Hagenwerder)







# Systemové testy





## Připojení k UCPTÉ v říjnu 1995

- Na společném jednání Výkonného výboru v srpnu 1995 ve Vídni předložila CENTREL zprávu o splnění podmínek a připravenosti k provedení zkušebního testu. Test zahájený 15. září spočíval v absolvování modelových výpadků zátěže v situaci „ostrovního provozu“, tj. v nejtěžších podmínkách provozu při odpojení soustav VEAG a části ukrajinské soustavy Lvovenergo. V ES ČR byl proveden výpadek 500 MW v elektrárně Mělník III. Díky dokonalé funkci primární regulace i v tomto náročném režimu došlo k poklesu frekvence jen o 80 mHz.
- Po úspěšném testu bylo na zasedání valné hromady UCPTÉ 28. září v Curychu rozhodnuto o synchronním propojení CENTREL k UCPTÉ.
- K vlastnímu propojení došlo 18. října 1995 ve 12:30 h zapnutím prvního propojovacího vedení 400 kV z ES ČR - V445 Hradec - Röhrsdorf.



## Zadání analytické úlohy

- Vznik paralelního provozu dvou generátorů a zátěže
- Vliv regulací na stabilitu provozu

