Model izolované elektrizační soustavy

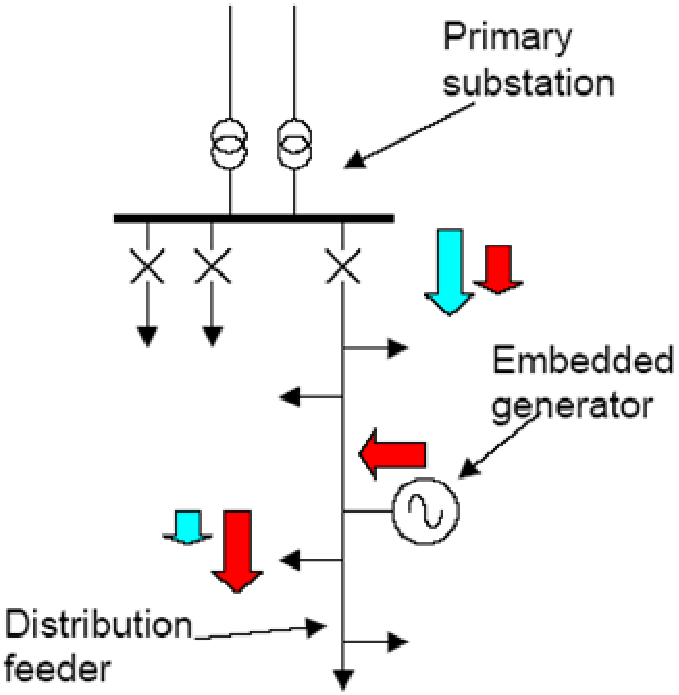
Ivan Petružela

Osnova

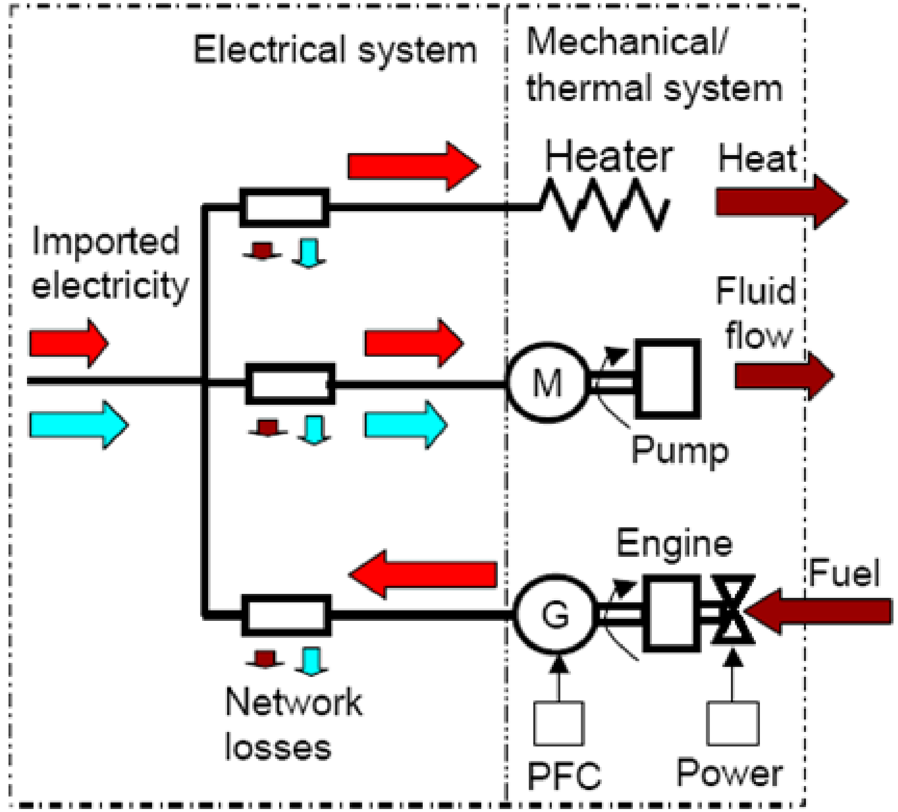
- Provoz TG v elektrizační soustavě
- Model regulace TG
- Model turbogenerátoru
- Model turbogenerátoru připojeného do ES

Provoz TG v elektrizační soustavě

Stav 1 ustálený stav



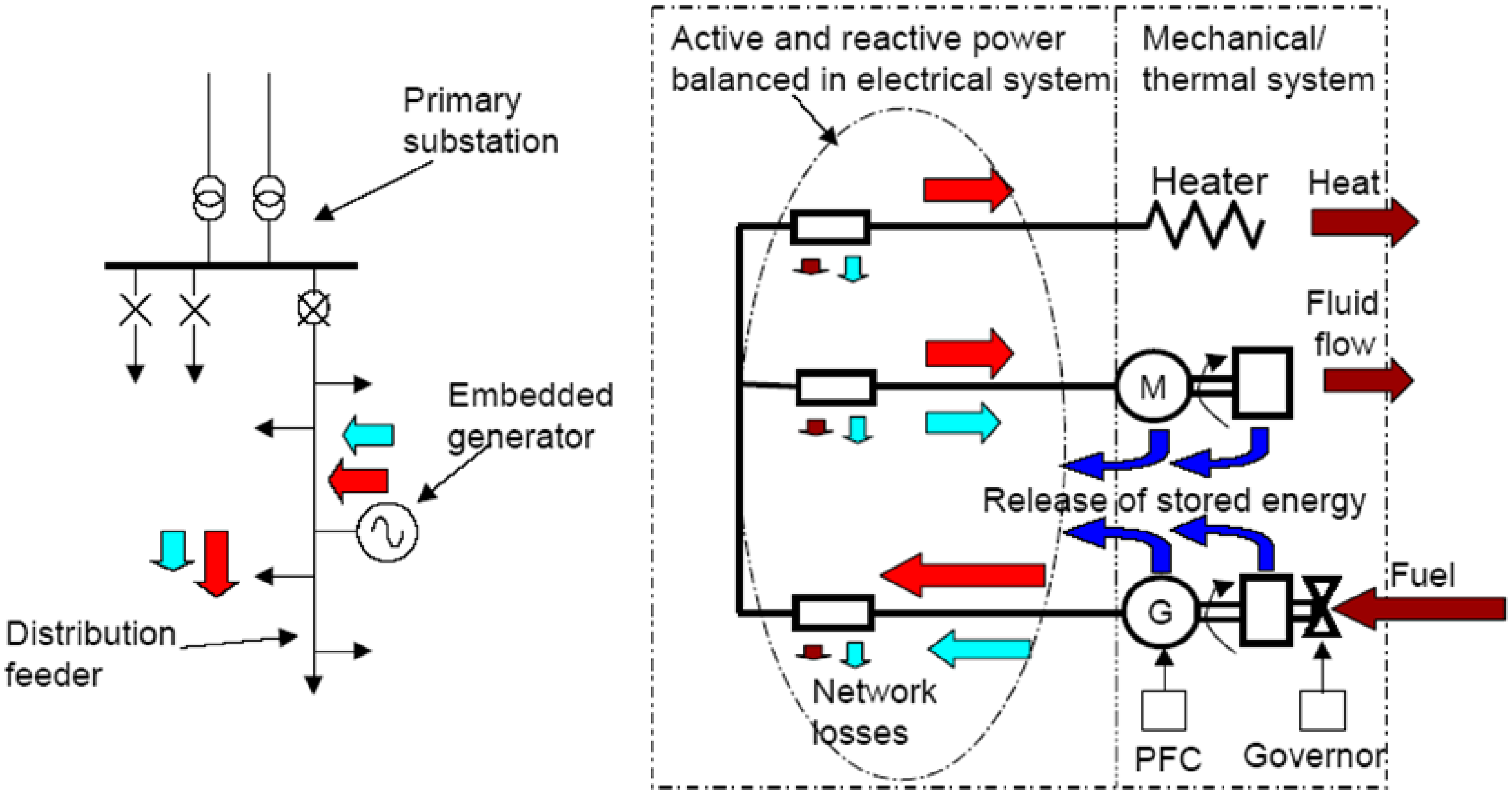
(a) Single line diagram



(b) Power balance diagram

Provoz TG v elektrizační soustavě

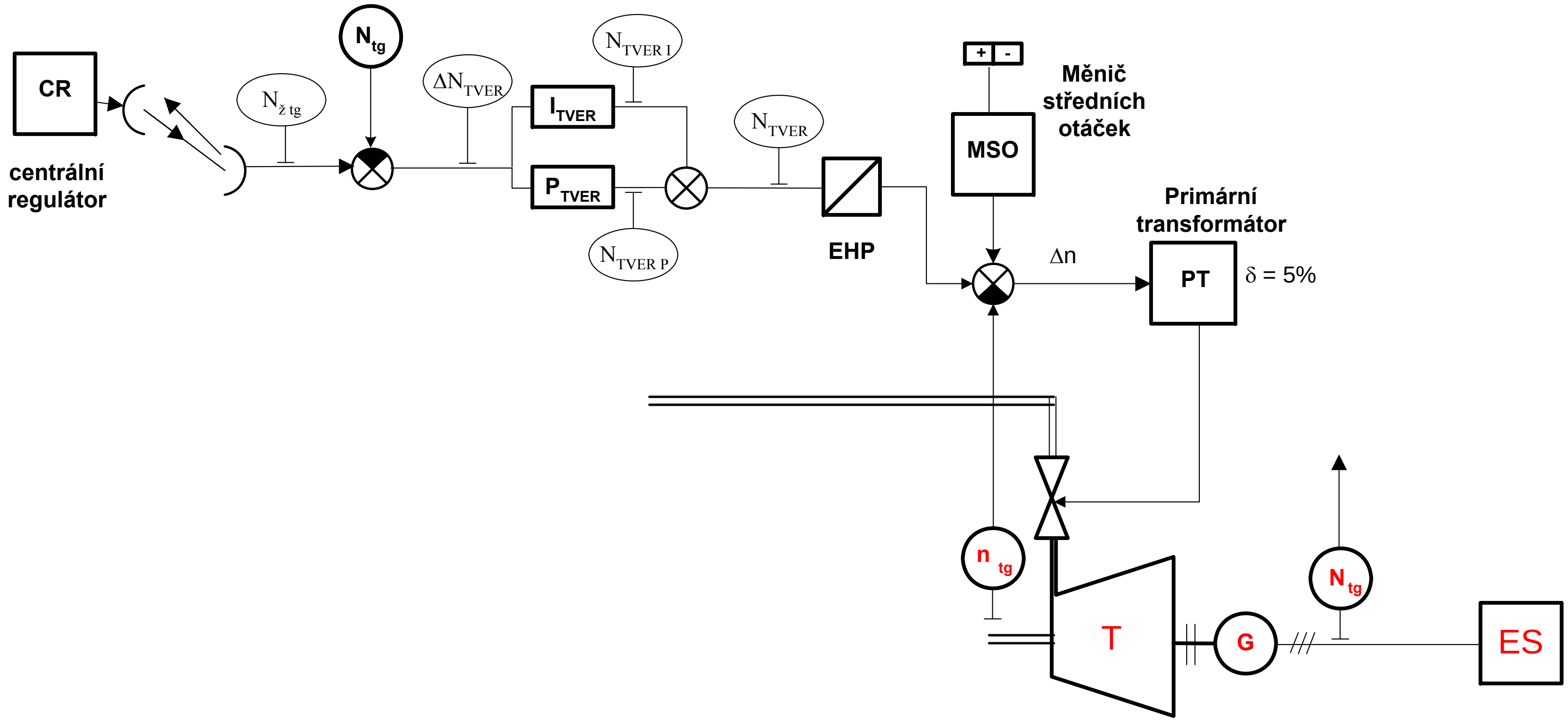
Stav 2. Vznik paraleního provozu dvou generátorů a zátěže



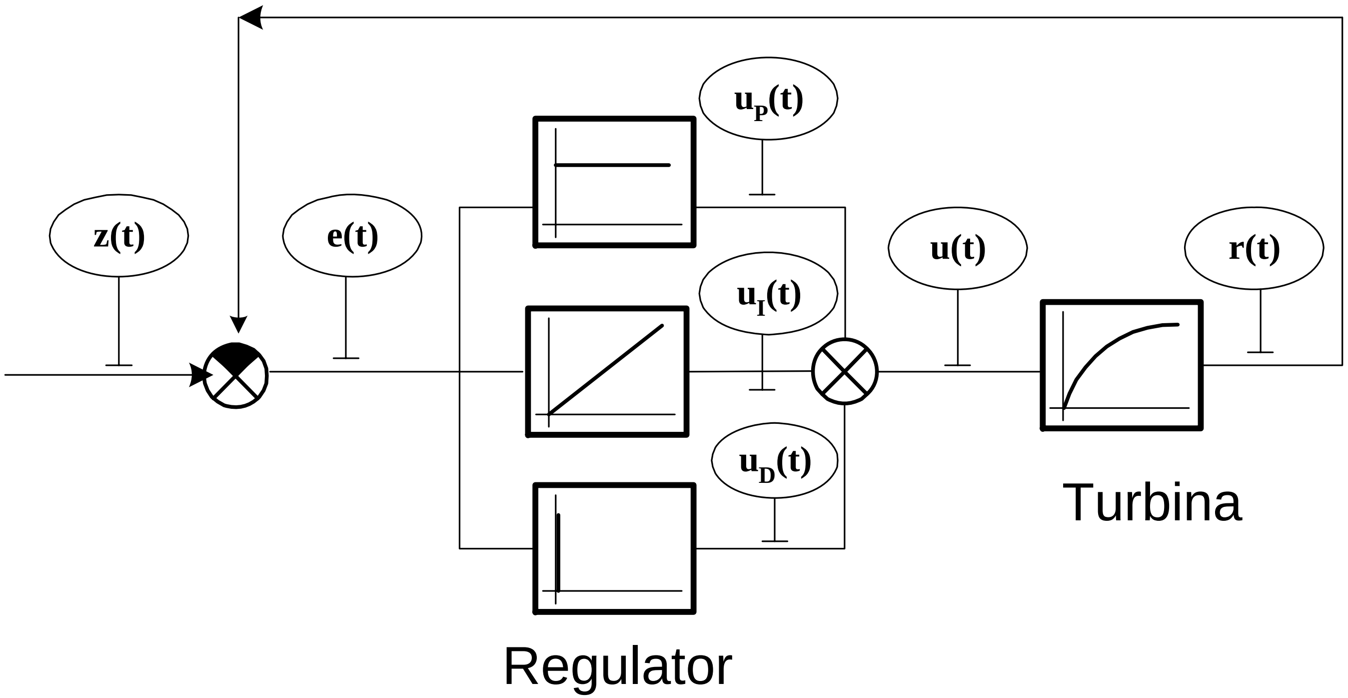
(a) Single line diagram (b) Power balance diagram

Regulace TG

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



Model regulace TG



Model turbogenerátoru

Obecná pohybová rovnice rotujícího soustrojí turbíny a generátoru je dána vztahem (při zanedbání tlumících efektů)

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a \qquad (1.1)$$

kde J označuje moment setrvačnosti roztočených hmot soustrojí, ω úhlovou rychlost, M_a akcelerační moment.

$$M_a = M_m - M_e \qquad (1.2)$$

Akcelerační moment vzniká jako rozdíl M_m mechanického momentu, kterým turbína pohání celé soustrojí a M_e elektrického momentu, kterým se brzdí soustrojí (elektromagnetickým polem generátoru). V přídadě kladných hodnot se rotor urychluje, v opačném případě se zpomaluje. Pokud je akcelerační moment nulový, otáčí se soustrojí konstantní synchronní rychlostí ω_s

Model turbogenerátoru

Zatímco hnací moment turbíny se mění obvykle velmi pomalu díky velkým časovým konstantám kotle a turbíny, elektromagnetický moment se může měnit velmi rychle, prakticky téměř okamžitě. Pokud rychlost rotoru ω odchýlí od ω_s můžeme jejich vztah definovat pomocí úhlu δ, který svírá osa rotoru vůči synchronně rotující referenční ose.

$$\omega = \omega_s + \frac{d\delta}{dt} \qquad (1.3)$$

Pohybovou rovnici pak můžeme převést do tvaru diferenciální rovnice druhého řádu.

$$J\frac{d^2\delta}{dt^2} = M_m - M_e \qquad (1.4)$$

Pokud rovnici (1.4) vynásobíme ω_s můžeme otáčivý moment nahradit výkonem, protože platí

$$P = \omega_s.M \qquad (1.5)$$

Pohybová rovnice pro mechanický výkon turbíny a elektrický výkon generátoru přejde do tvaru

$$J.\omega_s\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (1.6)$$

Model turbogenerátoru

Součin $J.\omega_s$ je je moment hybnosti H je úměrný kinetické energii rotujících hmot. Platí

$$W_k = \frac{1}{2}.J\omega_s^{\;2} = \frac{1}{2}.H.\omega_s \tag{1.7}$$

$$H = \frac{2}{\omega_s}.W_k \tag{1.8}$$

$$H\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \tag{1.9}$$

V praxi se často používá tzv normalizovaná setrvačná konstanty stroje H, která je definována jako podíl kinetické energie při daných otáčkách a jmenovitého zdánlivého výkonu stroje v MVA

$$H_n = \frac{W_k}{S_n} = \frac{1}{2}.\omega_s.\frac{H}{S_n} \tag{1.10}$$

$$H_n\frac{2.S_n}{\omega_s}.\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \tag{1.11}$$

Model turbogenerátoru

Z našeho pohledu je užitečnější definice časové konstanty stroje T_m , která vyjadřuje, za jakou dobu dosáhne soustrojí synchronní rychlosti, jestliže je roztáčen konstantním výkonem o velikosti S_n. Podle výše uvedené definice můžeme upravit rovnici (1.11). Druhou derivaci úhlu nahradíme první derivaci úhlové rychlosti a urychlovací výkon bude konstantní S_n . Tím získáme

$$H_n \frac{2.S_n}{\omega_s}.\frac{d\omega}{dt} = S_n \qquad (1.12)$$

Při integraci rovnice (1.12) hledáme čas T_m, při kterém bude dosaženo synchronní rychlosti ω_s

$$H_n.2\frac{1}{\omega_s}.\int_0^{\omega_s} d\omega = \int_0^{T_m} dt$$

$$2.H_n\frac{1}{\omega_s}.\omega_s = T_m$$

$$T_m = 2.H_n \qquad (1.13)$$

Pohybová rovnice přejde do tvaru

$$T_m \frac{S_n}{\omega_s}.\frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (1.14)$$

Model turbogenerátoru

Rychlost otáčení , i úhel elektrického pole (ω_{es}, δ_e) se liší od úhlu a rychlosti otáčení turbíny (ω_s, δ). Protože nás budeme analyzovat děje v elektrizační soustavě, upravíme (1.14) pro v elektrické veličiny. Pro generátor, kerý má počet pólpárů p platí,

$$\omega_{es} = \omega_s . \frac{p}{2} = 2\pi f_{ES} . \frac{p}{2} \qquad (1.15)$$

V takovém případě má tvar

$$T_m \frac{S_n}{2\pi f_{ES}} . \frac{d^2 \delta_e}{dt^2} = P_m - P_e \qquad (1.16)$$

Kde úhel je v radiánech

Model turbogenerátoru připojeného do ES

Jak již bylo naznačeno, mechanický výkon je dodáván turbínou, která je řízená primárním regulátorem.

Elektrický výkon závisí na velikosti vnitřního napětí generátoru, napětí soustavy a reaktanci propojovacích prvků. Výkon se mění se zátěžným úhlem. V případě ustáleného chodu do soustavy neomezeného výkonu bude elektrický výkon P_e dodávaný do soustavy má velikost

$$P_e = \frac{E.U_{ES}}{X}.\sin\delta_e = P_{e\max}.\sin\delta_e \qquad (1.17)$$

Rovnice přejde do tvaru

$$T_m \frac{S_n}{2\pi f_{ES}}.\frac{d^2\delta_e}{dt^2} = P_m - P_{e\max}.\sin\delta_e \qquad (1.18)$$

Model turbogenerátoru připojeného do ES

Počáteční podmínky k této rovnici plynou z ustáleného chodu při synchronní rychlosti, t.j úhlu dynamické rovnováhy $\delta_e = \delta_0$ a jeho nulové derivaci

$$P_m = P_{e\max}.\sin\delta_0$$

Pro řešení malých změn δ_e v okolí nominálního stavu δ_0 . Můžeme provést linearizeci pro $\delta_e = \delta_0 + \Delta\delta_e$.

$$T_m\frac{S_n}{2\pi f_{ES}}.\frac{d^2(\delta_0+\Delta\delta_e)}{dt^2} = P_m - P_{e\max}.\sin(\delta_0+\Delta\delta_e) \qquad (1.19)$$

Funkci $\sin(\delta_0 + \Delta\delta_e)$ nahradíme první dvěma členy jejího Taylorova rozvoje a získáme

$$T_m\frac{S_n}{2\pi f_{ES}}.\frac{d^2\delta_0}{dt^2} + T_m\frac{S_n}{2\pi f_{ES}}.\frac{d^2\Delta\delta_e}{dt^2} = P_m - P_{e\max}.(\sin\delta_0 + \cos\delta_0.\Delta\delta_e) \qquad (1.20)$$

Z obou stran rovnice můžeme odečíst počáteční stav, který je definován

$$T_m\frac{S_n}{2\pi f_{ES}}.\frac{d^2\delta_0}{dt^2} = P_m - P_{e\max}.\sin\delta_0 \qquad (1.21)$$

Model turbogenerátoru připojeného do ES

Linearizovaná rovnice pro změny úhlu v okolí ustáleného stavu pak má tvar

$$T_m \frac{S_n}{2\pi f_{ES}} . \frac{d^2 \Delta\delta_e}{dt^2} = P_m - P_{e\max} . \cos\delta_0 . \Delta\delta_e \qquad (1.22)$$

Rovnice se zjednodujší po zavedení tzv. Synchronizačního koeficientu, kerý je derivací funce P_m (δ_e) v bodě δ_0 jeho velikost je

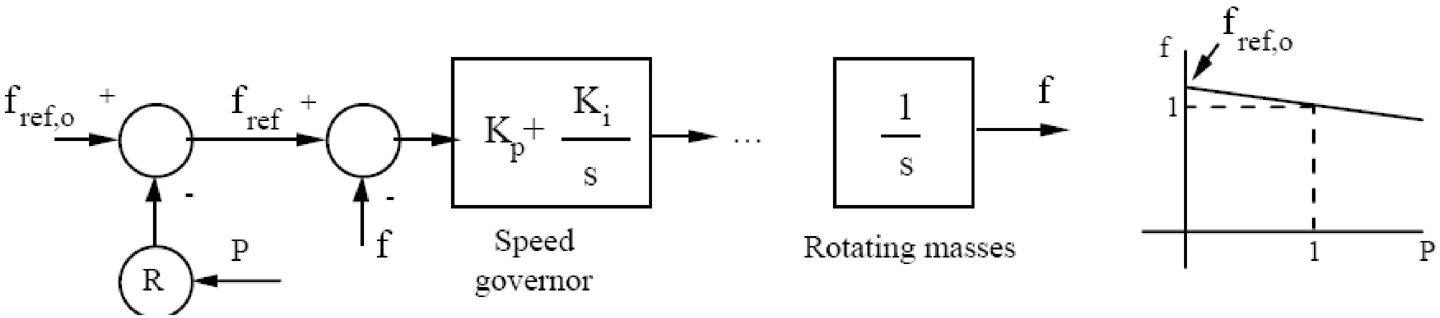
$$P_s = . \frac{dP_e}{d\delta_e}\bigg|_{\delta_0} = P_{e\max} . \cos\delta_0 \qquad (1.23)$$

$$T_m \frac{S_n}{2\pi f_{ES}} . \frac{d^2 \Delta\delta_e}{dt^2} = P_m - P_s . \Delta\delta_e \qquad (1.24)$$

Model turbogenerátoru připojeného do ES

Rovnice pro úhlovou rychlost má tvar

$$T_m \frac{S_n}{2\pi f_{ES}} \cdot \frac{d\Delta\omega_e}{dt} = P_m - P_s \cdot \int_o^t \Delta\omega_e(\tau) d\tau \qquad (1.25)$$



Model turbogenerátoru připojeného do ES

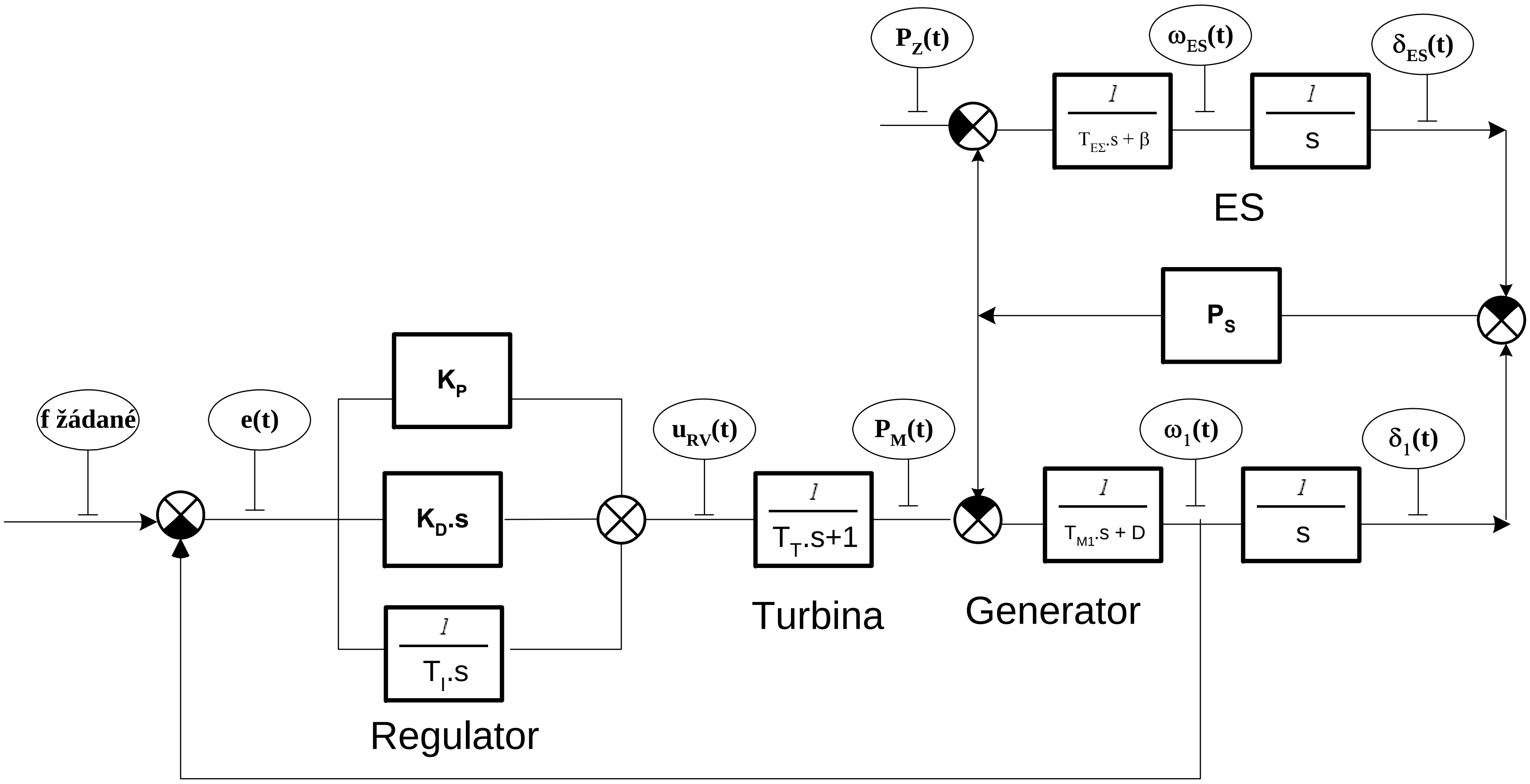
$$T_m \frac{S_n}{2\pi f_{ES}} . \frac{d\Delta\omega_e}{dt} + D.\Delta\omega_e = P_m - P_s . \int_o^t \Delta\omega_e(\tau) d\tau \qquad (1.26)$$

$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_Z}{D} \qquad (1.27)$$

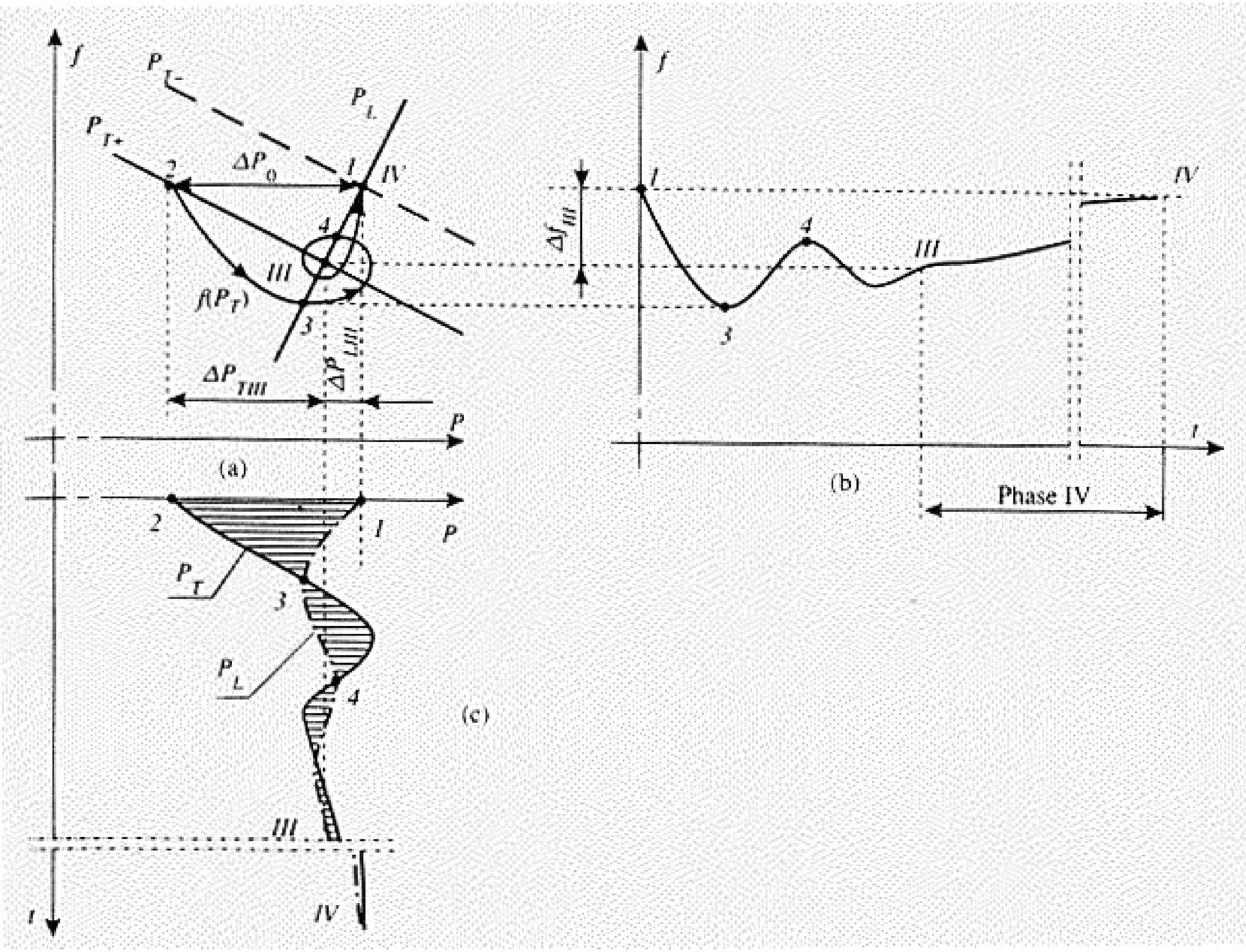
$$s[\%] = \frac{\Delta f . P_{nom}}{\Delta P . f_{nom}} .100 \qquad (1.28)$$

$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_Z}{\left(\frac{1}{s_1} + .. + \frac{1}{s_n}\right) + D} = \frac{-\Delta P_Z}{\beta} \qquad (1.29)$$

Model turbogenerátoru připojeného do ES



Sekundární regulace f a P



Sekundární regulace f a P