



Zeno Martini (admin)

## FREQUENZA E POTENZA

23 July 2007

Generatore rotante in regime di funzionamento quasi-stazionario

Una variazione nella richiesta di potenza ad un generatore rotante, una macchina sincrona ad esempio, si manifesta immediatamente come una variazione della coppia resistente applicata all'albero.

Lo squilibrio conseguente tra coppia motrice  $C_G$  (N m) e coppia resistente  $C_U$  (N m), la cui eguaglianza caratterizza la marcia a velocità costante  $w$  (rad s<sup>-1</sup>), determina un'accelerazione, positiva o negativa a seconda che la richiesta di potenza diminuisca od aumenti. Durante il transitorio, cioè nell'intervallo di tempo in cui permane lo squilibrio, le apparecchiature di regolazione della sorgente di energia primaria (flusso di vapore, portata idraulica o flusso di combustibile), pilotano il generatore verso una nuova situazione di equilibrio, raggiunta quando  $C_G$  ridiventa uguale  $C_U$  e, considerando unitario il rendimento della macchina,  $P_G$  (potenza generata dal motore primo (W) ) uguale a  $P_U$  (potenza richiesta dai carichi o uscente dall'alternatore)

Il funzionamento a regime di un generatore elettrico, è perciò caratterizzato dalle equazioni:

$$P_G = P_U[kW]$$

$$C_G = C_U[N m]$$

$$w = P_G / C_G = P_U / C_U[rad s^{-1}]$$

Le varie situazioni di equilibrio possono differire per velocità, nel qual caso il generatore effettua la sola regolazione primaria; ma possono anche realizzarsi ad una velocità stabilita, quella che corrisponde alla frequenza nominale. In tal caso il generatore effettua anche la regolazione secondaria.

## REGOLAZIONE PRIMARIA

La differenza di velocità tra le diverse condizioni di regime dipende dalla potenza che le caratterizza. La frequenza elettrica è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione, quindi la variazione di potenza determina una variazione della frequenza.

Il legame tra variazione di potenza  $DP = P_2 - P_1$  e variazione di frequenza

$Df = f_2 - f_1$  ( gli indici 1 e 2 indicano rispettivamente la situazione di regimi iniziale e finale ), quando le variazioni di frequenza sono percentualmente piccole come si verifica nelle reti elettriche, si esprime matematicamente con una relazione lineare:

$$DP = - K_R * Df$$

Il segno meno indica che un aumento della potenza comporta una diminuzione della frequenza e viceversa. Infatti un aumento della potenza richiesta provoca un aumento della coppia resistente con un rallentamento della macchina, quindi una diminuzione della velocità e della frequenza.

**$K_R$** , ha le dimensioni di un'energia e, all'interno del campo di variazione ammesso per la frequenza, si può considerare costante. E' detta energia regolante del generatore. Indica la variazione di potenza corrispondente alla variazione di frequenza di 1 Hz. La variazione della potenza si ottiene regolando il flusso del combustibile che alimenta il motore primo o il flusso d'acqua o di vapore del vapore che azionano le rispettive turbine che mantengono in rotazione l'alternatore.

$K_R$  è dunque una costante caratteristica della macchina e dipende dalle impostazioni di regolazione adottate. Se indichiamo con  $f_0$  ed  $f_1$  le frequenze che delimitano il campo di regolazione, rispettivamente la frequenza di funzionamento a vuoto del generatore ( $P_G = 0$ ) e la frequenza alla quale il generatore eroga la potenza nominale  $P_N$  ( $P_G = P_N$ ), indicando poi con  $f_N$  la frequenza nominale, intermedia alle due precedenti, e si definisce

$$s = ( f_0 - f_1 ) / f_N$$

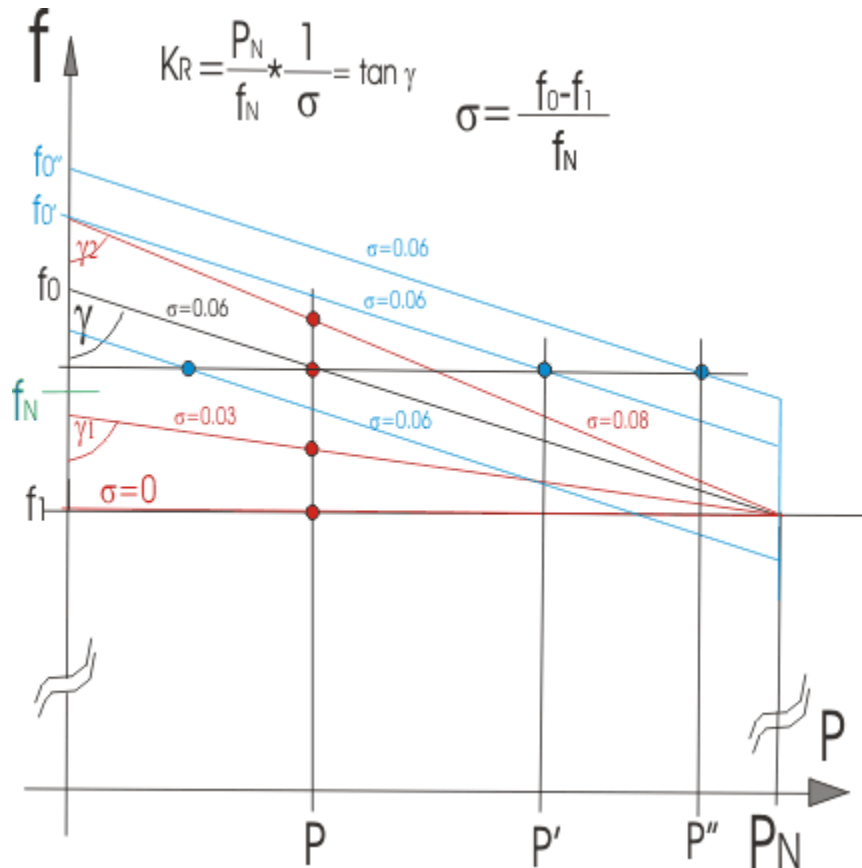
il grado di statismo della macchina, si può scrivere

$$K_R = - (P_N - 0) / (f_1 - f_0) = P_N / (f_0 - f_1) = (P_N / f_N) / s$$

Ad esempio per un grado di statismo regolabile tra il 4% e l'8% l'energia regolante di un gruppo di potenza nominale  $P_N$ , considerando  $f_N = 50$  Hz, varia tra la metà ed un quarto della stessa  $P_N$

L'energia regolante è dunque inversamente proporzionale al grado di statismo.

Le espressioni matematiche precedenti hanno una loro rappresentazione grafica nel piano cartesiano *potenza-frequenza*: è la caratteristica statica della macchina.



Rf. 1

Nella fig. Rf. 1 sono riportate diverse caratteristiche statiche di una stessa macchina, ottenute variando i parametri di regolazione. Sono segmenti di retta la cui pendenza dipende dall'energia regolante e la cui equazione è:

$$f = f_0 - P / K_R = f_0 - P * (\sigma * f_N / P_N)$$

Data una certa macchina il rapporto  $P_N / f_N$  è una costante. Il regolatore permette però di variare il grado di statismo, quindi l'energia regolante  $K_R$  che, nel grafico, si ricava calcolando la tangente trigonometrica dell'angolo  $\gamma$ . Aumentando il grado di statismo diminuisce la potenza regolante, ed aumenta la frequenza a cui si ha una data potenza  $P$ . Se lo statismo è maggiore di zero ad ogni potenza corrisponde una determinata frequenza; maggiore è il grado di statismo, maggiore è la frequenza a vuoto; se lo statismo, è nullo qualsiasi potenza ammessa (compresa tra 0 e  $P_N$ ) si ha sempre alla stessa frequenza:  $f = f_0$  per ogni  $P$ .

Se un gruppo elettrogeno lavora da solo, "in isola" come si dice, ed è dotato di un regolatore elettronico del grado di statismo compreso, ad esempio, tra lo 0% e l'8%, conviene impostarlo a zero. Se il gruppo invece opera in parallelo con altri gruppi o con la rete, il valore dello statismo è definito in funzione della logica che si desidera adottare per il parallelo, in quanto esso consente di stabilire il modo in cui i vari gruppi si ripartiscono il carico.

Le varie condizioni sono rappresentate, nella figura, dalle rette rosse e nera. La potenza non può crescere oltre il valore nominale. Quindi se la frequenza dovesse scendere al di sotto di  $f_1$ , il regolatore impedisce l'incremento di potenza che resta uguale a  $P_N$ . Da qui il tratto verticale della caratteristica. A volte la potenza viene limitata ad un valore  $P_L < P_N$

E' possibile, a parità di statismo, impostare la regolazione della macchina in modo da aumentare o diminuire la potenza erogata a parità di frequenza. Lo si fa regolando il valore della frequenza a vuoto. Nel grafico ciò corrisponde a traslare la caratteristica verso l'alto o verso il basso (rette azzurre in figura Rf.1). Alla frequenza a cui si aveva la potenza  $P$  sulla caratteristica nera, sulle caratteristiche azzurre si hanno le potenze  $P'$  e  $P''$  maggiori di  $P$  e  $P'''$  inferiore.

Dal grado di statismo dipende la regolazione di frequenza primaria.

### Regolazione secondaria.

Con la traslazione verticale della caratteristica che si ottiene ottenuta con il dispositivo di regolazione comunemente detto "variagiri" si ha la regolazione secondaria. In regolazione primaria alla variazione di potenza corrisponde una variazione di frequenza dipendente dall'energia regolante.

Con la regolazione secondaria si riporta la macchina a funzionare alla frequenza stabilita con la nuova potenza richiesta.

## I CARICHI ED IL GRUPPO: FUNZIONAMENTO IN ISOLA.



Rf. 2

Le variazioni di frequenza considerate sono molto piccole, frazioni di percento. La potenza assorbita dai carichi dipende dalla frequenza. Non per tutti i tipi di carico, certamente: non per i carichi puramente resistivi ad esempio, ma per i motori in genere sì. La velocità di rotazione è direttamente legata alla frequenza, sia per sincroni che per asincroni; e le apparecchiature meccaniche da essi azionati, quali pompe centrifughe, ventilatori, macchine utensili, richiedono coppie dipendenti dal quadrato o addirittura dal cubo della velocità.

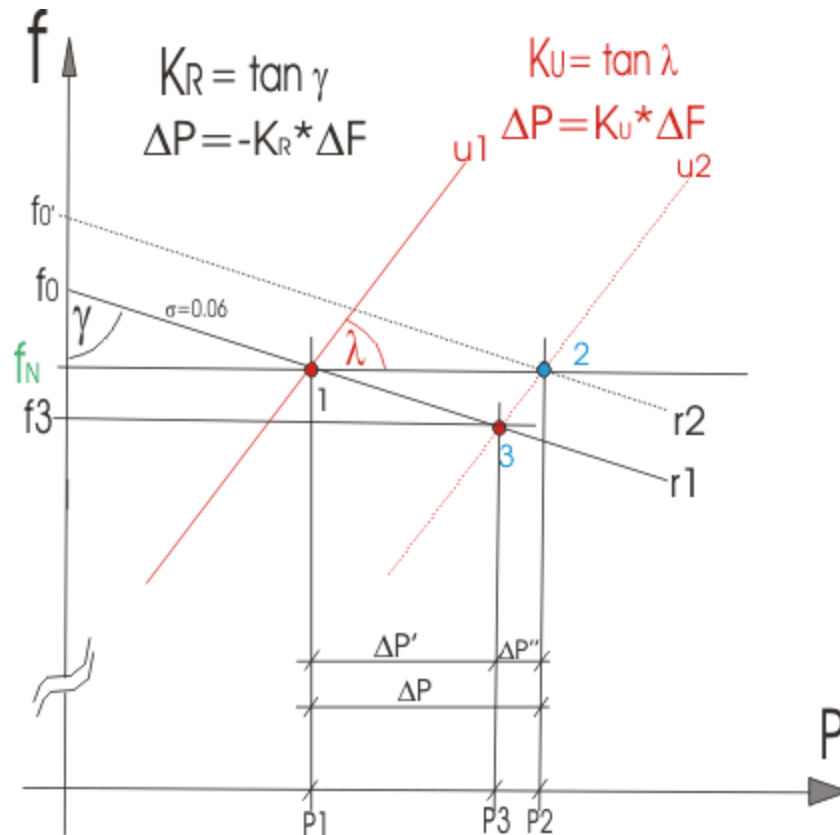
In situazione di regime, come più volte detto, vale l'equilibrio perfetto delle potenze in gioco  $P_G = P_U$  ( fig. Rf.2). Si è visto in che modo  $P_G$  dipende dalla frequenza. Ora, per esplicitare l'equazione, occorre conoscere il modo in cui  $P_U$  dipende dalla frequenza. Per piccole variazioni della frequenza rispetto ad un valore di riferimento, possiamo ritenere la dipendenza lineare, quindi scrivere un'espressione formalmente simile a quella scritta per il generatore, con la differenza che, nel caso dei carichi, ad un aumento di frequenza corrisponde un aumento della potenza assorbita:

$$DP_U = K_U * Df$$

La costante  $K_U$  si chiamerà *energia regolante dei carichi* ed ha un'espressione che in prima approssimazione vale

$$K_U = (P_{UN} / f_{UN}) * a$$

In cui  $P_{UN}$  è la potenza dei carichi alla frequenza nominale  $f_{UN}$  ed  $a$  l'esponente globale secondo cui la potenza assorbita dipende dalla frequenza (ad esempio 1: per i carichi che vi dipendono linearmente, cioè che mantengono costante la coppia al variare della velocità; 2 o 3 per pompe centrifughe, e così via; 0, lo ricordiamo, per i puri resistori: l'a complessivo ne sarà una combinazione)



Rf. 3

Nella figura Rf.3 i segmenti di retta rossi rappresentano le caratteristiche dei carichi di data energia regolante. L'energia regolante dei carichi è, matematicamente, la tangente trigonometrica dell'angolo  $\lambda$ . La caratteristica  $u_2$  si differenzia dalla  $u_1$  per la maggior potenza richiesta a parità di frequenza: alla frequenza  $f_N$  la potenza dei carichi vale rispettivamente  $P_1$  e  $P_2$  con  $P_2 - P_1 = \Delta P$ , incremento di potenza dei carichi.. Quindi se un complesso di carichi richiede una variazione di potenza, la caratteristica statica dei carichi subisce nel piano  $f, P$  una traslazione: verso destra per un incremento, verso sinistra per un decremento.

A regime, come più volte detto, la potenza generata è uguale alla potenza assorbita dai carichi. Una determinata condizione di regime è allora rappresentata dall'intersezione della caratteristica statica del generatore, ad esempio  $r_1$ , con la caratteristica statica dei carichi, ad esempio  $u_1$ . La potenza in gioco è dunque  $P_1$  e la frequenza  $f_N$ , che supponiamo sia la frequenza nominale..

Se i carichi richiedono un incremento di potenza  $\Delta P$ , la nuova caratteristica dei carichi è  $u_2$ , quindi, dopo il transitorio la cui durata è in genere dell'ordine di una o qualche decina di secondi, la nuova situazione di equilibrio corrisponderà all'intersezione di  $u_2$  con  $r_1$ , cioè con il punto 3 cui corrisponde una potenza  $P_3$

ed una frequenza  $f_3$ , inferiore ad  $f_N$ . Anche  $P_3$  è inferiore a quella che corrisponde alla potenza dei carichi alla frequenza nominale. I carichi cioè, essendo la frequenza inferiore, "rinunciano" alla potenza  $DP''$ , e "si accontentano" dell'incremento  $DP'$

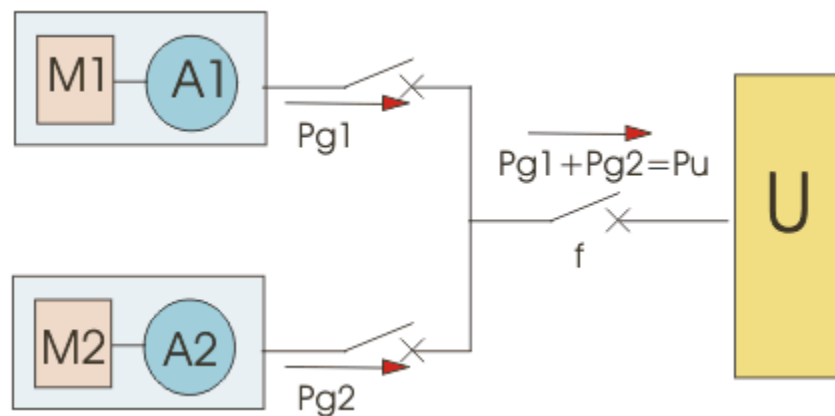
Se le cose rimangono così, ciò che si è avuta è la cosiddetta regolazione primaria, con una variazione di frequenza determinata dal grado di statismo impostato per il generatore. Se si vuole invece che i carichi ricevano la potenza richiesta alla frequenza nominale, occorre che l'intersezione della caratteristica dei carichi con quella del generatore avvenga nel punto 2. Occorre perciò intervenire sul generatore effettuando la regolazione secondaria, che ne modifica la caratteristica statica da  $r_1$  ad  $r_2$ .

In definitiva per soddisfare le esigenze dei carichi mantenendo costante la frequenza non basta la regolazione primaria, ma occorre intervenire con la regolazione secondaria. Anche se in questa discussione le due regolazioni sono presentate in successione, nella realtà possono avvenire contemporaneamente.

### Funzionamento in parallelo

Nella fig. Rf. 4 è mostrato un collegamento in cui un complesso di carichi,  $U$ , è alimentato da due gruppi in parallelo. Lo stesso schema è valido anche per un gruppo in parallelo alla rete. La rete infatti può essere immaginata come un gruppo che impone una frequenza fissa,  $f_N$ , rappresentabile con una caratteristica statica orizzontale (statismo = 0). Immaginiamo che il gruppo di generazione in esame sia quello contrassegnato dall'indice 1, mentre l'indice 2 indica l'altro gruppo oppure la rete. La potenza utile  $P_u$  è suddivisa tra i due gruppi per cui a regime, ad una data frequenza si ha

$$P_u = P_{G1} + P_{G2}$$



Rf. 4

### Parallelo con la rete

Analizziamo il comportamento del gruppo 1 in parallelo alla rete. Nella parte destra del grafico di fig. Rf.5 sono rappresentate le caratteristiche statiche del gruppo 1, corrispondenti a tre frequenze a vuoto diverse. La frequenza nominale  $f_N$  corrisponde alla frequenza a vuoto della caratteristica  $r_0$ .

Supponiamo si debba erogare al carico una certa potenza  $P_u$ , rappresentata dal segmento verde AB. Se il gruppo 1 è rappresentato dalla  $r_0$ , essendo la frequenza  $f_N$  imposta dalla rete, a tale frequenza il gruppo 1 non può erogare potenza; quindi funziona a vuoto e tutta la potenza  $P_u$  è erogata al carico dalla rete: il punto di funzionamento è dunque  $P_2=P_u$  sulla retta orizzontale  $f_N$  che rappresenta la rete.

Se ora si aumenta la frequenza a vuoto del gruppo 1, il che corrisponde ad una traslazione della sua caratteristica verso l'alto, se si lascia contemporaneamente inalterato il grado di statismo impostato, alla frequenza  $f_N$ , sempre imposta dalla rete, corrisponde sulla  $r_1$  la potenza  $P_1'$ , la quale sarà erogata dal gruppo al carico. La quota di potenza rimanente  $P_u - P_1' = P_2'$  è la potenza erogata dalla rete al carico. Quindi intervenendo sul "variagiri" si può distribuire la potenza richiesta dal carico tra il gruppo e la rete.

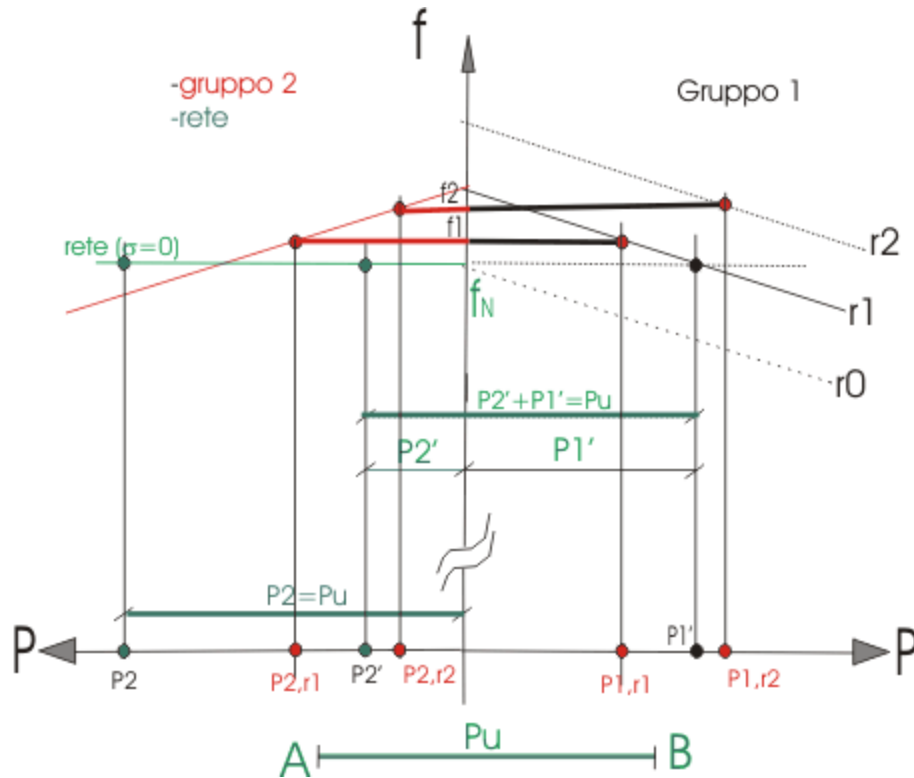
### Parallelo con un altro gruppo

La stessa cosa succede se invece della rete consideriamo un altro gruppo in parallelo ad 1. Per semplicità supponiamo che il gruppo 2 sia identico al gruppo 1, con identico statismo. Alla caratteristica orizzontale verde della parte di sinistra del diagramma, che rappresentava la rete, va ora sostituito quella rossa che rappresenta il secondo gruppo. Esso ha la stessa frequenza a vuoto del gruppo 1 con caratteristica  $r_1$  e lo stesso statismo. La potenza  $P_u$  del carico si suddivide esattamente tra i due gruppi:

$P_{1, r1} = P_{2, r2}$  con  $P_u = P_{1, r1} + P_{2, r2}$ . La situazione di equilibrio si ha però ad una frequenza  $f_1 > f_N$ . Per trovare i valori detti si tralla il segmento AB che rappresenta la  $P_u$ , mantenendolo orizzontale, finché i suoi estremi toccano le due caratteristiche statiche.

Se aumentiamo la frequenza a vuoto del gruppo 1 realizzando la caratteristica  $r_2$ , il gruppo 1 aumenterà la sua quota di potenza, e l'equilibrio si verificherà ad una frequenza  $f_2 > f_1 > f_N$ . Si avrà, a quella frequenza  $P_{1, r2} + P_{2, r2} = P_u$ , con  $P_{1, r2}$  potenza generata dal primo gruppo maggiore di  $P_{2, r2}$  potenza generata dal secondo gruppo.





Rf. 5

## Conclusion

Il parallelo dei gruppi di generazione tra loro e con la rete è in realtà un fenomeno molto complesso. Le considerazioni precedenti, basate esclusivamente sulle caratteristiche statiche, che quindi non considerano tutti i fenomeni transitori, elettrici e meccanici, non sono certo sufficienti per realizzarlo in modo corretto e completo.

Ad ogni modo esse forniscono idee utile per rendersi conto di come frequenza e potenza attiva sono correlate ed in che modo si può operare sulle macchine e sulle loro regolazioni per ottenere il comportamento desiderato.

## Bibliografia

- Gruppi Elettrogeni - Autori Vari - Ed. TNE
- Trasmissione dell'Energia Elettrica di Antonio Paolucci. Ed. Cleup