



Zeno Martini (admin)

REGOLAZIONE PRIMARIA E SECONDARIA

17 December 2007

Abstract

In un precedente articolo [frequenza-potenza](#) si sono considerate le caratteristiche statiche di un gruppo di generazione e della rete alimentata per esaminare la situazione a regime stazionario. A regime si perviene dopo un intervallo di tempo, detto transitorio, in cui le varie grandezze in gioco si assestano con un nuovo valore di potenza generata e trasformata. Questo articolo mostra come si imposta lo studio del transitorio mettendo in evidenza i parametri che lo determinano. Si presuppone la conoscenza del concetto di funzione di trasferimento e della sua rappresentazione mediante la trasformata di Laplace, aiutandosi eventualmente con la lettura di [questo articolo](#). Gli schemi a blocchi illustrati serviranno per la simulazione che sarà proposta in un articolo successivo.

Descrizione qualitativa

In un sistema elettrico a regime c'è perfetto equilibrio tra la potenza generata e la potenza assorbita dagli utilizzatori. La potenza richiesta varia nel tempo, quindi ci deve essere un continuo adeguamento della potenza generata mediante il consumo delle fonti di energia primarie (idraulica e combustibili di varia natura in massima parte) che turbine idrauliche e motori primi termici trasformano in energia meccanica, ed i generatori rotanti in elettrica. Per variare la potenza erogata si deve variare la portata dei fluidi, vettori o fonti dell'energia. Una richiesta di maggiore potenza comporta l'immediato aumento del flusso idrico o del combustibile; una riduzione, una diminuzione. E' quanto si fa nella guida di un'automobile premendo o rilasciando l'acceleratore. La variazione di potenza erogata comporta variazioni della frequenza che però deve essere mantenuta entro limiti prefissati molto ristretti. Per la rete nazionale normalmente è lo 0,1% del valore nominale di 50 Hz. La variazione di frequenza è tanto maggiore quanto più la variazione di potenza è improvvisa e confrontabile con la potenza nominale del generatore. Generalmente si immagina una richiesta a gradino, cioè una variazione istantanea della richiesta, e si studia la variazione della frequenza che ne consegue. La frequenza è determinata dalla velocità di rotazione dei generatori. Una richiesta di potenza produce un iniziale rallentamento, quindi una diminuzione della frequenza. I sistemi di regolazione dei generatori devono adeguare i flussi alle nuove esigenze. Ovviamente i motori primi devono avere la possibilità di produrre la potenza richiesta. La frequenza costante, ad esclusione dei periodi transitori che rappresentano il passaggio da

una situazione di regime ad un'altra, è ottenuta mediante due regolazioni separate: la primaria e la secondaria. Entrambe intervengono sugli organi di controllo del flusso idrico o di combustibile; entrambe cioè, se vogliamo mantenere il paragone con la guida di un'automobile, agiscono sull'acceleratore. La regolazione primaria è pilotata direttamente dalla variazione di frequenza; la secondaria corrisponde ad un comando indipendente dalla frequenza. Nella primaria la variazione della potenza generata è direttamente proporzionale alla variazione di frequenza. La costante di proporzionalità, o guadagno dell'azione proporzionale, è detta energia regolante del gruppo e corrisponde alla potenza che il gruppo mette in gioco per la variazione di frequenza di 1 Hz. Esiste sempre un errore di frequenza a regolazione primaria completata, tanto più piccolo quanto maggiore è l'energia regolante. La quale è tanto maggiore quanto maggiore è la potenza del gruppo, o quanto maggiore è il numero dei gruppi in parallelo che intervengono nella regolazione. L'energia regolante può anche essere modificata, per un dato gruppo, variandone lo statismo, un parametro di regolazione che indica la variazione di frequenza del gruppo, riferita al valore nominale, tra il funzionamento a vuoto ed il funzionamento alla potenza nominale. Diminuendo lo statismo il valore l'energia regolante aumenta. Per migliorare la risposta si possono aggiungere dispositivi accelerometrici, sensibili alla velocità di variazione della frequenza. Con la regolazione secondaria, che determina una variazione della velocità a vuoto del generatore, la variazione di potenza annulla l'errore di frequenza, cioè lo scostamento della frequenza dal valore nominale. In teoria potrebbe essere manuale, ma in genere si fa in modo che dipenda dal persistere dell'errore di frequenza, terminando la sua azione quando l'errore è nullo: è una regolazione integrale. Ritornando al paragone con l'automobile, il guidatore che vuole andare a velocità costante, preme o rilascia l'acceleratore non appena sente i giri del motore scendere o salire (immaginando che le variazioni di velocità non siano tali da richiere il cambio di rapporto) effettuando in tal modo la regolazione primaria; quindi osserva la velocità di marcia ed aziona il pedale fino a che la velocità assume il valore desiderato, portando a termine l'azione della regolazione secondaria. Qualcuno potrebbe obiettare: "Beh, ma perché distinguere? L'acceleratore è unico e la sua posizione finale pure, ed è quella raggiunta osservando la velocità, cioè quella secondaria. Quindi l'automobilista non fa due azioni ma una! ". In effetti le cose stanno così. In un gruppo in cui agiscono entrambe le regolazioni alla fine la variazione di potenza è quella che corrisponde all'intervento della regolazione secondaria. E' una questione soprattutto di prontezza e tempi di intervento: la regolazione primaria è "immediata" mentre la secondaria sistema con calma e definitivamente le cose. In una rete con più gruppi in parallelo, alcuni adibiti alla sola primaria, altri a primaria e secondaria, la regolazione può essere vista come distinta in due fasi. In una prima fase tutti i gruppi partecipano alla regolazione, limitando la variazione di frequenza mediante la variazione della loro potenza generata. In una seconda fase, quando la regolazione primaria può considerarsi conclusa, entra in gioco la regolazione secondaria nei gruppi in cui questa è prevista. La variazione di potenza di tali gruppi è quella effettivamente

immessa nella rete. A questo punto la frequenza ritorna al valore nominale, ed i gruppi che hanno partecipato alla regolazione primaria, tornano ad erogare la stessa potenza che stavano erogando prima dell'evento. L' "acceleratore" dei gruppi con regolazione secondaria subisce uno spostamento definitivo; quello dei gruppi con sola regolazione primaria torna nella posizione di partenza.

Funzione di trasferimento di un gruppo di generazione

Per un gruppo di generazione la grandezza d'uscita è la potenza erogata che, per semplicità, consideriamo uguale a quella generata. La regolazione del flusso di fluido è determinata direttamente dalla variazione della frequenza con cui è erogata la potenza in uscita e può essere modificata in modo indipendente dalla frequenza, che permette di variare la velocità a vuoto del gruppo. Sono perciò due gli ingressi di regolazione: la variazione di frequenza ed il "variagiri", cioè il comando per la variazione della velocità a vuoto. Illustreremo separatamente in che modo la variazione di potenza in uscita è legata al rispettivo ingresso. Nel caso in cui gli ingressi agiscano contemporaneamente, l'uscita sarà la somma delle due.

Regolazione primaria

E' la regolazione della potenza ottenuta in base alla variazione di frequenza. La f.d.t. esprime il legame tra la variazione della potenza in uscita dal generatore, $\Delta P'_i$, e la variazione della frequenza, Δf . La variazione di frequenza si manifesta con un certo ritardo rispetto alla variazione di potenza e la sua entità dipende dalle caratteristiche del gruppo e dalla taratura del sistema di regolazione. E' rappresentabile matematicamente con un [sistema del primo ordine](#):

$$\frac{\Delta P'_i}{\Delta f} = - \frac{K_R}{1 + s \cdot T_R}$$

- **K_R** è l'energia regolante del sistema, detta anche guadagno statico. Indicando con

$$\sigma = \frac{f_0 - f_c}{f_N}$$

il grado di statismo del gruppo, essendo f_0 , f_c , f_N rispettivamente la frequenza a vuoto, a pieno carico e nominale, si ha

$$K_R = \frac{P_N}{\sigma \cdot f_N}$$

con P_N potenza nominale del gruppo.

· T_R è la costante di tempo che stabilisce la durata del transitorio, cioè il tempo necessario per il passaggio da una condizione di regime ad un'altra. Dipende dai parametri costruttivi del gruppo e dalle regolazioni impostate. E' dell'ordine della decina di secondi. Ponendo $s = 0$ si ottiene

$$\frac{\Delta P'_i}{\Delta f} = -K_R$$

che corrisponde alla situazione a regime per una variazione a gradino dell'ingresso. A partire da una situazione di regime, nella quale, ad esempio, il gruppo sta erogando una certa potenza P_1 (inferiore alla sua potenza nominale P_N) ad una certa frequenza f_1 (uguale o molto vicina alla sua frequenza nominale $f_N = 50 \text{ Hz}$), una variazione della potenza immessa

$$\Delta P'_i = P_2 - P_1$$

fa sì che, dopo un intervallo di tempo (che possiamo assumere pari a un multiplo di T_R , ad esempio $4 \cdot T_R$) si porterà ad erogare la potenza P_2 alla frequenza

$$f_2 = f_1 + \Delta f$$

con

$$\Delta f = -\frac{\Delta P'_i}{K_R}$$

Nel caso in cui si adotti un dispositivo accelerometrico, sensibile cioè alla velocità con cui avviene la variazione di frequenza , la f.d.t. diventa

$$\Delta P'_i = -K_R \cdot \frac{1+s \cdot T_1}{1+s \cdot T_R}$$

T_1 : dipende dalle impostazioni del dispositivo accelerometrico, ha le dimensioni di un tempo e consente di rendere più pronta la risposta.

Regolazione secondaria

Con la regolazione precedente a fine transitorio si ha una variazione della frequenza. Per riportare la frequenza al suo valore originario si deve intervenire sul "variagiri",

ottenendo la *regolazione secondaria*. In questo modo si ha un'ulteriore variazione della potenza, $\Delta P_i''$. Indicando con ΔB la variazione del parametro modificabile dei variagiri si può assumere come f.d.t. tra l'uscita $\Delta P_i''$ e l'ingresso ΔB l'espressione

$$\frac{\Delta P_i''}{\Delta B} = \frac{K_R \cdot K_B}{1 + s \cdot T_R}$$

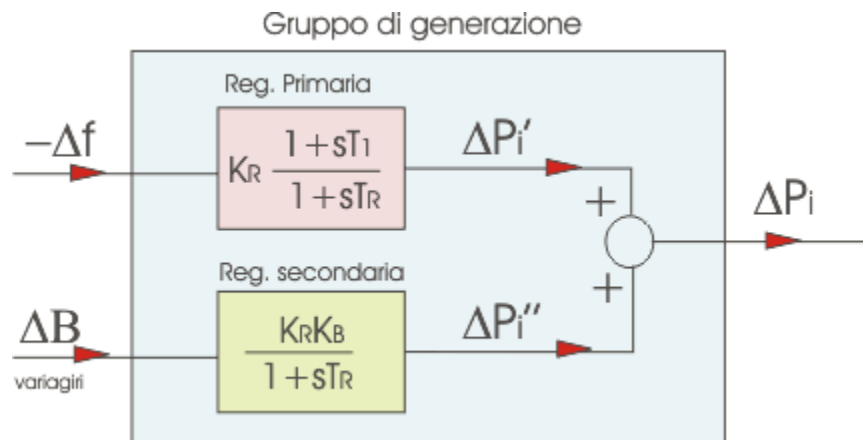
E' formalmente identica alla precedente in quanto si interviene sempre sull'organo di regolazione del flusso idrico o del carburante. K_B è il parametro che permette di definire l'entità della variazione di potenza a regime. Quindi dopo il transitorio, scandito sempre dalla costante di tempo T_R , per una data variazione finita dei variagiri si ha:

$$\Delta P_i'' = K_R \cdot K_B \cdot \Delta B$$

Se regolazione primaria e secondaria agiscono insieme la variazione di potenza in uscita dal gruppo di generazione è la somma:

$$\Delta P_i = \Delta P_i' + \Delta P_i''$$

Possiamo riassumere il tutto nello schema a blocchi di figura Rf.1



Rf. 1

Funzione di trasferimento della rete

La rete è il complesso di apparecchiature e linee alimentate dal gruppo. E' costituita da utilizzatori statici e da macchine rotanti, tra le quali occorre includere lo stesso gruppo di generazione. A regime la potenza immessa dal gruppo P_{i1} , è uguale a quella utilizzata dai carichi, P_{u1} e la frequenza f_1 , che possiamo supporre uguale

alla nominale f_N di 50 Hz, è costante, quindi è costante anche l'energia cinetica immagazzinata in tutte le macchine rotanti. Se si ha una variazione di potenza ΔP , la frequenza subisce una variazione Δf dipendente dalla differenza tra la variazione di potenza immessa in rete dal gruppo, ΔP_i e quella richiesta: $\Delta P_R = \Delta P_i - \Delta P$. La variazione di frequenza determina sia una variazione nella potenza richiesta dai carichi, ΔP_U , sia dell'energia cinetica di tutte le macchine rotanti presenti nella rete, quindi della potenza accelerante, ΔP_a . La variazione di potenza assorbita dai carichi, per piccole variazioni di frequenza, è proporzionale alla variazione di frequenza:

$$\Delta P_U = K_U \cdot \Delta f$$

K_U è detta energia regolante dei carichi. Dipende dal rapporto tra la potenza assorbita P_{U1} , e la frequenza f_1 nel momento della nuova richiesta. Dunque

$$K_U = \alpha \cdot \frac{P_{U1}}{f_1}$$

La costante di proporzionalità α è l'esponente che esprime in che modo la potenza dipende dalla frequenza: (lineare $\alpha = 1$); (quadratica: $\alpha = 2$) ecc. Se esprimiamo con c il rapporto tra la potenza assorbita dai carichi al momento della variazione richiesta, e la potenza nominale del gruppo, quindi

$$c = \frac{P_{U1}}{P_N}$$

e se assumiamo $f_1 = f_N$, si ha:

$$K_U = \alpha \cdot c \cdot \frac{P_N}{f_N} = \alpha \cdot c \cdot \sigma \cdot K_R$$

- K_R è l'energia regolante del gruppo
- σ è il grado di statismo del gruppo

Considerando $\alpha = 2$, $\sigma = 0,05$ essendo $c < 1$ si ha $K_R > 10K_U$ il che dimostra che l'energia regolante del gruppo è abbastanza maggiore di quella dei carichi. La variazione di potenza accelerante risulta invece proporzionale alla velocità con cui varia la frequenza (il che corrisponde a moltiplicare per s la variazione di frequenza):

$$\Delta P_a = K_W \cdot s \cdot \Delta f$$

K_W è una costante dipendente dall'energia cinetica complessiva immagazzinata, che si può esprimere con

$$K_W = \frac{2 \cdot W_1}{f_1}$$

- **W₁** è l'energia cinetica complessiva di tutte le macchine rotanti al momento della variazione. Essa è una funzione del quadrato della velocità di rotazione, quindi della frequenza
- **f₁** la frequenza al momento della variazione, ad esempio quella nominale a 50 Hz : **f₁ = f_N**

Per immagazzinare l'energia cinetica **W₁** è necessario un certo tempo, detto tempo di avviamento della rete e si può porre

$$2 \cdot W_1 = P_N \cdot T_a$$

- **P_N** è la potenza del generatore
- **T_a** tempo di avviamento della rete, dipendente dall'entità e dal tipo di carichi rotanti presenti oltre che dal gruppo stesso. E' in pratica la somma del tempo di avviamento del gruppo **T_{aN}** e di un tempo che dipende dall'avviamento dei carichi

$$T_a = T_{aN} + \frac{1}{P_N} \cdot \sum_{i=1}^n P_{ai} \cdot T_{ai}$$

n: numero di motori presenti nella rete

T_{ai}: tempo di avviamento del singolo motore

P_{ai}: potenza del singolo motore

Orientativamente lo si può ritenere un tempo dell'ordine di dieci - quindici secondi, mentre il tempo di avviamento del gruppo di otto secondi.. Si può allora scrivere (per **f₁ = f_N**)

$$K_W = \frac{P_N}{f_N} \cdot T_a = \sigma \cdot K_R \cdot T_a$$

- **K_R** è l'energia regolante del gruppo
- **σ** è il grado di statismo del gruppo

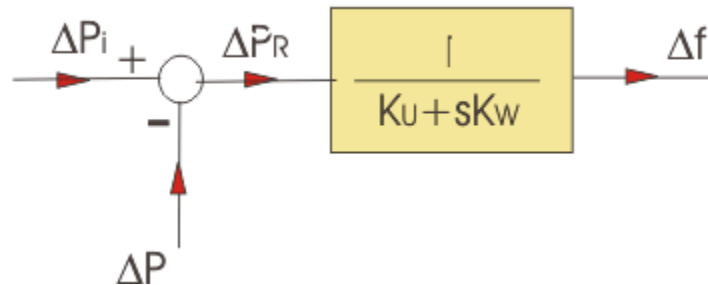
Il bilancio energetico richiede che la differenza tra la nuova potenza richiesta e quella immessa in rete si traduce in una variazione della potenza assorbita dai carichi elettrici preesistenti ed una variazione dell'energia cinetica delle masse rotanti. Quindi si ha

$$\Delta P_R = \Delta P_U + \Delta P_a$$

da cui si ricava la f.d.t. della rete

$$\frac{\Delta f}{\Delta P_R} = \frac{1}{K_U + s \cdot K_W}$$

La figura Rf.2 rappresenta lo schema a blocchi



Rf. 2

La f.d.t. può essere anche scritta nella forma

$$\frac{\Delta f}{\Delta P_R} = \frac{\frac{1}{K_U}}{1 + s \cdot T_W}$$

avendo posto

$$T_W = \frac{K_W}{K_U}$$

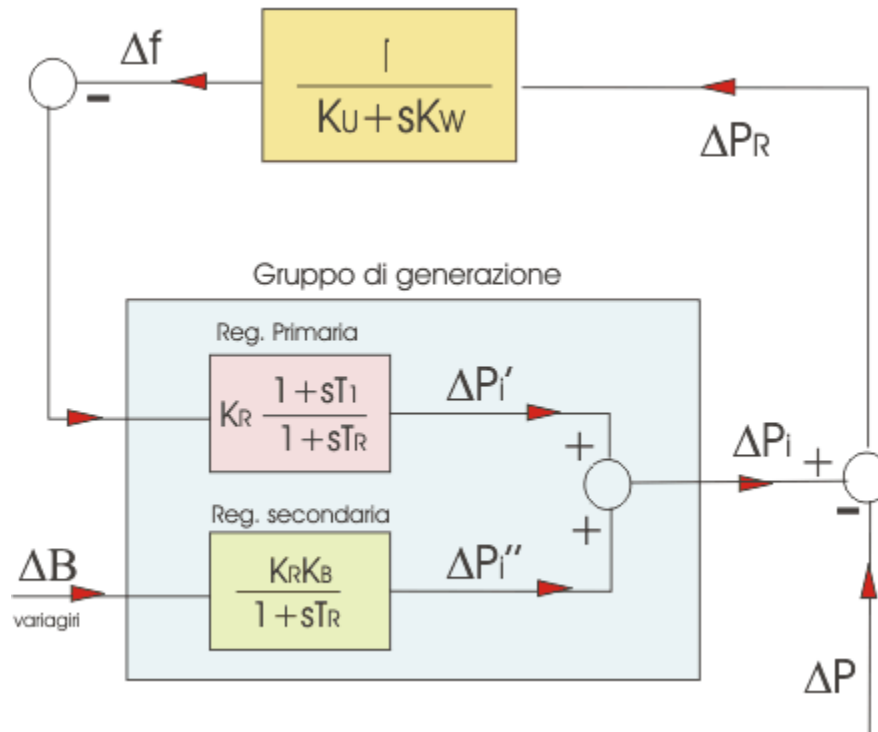
costante di tempo che determina la durata del transitorio. Per $s = 0$ si ha la situazione a regime corrispondente alla variazione finale ΔP_R . Al nuovo regime sarà

$$f_2 = f_1 + \Delta f$$

con

$$\Delta f = \frac{\Delta P_R}{K_V}$$

Unendo i blocchi che rappresentano il gruppo di generazione e la rete si ottiene lo schema di fig. Rf.3



Rf. 3

La variazione di frequenza è massima se $\Delta P_i = 0$, cioè se il regolatore del gruppo non interviene, in quanto $\Delta P_R = \Delta P$ ed in genere è eccessiva. Se il gruppo interviene con la sola regolazione primaria la funzione di trasferimento da considerare si ricava dallo schema a blocchi Rf.3 considerando $\Delta P = 0$. Quindi

$$\Delta P_i'' = 0$$

$$\Delta P_i' = \Delta P_i$$

Lo schema a blocchi da considerare è allora

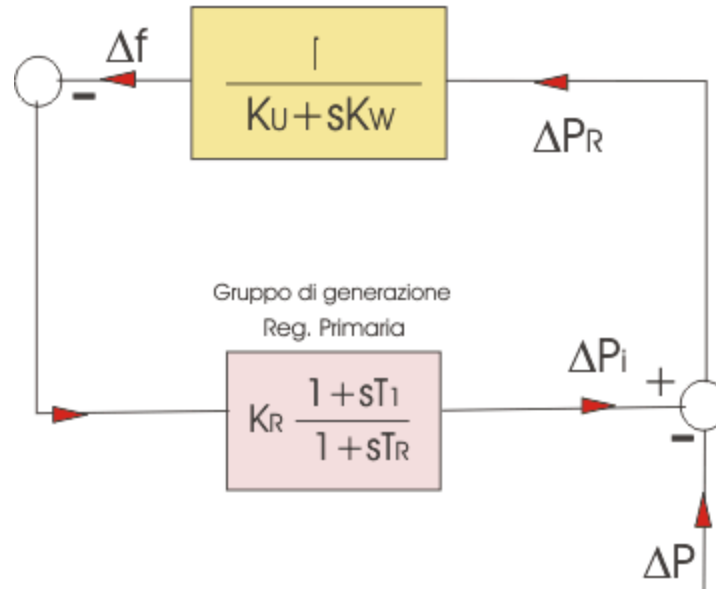


fig. Rf.4

La funzione di trasferimento è il rapporto tra la richiesta di potenza ΔP e la variazione di frequenza che ne consegue $-\Delta f$. Con alcuni passaggi matematici si arriva ad evidenziare che si ha un [sistema del secondo ordine](#):

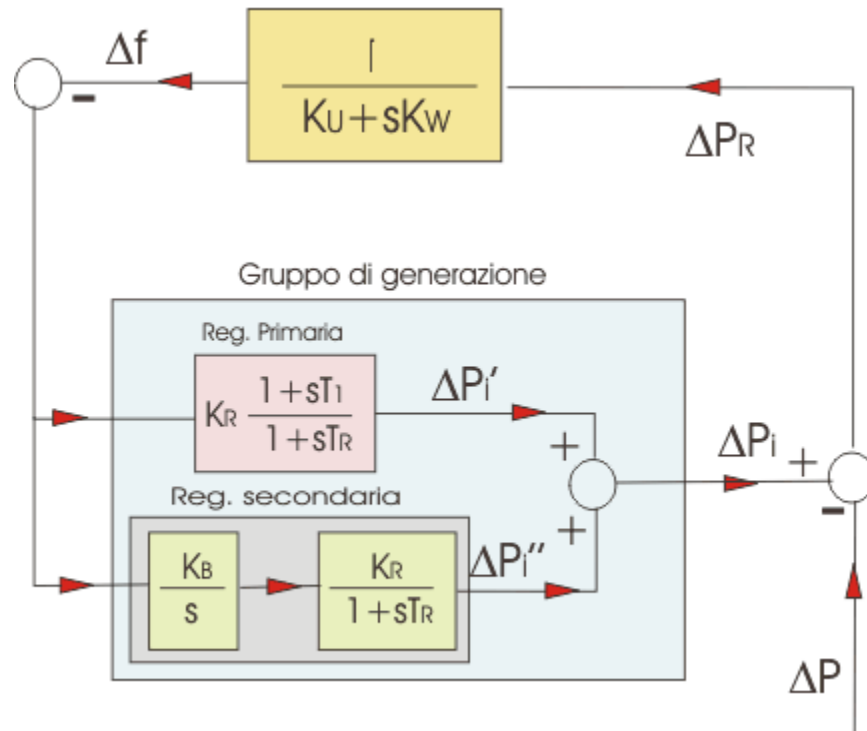
$$\begin{aligned} \frac{\Delta f}{-\Delta P} &= \frac{1}{K_R + K_U} \cdot \frac{\omega_0^2 + \omega_0^2 \cdot T_R \cdot s}{s^2 + 2\xi\omega_0 \cdot s + \omega_0^2} \\ \omega_0 &= \sqrt{\frac{K_R + K_U}{T_R \cdot K_W}} = \sqrt{\frac{1 + \rho}{\sigma \cdot T_R \cdot T_a}} \\ \xi &= \frac{1}{2} \cdot \frac{K_U \cdot T_R + K_R \cdot T_1 + K_W}{\sqrt{T_R \cdot K_W \cdot (K_R + K_U)}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho T_R + \sigma T_a + T_1}{\sqrt{\sigma \cdot (1 + \rho) \cdot T_R \cdot T_a}} \\ \rho &= \frac{K_U}{K_R} \end{aligned}$$

Per $s = 0$ si ottiene la variazione di frequenza a regime

$$\Delta f = - \frac{\Delta P}{K_R + K_U}$$

che mostra come l'intervento della regolazione primaria riduca notevolmente la variazione di frequenza essendo, come visto, K_R dieci volte maggiore di K_U . La f.d.t. è del secondo ordine. Quindi presenta delle oscillazioni smorzate di pulsazione ω_0 e coefficiente di smorzamento ξ .

Il segnale ΔB può essere manuale, ma anche automatico. In questo caso è ricavato sempre dalla variazione di frequenza. Si può ad esempio fare in modo che sia proporzionale all'integrale dello scarto di frequenza. Con tale regolazione alla fine del transitorio l'errore è nullo, cioè la frequenza assume il suo valore nominale. Il blocco che effettua questo tipo di regolazione è mostrato in figura Rf.5



RF. 5

Quando la frequenza torna al valore di riferimento, quindi la variazione di frequenza è nulla, è nulla anche la variazione di potenza relativa alla regolazione primaria. Rimane esclusivamente la variazione di potenza determinata dalla regolazione secondaria che, tra l'altro, è esattamente uguale alla variazione di potenza richiesta. Se agisse la sola primaria, oltre all'errore di frequenza, ci sarebbe anche una differenza tra la richiesta e l'effettiva immissione. Si ha cioè $\Delta P_i'' = \Delta P$ con $\Delta P_i' = 0$.

Nota.

Quanto esposto è riferito ad un generatore. I valori orientativi dei parametri sono quelli di un gruppo idroelettrico, che però non differiscono molto da quelli riportati. L'azione di più generatori in parallelo implica considerazioni un po' più complesse, soprattutto se i generatori sono diversi. Si può dimostrare che, per quanto riguarda la situazione di regime raggiunta con la sola regolazione primaria, equivale all'azione di un singolo generatore avente una potenza regolante pari alla somma delle potenze regolanti dei singoli generatori.

Bibliografia

Antonio Paolucci - Lezioni di Trasmissione dell'energia elettrica- Ed. Cleup