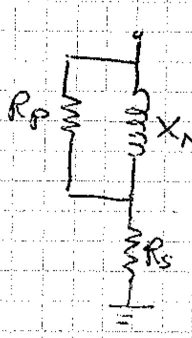
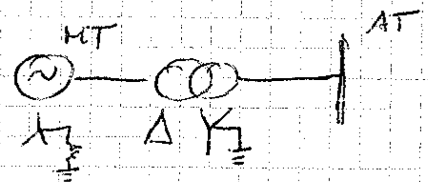


Le resistenze R_S abbassa la costante di tempo unidirezionale della linea

$$\tau \propto \frac{1}{R_S}$$

Stato del neutro dei generatori connessi alla rete AT



Si utilizza questa soluzione perché se il trafo fosse Y ⏚ si avrebbe una X_0 (AT) elevata ($K = \frac{X_0}{X_+}$ "grande")

Lo statore è collegato a stella e il centro-stella è messo a terra con resistenza di valore elevato.
Se il centro-stella fosse collegato francamente a ~~stella~~ terra si avrebbe $I_{FT} > I_{3f}$ infatti:

$$X_+ = X'' \qquad X_- = X'' \qquad X_0 = \frac{X''}{2} \qquad \frac{X_+ + X_- + X_0}{3} = \frac{5}{6} X''$$

$$I_{3F} = \frac{E_+}{X''} \qquad I_{FT} = \frac{6 E_+}{5 X''} = \frac{6}{5} I_{3F}$$

REGOLAZIONE della POTENZA ATTIVA / FREQUENZA

In condizione di regime i generatori ruotano tutti alla stessa velocità. A questa velocità corrisponde una determinata frequenza.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \leftarrow 2 \text{ poli}$$

La frequenza è un parametro di qualità infatti f impone la velocità dei motori direttamente collegati alla rete. Se la macchina è sincrona $\omega = 2\pi f$. Se è asincrona $\omega = 2\pi f (1-s)$ $|s| \ll 1$

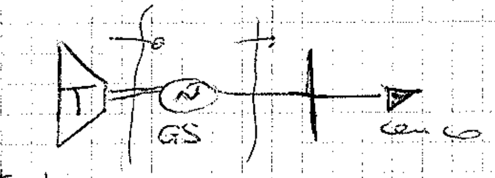
f è parametro di qualità in quanto viene usata come "orologio"

$$\Phi = \frac{V}{f}$$

flusso

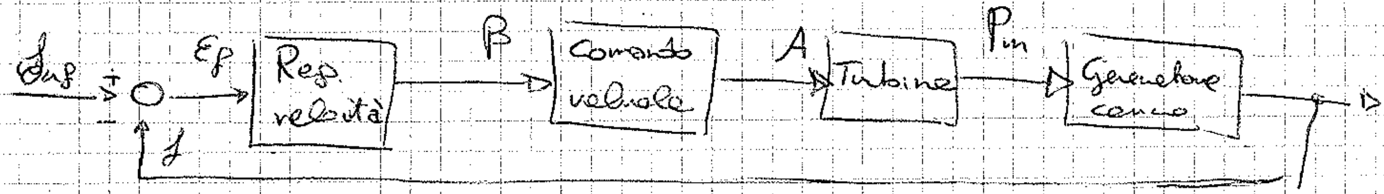
Nella rete elettrica non c'è accumulo di potenza (a meno di campi magnetici e campi elettrici). La potenza di cui hanno bisogno i carichi allo spunto non è presa dai campi, ma dall'energia cinetica dei ~~rotori~~ motori (che comporta una diminuzione di velocità di rotazione e diminuzione della frequenza). Per aumentare la velocità dei generatori è necessario aumentare la potenza meccanica sull'albero.

Generatore in funzionamento isolato



$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2 \text{ poli})$$

Questo è uno nodo di slack. Non decido potenza, né tensione e fase. E' necessario far sì che la potenza prodotta sia uguale a quella richiesta dal carico, la velocità del generatore deve essere costante.



f_{rif}: riferimento di velocità

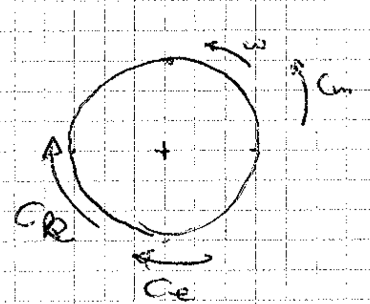
$E_f = f_{rif} - f$ errore di velocità

β: angolo che definisce la posizione dell'albero

A: sezione di passaggio del vapore (turbina a vapore) o del combustibile (turbina a gas).

P_m: potenza meccanica prodotta.

Equazione meccanica del generatore



C_e: coppia elettromagnetica dentro il generatore

C_a: attriti (trascurabili).

$$J\frac{d\omega}{dt} = C_m - C_e - \cancel{D\omega}$$

trascurabile

J momento d'inerzia complessivo generatore + turbina

71

$$J\omega\frac{d\omega}{dt} = \underbrace{C_m\omega}_{P_m} - \underbrace{C_e\omega}_{P_e}$$

$$J\omega\frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{dt}\frac{1}{2}\left(J\omega^2\right)$$

$$\frac{dW_m}{dt} = J\omega\frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e$$

Se $P_m > P_e \Rightarrow \frac{dW_m}{dt} \uparrow$ (aumenta l'energia cinetica)

Se aumenta $W_m \Rightarrow$ aumentano ω e la frequenza

Se $P_m < P_e \Rightarrow \frac{dW_m}{dt} \downarrow$ (diminuisce l'energia cinetica, ω e freq.)

$$P_e = P_m - \frac{dW_m}{dt}$$

la potenza elettrica ha 2 origini:
- ciò che produce la turbina
- variazione di energia cinetica.

$|\omega - \omega_0| << \omega_0$

velocità nominale

$P_m \simeq C_m\omega_0$

$P_e \simeq C_e\,\omega_0$

$\frac{dW_m}{dt} \simeq J\omega_0\frac{d\omega}{dt}$ ω_0 ~~dice~~ è un fattore di scala che viene assorbito dai parametri p.u.

Per definire J si usa un parametro T_a (tempo di avviamento [s])

$$T_a = \frac{J\omega_0^2}{S_b}$$

S_b può essere o S_N del generatore o P_N della turbina

In genere S_N non è molto diverso P_N. Il numeratore è energia il denominatore è una potenza.

Si chiama tempo di avviamento perché se pensiamo di avviare il generatore (da fermo) $\sqrt{}$ con C_m costante $C_m = \frac{S_b}{\omega_0}$

$$J\frac{d\omega}{dt} = \frac{S_b}{\omega_0} \quad \text{integriamo}$$

$$J\int_0^{\omega_0} d\omega = \frac{S_b}{\omega_0}\int_0^t dt$$

$$J\omega_0 = \frac{S_b}{\omega_0}\,t \qquad t = \frac{J\omega_0^2}{S_b}$$

Valori tipici: 6 - 10 s riferiti a $S_b = S_N$ o $P_b = P_N$

In UK si usa la costante di inerzia (H)

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_0^2}{S_b} = \frac{T_a}{2} \quad (\text{valori tipici } 3 \div 5\ s)$$

Il numeratore di H è l'energia cinetica del ~~rotore~~ motore a velocità nominale

Esempio: $H = 4 \Rightarrow W_m = 4\,S_b$

Supponiamo siano richiesti 40'000 MW con generatori che generano una potenza di 50'000 MVA.

Nei generatori abbiamo un'energia cinetica di 200'000 MJ (potenza richiesta dal carico per 5 secondi). Non possiamo usare tutta l'energia cinetica, ma solo una modesta porzione.

Supponiamo una variazione di 1 Hz (50 Hz → 49 Hz) cioè una variazione del 2%.

Poiché $W_m \propto \omega^2 \propto f^2$ ne risulta che $\Delta W_m = 4\%$

Dei 200'000 ne possiamo usare solo il 4% (8'000 MJ) per un tempo di 0,2 s.

Ne segue che è necessaria una variazione rapida di ω.

$$\underbrace{J\omega_0}_{\frac{T_a S_b}{\omega_0}}\frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \Rightarrow \frac{T_a S_b}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e$$

$\omega = 2\pi f \qquad \omega_0 = 2\pi f_0 \qquad f_0$: frequenza nominale

$$\frac{T_a S_b}{f_0}\frac{df}{dt} = P_m - P_e$$

definiamo $M = \frac{T_a S_b}{f_0} \propto J$

l'equazione risulta $M \frac{df}{dt} = P_m - P_e$

Se uso S_b come potenza base:

$$M = \frac{T_a}{f_0}$$

A regime ω, f sono costanti nel tempo per cui $\frac{df}{dt} = 0$
e quindi
$$P_e = P_m$$

Punto di equilibrio f_0 $\quad P_{m_0} = P_{e_0} = P_0$

$$\Delta f = f - f_0$$

$$\Delta P_m = P_m - P_0$$

$$\Delta P_e = P_e - P_0$$

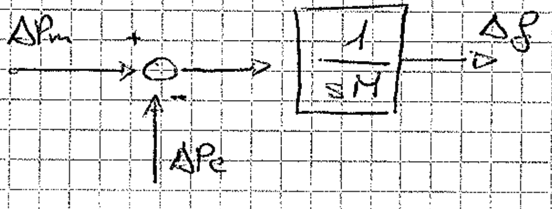
linearizziamo l'equazione

$$M \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e$$

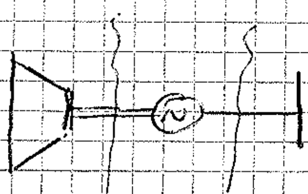
$$M \frac{df}{dt} = P_m - P_e - P_0 + P_0$$

Applichiamo Laplace

$$sM\Delta f = \Delta P_m - \Delta P_e \Rightarrow \Delta f = \frac{\Delta P_m - \Delta P_e}{sM}$$



A regime $\Delta P_m = \Delta P_e$



$$\Delta P_e = \Delta P_L + E_c \Delta f$$

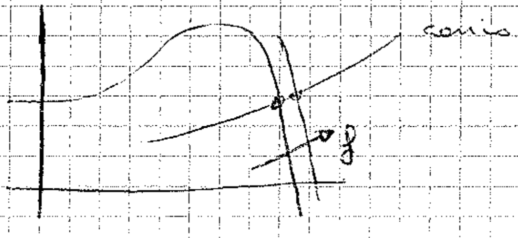
variazioni di carico

ΔP_c dipende dalla frequenza, dalla potenza assorbita dai carichi

Carico rotante: al crescere della frequenza (cioè al crescere di Δf) aumenta la velocità di rotazione dei rotori (e di conseguenza aumenta la potenza assorbita).

Nel motore asincrono: $P = P_{Js} + P_{Fe} + \underbrace{C_m \, 2\pi f}_{\text{potenza al traferro}}$

$2\pi f$ in questo caso è la ω di sincron.



Un aumento della frequenza comporta un aumento della coppia e quindi anche della potenza al traferro.

Quindi gli effetti sulla potenza sono:

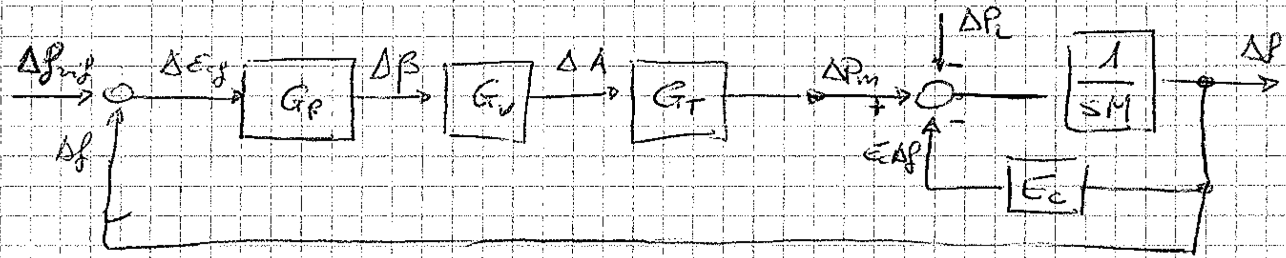
- variazioni di potenza al traferro (che aumenta al crescere di f)
- variazioni (trascurabili) di P_{Js} e P_{Fe}.

Nota: ~~tr~~ ignoriamo la dinamica del carico rotante.

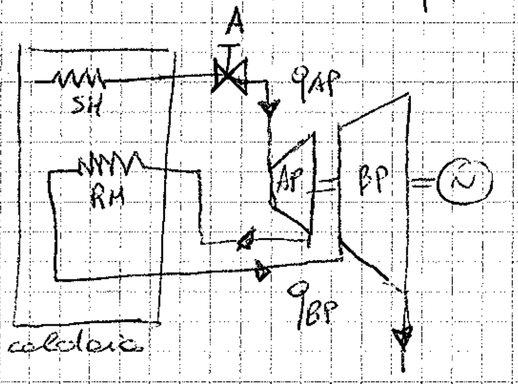
Il ~~carico~~ parametro E_c si chiama: energia regolante del carico

$[E_c] = \frac{MW}{Hz} \cdot MJ$

Ridisegnamo lo schema della regolazione di velocità:



Dobbiamo occuparci di G_R, G_V, G_T. Consideriamo il caso delle turbine a vapore.



SH: surriscaldatore

RH: risurriscaldatore

Chiamiamo q le portate $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

$P_m = P_{AP} + P_{BP}$

$P_{AP} = h_{AP} \cdot q_{AP}$ h entalpia specifica per unità di massa $[J/kg]$

$P_{BP} = h_{BP} \cdot q_{BP}$

Operando sulle valvole si varia la portata.

$$\Delta P_{AP} = h_{AP} \, \Delta q_{AP} + q_{AP} \cancel{\Delta h_{AP}}$$

trascuriamo perché Δh_{AP} sono lenti rispetto alla scala di ~~frequenze~~ tempi con cui varia il carico.

Idem per il corpo a bassa pressione:

$$\Delta P_{BP} = h_{BP}\, \Delta q_{BP}$$

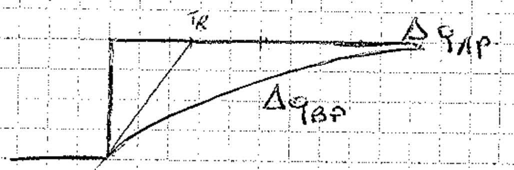
Valutiamo q_{AP}. Se assumiamo che la pressione a monte della valvola resti costante. Possiamo quindi dire che

$\Delta q_{AP} = K \Delta A$ (variazioni di portata $\propto$ alla variazione dell'area di passaggio).

Per quanto riguarda la portata di BP non si ha un adeguamento immediato. Questo perché nel surriscaldatore è presente una grande quantità di vapore.

$$\Delta q_{BP} = \frac{\Delta q_{AP}}{1 + s T_2}$$ T_2: costante di tempo del risurriscaldatore (10-20 s)

Supponiamo di effettuare una variazione a gradino con $\Delta A > 0$. La variazione a gradino ΔA si accompagna con una variazione a gradino Δq_{AP}.
La portata Δq_{BP} risponde con un esponenziale con costante di tempo T_2.



A regime le due portate sono uguali, ma transitoriamente le portate sono diverse.
In questo caso $\Delta q_{AP} > \Delta q_{BP}$ per tutta la durata del transitorio. Ne segue che aumenta la massa di vapore nel risurriscaldatore.
Ciò che accade nel surriscaldatore accade anche nelle turbine, ma è molto più veloce l'adeguamento. Pertanto ciò che accade nelle turbine è trascurabile.

$$\Delta P_m = h_{AP}\, \Delta q_{AP} + h_{BP}\, \Delta q_{BP} =$$

$$= \Delta q_{AP} \left(h_{AP} + \frac{h_{BP}}{1 + s T_2} \right) = \frac{h_{AP} + h_{BP} + s h_{AP} T_2}{1 + s T_2} K \Delta A - G_T$$

$$G_T(0) = (h_{AP} + h_{BP}) K = K_T$$

Polo: in T_2

Zero in $T_z = \frac{h_{AP}}{h_{AP} + h_{BP}} T_2 = \alpha T_2$, $\alpha = \frac{h_{AP}}{h_{AP} + h_{BP}}$

a regime $q_{AB} = q_{BP} = q$ ne segue che

$$\alpha = \frac{h_{AP}}{h_{AP}+h_{BP}} \cdot \frac{q}{q} = \frac{P_{APo}}{P_{mo}}$$

α rappresenta quindi la quota di potenza prodotta dal corpo ad ~~bas~~ alta pressione (Di solito $\alpha \simeq 0,2 \div 0,4$).

$$G_T = K_T \frac{1+s\alpha T_2}{1+sT_2} \qquad T_2 < T_R \quad \text{in quanto } \alpha < 1$$

Risposta al gradino: $\Delta A > 0$

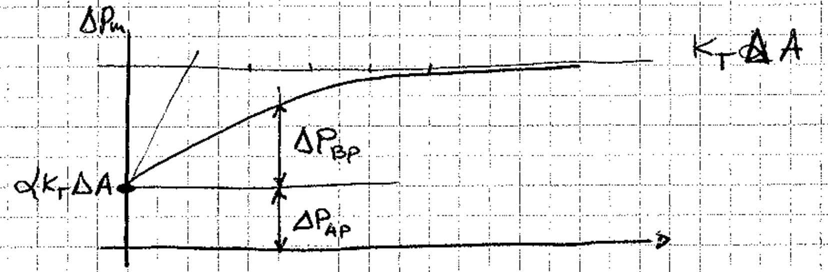
a regime ($t \to \infty$) si ha $s \to 0$. Ne segue che

$$\Delta P_m = K_T \, \Delta A$$

Comportamento iniziale ($t = 0$) cioè $s \to \infty$

$$\lim_{s\to\infty} G_T = K_T \frac{\alpha T_2}{T_2} = \alpha K_T$$

$$\Delta P_m(0^+) = \alpha K_T A$$



Il comando delle valvole è veloce rispetto a quello della turbina, pertanto può essere trascurato.

$$G_V \simeq K_V$$

Dove non viene trascurato il modello è $G_V = \dfrac{K_V}{1+sT_V}$ con $T_V \ll T_2$

Regolatore di velocità (G_R):

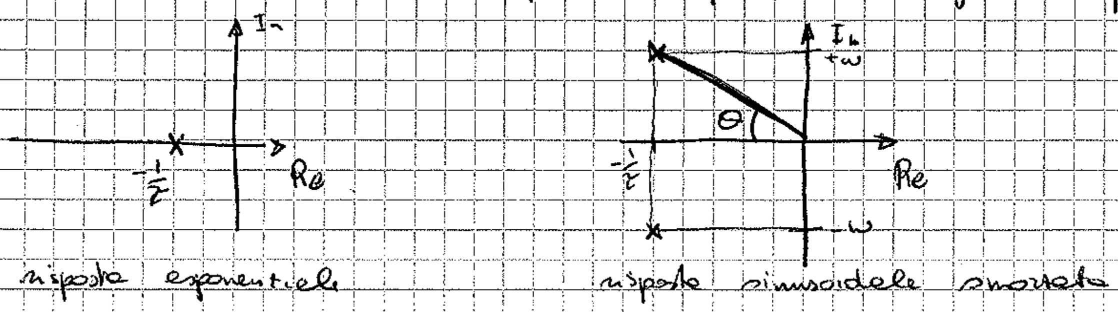
i requisiti sono:

- precisione (errore a regime)
- stabilità (poli in anello chiuso nel semipiano sx)
- velocità della risposta

In un sistema lineare la risposta è formata da due forme:

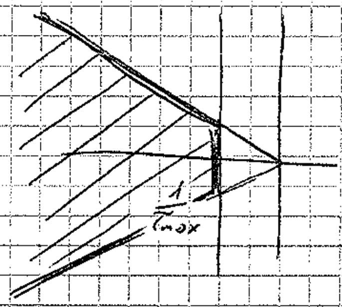
- esponenziale (poli reali) $p = -\frac{1}{\tau}$

- sinusoidale smorzata (poli complessi coniugati). $p = -\frac{1}{\tau} + j\omega$



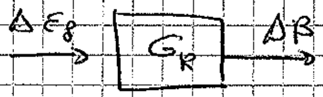
Lo smorzamento $\xi = \cos\theta$

Noi vogliamo che $\tau < \tau_{MAX}$ e $\xi \geq \xi_{MIN}$

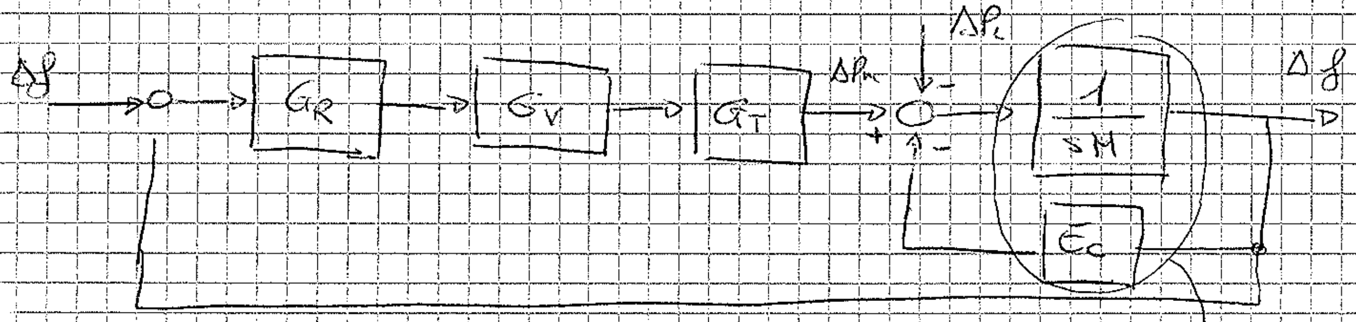


La zona tratteggiata è la zona in cui vogliamo che si trovino i nostri poli (lontani dall'asse immaginario e vicini all'asse reale).

Il regolatore



Se la turbina è a vapore è sufficiente un regolatore proporzionale.



Con
$$G_R = K_R$$
$$G_V = K_V$$
$$G_T = K_T \frac{1 + s\alpha T_R}{1 + sT_R}$$

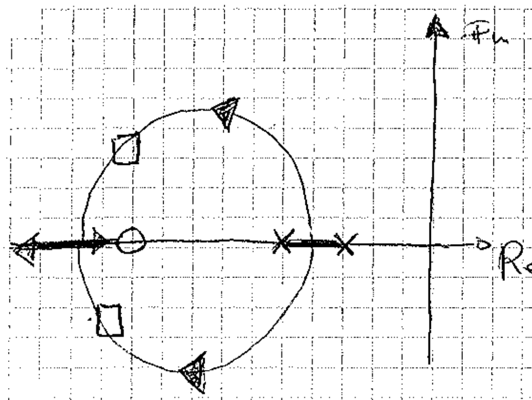
$$\frac{\frac{1}{sM}}{1 + \frac{E_c}{sM}} = \frac{1}{sM + E_c}$$

$$G_{AP} = K_R K_T K_V \frac{1 + s\alpha T_R}{1 + sT_R} \frac{1}{sM + E_c}$$

2 poli: $-T_R$

$-\tau = \frac{M}{E_c}$ se $E_c = 0$ $\tau \to \infty$ quindi polo nell'origine

1 zero $-\alpha T_R < T_R$



Il parametro per lo studio del luogo delle radici è K_R

I valori tipici di K_R permettono un posizione soddisfacente dei poli in anello chiuso.

Introduciamo $G_f = G_R \cdot G_V \cdot G_T = \frac{\Delta P_M}{\Delta E_f}$. Definiamo

$E_p = G_f(0)$ l'energia regolante permanente $\left[\frac{MW}{Hz}\right]$.

$E_p = K_R K_V K_T$

Viene definito lo statismo permanente $b_p \propto \frac{1}{E_p}$

$$b_p = \frac{P_N}{E_p f_0}$$ f_0: frequenza nominale

Di solito $b_p \simeq 5\%$

Viene definita anche l'energia regolante transitoria

$E_T = \lim_{s \to \infty} G_f = K_R \cdot K_V \cdot K_T \cdot \alpha = \alpha E_p < E_p$

Al posto di α possiamo usare il rapporto tra le costanti di tempo dello zero e del polo

Come per E_p viene definito lo statismo transitorio

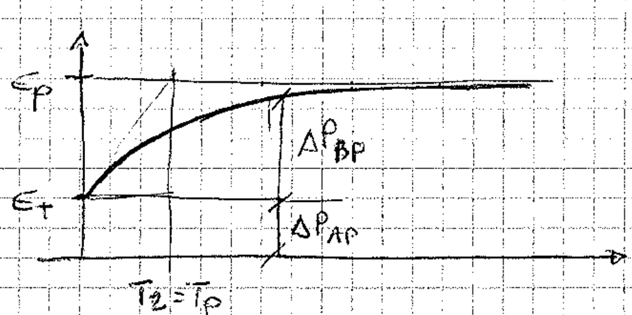
$$b_T = \frac{P_N}{E_T f_0} > b_p$$

La risposta al gradino unitario positivo

$\Delta E_f = 1 Hz$

$\Delta P_M(0)^+ = E_p$

$\Delta P_M(0^+) = E_T$



Comportamento a regime

1) $\Delta f_{rif} \neq 0$ $\quad \Delta P_L = 0$

$\Delta P_m = \Delta P_e$

$$\left.\begin{aligned}\Delta P_e &= \underbrace{\Delta P_L}_{=0} + E_c \Delta f \\ \Delta P_M &= E_p \left(\Delta f_{rif} - \Delta f\right)\end{aligned}\right\} \quad \Delta P_e = \Delta P_M \Rightarrow E_c \Delta f = E_p (\Delta f_{rif} - \Delta f)$$

$$\Delta f = \frac{E_p \, \Delta f_{RIF}}{E_c + E_p}$$

Ne segue che $|\Delta f| < |\Delta f_{rif}|$ se $E_c \neq 0$

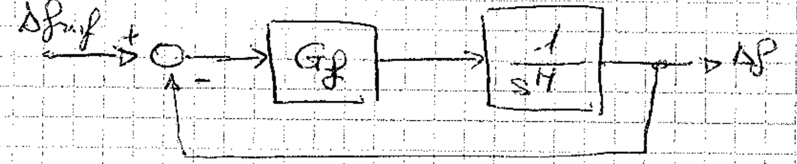
Nota: l'energia regolante del carico introduce un errore

$$\Delta P_M = \Delta P_e = \frac{E_c E_p}{E_c + E_p} \Delta f_{RIF}$$

Se vogliamo aumentare la frequenza dobbiamo aumentare la potenza prodotta. Poiché E_p è finito è necessario avere un errore di frequenza.

2) Se non abbiamo carico rotante $(E_c = 0)$ $\Delta P_e = 0$ $\Delta P_M = 0$

$\Delta f = \Delta f_{RIF}$ in questo caso l'errore è nullo



l'errore si annulla a causa del polo nell'origine dovuto al fatto che $E_c = 0$

3) se abbiamo variazione di carico

$\Delta P_L \neq 0$ $\Delta f_{rif} = 0$

$\Delta P_e = \Delta P_M$

$$\begin{cases}\Delta P_e = \Delta P_L + E_c \Delta f \\ \Delta P_M = -E_p \Delta f\end{cases} \Rightarrow \Delta P_L + E_c \Delta f = -E_p \Delta f \Rightarrow \Delta f = -\frac{\Delta P_L}{E_c + E_p}$$

se $\Delta P_L > 0$ $\Delta f < 0$

Ai fini delle variazioni di frequenza dovute a variazioni di carico l'energia regolante dei carichi rotanti si aggiunge all'energia regolante permanente

$E = E_p + E_c$ energia regolante totale

a pari ΔP_L se $E_c \uparrow$ allora $\Delta f \downarrow$

$$\Delta P_M = \Delta P_e = \frac{E_p}{E_p + E_c} \Delta P_L \neq \Delta P_L \quad \text{se } E_c \neq 0 \quad |\Delta P_M| < |\Delta P_L|$$

$$\Delta P_e = \Delta P_L + E_c \Delta f \Longrightarrow \underbrace{\Delta P_L}_{>0} = \underbrace{\Delta P_m}_{\substack{<\Delta P_L \\ >0}} \underbrace{- E_c \Delta f}_{>0}$$

quindi $E_c \Delta f < 0$ cioè i carichi rotanti assorbono meno energia

interpretazione dello statismo a regime permanente

$$\Delta P_m = -E_p \Delta f = -\frac{1}{b_p} \frac{P_n}{f_0} \Delta f \Longrightarrow b_p = -\frac{P_n}{\Delta P_m} \frac{\Delta f}{f_0}$$

esempio: $\Delta f = 1\,Hz$ $\quad b_p = 0{,}05$

$$\frac{\Delta P_m}{P_n} = -\frac{1}{b_p} \frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{1 \cdot 1}{0{,}05 \cdot 50} = 0{,}4\ P_n$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{E_p} = -\frac{\Delta P_L}{\frac{1}{b_p} \frac{P_N}{f_0}} = \frac{b_p\, f_0}{1} \frac{\Delta P_L}{P_N}$$

esempio: $\frac{\Delta P_L}{P_N} = 0{,}1 \quad b_p = 0{,}05 \quad \Delta f = -\frac{0{,}05 \cdot 50 \cdot 0{,}1}{1} = -0{,}25\ Hz$

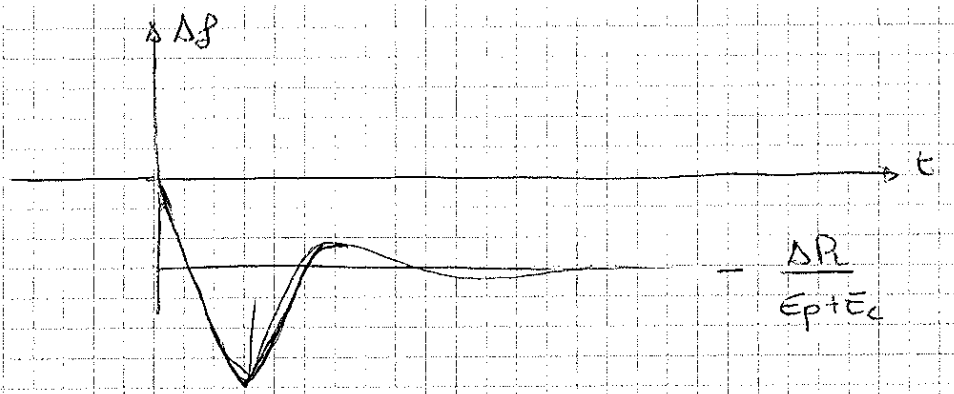
Risposta al gradino

1) $\Delta P_L > 0$

$\Delta f(t)$ $\quad t \to \infty \quad \Delta f(\infty) = -\frac{\Delta P_L}{E_p + E_c}$

$t \to 0^+ \quad \Delta f(0^-) = \Delta f(0^+) = 0$

Se i due poli complessi coniugati sono ben smorzati



La discesa iniziale della frequenza

$$M \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e$$

inizialmente $\Delta P_m \simeq 0$ (in $t = 0^+$ $\Delta P_m = 0$)

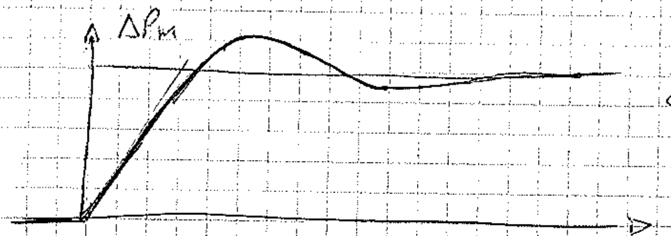
$$M\frac{d\Delta f}{dt} \cong -\Delta P_L$$ ipotesi istante 0^+ (Δf trascurabile)

$$\Delta f \cong -\frac{\Delta P_L}{M}\cdot t$$

$$\left(\frac{d\Delta f}{dt}\right)_{t=0^+} = \left(\frac{df}{dt}\right)_{t=0^+} = -\frac{\Delta P_L}{M}$$

la frequenza inizia a scendere il controllo se ne accorge e $\Delta P_m > 0$.

inizialmente possiamo dire che $\Delta P_m \cong -\epsilon_T \Delta f \cong \frac{\epsilon_T}{M}\Delta P_L t$



$\Delta P_e = \Delta P_L + \epsilon_c \Delta f$

$\Delta P_e(0^+) = \Delta P_L$

$\Delta P_e(\infty) = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_p+\epsilon_c}\Delta P_L \overset{\text{se } \epsilon_c=0}{=} \Delta P_L$

<u>Per altri generatori</u> (turbine a gas / turbine idrauliche)
Questo tipo di generatori ha comportamento dinamico veloce. Si può quindi approssimare $G_T = K_T$.
Possiamo fare $G_R = K_2\frac{1+sT_z}{1+sT_p}$. Ne segue che

$$G_f = \epsilon_p \frac{1+sT_z}{1+sT_R}$$

utilizzando questa funzione di trasferimento ~~si può~~ quanto studiato fin d'ora può essere esteso anche alla turbina a gas e a quelle idrauliche.

Presenza di più generatori

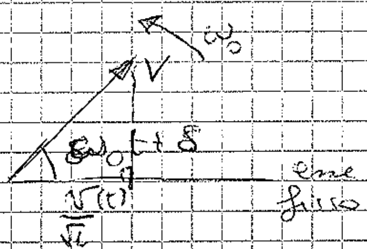
Prima di valutare il comportamento di più generatori è necessario fare un excursus su frequenza/velocità in sistemi con più di 1 generatore

A regime tutti i sistemi ruotano alla stessa velocità

$$\omega_k = \omega_0 = 2\pi f_0 \quad (2 \text{ poli}) \qquad \forall k$$

f è uguale in tutti i punti del sistema

$$v(t) = \sqrt{2}\, V \cos(\omega_0 t + \delta)$$



In condizioni dinamiche la rappresentazione di tensioni e correnti sarà del tipo

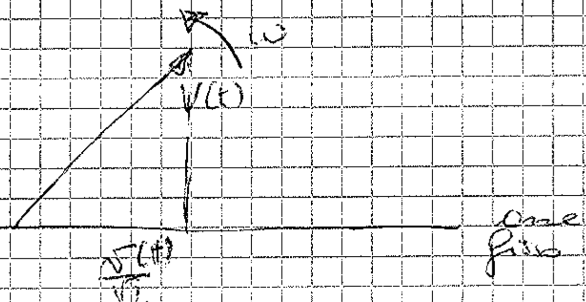
$$v(t) = \sqrt{2}\, V(t) \cos(\omega_0 t + \delta(t))$$

con $V(t)$ e $\delta(t)$ variabili lentamente nel tempo (cioè

$$\left|\frac{dV(t)}{dt}\right| \ll \omega_0 V \quad e \quad \left|\frac{d\delta}{dt}\right| \ll \omega_0)$$

La variazione nel tempo di V è una modulazione in ampiezza. La modulazione nel tempo della fase è una modulazione in frequenza.

In un periodo $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{f_0}$ cioè $V(t)$ e $\delta(t)$ sono praticamente costanti.

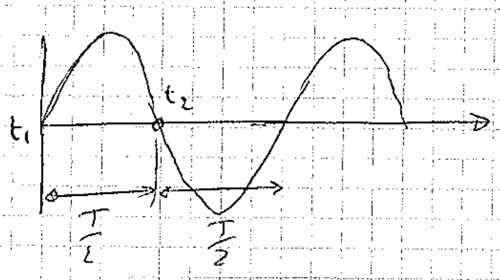


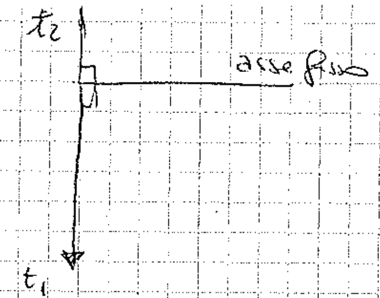
$$\omega = \frac{d}{dt}(\omega_0 t + \delta(t)) = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt}$$

$$|\omega - \omega_0| = \left|\frac{d\delta}{dt}\right| \ll \omega_0$$

Possiamo definire la frequenza in condizioni dinamiche

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = f_0 + \frac{1}{2\pi}\frac{d\delta}{dt} \qquad \Delta f = f - f_0 = \frac{1}{2\pi}\frac{d\delta}{dt}$$



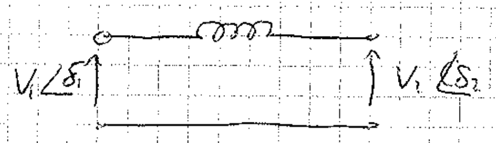


punti in cui $v(t)$ si annulla. Se si misura la frequenza tra due zeri successivi

$$f = \frac{1}{2(t_2 - t_1)}$$ è

esattamente come misurare la velocità media del vettore nel tratto $t_1 - t_2$. Infatti $\omega_{media} = \frac{\pi}{t_1 - t_2}$ $\quad \frac{\omega_M}{2\pi} = \frac{1}{2(t_1 - t_2)} = f.$

Generatori connessi tra loro attraverso trafo e linee



$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

$$\frac{dP_{12}}{dt} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2)\left(\frac{d\delta_1}{dt} - \frac{d\delta_2}{dt}\right)$$

supponendo che V_1, V_2 costanti mentre δ_1 e δ_2 variabili nel tempo.

$$f_1 = f_0 + \frac{1}{2\pi}\frac{d\delta_1}{dt} \qquad f_2 = f_0 + \frac{1}{2\pi}\frac{d\delta_2}{dt}$$

$$2\pi(f_1 - f_2) = \frac{d\delta_1}{dt} - \frac{d\delta_2}{dt}$$

Se le frequenze agli estremi sono diverse $f_1 \neq f_2$ allora

$\frac{dP_{12}}{dt} \neq 0$ cioè P_{12} variabile nel tempo.

se $f_1 > f_2$ allora $\cos(\delta_1 - \delta_2) > 0 \Rightarrow \frac{dP_{12}}{dt} > 0$

A regime $\frac{dP_{12}}{dt} = 0$ cioè $f_1 = f_2$

In una situazione in cui ω_K sono diverse tra loro, in genere, il passaggio alla situazione di regime avviene in modo

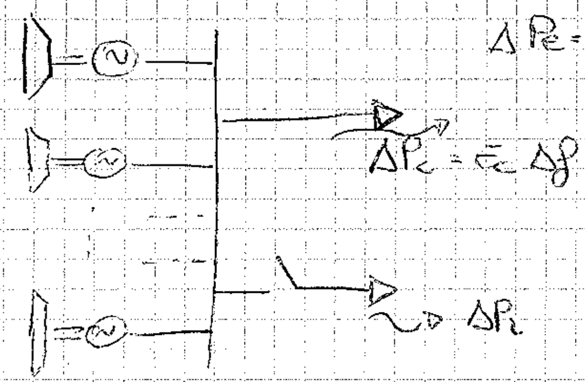
- veloce
- oscillatorio (durata 1-2 secondi)

Ne segue che possiamo ignorare i transitori e fare l'ipotesi di sincronismo tra i generatori

$$\omega_K = \omega(t) = 2\pi f(t) \qquad \forall K$$

Sistema con N generatori.

Trascuriamo gli effetti della rete.



$$\Delta P_e = \Delta P_L + E_c \Delta f$$

Ogni generatore avrà la sua potenza elt. P_{ek}; ogni turbina avrà potenza meccanica P_{mk}; la velocità di rotazione sarà ω_k uguale per tutti.

$$M_k \frac{d}{dt} \Delta f = \Delta P_{mk} - \Delta P_{ek} \qquad \forall k$$

$$\Delta f = \frac{\Delta \omega_k}{2\pi} = \frac{\Delta \omega}{2\pi}$$

$$s M_k \Delta f = \Delta P_{mk} - \Delta P_{ek}$$

definiamo $\Delta P_e = \sum_{k=1}^{N} \Delta P_{ek} = \Delta P_L + E_c \Delta f$

Supponiamo ci siano $n < N$ generatori che operano con regolatore di velocità

$$\Delta P_{m_k} = G_{f k} (\Delta f'_{rif k} - \Delta f) \qquad k = 1 \ldots n$$

$$\Delta P_{m_k} = 0 \qquad k = n+1, \ldots, N \qquad G_{f_k} = 0$$

Solo n generatori partecipano alla regolazione primaria

$$\Delta P_m \stackrel{def}{=} \sum_{k=1}^{n} \Delta P_{mk}$$

$$\Delta f_{rif_k} = \Delta f_{rif} \qquad \forall K$$

$$\Delta P_m = G_f (\Delta f_{rif} - \Delta f)$$

G_f è funzione di trasferimento del sistema

$$G_f = \sum_{k=1}^{n} G_{f k}$$

$E_{P_k} = G_{f_k}(0)$ energia regolante permanente al nodo K

$E_{T_k} = G_{f_k}(\infty)$ energia regolante transitoria del nodo K

$E_p = g_f(0) = \sum_{K=1}^{n} g_{fK}(0) = \sum_{K=1}^{n} E_{pK}$ energia regolante permanente del sistema

$E_t = g_f(\infty) = \sum_{K=1}^{n} g_{fK}(\infty) = \sum_{K=1}^{n} E_{TK}$ energia regolante transitoria del sistema

Utilizziamo le equazioni meccaniche dei generatori

$$M_K \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_{mK} - \Delta P_{eK} \quad \text{con} \quad K = 1, \dots, N$$

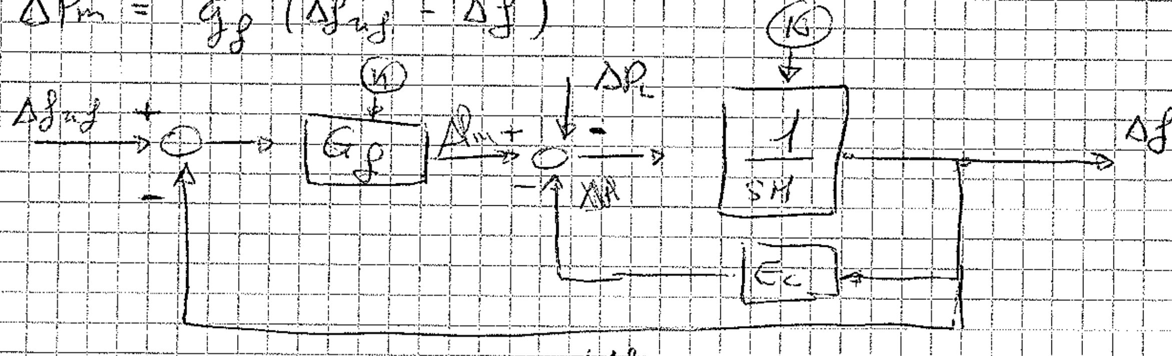
$$\sum_{K=1}^{N} M_K \frac{d\Delta f}{dt} = \sum_{K=1}^{n} \Delta P_{mK} - \sum_{K=1}^{N} \Delta P_{eK}$$

definiamo $\quad M = \sum_{K=1}^{N} M_K = \sum_{K=1}^{N} \frac{T_{aK} P_{NK}}{f_0}$

$$T_a \stackrel{def}{=} \frac{M f_0}{\sum_{K=1}^{N} P_{NK}} = \frac{\sum_{K=1}^{N} T_{aK} P_{NK}}{\sum_{K=1}^{N} P_{NK}}$$

il tempo di avviamento del sistema è la media pesata dei tempi di avviamento dei singoli generatori usando come pesi le potenze nominali.

$$\Delta P_e = \Delta P_L + E_c \Delta f$$
$$\Delta P_m = G_f (\Delta f_{rif} - \Delta f)$$



$$\Delta P_{eK} = \Delta P_{mK} - \underbrace{M_K \frac{d\Delta f}{dt}}_{\frac{dW_K}{dt}}$$

$\frac{dW_K}{dt}$ variazione di energia cinetica del generat. K ~~rottore~~

Per quanto riguarda i generatori e potenza erogata concorrono solo transitoriamente con la variazione di energia cinetica

<u>Comportamento a regime</u> $\quad \Delta P_L \neq 0 \quad$ e $\quad \Delta f_{rif} = 0$

$\Delta P_m = \Delta P_e$
$$\begin{cases} \Delta P_m = -E_p \, \Delta f \\ \Delta P_e = \Delta P_L + E_c \, \Delta f \end{cases}$$

$$-E_p \, \Delta f = \Delta P_L + E_c \, \Delta f \Rightarrow \Delta f = -\frac{\Delta P_L}{E_p + E_c}$$

$$\Delta P_m = \frac{E_p \, \Delta P_L}{E_p + E_c} = \Delta P_e \ (\text{a regime})$$

Ripartizione della potenza a regime

$$\Delta P_{eK} = \Delta P_{mK} = -E_{pK} \, \Delta f = \frac{E_{pK}}{E_p + E_c} \Delta P_L \qquad K = 1, \dots, n$$

$$\Delta P_{eK} = \Delta P_{mK} = 0 \qquad K = n+1, \dots, N$$

$$\frac{\Delta P_{eK}}{\Delta P_e} = \frac{\Delta P_{mK}}{\Delta P_m} = \frac{E_{pK}}{E_p} \qquad K = 1, \dots, n$$

La ripartizione è quindi proporzionale all'energia regolante permanente

$$E_{pK} = \frac{P_{NK}}{b_{pK} \cdot f_0}$$

$$\Delta P_{mK} = \Delta P_{eK} \propto E_{pK} \propto \frac{P_{NK}}{b_{pK}}$$

Se i generatori hanno lo stesso statismo la ripartizione è proporzionale alla potenza nominale. Questa è una regolazione ottimale ed è il motivo per cui si cerca di avere i generatori con un unico valore di statismo.

Ripartizione della potenza elettrica nei "primi istanti"

ΔP_e è a gradino

inizialmente $\Delta P_{mK} = 0$ perché non abbiamo variazioni di f.

Ne segue che $\Delta P_{eK} = -M_K \dfrac{d\Delta f}{dt}$.

$$\Delta P_e = -M \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_L$$

$$\frac{\Delta P_{eK}}{\Delta P_e} = \frac{\Delta P_{eK}}{\Delta P_L} = \frac{M_K}{M}$$

La ripartizione iniziale della potenza elettrica è proporzionale a M_K

$$M_K = T_{aK} \frac{P_{NK}}{f_0}$$

$\Delta P_{eK} \propto T_{aK} P_{NK}$ se i tempi di avviamento sono uguali allora la ripartizione è proporzionale alla taglia dei generatori.

Ripartizione transitoria della variazione di P_m

Nei "primi istanti" possiamo approx G_g con $g_r(\infty) = E_T$
la risposta iniziale

$$\Delta P_{mK} = -E_{TK} \Delta f$$
$$\Delta P_m = -E_T \Delta f$$

$$\frac{\Delta P_{mK}}{\Delta P_m} = \frac{E_{TK}}{E_T} \quad \text{proporzionale a } E_{TK}$$

Nel nostro modello G_{fK} hanno uno zero e un polo. Quindi
$E_{TK} = E_{pK} \frac{T_{zK}}{T_{pK}}$ (T costanti di tempo). Quindi

$$\Delta P_{mK} \propto \frac{T_{zK}}{T_{pK}} \frac{P_{NK}}{b_{pK}}$$

Se lo statismo e le costanti di tempo sono uguali per tutti i generatori $\Delta P_{mK} \propto P_{NK}$. Se solo le costanti di tempo sono uguali per tutti i generatori allora $\Delta P_{mK} \propto \frac{P_{NK}}{b_{pK}}$ come nel caso a regime.

Ripartizioni

- $\frac{dW_K}{dt} \simeq \Delta P_{eK} \propto T_{aK} P_{NK}$ nei "primi istanti" successivi a ΔP_L su tutti gli N generatori
- $\Delta P_{mK} \propto E_{TK} \propto \frac{T_{zK} P_{NK}}{T_{pK} b_{pK}}$ nei "primi istanti" successivi all'intervento del regolatore di velocità per gli n generatori
- $\Delta P_{eK} = \Delta P_{mK} \propto E_{pK} \propto \frac{P_{NK}}{b_{pK}}$ a regime sugli n generatori che partecipano alla regolazione primaria.

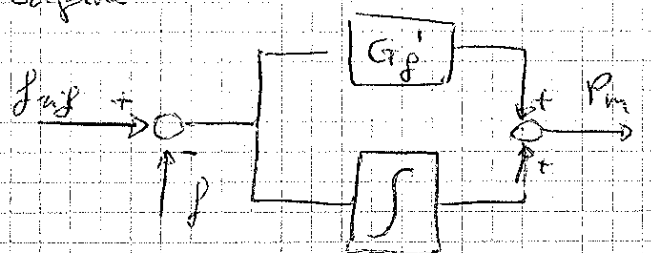
Prestazioni della regolazione primaria

Durante il transitorio Δf deve essere contenuta e P_m deve adeguarsi rapidamente alla potenza elettrica richiesta dal carico.
Si ha inoltre un errore residuo sulla frequenza perché

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{E_p + E_c}$$

Ne segue che la regolazione primaria non è molto precisa.
Si potrebbe pensare che per avere buona precisione sia sufficiente avere ε_p elevato (cioè avere basso statismo).
Un altro metodo potrebbe essere inserire un polo nell'origine (rendere $\varepsilon_p \to \infty$). Tutto ciò non è possibile per motivi di ripartizione. Inoltre il nostro modello dinamico non tiene conto di poli ad alta frequenza. ~~Quindi non tiene conto di~~
Tuttavia l'aspetto principale è la ripartizione.

Supponiamo quindi di avere 2 generatori e G_F con polo nell'origine



~~Poiché~~ In generale i riferimenti di frequenza non sono perfettamente uguali tra i due generatori. Supponiamo pertanto che

$$f_{rif_1} > f_{rif_2}$$

Se le frequenze di riferimento sono diverse è impossibile ottenere in entrambi i riferimenti errore di velocità nullo. Ne segue che dei due generatori ne prevale uno cioè porta la frequenza del sistema esattamente al suo riferimento. L'errore all'altro generatore sarà $f_{rif_2} - f = f_{rif_2} - f_{rif_1} < 0$. In questo caso il generatore 2 si porta a lavorare al minimo per opporsi al generatore 1 che ruota più veloce. Ne segue che un generatore lavora al minimo.
Se prevale il generatore $f = f_{rif_2} < f_{rif_1}$ il generatore 1 apre le valvole per cercare di aumentare la velocità. Ne segue che si ha un generatore che lavora alla potenza max.
In pratica si ha che le ripartizioni di potenza sono totalmente indeterminate e dipendono dagli errori del riferimento.

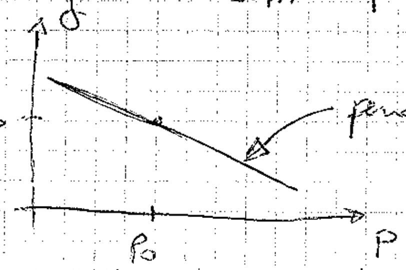
Riassumiamo le criticità della regolazione primaria

1) $\Delta f = -\dfrac{\Delta P_L}{E_p + E_c}$

2) Riserva

a regime $\Delta P_e = \Delta P_m = -E_p \Delta f$ $\qquad f = f_0 - \dfrac{P - P_0}{E_p}$

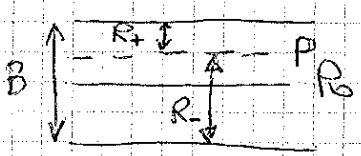
$\Delta P_m = P - P_0$



caratteristica statica

$P_0 \rightarrow$ potenza generata programmata

In ogni istante il generatore ha un valore di P_0 previsto. Il regolatore ha una banda limitata, per tanto ci si muove in un intervallo B centrato in P_0 che è la banda di regolazione primaria. B è dell'ordine di qualche % della potenza nominale.



$R_+ = P_0 + \dfrac{B}{2} - P$ riserva a salire

$R_- = -\left(P_0 - \dfrac{B}{2}\right) + P$ riserva a scendere

I valori programmati sono dei valori medi. Ne segue che le riserve possono esaurirsi. Le bande sono utilizzate per non discostarsi troppo dalla situazione ottimale. L'obiettivo è quindi far variare il meno possibile la frequenza per avere sempre il max della banda disponibile. Questo obiettivo viene raggiunto dalla regolazione primaria e secondaria.

Regolazione Secondaria

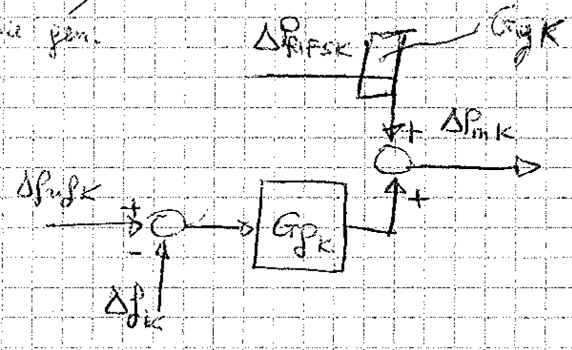
La regolazione secondaria è centralizzata. Si ha un unico regolatore secondario che agisce su un numero di regolatori che appartengono ad un'area del sistema.

La regolazione secondaria è una regolazione di

frequenza. La frequenza viene misurata con un frequenzimetro.
La regolazione secondaria è una regolazione lenta rispetto alla primaria. (decine di minuti vs. decine di secondi).
Se consideriamo un generico sistema con N generatori di cui n partecipano alla regolazione primaria, avremo un numero m << n di generatori che partecipa alla regolazione secondaria. Gli m generatori partecipano sicuramente anche alla generazione primaria.

m generatori $K = 1 \dots m$ partecipano a entrambe le relazioni
n-m generatori $K = m+1, \dots, n$ partecipano alla reg. 1ª ria
N-n generatori $K = n+1, \dots, N$ potenza costante

$\Delta P_{RIF\,S\,K}$ è il comando che entra come parametro aggiuntivo nella regolazione di ω.
secondaria
indice gen.



ΔP_{mK} è variazione di potenza meccanica

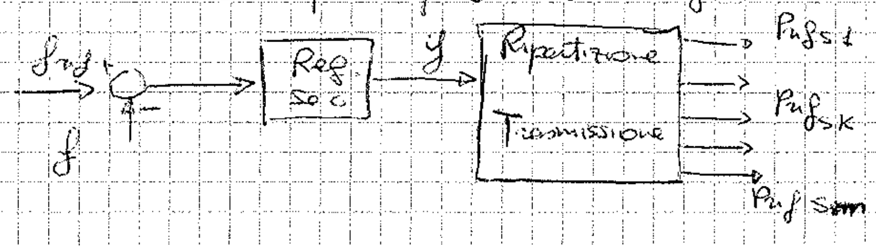
$$\Delta P_{mK} = \underbrace{\Delta P_{PK}}_{\text{regolazione primaria}} + \underbrace{\Delta P_{SK}}_{\text{regolazione secondaria}}$$

$$\Delta P_{PK} = G_{fK}\left(\Delta f_{RIFK} - \Delta f_K\right) \qquad \Delta P_{SK} = G_{yK}\,\Delta P_{RIFSK}$$

$$G_{fK}(0) = E_{pK} \qquad G_{fK} \simeq E_p \frac{1+sT_{zK}}{1+sT_{pK}}$$

$$G_{yK}(0) = 1 \qquad G_{yK} = \frac{G_{fK}}{E_p} \simeq \frac{1+sT_{zK}}{1+sT_{pK}}$$

Schema di principio del reg. secondario



y: è la potenza complessivamente richiesta agli m generatori soggetti alla regolazione secondaria

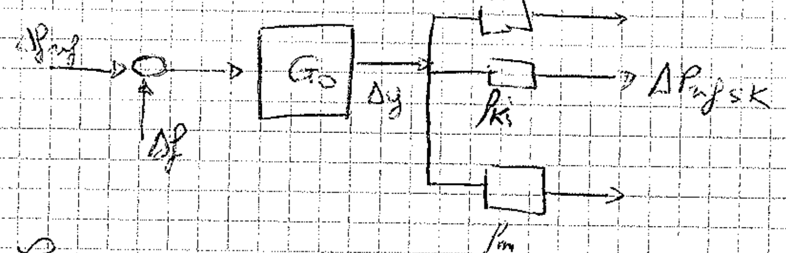
La funzione di ripartizione sarà

$$P_{rif\,sk} = \rho_k\, y \qquad \text{con} \quad \rho_k > 0 \quad e \quad \sum_{k=1}^{m} \rho_k = 1$$

$$y = \sum_{k=1}^{m} P_{rif\,sk}$$

il regolatore secondario è digitale. il campionamento è fatto, tipicamente la misura di frequenza viene fatta con $\Delta t = 1\,s$.

Ignoriamo i ritardi di trasmissione.



Lo scopo della regolazione secondaria è annullare l'errore lasciato dalla regolazione primaria.

Se consideriamo costante il riferimento $f = f_{rif}$ allora vogliamo che se $\Delta f_{rif} = 0$ anche $\Delta f = 0$. È sufficiente aggiungere un polo nell'origine. Di solito i regolatori sono di tipo P.I. Noi considereremo solo la parte integrale.

$$G_o(s) = \frac{K_o}{s}$$

Modello aggregato del nostro sistema:

$$\Delta P_S = \sum_{k=1}^{m} \Delta P_{sk} = \sum_{k=1}^{m} G_{yk}\, \Delta P_{rif\,sk} = \sum_{k=1}^{m} G_{yk}\, \Delta y\, \rho_k =$$

$$= G_y\, \Delta y$$

$$G_y = \sum_{k=1}^{m} \rho_k\, G_{yk}$$ media pesata con peso ρ_k delle funzioni di trasferimento G_{yk}

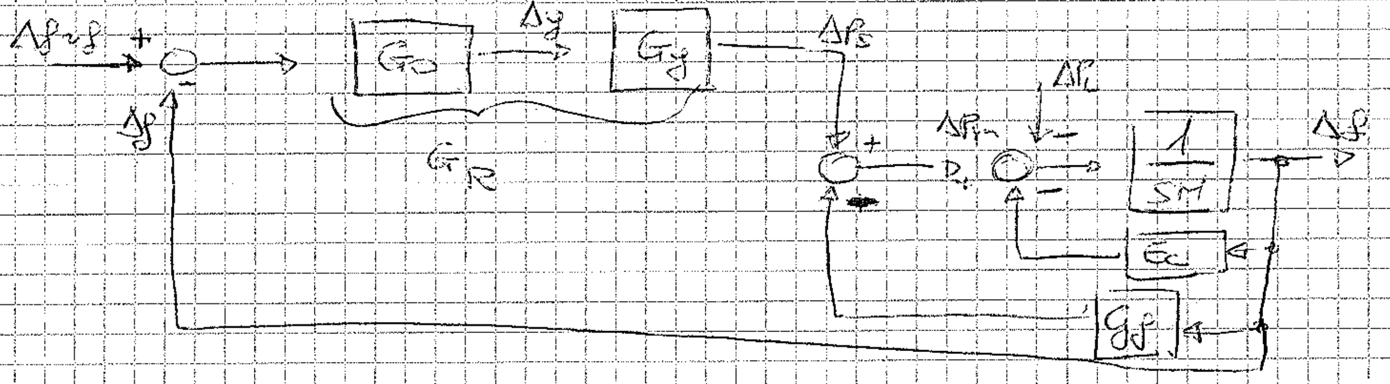
$$G_y(0) = \sum_{k=1}^{m} \rho_k\, G_{yk}(0) = 1$$

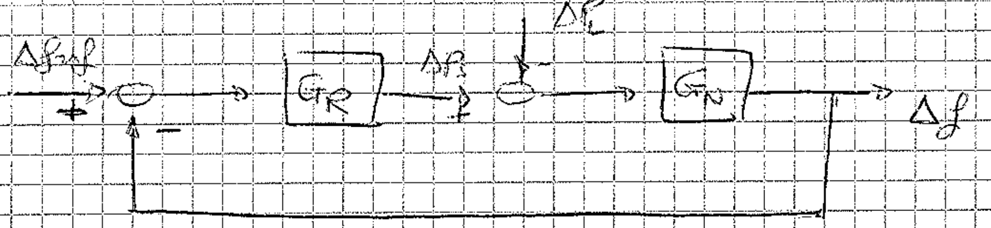
$$\Delta P_p = \sum_{k=1}^{n} \Delta P_{pk} = \sum_{k=1}^{n} G_{fk}\,(\Delta f_{rif} - \Delta f)$$

Supponiamo che $\Delta f_{rif} = 0 \quad \forall k$

$$\Delta P_p = \left(-\sum_{k=1}^{n} G_{fk}\right)\Delta f = -G_f\,\Delta f \qquad G_f = \sum_{k=1}^{n} G_{fk}$$

$$\Delta P_m = \sum_{k=1}^{n} = \Delta P_p + \Delta P_s$$





$$G_R = G_o(s)\cdot G_y(s)$$

$$G_N = \frac{\Delta f}{\Delta P_s - \Delta P_L} = \left(\frac{\Delta f}{\Delta P_L}\right)_{\Delta P_s = 0} = \frac{1}{\frac{1}{G} + H}$$

$$G = \frac{1}{sM} \qquad H = E_c + G_f$$

$$G_N = \frac{1}{\underbrace{sM}_{-\frac{\Delta N}{\partial t}} + \underbrace{G_f}_{\Delta P_c} + \underbrace{E_c}_{\Delta P_m}} \qquad G_N(0) = \frac{1}{E_p + E_c}$$

<u>Comportamento a regime</u>

$\Delta P_L \qquad \Delta f_{rif} = 0$

G_o ha polo nell'origine cioè $G_o(0) \to \infty$

questo implica $\Delta f - \Delta f_{rif} = 0$

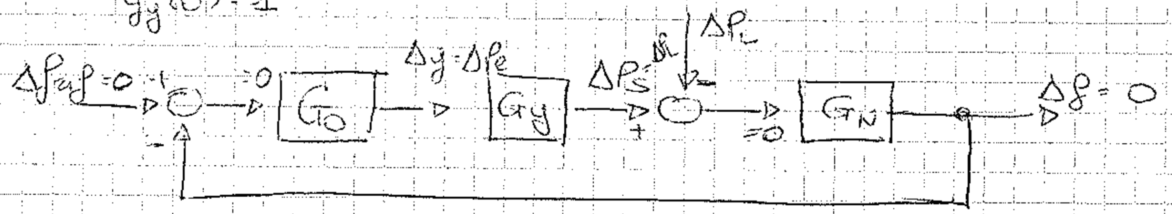
$$\Delta P_m = \Delta P_e + \Delta P_L + \underbrace{\cancel{E_c\,\Delta f}}_{=0 \text{ perché } \Delta f = 0}$$

Quindi la variazione di potenza è esattamente uguale alla variazione di carico

$\Delta P_m = \Delta P_p + \Delta P_s$

$\Delta P_p = G_f \, \Delta f = -E_p \, \Delta f = 0$ a regime non interviene la regolazione primaria ($\Delta P_p \neq 0$ solo in transitorio)

$$\left.\begin{array}{l} \Delta P_s = \Delta P_m - \Delta P_p = \Delta P_L \\ \Delta P_s = \underset{\substack{\downarrow \\ G_y(0)=1}}{G_y} \, \Delta y = \Delta y \end{array}\right\} \Delta y = \Delta P_L$$



Ripartizione tra i generatori a regime

$\Delta P_{mk} = \Delta P_{ek} = \Delta P_{pk} + \Delta P_{sk}$

$\Delta P_{pk} = -\epsilon_p \, \Delta f = 0$ perché $\Delta f = 0$ (regime) $\forall k = 1, \dots, n$

$\Delta P_{sk} = \underbrace{G_{yk}(0)}_{1} \rho_k \cdot \Delta y = \rho_k \, \Delta P_L \quad \forall k = 1, \dots, m$

Quindi a regime avremo la situazione:

$\Delta P_{mk} = \rho_k \Delta P_L \quad k = 1, \dots, m$

$\Delta P_{mk} = 0 \quad k = m+1, \dots, N$

ΔP_L è ripartito tra gli m generatori ed è in parti proporzionali a ρ_k

Slack distribuito

Si è detto che $P_{Gk} = \underbrace{P_{Gk0}}_{\text{termine costante assegnato}} + \underbrace{\alpha_k}_{\text{variabile di bilanciamento}} \Delta P_G$

α_k era tale che $\sum \alpha_k = 1$

Possiamo definire α in 3 modi:

1) $\alpha_k = \dfrac{M_k}{M}$ $\forall$ generatori (N)

2) $\alpha_k = \dfrac{\epsilon_{pk}}{\epsilon_p}$ sugli n generatori della regolazione primaria

3) $\alpha_k = \rho_k$ per gli m generatori che partecipano alla regolazione secondaria.

Nel 1° caso $\alpha_k \propto -\frac{df}{dt}$

Nel 2° caso $\alpha_k \propto -\Delta f$ (a regime)

Nel 3° caso ~~α_k~~ $\Delta P_G = \Delta P_S$

Ricordiamo che ΔP_G è una incognita.

Nel primo caso ΔP_G viene ripartito in base all'inerzia del generatore (rappresenta prima che intervenga la reg primaria)

Nel 2° ΔP_G è ripartito tra i generatori che partecipano alla regolazione primaria a regime.

Nel 3° caso rappresentiamo il raggiungimento del regime nella regolazione secondaria.

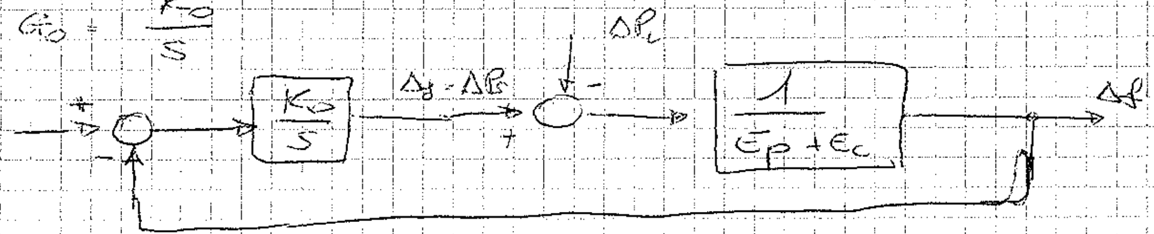
<u>Comportamento dinamico della regolazione secondaria</u>

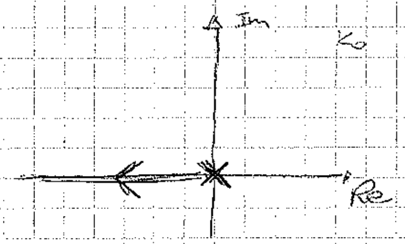
Consideriamo solo la dinamica lenta introdotta dal generatore secondario, cioè

$$G_N(s) = \frac{1}{sM + E_c + G_p(0)} \simeq G_N(0) = \frac{1}{E_p + E_c}$$

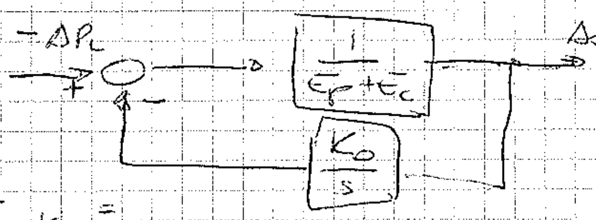
$G_y(s) \simeq G_y(0) = 1$ stesso ragionamento che per G_N

$G_0 = \frac{K_0}{s}$





$\Delta P_L \neq 0$, $\Delta f_{rif} = 0$



$$\frac{\Delta f}{\Delta P_L} = -\frac{1}{E_p+E_c+\frac{K_0}{s}} = \frac{-s}{(E_p+E_c)s+K_0} = -\frac{s/K_0}{\frac{E_p+E_c}{K_0}s+1}$$

$T_0 = \frac{E_p+E_c}{K_0}$ costante di tempo (dinamica lenta) della reg. secondaria

Come si può notare $T_0 \propto \frac{1}{K_0}$ - In genere si usa
$T_0 = 150 \div 100$ s (1 ÷ 2 minuti) (83)

$$T_0 = \frac{E_p + E_c}{K_0} \simeq \frac{E_p}{K_0}$$

$t \to \infty \qquad s \to 0 \qquad \frac{\Delta f}{\Delta P_L}(0) = 0$

$t \to 0^+ \qquad s \to \infty \qquad \frac{\Delta f}{\Delta P_L}(\infty) = -\frac{1}{E_p + E_c} \qquad \Delta f = -\frac{\Delta P_L}{E_p + E_c}$

Risposta al gradino $\Delta P_L > 0$

$\Delta f \qquad \Delta P_p \qquad \Delta P_s$

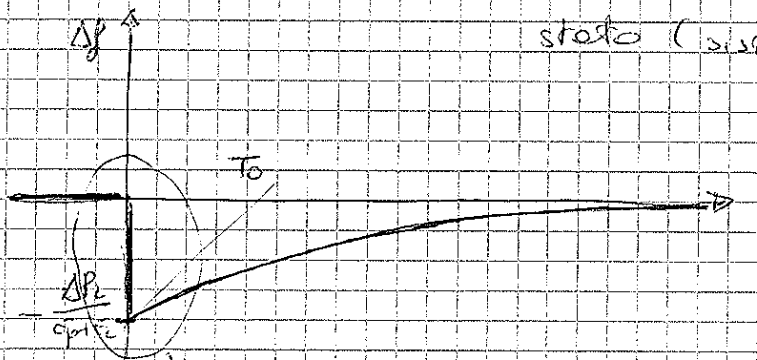
$t \to \infty \qquad \Delta f = 0 \qquad \Delta P_p = -E_p \Delta f = 0 \qquad \Delta P_s = \Delta P_L$

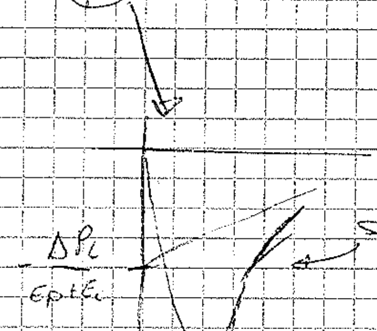
$t \to 0^+ \qquad \Delta f = -\frac{\Delta P_L}{E_p + E_c}$ NOTA Δf non è più variabile di stato

$\Delta P_p(0+) = -E_p \Delta f = + \frac{E_p \Delta P_L}{E_p + E_c}$

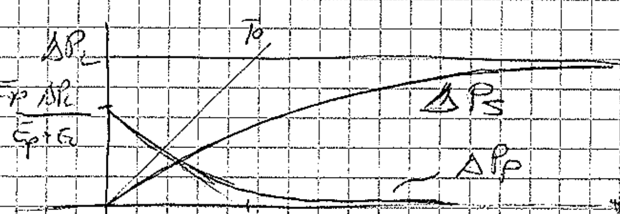
$\Delta P_s(0+) = 0$ perché ΔP_s è l'unica variabile di stato (sistema 1° ordine).

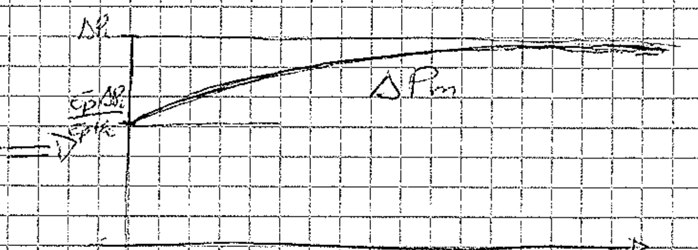
Regime $(4 \div 5) T_0 \sim (5 \div 10)$ m





se consideriamo il modello completo (regol. 1ª ria + 2ª ria)





Dopo l'intervento della regolazione primaria (che contiene la variazione di f) la regolazione secondaria porte un lento ritorno a $\Delta f = 0$. Questo comporta ci sia una ridistribuzione della potenza meccanica tra reg primaria e secondaria.

Al singolo generatore accade:

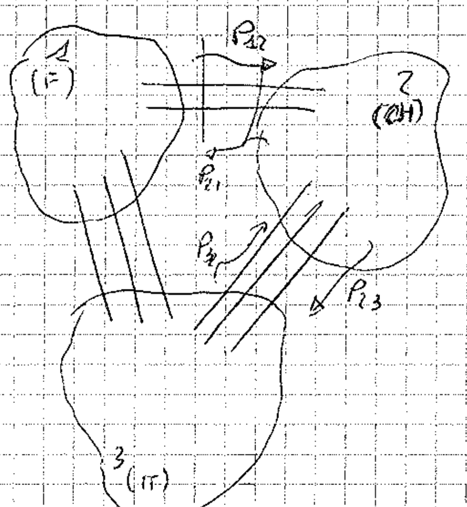
$\Delta P_{m_K} = -\epsilon_{pK} \Delta f + \rho_K \Delta P_S \qquad K = 1, \dots, m$

$\Delta P_{m_K} = -\epsilon_{pK} \Delta f \qquad K = m+1, \dots, n$

$\hookrightarrow$ aumenta la potenza meccanica durante la reg. primaria. Poi la potenza torna a scendere fino a ristabilizzare la riserva.

$\rightarrow$ aumenta la potenza meccanica. Il termine dovuto alla regolaz. secondaria $\uparrow$, mentre quello dovuto alla regolaz primaria diminuisce. Di solito prevale $\rho_K \Delta P_S$. Ne segue che P_{mK} aumenta.

Il sistema elettrico reale è costituito da un insieme di aree interconnesse.
L'area è una parte della rete elettrica che è gestita dallo stesso gestore (TSO transmission system operator) il TSO italiano è TERNA.
In ogni area è presente un regolatore secondario
Le aree sono connesse tra loro attraverso linee elettriche



Un sistema generale è costituito da N aree diverse.
Le potenze scambiate sono

P_{ij} = somma potenze in uscita dell'area i attraverso le linee che collegano l'area i alla j

Se trascuriamo le perdite nelle linee di interconnessione si ha che $P_{ij} = -P_{ji}$

Definiamo potenza esportata $P_{Ei} = \sum_{j=1}^{N} P_{ij}$ dove

$P_{ii} = 0 \qquad P_{ij} = P_{ji} = 0$ se le aree i e j non sono collegate direttamente.

Nell'esempio in figura:

$$P_{E1} = P_{12} + P_{13}$$

$$P_{E2} = P_{21} + P_{23} = -P_{12} + P_{23}$$

$$P_{E3} = P_{31} + P_{32} = -P_{13} - P_{23}$$

$$P_{E1} + P_{E2} + P_{E3} = \cancel{P_{12}} + \cancel{P_{13}} - \cancel{P_{12}} + \cancel{P_{13}} - \cancel{P_{13}} - \cancel{P_{23}} = 0$$

trascurando le perdite $\sum_{i=1}^{N} P_{Ei} = 0$

È indispensabile regolare:

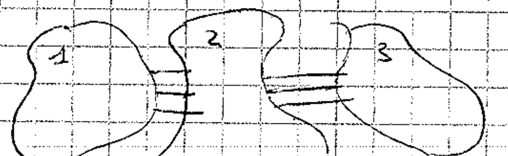
- frequenza
- potenze esportate $\begin{cases} \text{tecnico (sovraccarico delle interconnessioni)} \\ \text{economico (scambi di energia)} \end{cases}$

Con gli ~~m~~ n regolatori secondari delle aree

- $f = f_{ug} = f_0 \quad \rightarrow 1$
- $P_{Ei} = P_{E_{RIF}} \quad \forall i \quad \rightarrow n-1$

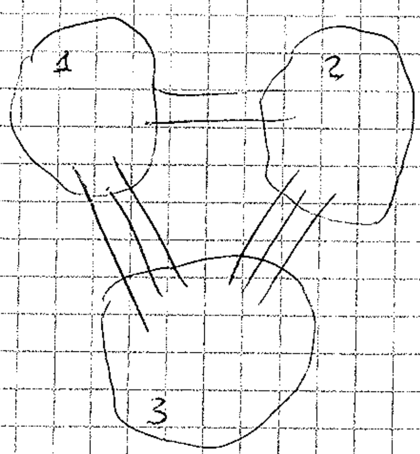
Abbiamo n errori da controllare e regime.

Non possiamo regolare al valore voluto le potenze scambiate. Se il sistema è radiale (assenza di maglie nelle connessioni tra le aree) come in figura le potenze P_{ij} sono



2 (da 1 a 2 e da 2 a 3). In generale $n-1$. Si hanno anche solo 2 potenze scambiate.

Se il sistema è a connessione completa (ciascuna area è connessa a tutte le altre) le P_{ij} sono $\frac{n(n-1)}{2}$. In questo caso 3.

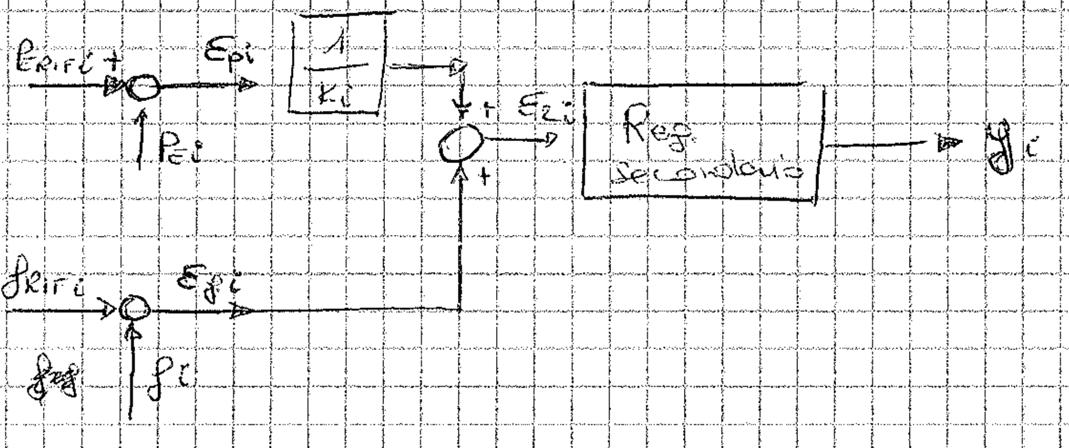


Se ci si trova in un caso intermedio si ha che il numero di P_{ij} vale $n-1+n_{MAGLIE}$.

Nel caso in figura $n-1+n_{MAGLIE} =$

$$3-1+1=3$$

Con la sola regolazione secondaria non si riescono a controllare le potenze scambiate. Per poterle controllare **bisogna** usare i **PST** (possiamo modificare i transiti di P_{ij} a pari potenza esportata).



Abbiamo la teletrasmissione di tutte le potenze attive entranti/uscenti **dall'area** (1 misura ogni 2 secondi).
È necessario combinare i due errori per darli in ingresso al regolatore secondario. Moltiplichiamo ε_{Pi} per $\frac{1}{K_i}$ con $K_i = \left[\frac{MW}{Hz}\right]$.

ε_{Zi} è l'errore complessivo $\varepsilon_Z = \varepsilon_{fi} + \varepsilon_{Pi}\frac{1}{K_i}$. In gergo ε_{Zi} è chiamato errore di rete.
Si può avere un errore complessivo misurato in MW, questo errore è detto Area Control Error (ACE).

$$ACE_i = P_{ERIF\,i} - P_{Ei} + K_i\left(f_{RIF\,i} - f_i\right) = K_i\,\varepsilon_{Zi} \quad [MW]$$

<u>Principio di funzionamento:</u>

a regime (trascurando gli errori di misura) la frequenza è uguale in tutte le aree. ($f_i \neq f_j$ solo in transitorio)

Gli $ACE = 0$ in tutte le aree.

$$\sum_{i=1}^{N} ACE = 0 = \sum_{i=1}^{n} P_{ERIF\,i} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n} P_{Ei}}_{\substack{=0 \\ \text{sempre}}} + \sum_{i=1}^{n} K_i f_{RIF\,i} + \left[\sum_{i=1}^{n} K_i\right] f$$

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{E_{rif_i}} + \sum_{i=1}^{N} K_i f_{rif_i}}{\sum_{i=1}^{N} K_i}$$

I riferimenti non possono essere dati a caso, ma devono essere tutti uguali. Inoltre anche la somma dei $P_{E_{RIFF}}$ deve essere nulla. Pertanto

$$\boxed{f = f_{rif_i}}$$

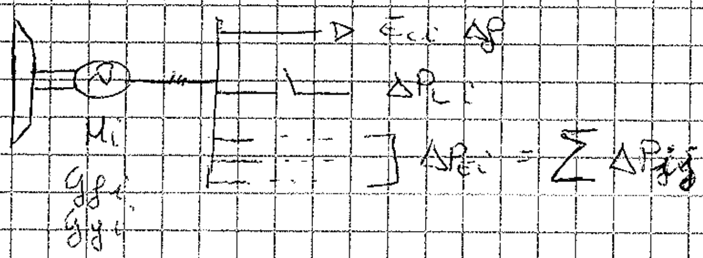
Per quanto riguarda le potenze esportate

$$ACE_i = 0 = P_{E_{RIFF_i}} - P_{E_i} + K_i \underbrace{\cancel{(f_{rif_i} - f_i)}}_{=0} \Rightarrow P_{E_{RIFF_i}} = P_{E_i} \quad \forall i$$

In questo modo riusciamo ad utilizzare n regolatori con polo nell'origine senza avere i problemi "di concorrenza" visti nel caso della regolazione primaria.

<u>Modello dell'area i</u>

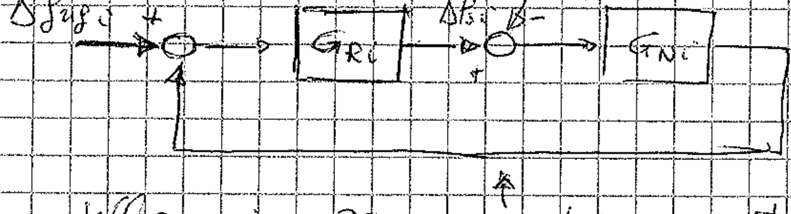
$$\Delta P_{e_i} = \Delta P_{L_i} + E_{c_i} \Delta f_i + \Delta P_{E_i}$$



$$sM_i \Delta f_i = \Delta P_{m_i} - \Delta P_{e_i} \qquad \Delta P_{m_i} = \Delta P_{p_i} + \Delta P_{s_i}$$

$$\Delta P_{p_i} = -G_{f_i} \Delta f_i$$

$$\Delta P_{s_i} = G_{y_i} \Delta y_i = G_{o_i} G_{y_i} \Delta E_{r_i} = G_{R_i} \Delta E_{r_i}$$

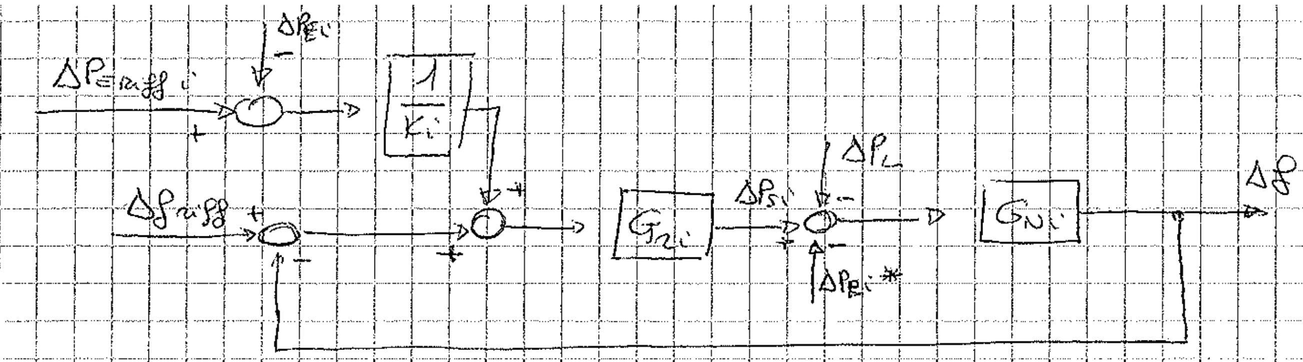


$$G_{R_i} = G_{o_i} G_{y_i}$$

$$G_{N_i} = \frac{1}{sM_i + E_{c_i} + G_{f_i}}$$

modello in assenza di esportazioni

Per considerare l'esportazione dobbiamo tenere conto degli errori e modificare la P_e



ΔP_{Ei} è misurato

ΔP_{Ei}^* è la potenza esportata reale.

<u>Risposta a regime</u> ($\Delta P_{Li} \neq 0$) $\Delta f_{rif\,i} = 0$

$$\left.\begin{array}{l}\Delta f_{riff\,i} = \Delta f_{riff} = 0 \\ \sum_{i=1}^{N} P_{Eriff\,i} = 0\end{array}\right\} \Rightarrow \begin{array}{l}\Delta f_i = 0 \\ \Delta P_{Ei} = 0\end{array} \qquad \forall i$$

Le nostre variazioni di carico non comportano variazioni di f né di potenza esportata.

$$\Delta P_{mi} = \Delta P_{Ei} = \Delta P_{Li} + \underbrace{\cancel{E_{Li}\Delta f_i}}_{=0} + \underbrace{\cancel{\Delta P_{Ei}}}_{=0}$$

$$\left.\begin{array}{l}\Delta P_{mi} = \Delta P_{pi} + \Delta P_{si} \\ \Delta P_{pi} = -E_{pi}\Delta f_i = 0\end{array}\right\} \quad \Delta P_{mi} = \Delta P_{si} = \Delta P_{Li}$$

ΔP_{Li} si suddivide secondo i fattori ρ_k dell'area i

Risposta ΔP_{Li} ($\Delta f_{rif} = 0$ $\quad \Delta P_{ERIF} = 0$)

a regime $\quad \Delta f_i = \Delta f = 0 \qquad \Delta P_{Ei} = 0$

$$\Delta P_{mi} = \Delta P_{Ei} = \Delta P_{Li} =$$

$$\Delta P_{pi} = 0 \qquad \Delta P_{si} = \Delta P_{Li}$$

Determinazione di K_i

$$ACE_i = P_{Erif} - P_{Ei} + K_i\,(f_{RIFF_i} - f_i)$$

Criterio di autonomia transitoria o di non intervento ~~Se $\Delta P_{Li} = 0$~~ della regolazione secondaria

Se $\Delta P_{Li} = 0$ a regime $\Delta P_{si} = 0$

estensione dinamica (anche regime transitorio in aree volute)

$$\Delta P_{si} = G_{Ri}\left(-\Delta f_i - \frac{\Delta P_{Ei}}{K_i}\right)$$

$$\Delta f_i = G_{Ni}\left(\Delta P_{si} - \Delta P_{Li} - \Delta P_{Ei}\right)$$

$$\Delta P_{si} = -G_{Ri}\,G_{Ni}\left(\Delta P_{si} - \Delta P_{Li} - \Delta P_{Ei}\right) - \frac{G_{Ri}\,\Delta P_{Ei}}{K_i}$$

$$\Delta P_{si} = \frac{G_{Ri}\,G_{Ni}\,\Delta P_{Li} + G_{Ri}\,\Delta P_{Ei}\left(G_{Ni} - \frac{1}{K_i}\right)}{1 + G_{Ri}\,G_{Ni}}$$

Se $G_{Ni} = \dfrac{1}{K_i}$

$$\Delta P_{si} = \frac{G_{Ri}\,G_{Ni}\,\Delta P_{Li}}{1 + G_{Ri}\,G_{Ni}}$$ Se $\Delta P_{Li} = 0$ allora $\Delta P_{si} = 0$

$$K_i = \frac{1}{G_{Ni}} = s\,H_i + E_{ci} + g_{fi}$$

Relazione approx

$$K_i = \frac{1}{G_{Ni}(0)} = E_{pi} + E_{ci}$$

Interpretazione fisica regolazione primaria a regime

$\Delta P_{Li} = 0 \qquad \Delta P_{si} = 0$

$$\Delta P_{mi} = \Delta P_{ei} = \underbrace{\Delta P_{Li}}_{=0} + E_{ci}\,\Delta f + \Delta P_{Ei}$$

$$\Delta ACE_i = -\Delta P_{Ei} - K_i\,\Delta f_i$$

$$\Delta P_{Ei} = \Delta P_{mi} - E_{ci}\,\Delta f_i = -E_{pi}\,\Delta f_i - E_{ci}\,\Delta f_i$$

$$\Delta ACE_i = E_{pi}\,\Delta f_i + E_{ci}\,\Delta f_i - K_i\,\Delta f_i$$ Se $K_i = E_{pi} + E_{ci}$ allora

$$\boxed{\Delta ACE_i = 0}$$

Se $\Delta P_{Li} \neq 0$ allora $\Delta ACE_i = \Delta P_{Li}$

Usando questo valore di K_i teniamo conto dell'effetto della regolazione primaria e dell'energia cinetica

Descrizione qualitativa $\Delta P_{Li} \neq 0$ a gradino
$\Delta P_{Lj} = 0 \quad \forall j \neq i$

Fase iniziale $\Delta f_i \neq \Delta f_j$

rapidamente $\Delta f_i = \Delta f_j$ sincronizzazione dei generatori di tutte le aree

Tutte le aree partecipano all'alimentazione di ΔP_{Li}

attraverso:

- energia cinetica dW_m/dt
- regolazione primaria.

Le altre aree partecipano alla regolazione in maniera solo transitoria

Se $\forall j \quad K_j = E_{pj} + E_{cj}$ l'intervento della regolazione secondaria si ha solo nell'area i.

$$\frac{dW_m}{dt} = -M \frac{d\Delta f}{dt} \qquad M = \sum_{i=1}^{n} M_i$$

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{E_p + E_c} \qquad E_p = \sum_{i=1}^{n} E_{pi} \qquad E_c = \sum_{i=1}^{n} E_{ci}$$

$$\frac{d\Delta f}{dt} = -\frac{\Delta P_L}{M}$$

Avere un sistema di dimensione continentale comporta che ha pari ΔP_L si ha un inerzia maggiore e di conseguenza si ha una piccolissima diminuzione di frequenza.

Risposta alle variazioni dei riferimenti

- regolazione delle potenze esportate.

$hp: \quad \Delta P_{Li} = 0 \qquad \Delta f_{riff_i} = 0 \qquad \Delta P_{E_{riff}} \neq 0$

Le variazione di $\Delta P_{E riff_i}$ deve essere tali che

$$\sum_{i=1}^{n} P_{E riff_i} = 0$$

a regime $\Delta f_i = \Delta f_{riff} = 0$ e $\Delta P_E = \Delta P_{E riff_i}$ $\forall i$

$$\Delta P_{m_i} = \Delta P_{e_i} = \underbrace{\Delta P_{L_i}}_{=0} + \underbrace{E_{ci}}_{=0} \Delta f_i + \Delta P_{Ei} = \Delta P_{E riff_i}$$

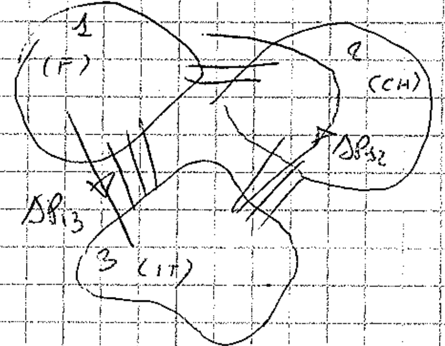
$\Delta P_{mi} = \Delta P_{pi} + \Delta P_{si}$ $\qquad \Delta P_{pi} = -\frac{1}{\rho_i}\underbrace{\Delta f_i}_{=0} = 0$ $\quad$ (87)

ne segue che $\Delta P_{mi} = \Delta P_{si}$

Se c'è una variazione $\Delta P_{E\,rif\,i}$ vuol dire che c'è variazione commerciale di potenza esportata. Nella realtà l'intervento di ΔP_{si} è solo transitorio in quanto per le transizioni commerciali in Europa ci sarà un qualche generatore che verrà ~~aumentato~~ anch'esso la potenza esportata.

$\Delta P_{ij\,vol}$ scambi "commerciali" di potenza tra l'area i e l'area j.

$$\left.\begin{array}{ll} \Delta P_{E\,rif\,i} = \Delta P_{ij\,vol} & >0 \\ \Delta P_{E\,rif\,j} = -\Delta P_{ij\,vol} & <0 \end{array}\right\} \sum_{i=1}^{N} P_{E\,rif\,i} = 0$$



$\Delta P_{13\,vol} > 0$

$\Delta P_{E\,rif\,1} = \Delta P_{13\,vol}$

$\Delta P_{E\,rif\,2} = 0$

$\Delta P_{E\,rif\,3} = -\Delta P_{13\,vol}$

A regime $\Delta P_{E1} = \Delta P_{E\,rif\,1}$ $\quad \Delta P_{E2} = \Delta P_{E\,rif\,2}$ e $\Delta P_{E3} = \Delta P_{E\,rif\,3}$

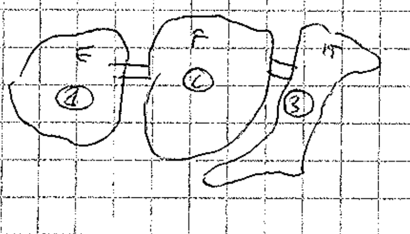
$\Delta P_{E1} = \Delta P_{12} + \Delta P_{13} = \Delta P_{13\,vol}$

$\Delta P_{E2} = -\Delta P_{12} + \Delta P_{23} = 0 \Rightarrow \Delta P_{23} = +\Delta P_{12}$

$\Delta P_{E3} = -\Delta P_{13} - \Delta P_{23} = -\Delta P_{12} - \Delta P_{13}$

L'aumento di produzione dell'area 1 si divide in 2 parti ΔP_{12} e ΔP_{13}. Il ΔP_{12} attraversa l'area 2 e giunge nell'area 3. La suddivisione in ΔP_{12} e ΔP_{13} dipende dalle linee (equazioni di load flow)

In una situazione radiale (commercio area 13)

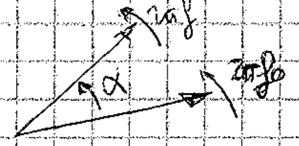


$$\left.\begin{array}{l} \Delta P_{E\,rif\,1} = \Delta P_{13\,vol} \\ \Delta P_{E\,rif\,2} = 0 \\ \Delta P_{E\,rif\,3} = -\Delta P_{13\,vol} \end{array}\right\} \quad \begin{array}{l} \Delta P_{12} = \Delta P_{E\,rif\,1} \\ -\Delta P_{12} + \Delta P_{23} = 0 \\ \Delta P_{32} = \Delta P_{E\,rif\,3} \end{array}$$

Nella realtà le variazioni di potenza esportata sono a rampa.

Risposta alle variazioni di Δf_{rif} (regolazione di f)

Nei sistemi elettrici si tiene d'occhio non solo la frequenza, ma anche l'errore di fase $d = 2\pi \int_0^T (f - f_0)\, dt$



Se l'errore di fase è positivo $f > f_0$ bisogna abbassare la frequenza. Se l'errore di fase è negativo $f < f_0$

Bisogna operare quindi a una frequenza superiore.

In genere le correzioni sono molto modeste

Ipotesi $\quad \Delta P_L = 0 \quad \Delta P_{E\,riff_i} = 0 \quad \Delta f_{RIFF_i} = 0 \quad \forall i$

A regime $\quad \Delta f_i = \Delta f - \Delta f_{rif} \quad \Delta P_{E_i} = 0 \quad \forall i$

$$\Delta P_{mi} = \Delta P_{ei} = \underbrace{\cancel{\Delta P_{Li}}}_{=0} + E_{ci}\, \Delta f_i + \underbrace{\cancel{\Delta P_{ei}}}_{=0} = E_{ci}\, \Delta f_{RIFF}$$

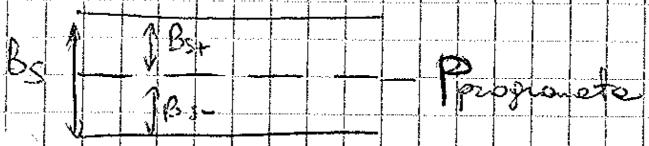
$$\Delta P_{mi} = \Delta P_{pi} + \Delta P_{si} \quad \underbrace{-E_p\, \Delta f_{riff}}_{\Delta P_{pi}} = \Delta P_{pi}$$

$$\Delta P_{si} = P_{mi} - \Delta P_{pi} = (E_{ci} + E_{pi})\, \Delta f_{riff}$$

Se $\Delta f_{riff} > 0$ la regolazione primaria diminuisce la potenza. La regolazione secondaria aumenta di potenza. I generatori con generazione secondaria subiscono la dimin. di potenza dovute alla reg 1^aria e l'aumento di potenza dovuto alla secondaria (di solito pareggia l'aumento di potenza). I generatori con sola reg. primaria diminuiscono di potenza. Ogni area deve provvedere a sé stessa.

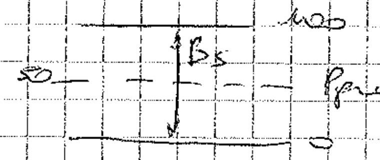
Regolazione terziaria (è di tipo manuale)

1) abbiamo bisogno di ripristinare la riserva della regolazione secondaria



Per ripristinare la Pprogrammata è necessaria una regolazione manuale. La regolazione manuale viene riassorbita dal regolatore secondario che riporta la potenza P_g al valore programmato.

Abbiamo un $y: [0, \dots, 100]$



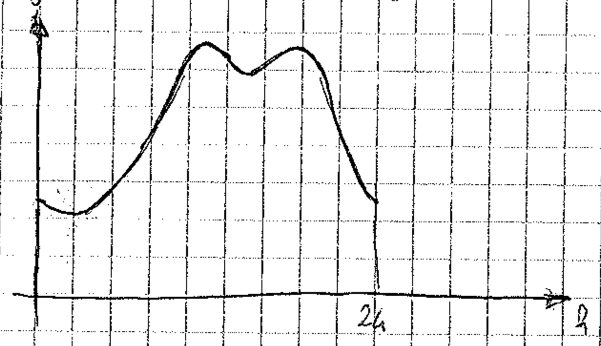
$$B_S = \sum_{i=1}^{m} B_{Sk}$$

Ad esempio se $B_S = 50$ MW il generatore avrà $B_{S+} = B_{S-} = 25$
se il generatore riceve $y = 50$ allora si troverà esattamente su Pprogrammata se riceve 60 dovrà produrre di più.

2) Variazioni dei riferimenti di ΔP_{scambi} e Δf_{rif} (per compensare errore di fase).

3) ΔP_{Gk} per errori accidentali (perdita di generatori, linee, trafo). Sicurezza n-1

Diagramma di carico



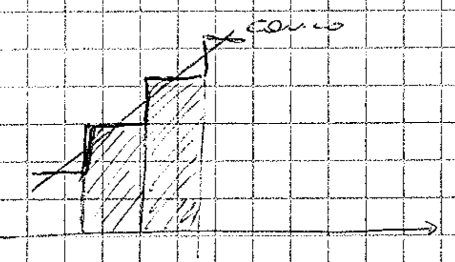
Pmedia su intervalli di 15/30/60 minuti

Se si facessero medie su intervalli più modesti il diagramma avrebbe forti oscillazioni intorno ai valori medi.

Oscillazioni di P intorno ai valori medi. Usando Fourier si possono approx le oscillazioni come somme

di sinusoidi e potenza diversa.
Possiamo individuare le componenti veloci (ω elevate) che non comportano la regolazione (vengono assorbite dall'energia cinetica).
Le componenti lente (bassa ω) vengono seguite dalla regolazione secondaria.
Per componenti a velocità intermedie abbiamo l'intervento della sola regolazione primaria.

Programmi di produzione (discretizzati su base oraria)



Nel mercato del giorno prima vengono venduti i MWh

Il risultato della discretizzazione è che c'è differenza tra carico e generazione). Queste differenze è gestita dalle regolazioni automatiche.

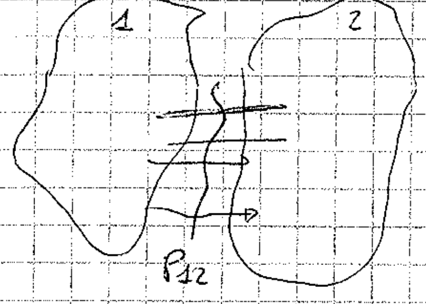
Poiché il diagramma di carico è previsto, non è quello effettivo, si hanno degli errori dovuti alle previsioni.

Controllo in emergenza di frequenza
In emergenza si hanno grosse perturbazioni del bilancio di potenza.

$$M \frac{df}{dt} = P_m - P_e$$

Il sistema europeo sopporta una perturbazione di 3000 MW (cioè la perdita di un impianto di grosse dimensioni) ordine dell' 1% della potenza europea. I 3000 MW sono la riserva primaria (Italia è circa il 7%). Questo vuol dire che ~~la rete~~ deve essere ripristinato il bilancio senza avere distaccamenti. (83)

Si possono avere delle perturbazioni di entità maggiore se la rete viene separata in due o più isole.



Supponiamo $P_{12} > 0$. Se le due aree si separano Nell'isola 1 si ha $\Delta P_L = -P_{12}$. Si ha eccesso di potenza meccanica inizialmente pari a P_{12}. L'eccesso di P_{m_1} provoca un $\frac{df}{dt} > 0$ cioè un aumento di frequenza.

Nell'area 2 $\Delta P_L = P_{12}$ $P_{m_2} < P_{e_2}$. Si eccesso di potenza elettrica pari a P_{12}. Si ha $\frac{df_2}{dt} < 0$ cioè $f \downarrow$.

Esempio: black-out italiano

$P_{N_{IT}} \cong 25000$ MW $\qquad \Delta P \cong |P_m - P_e| \cong 6400$ MW

potenza ~~export~~ importata dall'estero

$\frac{\Delta P}{P_{N_{IT}}} \cong 0{,}25 = 25\%$

In questi casi vengono esaurite le riserve delle regolazioni (in particolare delle riserve primaria)

Supponendo $b_p \sim 5\% \longrightarrow E_p = 0{,}4$ pu/Hz

$\alpha = 0{,}3 = \frac{E_T}{E_p} \longrightarrow E_T = 0{,}12$ pu/Hz

Cioè la variazione di frequenza di 1 Hz

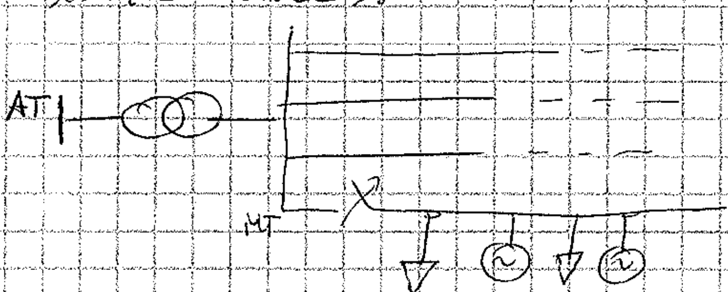
$\Delta P_m \cong 40\%$ di P_N a regime (12% di P_N in transitorio)

Distacco dei generatori: determinato da f troppo elevata o da f troppo bassa.

1) Generatori di ~~tg~~ taglia "rilevante" connessi alla rete AT.
Le soglie di distacco sono 51,5 Hz (52,5 Hz se generatori idroelt) come freq. massima e 47,5 (46,5 Hz generatori idroelettrici) come frequenza minima.

2) Generatori di taglia "piccola" connessi alle reti MT ("generazione distribuita"):
- turbine eoliche
- solare
- idroelt di taglia piccola
- cogenerazione

La differenza rispetto alla "taglia rilevante" è che i generatori sono connessi alla rete MT (magliata ma ad esercizio radiale con un ~~ge~~ interruttore generale ad inizio linea).



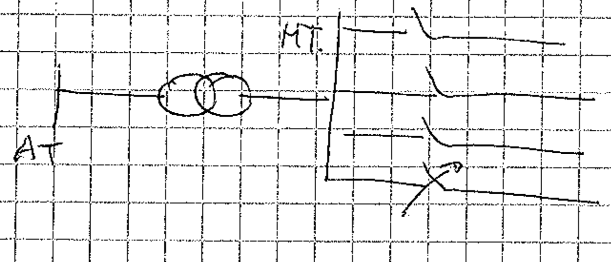
Se si apre l'interruttore generale e si hanno generatori lungo la linea si crea un isola alimentata dai generatori. Per evitare questa situazione è necessario staccare i generatori. In modo tradizionale si usano dei relè sensibili alla tensione e alla frequenza. Questa soluzione poteva andare bene una volta quando c'erano pochi generatori. Se ho soglie ridotte i generatori si staccano in caso di disturbi della rete.

Nel blackout italiano i generatori di piccola taglia producevano più percentuale della potenza che in ~~m~~ caso di funzionamento normale. A fronte della perturbazione del sistema elettrico ~~il~~ questi generatori si sono staccati tutti e hanno contribuito al blackout.

Nel caso di surplus di potenza meccanica il distacco per superamento di frequenza massima è positivo. Nel caso di deficit di potenza meccanica il distacco avviene (03) per ~~potenza~~ frequenze basse. In questo caso si aggiunge il ~~ΔP~~ $\Delta P_m - \Delta P_e$.

Se la frequenza scende sotto il 47,5 Hz si ha il block-out.

Per non trovarsi in situazione di block-out viene effettuato il distacco di carico aprendo gli interruttori



in testa alle linee MT utilizzando relè sensibili alla frequenza e alla sua derivata. Se non possiamo aumentare P_m non si può fare altro che diminuire P_e.

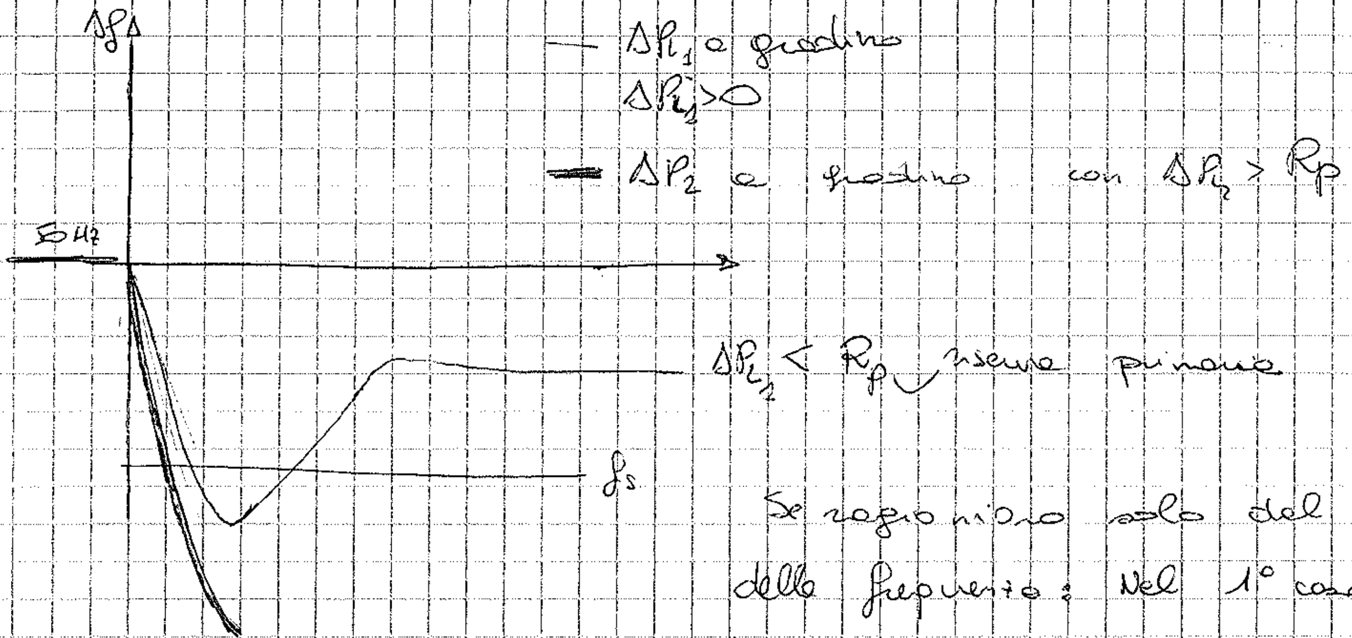
Nel caso del block-out italiano (3 di notte tra sabato e domenica) l'incidenza delle utenze privilegiate (ospedali / utenze di stato) era superiore rispetto alle condizioni ordinarie. Un fattore sfavorevole legato all'ora e che più della metà delle potenza importata veniva assorbita dagli impianti di pompaggio (~3500 MW). Gli impianti di pompaggio sono stati pensati negli anni 60-70 quando si pensava a uno sviluppo nucleare in Italia. Quando si hanno bassi costi di energia elettrica si può pensare di pompare l'acqua. Quando l'energia costa di più posso produrre energia elettrica con l'acqua pompata.

Le pompe degli impianti di pompaggio vengono immediatamente staccate alla minima variazione di f.

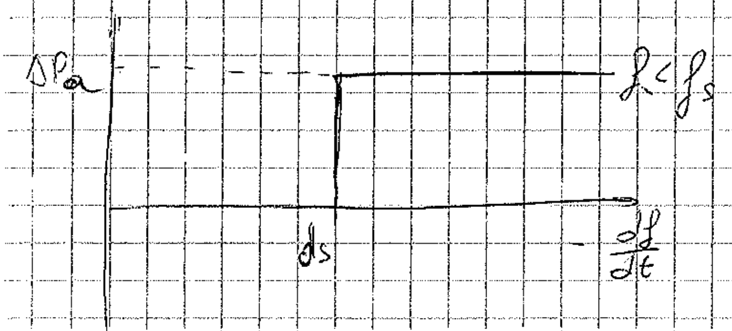
Si usa la derivata della frequenza perché si $M\frac{df}{dt} = P_m - P_e$. Quindi la $\frac{df}{dt}$ è una stima della causa, mentre la f è stima dell'effetto.

Blackout italiano: $\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{M} = \frac{\Delta P}{\frac{T_a}{f_0} P_N} = \frac{6400}{\frac{10}{50} 25000} = 1,28 \ \frac{Hz}{s}$

è stata una caduta a velocità mostruosa



Se ragioniamo solo dal lato della frequenza: Nel 1° caso il distacco di carico è intempestivo e non è bene farlo (situazione transitoria). Nel 2° caso è opportuno staccare. Per distinguere tra i due casi è necessario misurare lo $\frac{df}{dt}$: $\left|\frac{df_2}{dt}\right| > \left|\frac{df_1}{dt}\right|$. Il relè apre l'interruttore se $f \leq f_s$ e se $\left|\frac{df}{dt}\right| > d_s$

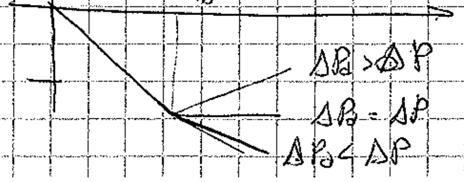


$M \frac{df}{dt} = P_m - P_e = -\Delta P$ $\qquad t = t_a$ distacco ΔP_a

$t < t_a \quad \frac{df}{dt} = -\frac{\Delta P}{M}$

ΔP_a è carico che viene distaccato

$t > t_a \quad \frac{df}{dt} = \frac{\Delta P - \Delta P_a}{M}$



il distacco di carico provoca una variazione della pendenza.

Nel black-out italiano del 2003 il distacco del carico ha funzionato correttamente. Il problema è stato che si sono staccati un mucchio di generatori "piccoli". Inoltre dei circa 50 generatori di taglia rilevante ben 21 si sono staccati in anticipo. (specialmente dei generatori che si sono staccati durante il transitorio). Il grosso dei distacchi è stato dovuto alla parte termica degli impianti termoelettrici.