



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Dipartimento Energia



IT9700545

ANALISI DELLA STABILITÀ DI UN SISTEMA DI GENERAZIONE DI ELETTRICITÀ COSTITUITO DA UN GENERATORE ROTATIVO CONVENZIONALE E UNA FONTE RINNOVABILE INTERMITTENTE

DOMENICO COIANTE

ENEA, Centro Ricerche Casaccia, Roma

VOL 28 № 23

RT/ERG/96/27

Testo pervenuto nel dicembre 1996

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA
rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

RIASSUNTO

Un semplice sistema di generazione di potenza, costituito da un generatore rotativo convenzionale accoppiato ad una fonte rinnovabile intermittente (eolica o fotovoltaica) viene presa in considerazione ricavandone un modello attraverso i rispettivi schemi funzionali. Le variazioni della frequenza di rete rispetto al suo valore nominale, come risposta a brusche variazioni della potenza intermittente allacciata, viene calcolato analiticamente in funzione dei parametri elettro-meccanici del generatore rotativo (coefficiente di smorzamento del regolatore di velocità e statismo transitorio). Alcuni casi tipici di stabilità sono discussi in relazione alla tolleranza consentita nelle variazioni di frequenza dal sistema di gestione del carico. Di conseguenza, vengono calcolati i limiti da porre sulla quota di potenza intermittente che può essere accettata in collegamento diretto con il generatore convenzionale. Il risultato mostra che tale quota si colloca tra il (12+19)% del valore della potenza nominale del generatore a seconda del valore posseduto dal coefficiente di statismo transitorio della macchina.

STABILITY ANALYSIS OF A POWER SYSTEM MADE UP OF AN INTERMITTENT RENEWABLE ENERGY SOURCE DIRECTLY TIED TO A CONVENTIONAL ROTATING POWER GENERATOR.

ABSTRACT

A simple power system made up of a conventional rotating power generator in direct connection to an intermittent renewable energy source (wind energy or photovoltaics) is modelled on the base of respective functional schemes. The relative variations of the voltage frequency are calculated as an output to an abrupt variation of intermittent tied power and in function of electro-mechanical parameters of the rotating generator (dumping coefficient and inertial rotor coefficient). The stability conditions and the tolerance allowed on the frequency variations are considered in relation to load service requires. As a consequence, the maximum intermittent power amount, which can be accepted in direct connection, is obtained. For usual conventional rotating machines, the resulting limit is placed in the range of (12+19)% of nominal capacity of power generator.

KEYWORDS

Renewable Energy, grid stability, grid penetration share.

**NEXT PAGE(S)
left BLANK**

INDICE

1 - INTRODUZIONE	Pag.	7
2 - IL SISTEMA		8
3 - IL MODELLO		9
4 - LA RISPOSTA AD UNA BRUSCA VARIAZIONE		11
4.1 - Risposta secondo la Trasformata di Laplace		11
4.2 - Risposta nel tempo		13
5 - ANALISI DELLA RISPOSTA		14
5.1 - Smorzamento sopracritico		14
5.2 - Smorzamento critico		16
5.3 - Smorzamento sottocritico		17
5.4 - Rappresentazione grafica comparativa		19
6 - ACCETTABILITA' DELLA VARIAZIONE		20
7 - CONCLUSIONE		21
8 - BIBLIOGRAFIA		22
9 - APPENDICE		23

1 - INTRODUZIONE

Il collegamento diretto alla rete elettrica dei generatori di potenza intermittente, come è il caso degli impianti fotovoltaici o eolici, pone alcuni problemi di stabilità del punto di lavoro della rete, in relazione soprattutto al verificarsi di brusche variazioni della potenza allacciata.

Si ricorda che il punto di lavoro della rete è il risultato di un delicato equilibrio dinamico tra la fornitura di potenza da parte dei numerosi generatori attivi in rete e l'assorbimento di energia da parte dei molteplici carichi dell'utenza. Le condizioni di equilibrio sono tali che il punto di lavoro può essere rappresentato dai valori nominali della tensione V_0 e della frequenza f_0 sul carico, valori che la rete è impegnata contrattualmente a garantire agli utenti. Anzi, il rapporto tra il produttore di elettricità e gli utenti prende in considerazione anche i limiti di variazione del punto di lavoro, che generalmente è fissato con una tolleranza non più ampia del 5% - 10% per le variazioni della tensione e non oltre il 3% - 5% per quelle della frequenza.

In una rete alimentata prevalentemente da generatori rotativi (moto e turbo-alternatori), il sincronismo delle macchine richiede una particolare attenzione sui transienti di frequenza, perché questi, a prescindere dagli effetti sui carichi, possono mandare fuori servizio uno o più generatori in virtù dell'azione protettiva dei dispositivi automatici di salvaguardia degli impianti. Un tale evento può innescare a sua volta una serie di pendolazioni di potenza lungo la rete che può produrre la propagazione dei "fuori servizio" fino a portare anche al "black out" totale dell'intero sistema.

Si può pertanto capire come lo studio degli effetti di una perturbazione brusca sullo stato di equilibrio della rete sia un argomento molto importante. L'analisi di questo fenomeno presenta una notevole complessità, in quanto essa richiede la modellizzazione di un sistema, che è di per sé molto complesso, essendo costituito da numerosi generatori, complicate linee di trasmissione e molteplici tipologie e profili temporali dei carichi di utenza. Tutto ciò si traduce in un sistema di equazioni differenziali, la cui soluzione necessariamente richiede grandi capacità di calcolo e numerose approssimazioni semplificative.

E' chiaro che la difficoltà della soluzione deriva dalla complessità della configurazione di una moderna rete elettrica, dato che essa comprende quasi sempre alcune decine o centinaia di generatori, interconnessi tra di loro ed allacciati ad una griglia di linee di trasmissione, topologicamente complicata, su cui fluisce la potenza verso molteplici tipologie di utenze. Dunque, questa oggettiva difficoltà giustifica il fatto che non si riesca a quantificare in modo esatto e generale gli effetti della intermittenza casuale dei generatori fotovoltaici o eolici sulla stabilità della rete a cui essi vengono allacciati. A questa problematica vengono date soltanto soluzioni parziali, più o meno empiriche, che suscitano sempre una certa discussione. L'unica cosa, sulla quale tutti concordano, è il concetto che la quantità di potenza intermittente, inseribile in rete, non debba superare una frazione "piccola" della potenza rotativa totale simultaneamente attiva nella rete.

La quantificazione di questo concetto, effettuata da parte di alcune grosse "utilities" sulla base di modelli semplificati del sistema, ha portato a fissare il limite massimo di accettazione per l'inserimento delle fonti intermittenti intorno al 10% - 20% della potenza rotativa presente. Vista l'importanza che tale limite riveste sulle prospettive di sviluppo del mercato delle fonti rinnovabili, si proverà a verificare questo valore attraverso l'analisi applicata al caso più semplice possibile, esaminando il comportamento ai transienti di un sistema elementare, composto da un generatore rotativo collegato ad un impianto di potenza intermittente e ad un solo carico.

2 - IL SISTEMA

Schematizziamo così il nostro sistema elettrico:

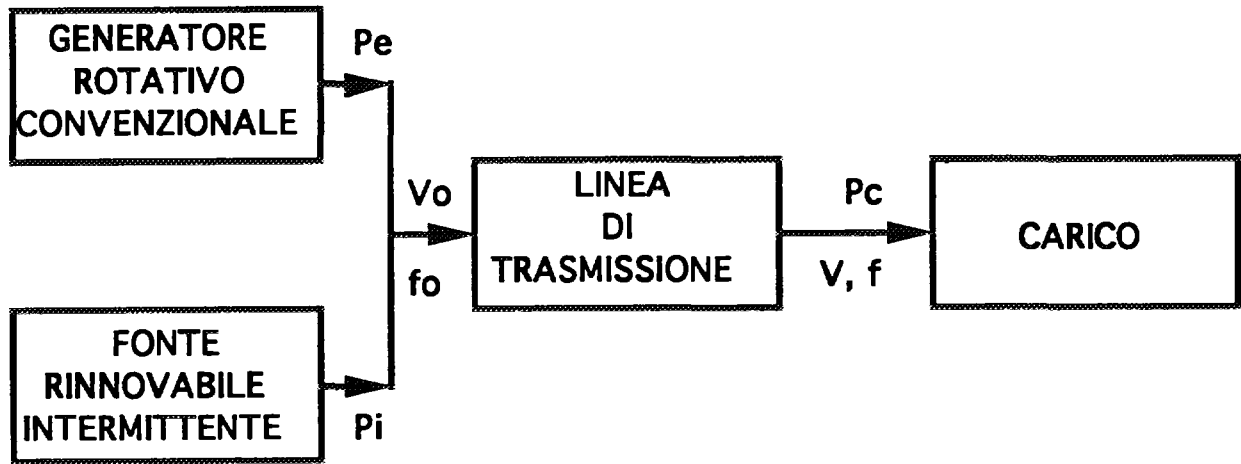


Fig. 1 - Sistema elementare per l'alimentazione mista del carico

La potenza elettrica, P_e , generata da un generatore rotativo convenzionale, ad esempio un motogeneratore diesel o un gruppo turbina-alternatore, viene fatta confluire, mediante un'opportuna linea di trasmissione, verso il carico assieme alla potenza intermittente, P_i , di una fonte rinnovabile. Supponendo che la linea non introduca perdite, verrà fornita al carico, istante per istante, la potenza richiesta, P_c , che sarà sempre uguale alla somma di P_e e P_i .

Il sistema è dotato di un sottosistema di controllo della potenza immessa nella linea in modo che, in condizioni stazionarie, venga garantito il valore di P_c sul carico. In pratica tale controllo viene esercitato autoregolando l'apertura della valvola di immissione del combustibile nel motogeneratore (e/o del vapore per i gruppi turbina-alternatore), cosicché eventuali indesiderate intermittenze di P_i possano essere compensate con le corrispondenti opposte variazioni di P_e . Poiché ad ogni variazione del flusso di alimentazione del motogeneratore corrisponde una variazione del numero di giri, la regolazione della potenza produce anche una variazione della frequenza della tensione erogata. Pertanto, ad ogni perturbazione delle condizioni di equilibrio, sia la tensione V , che la frequenza f , subiranno fluttuazioni nel tempo prima che il sistema di controllo arrivi a recuperare i valori stazionari, V_0 e f_0 .

Già da questa semplice descrizione si può arrivare a comprendere due concetti fondamentali:

1) Poiché ogni sistema di controllo possiede una propria costante di tempo per l'azione, se la variazione di P_i avviene in tempi compatibili con tale costante, la regolazione segue bene il fenomeno, compensandone gli effetti senza che l'utenza si accorga di quanto è avvenuto. Se invece la variazione è troppo brusca, il sistema di regolazione non riesce più a reagire in tempo reale e l'equilibrio viene raggiunto (e come vedremo solo a certe condizioni) con un ritardo, durante il quale la tensione e la frequenza sul carico possono subire notevoli indesiderate variazioni.

2) Poiché ogni sistema di regolazione possiede un campo d'azione, generalmente limitato alla zona lineare della propria caratteristica dinamica, e questo campo è commisurato ad una frazione della potenza nominale del generatore rotativo, si comprende come l'ampiezza delle variazioni

accettabili per P_i non possano andare sopra ad una frazione piccola di P_e . Ricordando poi che tali variazioni possono raggiungere un'ampiezza pari all'intero valore di P_i , (quando per esempio venga a mancare il sole per il passaggio di una nuvola o cessi di colpo il vento), ne segue che il valore stesso di P_i non può che essere limitato ad una frazione piccola di P_e .

3 - IL MODELLO

Facendo riferimento alla fig. 1, vediamo come è possibile tenere conto di tale schema nel classico modello a blocchi del sistema di regolazione di un motogeneratore [1]. Si ottiene la situazione illustrata nella seguente fig. 2.

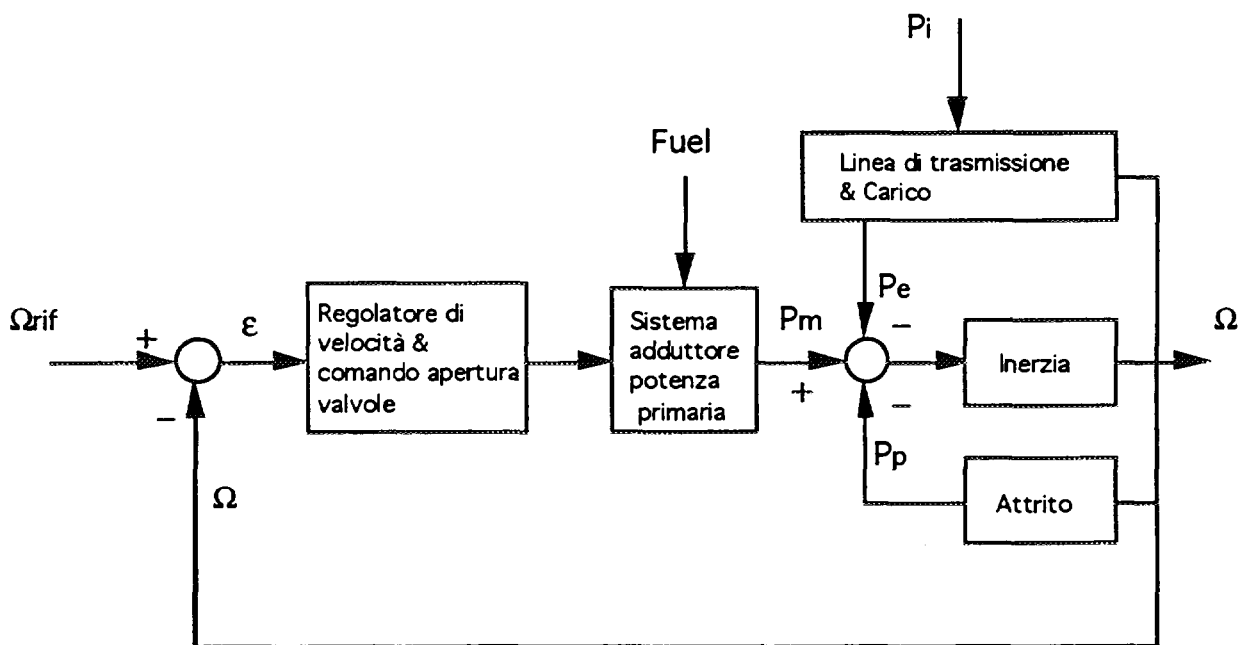


Fig. 2 - Schema di regolazione del sistema di fig. 1.

Dove:

Ω_{rif} = pulsazione elettrica di riferimento;

Ω = pulsazione attuale della tensione erogata;

$\epsilon = (\Omega_{rif} - \Omega)$ = errore nella pulsazione della tensione erogata;

P_m = Potenza meccanica motrice (positiva = entrante nel nodo);

P_p = Potenza perduta per gli attriti meccanici (negativa = uscente dal nodo);

P_i = Potenza intermittente immessa nella linea dalla fonte rinnovabile;

P_e = Potenza elettrica erogata dall'alternatore verso il carico (negativa = uscente dal nodo);

Fuel = linea di alimentazione del generatore con il combustibile.

Le condizioni di equilibrio elettrico sul carico sono tali che la potenza richiesta dal carico, P_C , deve essere fornita dalla somma di quella proveniente dal generatore e di quella della fonte rinnovabile:

$$P_C = P_e + P_i \quad (1)$$

o ciò che è lo stesso, l'alternatore deve fornire una potenza:

$$P_e = P_C - P_i = P_L \quad (2)$$

Quindi l'alternatore vede il contributo intermittente della potenza rinnovabile, P_i , come se si trattasse di un alleggerimento della potenza da fornire al carico. Questo, a sua volta, viene visto dal generatore come se possedesse un nuovo valore, più piccolo, P_L .

In condizioni stazionarie, l'equilibrio al nodo della potenza meccanica richiede a sua volta che:

$$P_m = P_e + P_p = P_L + P_p \quad (3)$$

Facendo riferimento allo schema di fig. 2, è facile vedere che, differenziando entrambi i membri e trascurando in prima approssimazione le variazioni della potenza perduta per gli attriti visto che in genere gli scostamenti dal loro valore stazionario sono abbastanza piccoli, si ha che:

$$\Delta P_m \approx \Delta P_L \quad (4)$$

e quindi le variazioni del carico elettrico (sia derivanti da variazioni di P_i , sia da distacchi o prese di carico) sono compensate da uguali variazioni della potenza meccanica. In conclusione perciò lo studio del comportamento del sistema per piccole variazioni intorno ai valori dei parametri nello stato di equilibrio può essere fatto sul seguente modello semplificato deducibile da quello di fig. 2:

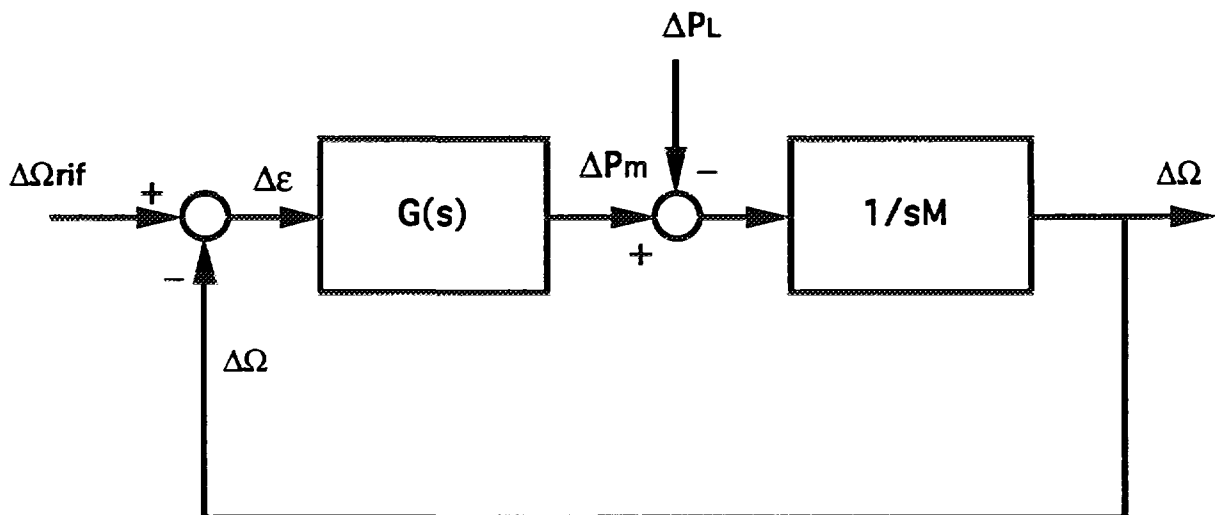


Fig. 3 - Sistema di regolazione semplificato

Dove:

$G(s)$ = trasformata di Laplace della funzione di trasferimento complessiva dei blocchi: regolatore di velocità e comando apertura valvole più il sistema adduttore di energia primaria;

$1/sM$ = funzione di trasferimento del blocco che rappresenta l'inerzia di tutto l'apparato rotante;

s = variabile complessa di Laplace;

M = coefficiente d'inerzia definito come il rapporto tra il doppio dell'energia cinetica del gruppo rotante e la pulsazione elettrica nominale [1].

Un'altra comoda definizione per M deriva dalla sua relazione con il tempo di lancio del gruppo rotante, T_a , cioè il tempo che impiega il rotore per portarsi da fermo alla velocità nominale. Si trova [1]:

$$M = (P_{nom} T_a) / \Omega_{nom} \quad (5)$$

Dove P_{nom} e Ω_{nom} sono rispettivamente i valori nominali della potenza e della frequenza di targa del generatore.

Dalla (5) è facile comprendere quale sia il significato fisico di M : tale coefficiente viene a rappresentare la quantità di energia ($P_{nom} T_a$) da fornire al rotore per ciclo durante l'avviamento.

La comodità di questa relazione deriva essenzialmente dal fatto che T_a vale per quasi tutti i generatori rotative circa 8 sec indipendentemente dal tipo di generatore. Tale caratteristica, come vedremo, aiuterà molto a semplificare i calcoli successivi.

4 - LA RISPOSTA AD UNA BRUSCA VARIAZIONE

Una brusca variazione della potenza intermittente allacciata, dovuta per esempio al passaggio rapido di una nuvola davanti al sole nel caso degli impianti fotovoltaici o a una raffica improvvisa di vento per gli aerogeneratori, può essere schematizzata come una variazione a gradino subita dalla potenza P_L .

4.1 - Risposta secondo la trasformata di Laplace

La soluzione equivale a considerare l'effetto dell'eccitazione del sistema di fig. 3 con una funzione del tipo:

$$\Delta P_L = \Delta P_o (1/s) \quad (6)$$

Dove ΔP_o è l'ampiezza del gradino di potenza.

Facendo riferimento alla fig. 3 e ricordando il principio di sovrapposizione degli effetti, si può ricavare la risposta del sistema di regolazione della velocità rispetto alla sola variazione della potenza. Si ottiene facilmente:

$$\Delta \Omega / \Delta P_L = - 1 / [G(s) + sM] \quad (7)$$

Per questioni di stabilità del sistema di autoregolazione della frequenza, i generatori convenzionali hanno una funzione di trasferimento $G(s)$ che può essere rappresentata [1] da:

$$G(s) = \frac{K_0 (1 + sT_2)}{(1 + sT_1)} = (P_{nom}/\Omega_{nom}) \left[\frac{(1 + sT_2)}{(b_p + sT_2 b_t)} \right] \quad (8)$$

Dove:

K_0 = guadagno della catena di reazione in condizioni stazionarie ($s=0$);

T_1 = costante di tempo che determina il polo principale;

T_2 = costante di tempo per la compensazione dello sfasamento introdotto dal polo principale, di valore adatto ad evitare le oscillazioni ad alta frequenza dovute all'anello di retroazione;

b_p = "statismo permanente di regolazione" definito dal rapporto, cambiato di segno, tra le variazioni relative di frequenza e di potenza in condizioni di equilibrio a tempi lunghi, cioè $s=0$ (per una maggiore comprensione vedi la nota in Appendice);

b_t = "statismo transitorio di regolazione" definito analogamente a sopra in condizioni di tempi brevi, cioè $s=\infty$.

Tra i due statismi esiste la relazione:

$$b_t = b_p (T_1/T_2) \quad (9)$$

Sostituendo nella precedente (7) ed effettuando qualche passaggio algebrico si ottiene facilmente la relazione finale in termini relativi:

$$H(s) = \frac{(\Delta\Omega/\Omega_{nom})}{(\Delta P_L/P_{nom})} = \frac{- b_p (1 + sT_2 b_t/b_p)}{[1 + s(b_p T_a + T_2) + s^2 b_t T_a T_2]} \quad (10)$$

Poiché generalmente è ($T_1 \gg T_2$), dalla (9) segue che ($b_p \ll b_t$). I valori tipici per questi parametri si aggirano, ad esempio, tra 0% e 0.5% per b_p e tra 25% e 40% per b_t [1].

Pertanto nella relazione precedente la costante di tempo a numeratore ($T_2 b_t/b_p$) assume un valore molto grande, che porta il contributo del secondo termine ad essere determinante rispetto all'unità nel campo di frequenze di nostro interesse. Pertanto, nel termine a numeratore l'unità può essere trascurata. Inoltre, un'ulteriore semplificazione può essere ottenuta nel denominatore considerando il fatto che generalmente ($b_p T_a \ll T_2$). In conclusione, possiamo ritenere valida ai nostri fini l'approssimazione:

$$H(s) \approx \frac{- sT_2 b_t}{1 + sT_2 + s^2 b_t T_a T_2} \quad (11)$$

Quindi la risposta ad un gradino negativo (interruzione improvvisa del flusso della potenza rinnovabile) di ampiezza unitaria sarà trovata cercando la funzione antitrasformata di:

$$F(s) = - H(s)/s = \frac{T_2 b_t}{1 + sT_2 + s^2 b_t T_a T_2} \quad (12)$$

espressione che può essere ricondotta alla sua forma canonica introducendo la frequenza di risonanza ω_0 e il coefficiente di smorzamento ζ , definiti rispettivamente dalle relazioni:

$$\omega_0^2 = 1/b_t T_a T_2 \quad (13)$$

$$\alpha = 2 \zeta = \omega_0 T_2 \quad (14)$$

Si ottiene l'espressione finale:

$$F(s) = \frac{\omega_0 \alpha b_t}{\omega_0^2 + s \omega_0 \alpha + s^2} \quad (15)$$

che è facilmente riconoscibile come la forma canonica per un sistema oscillante smorzato con frequenza di risonanza pari a ω_0 e coefficiente di smorzamento pari a $\zeta = \alpha/2$.

4.2 - Risposta nel tempo

La risposta in funzione del tempo può essere trovata risolvendo l'equazione di secondo grado che si ottiene uguagliando a zero il denominatore della (15) e riscrivendo:

$$F(s) = \frac{\omega_0 \alpha b_t}{(s - s_1)(s - s_2)} \quad (16)$$

Dove s_1 e s_2 sono i poli della $F(s)$, corrispondenti alle due radici dell'equazione di secondo grado a denominatore:

$$s_{1,2} = -\omega_0 \alpha / 2 \pm (1/2) \omega_0 (\alpha^2 - 4)^{1/2} \quad (17)$$

Si ricorda che quando una funzione trasformata può essere posta nella forma della nostra $F(s)$, la sua antitrasformata $f(t)$ può essere trovata applicando il metodo dei residui. Senza entrare in particolari dettagli, per i quali si rimanda all'appendice, la nostra risposta nel tempo avrà la forma generale:

$$f(t) = \frac{\omega_0 \alpha b_t}{(s_1 - s_2)} [\exp(s_1 t) - \exp(s_2 t)] \quad (18)$$

Inoltre, poiché si ha:

$$(s_1 - s_2) = \omega_0 (\alpha^2 - 4)^{1/2} \quad (19)$$

$$[\exp(s_1 t) - \exp(s_2 t)] = \exp(-\alpha \omega_0 t/2) \{ \exp[(1/2)\omega_0(\alpha^2 - 4)^{1/2}] t - \exp[-(1/2)\omega_0(\alpha^2 - 4)^{1/2}] t \} \quad (20)$$

la (18) diviene:

$$f(t) = \frac{\alpha b_1 \exp(-\alpha \omega_0 t/2)}{(\alpha^2 - 4)^{1/2}} * \{ \exp[(1/2)\omega_0(\alpha^2 - 4)^{1/2}] t - \exp[-(1/2)\omega_0(\alpha^2 - 4)^{1/2}] t \} \quad (21)$$

che costituisce la risposta generale del sistema nel tempo t.

5 - ANALISI DELLA RISPOSTA

Conviene distinguere tre casi possibili:

- a) Regime di smorzamento supercritico ($\alpha > 2$);
- b) Regime di smorzamento critico ($\alpha = 2$);
- c) Regime di smorzamento sottocritico ($\alpha < 2$).

5.1 - Smorzamento sopracritico ($\alpha > 2$)

In questo caso il coefficiente di smorzamento ha un valore tale che le due radici dell'equazione di secondo grado sono distinte ed entrambe si trovano nel campo dei numeri reali.

Per facilitare l'analisi conviene introdurre la variabile adimensionale x definita da:

$$x = \omega_0 t = t/\tau \quad (22)$$

$$\tau = 1/\omega_0 \quad (23)$$

Dove τ rappresenta la costante di tempo del sistema.

Nel nostro caso, la risposta (21) è rappresentata da una curva in funzione di x che nasce nell'origine degli assi e cresce fino ad un massimo in corrispondenza del valore:

$$x = x_0 = (1/2h) \ln [(h + \alpha/2)/(\alpha/2 - h)] \quad (24)$$

con h che vale:

$$h = (1/2) (\alpha^2 - 4)^{1/2} \quad (25)$$

Dopo aver raggiunto il massimo la curva decresce monotonicamente verso il suo asintoto costituito dall'asse delle ascisse.

Pertanto il recupero dello stato di equilibrio è assicurato ed il sistema va considerato inerentemente stabile.

La convergenza verso l'asintoto è governata dal valore di α . Più tale parametro diviene grande rispetto al valore critico di 2, più lento diviene l'avvicinamento della curva all'asintoto. Di

conseguenza, a valori di α molto maggiori di 2 corrispondono tempi di recupero della frequenza di equilibrio molto lunghi, quasi sempre incompatibili con le normali esigenze di gestione del servizio.

Assumiamo come esempio un caso particolarmente comodo da trattare matematicamente e cioè quello di $[\alpha = 2 * (2)^{1/2}]$. Con qualche semplice passaggio si ottiene dalla (21):

$$f(x)/b_t = (2)^{1/2} * \exp[-(2)^{1/2}x] * [\exp(x) - \exp(-x)] \quad (26)$$

Come è facile verificare, tale funzione ha un massimo in corrispondenza del valore ($x_0 = 0.881$), dove essa vale 0.813. La Fig. 4 mostra il grafico di tale funzione normalizzata al valore del suo massimo.

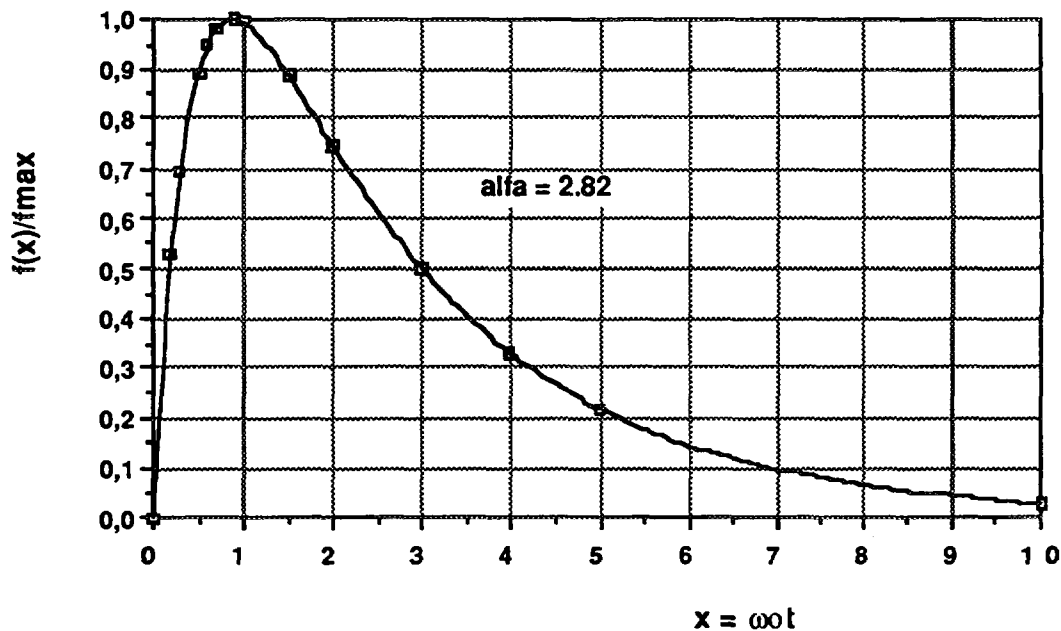


Fig. 4 - Risposta normalizzata nel caso di smorzamento sopracritico $[\alpha = 2 * (2)^{1/2}]$.

Come si può vedere dal grafico, il recupero dello stato stazionario, (usualmente considerato raggiunto quando il valore dello scostamento si è ridotto a meno del 10% del massimo), avviene in più di 7 costanti di tempo.

Ricordando le (13) e (14), si può ricavare dalla (23) che:

$$\tau = \alpha b_t T_a \quad (27)$$

Ponendo in questa relazione il valore assunto per α e quello usuale degli altri parametri, si ottiene che la costante di tempo del sistema può valere (5.6 ÷ 9.0) sec in dipendenza dal valore di b_t . Di conseguenza il recupero dello stato stazionario avverrà in più di (39 ÷ 56) sec, che è un tempo da considerarsi intollerabile per la corretta gestione del servizio.

Pertanto, il caso sopracritico, se da un lato possiede una stabilità intrinseca in quanto garantisce il recupero della condizione di equilibrio, dall'altro lato conduce a tempi di recupero troppo lunghi, difficilmente compatibili con le esigenze del servizio.

5.2 - Smorzamento critico ($\alpha = 2$)

Introducendo tale valore di α nell'espressione generale, si ottiene una forma indeterminata. Pertanto occorre considerare l'espressione cercata come il limite per α che tende a 2 della $f(x)$ generale. Con le usuali regole per i limiti si ottiene:

$$f(x)/b_t = \lim_{\alpha \rightarrow 2} [f(x, \alpha)/b_t] = 2 \times \exp(-x) \quad (28)$$

Tale relazione rappresenta una funzione crescente fino ad un massimo, raggiunto per il valore:

$$x = x_0 = 1 \quad (29)$$

dove la funzione vale:

$$f(x_0)/b_t = 2/e = 0.736 \quad (30)$$

La fig. 5 rappresenta l'andamento della (28) normalizzata al valore del suo massimo.

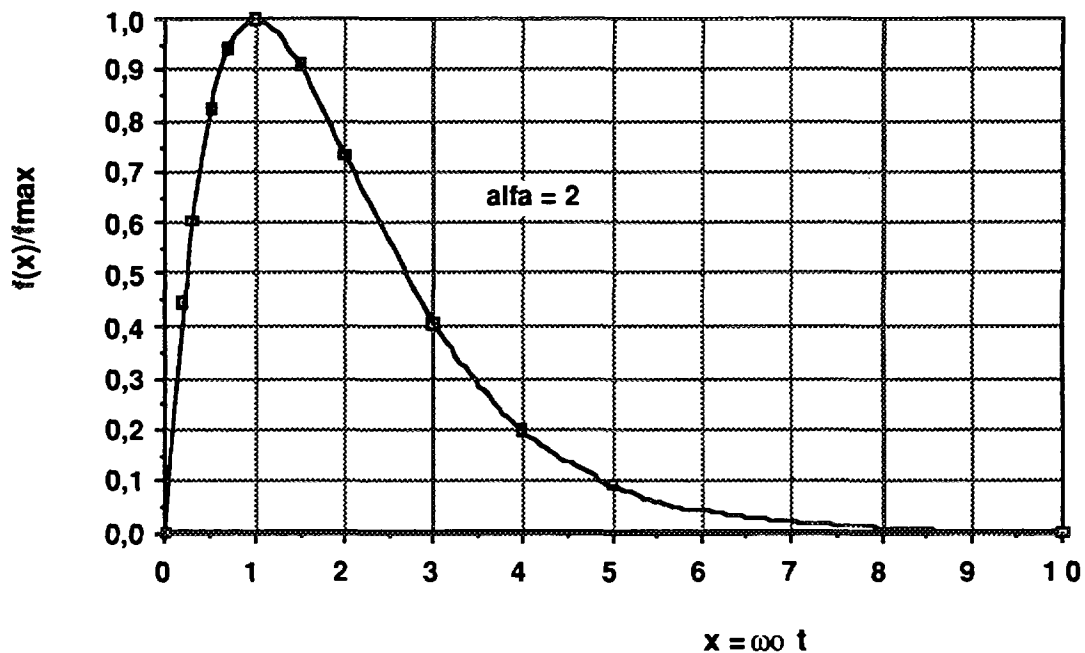


Fig. 5 - Andamento della risposta normalizzata nel caso critico ($\alpha = 2$).

Raggiunto il massimo la curva decresce rapidamente con x e si avvicina asintoticamente all'asse delle ascisse con un andamento esponenziale decrescente, e cioè nel modo monotono più veloce possibile.

Anche in questo caso la stabilità è garantita perché nella risposta non sono presenti oscillazioni e l'equilibrio può considerarsi recuperato (10% del massimo) dopo circa 5 costanti di tempo, cosa che corrisponde ad un ritardo pari a $(20 + 32)$ sec a seconda del valore di b_t .

Pur essendo questo tempo più piccolo che nel caso sopracritico, tuttavia esso è appena compatibile con alcune situazioni particolari di carico, favorevoli per l'esercizio (essenzialmente carichi termici). Nel caso più generale di carichi di molteplice natura, tale ritardo è ritenuto ancora incompatibile con una situazione corretta di esercizio, per cui solo raramente si trova che il sistema di regolazione dei generatori rotativi è posto in condizione di smorzamento critico.

5.3 - Smorzamento sottocritico ($\alpha < 2$)

In questo caso, che rappresenta, per i motivi che vedremo, la condizione usuale di lavoro del sistema di controllo del generatore, il discriminante delle radici dell'equazione di secondo grado ha valore negativo, per cui le due radici si trovano nel piano dei numeri complessi e possono essere rappresentate come:

$$s_{1,2} = a \pm i (1/2) \omega_0 b \quad (31)$$

Dove:

$$\begin{aligned} a &= -\omega_0 \alpha / 2 \\ b &= (4 - \alpha^2)^{1/2} \\ i &= (-1)^{1/2} \end{aligned} \quad (32)$$

Sostituendo le (26) nella relazione generale ed effettuando qualche passaggio matematico si ottiene con lo stesso significato di x delle espressioni precedenti:

$$f(x)/b_t = (2 \alpha / b) \exp(-\alpha x/2) * \frac{\{\exp[i(1/2)bx] - \exp[-i(1/2)bx]\}}{2i} \quad (33)$$

E' facile verificare che l'ultimo fattore del prodotto corrisponde alla scrittura esponenziale del $\sin(bx/2)$, per cui in definitiva la relazione diviene:

$$f(x)/b_t = (2 \alpha / b) \exp(-\alpha x/2) \sin(bx/2) \quad (34)$$

Tale espressione è facilmente riconoscibile come una funzione oscillante intorno all'asse delle ascisse, la cui ampiezza si smorza nel tempo per opera del termine esponenziale decrescente posto a fattore.

Consideriamo, come caso esemplificativo, un particolare valore di α che rende molto semplice la trattazione matematica e cioè:

$$\alpha = (2)^{1/2} \approx 1,414 \quad (35)$$

In questo caso l'espressione precedente assume la forma semplice di:

$$f(x)/b_t = 2 \exp(-0,707 x) \sin(0,707 x) \quad (36)$$

Questa funzione possiede una serie di massimi e di minimi in corrispondenza dei valori di ascissa:

$$x_n = (2)^{1/2} (\pi/4 + n \pi) \quad (37)$$

dove n assume tutti i valori interi a partire da zero. I valori massimi si hanno per i valori pari di n e i minimi per i valori dispari.

Il primo massimo è incontrato per $n=0$ in corrispondenza di $[x_0 = (2)^{1/2} \pi/4]$ e vale:

$$f_{\max}/b_t = (2)^{1/2} \exp(-\pi/4) = 0.645 \quad (38)$$

poi la curva decresce fino a tagliare l'asse delle ascisse ripetutamente nei punti di valore:

$$x_m = (2)^{1/2} (m \pi) \quad (39)$$

Il primo punto di zero, a parte l'origine, s'incontra per $m=1$ in corrispondenza dell'ascissa:

$$x_1 = (2)^{1/2} (\pi) = 4.44 \quad (40)$$

Successivamente la curva raggiunge il primo minimo per $n=1$, in cui vale:

$$f_{\min}/b_t = - (2)^{1/2} \exp(-5\pi/4) = -0.028 \quad (41)$$

La seguente fig. 6, in cui è riportata la rappresentazione normalizzata della (36), chiarisce meglio in forma grafica tutto il precedente discorso.

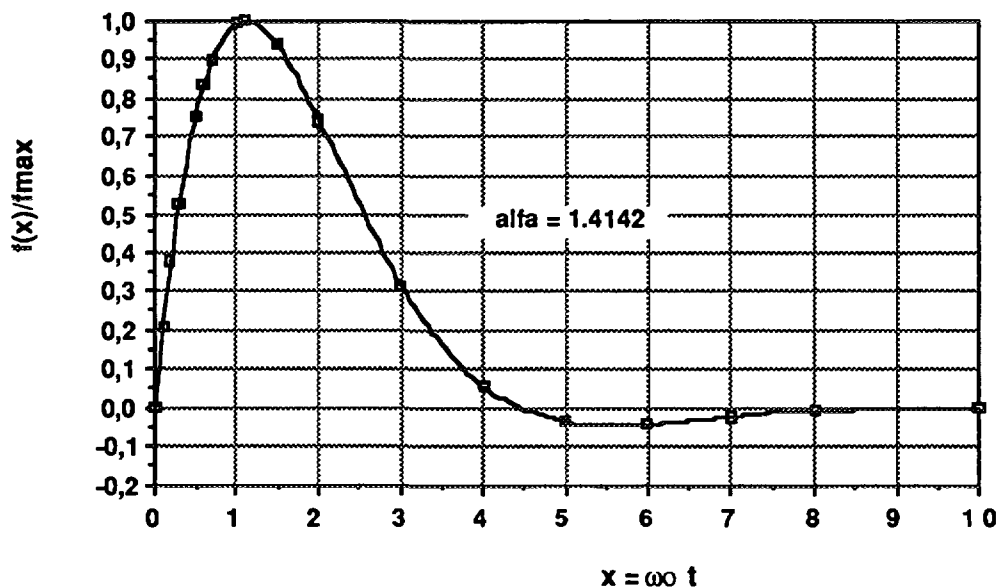


Fig. 6 - Risposta normalizzata nel caso sottocritico [$\alpha = (2)^{1/2} \approx 1,4142$]

Come è possibile vedere, il tempo di recupero (da definire in questo caso entro la fascia di $\pm 10\%$) viene raggiunto in un tempo molto breve (circa 3.8 costanti di tempo). Ciò è ottenuto però a scapito della stabilità in quanto la risposta diviene oscillante. Tuttavia, visto il notevole smorzamento delle oscillazioni, (il primo massimo negativo ha un'ampiezza pari a circa lo 0.5% del massimo scostamento e tutti gli altri hanno ampiezza minore), la piccola instabilità temporanea può ritenersi tollerabile.

5.4 - Rappresentazione grafica comparativa

Nella fig. 7 sono stati riportati i grafici relativi ai tre valori esemplificativi di α sopra considerati. In più si è anche riportato il grafico relativo ad un altro valore fortemente sottocritico di α , ($\alpha = 0.5$), in modo da mostrare come la risposta del sistema si avvia a divenire del tipo a oscillazioni permanenti al decrescere del fattore di smorzamento.

Come si può vedere, nel caso di uno smorzamento fortemente sottocritico, la risposta mostra un primo recupero rapidissimo, entro soltanto 3 costanti di tempo; però poi lo scostamento cresce fortemente dal lato negativo fino al 40% e successivamente ancora al 20%, valori del tutto intollerabili nella gestione corretta dei carichi.

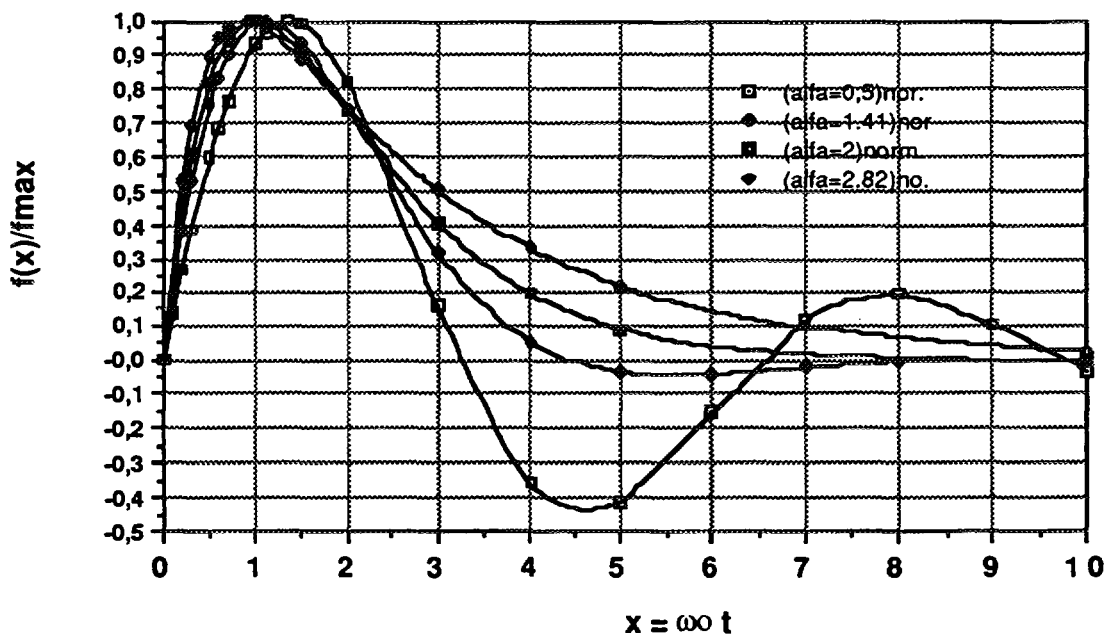


Fig. 7 - Rappresentazione comparativa dei casi esaminati

In conclusione di questo paragrafo, interessa soprattutto sottolineare il fatto che nella pratica viene generalmente adottato il caso leggermente sottocritico in quanto esso rappresenta il più conveniente compromesso tra un rapido recupero delle condizioni di equilibrio e la stabilità del sistema. Come si è visto, nel caso di $\alpha = (2)^{1/2}$, il tempo di recupero vale circa 3.8 costanti di tempo, che equivale ad un tempo compreso tra 10 sec e 17 sec in corrispondenza del valore di b_t .

6 - ACCETTABILITA' DELLA VARIAZIONE

Facciamo dunque riferimento al caso pratico dello smorzamento appena sottocritico [$\alpha = (2)^{1/2} \approx 1,414$] e cerchiamo di calcolare lo scostamento massimo della frequenza di rete dal suo valore nominale di equilibrio. Ciò equivale a cercare il massimo della funzione $f(x)$ con il solito sistema di uguagliare a zero la sua derivata. Senza entrare in particolari dettagli di calcolo si trova che tale massimo avviene in corrispondenza del valore di x :

$$x_0 = 2 (4 - \alpha^2)^{-1/2} \operatorname{arctang}[(4 - \alpha^2)^{1/2}/\alpha] \quad (42)$$

Sostituendo tale valore nella (34), si ottiene:

$$f_{\max} = f(x_0) = 2 b_t \exp(-\alpha x_0/2) \cos(bx_0/2) \quad (43)$$

Dato il particolare valore considerato per α si ha che x_0 vale:

$$x_0 = 2^{1/2} \operatorname{arctang} 1 = 2^{1/2} \pi/4 \quad (44)$$

Sostituendo questo valore nella precedente si ottiene:

$$f_{\max} = 2 b_t \exp(-\pi/4) \cos(\pi/4) = b_t 2^{1/2} \exp(-\pi/4) = 0.645 b_t \quad (45)$$

Ricordando la definizione di $f(x)$ derivante dalla (10) come rapporto tra la variazione relativa della frequenza di rete e la variazione relativa della potenza, si può scrivere che:

$$(\Delta\Omega/\Omega_{\text{nom}})_{\max} = (\Delta P_L/P_{\text{nom}}) f_{\max} = (\Delta P_L/P_{\text{nom}}) 0.645 b_t \quad (46)$$

Quindi la variazione relativa massima della frequenza di rete è proporzionalmente collegata alla variazione relativa della potenza, attiva nello stesso momento in rete, con un coefficiente di proporzionalità che dipende dalle caratteristiche meccaniche del generatore convenzionale.

Per quanto si è già detto a proposito di quest'ultimo parametro, i valori di b_t si trovano nella pratica sempre nell'intervallo tra 0.25 e 0.40. Si è anche già accennato al fatto che generalmente le specifiche contrattuali per la frequenza di rete fissano la tolleranza dentro un'oscillazione relativa non superiore al 3%. Pertanto questa condizione dovrà essere imposta alla relazione precedente, che in tal modo diviene:

$$(\Delta P_L/P_{\text{nom}}) 0.645 b_t < 0.03 \quad (47)$$

o ciò che è lo stesso:

$$(\Delta P_L/P_{\text{nom}})_{\max} < 0.03/(0.645 b_t) \quad (48)$$

Ponendo dentro la formula i valori ricordati per b_t , si ottengono i corrispondenti valori delle variazioni di potenza che il sistema riesce a tollerare e cioè:

b_t	$(\Delta P_L/P_{nom})_{max}$
0.25	19%
0.40	12%

In definitiva, ogni perturbazione brusca (a gradino) del livello della potenza maneggiata dal sistema nel suo stato di equilibrio produce una deviazione dai limiti delle specifiche, e quindi un intervento dei sistemi di protezione del generatore, quando l'ampiezza del gradino raggiunge e supera un livello dell'ordine del (12 - 19)% rispetto alla potenza nominale in gioco.

7 - CONCLUSIONE

Se si considera il fatto che, nel caso dell'allacciamento al generatore di una fonte rinnovabile intermittente, la variazione del livello di potenza può essere dovuto all'improvvisa mancanza della potenza proveniente dalla fonte, si comprende immediatamente come la potenza massima allacciabile non deve mai superare i limiti sopra calcolati.

Nel caso della presenza simultanea di due o più generatori convenzionali, il calcolo diviene più complicato e difficile. Tuttavia, almeno qualitativamente si può dire che le condizioni per la tolleranza sulle variazioni della frequenza divengono più restrittive a causa della necessità di mantenere il sincronismo tra le diverse macchine (tipicamente la tolleranza diviene inferiore all'1%). Ciò comporterebbe la riduzione ad un terzo dei valori accettabili per l'allacciamento di potenza, se non intervenissero altri fattori compensativi, sia sul coefficiente di smorzamento complessivo del sistema, sia sullo statismo equivalente complessivo, a causa della stessa presenza di più generatori rotanti in sincronismo.

Il primo di questi fattori riguarda il fatto che, entro certi limiti, eventuali variazioni di velocità di rotazione di un generatore ed il conseguente slittamento di fase producono negli altri un aggiustamento compensativo della frequenza, che tende a ripristinarne il valore di equilibrio ed il perfetto sincronismo. Ciò equivale ad usufruire di un coefficiente di smorzamento aggiuntivo senza intervenire sulla stabilità delle singole regolazioni di macchina.

Il secondo fattore riguarda lo statismo transitorio. Si può dimostrare [1] infatti che l'onere di reagire alla perturbazione dello stato di equilibrio della potenza può essere suddiviso automaticamente tra i diversi generatori rotativi. In tal modo, il sistema riesce a sopportare complessivamente una variazione relativa di potenza più grande che nel caso di un singolo generatore.

In definitiva, la conclusione sopra raggiunta per i limiti di accettabilità di un singolo generatore non può essere generalizzata, tale e quale, al caso dell'allacciamento delle fonti rinnovabili ad una rete elettrica. Tuttavia, viste le considerazioni qualitative circa gli effetti, peggiorativi e migliorativi, sulla stabilità del sistema per la presenza di più generatori, si può ritenere che i valori calcolati per il caso semplice sopra esaminato, pur essendo soltanto indicativi, possano essere considerati rappresentativi, sul piano concettuale, almeno dell'ordine di grandezza da attribuire come limite alla potenza intermittente che può essere accettata in collegamento diretto alla rete.

8 - BIBLIOGRAFIA

1 - F. Saccomando: "Sistemi Elettrici Per l'Energia: analisi e controllo." - Edizioni UTET, Torino 1992

9 - APPENDICE

A .1 - Statismi di regolazione [1]

a) Lo statismo permanente di un gruppo è definito come il rapporto cambiato di segno tra le variazioni relative di frequenza e quelle della potenza regolante in condizioni di tempi lunghi, cioè, ad una distanza temporale abbastanza grande dall'istante di inizio del verificarsi di un cambiamento di potenza.

$$b_p = \left[- \frac{(\Delta\Omega/\Omega_{nom})}{(\Delta P_r/P_{nom})} \right]_{t = \infty}$$

Quindi b_p riguarda il comportamento del sistema di regolazione quando variano le condizioni stazionarie in modo stabile. Esso rappresenta perciò la misura della capacità del sistema di regolazione a controllare che la frequenza non possa discostarsi troppo dal suo valore nominale quando venga a persistere una variazione della potenza.

Dalla definizione segue pertanto che più piccolo è lo statismo permanente e meno si fanno risentire sulla frequenza operativa le variazioni relative della potenza. Un buon gruppo di regolazione deve quindi avere valori di b_p più bassi possibili.

b) Lo statismo transitorio di regolazione è definito analogamente al precedente, con riguardo però ai tempi brevi e, cioè, esso viene a caratterizzare il comportamento della regolazione di un gruppo elettrogeneratore per variazioni rapide e transitorie della potenza.

$$b_t = \left[- \frac{(\Delta\Omega/\Omega_{nom})}{(\Delta P_r/P_{nom})} \right]_{t = 0}$$

In questo caso si vuole che, ad uno scostamento rapido e transitorio della frequenza dalle sue condizioni nominali, il sistema reagisca subito in termini di variazioni compensative della potenza regolante. Ciò comporta che b_t debba essere il più grande possibile, perché piccoli aggiustamenti di potenza abbiano grandi effetti compensativi sulle variazioni di frequenza.

c) Statismi e risposta del sistema

Facendo riferimento alla definizione della risposta come mostrato nella prima parte della (8), si può vedere che cosa significano gli statismi sopra definiti in termini di parametri della risposta.

$$G(s) = \frac{K_0 (1 + sT_2)}{(1 + sT_1)} = \frac{\Delta P_r}{\Delta\Omega}$$

Da cui segue che:

$$\frac{\Delta P_r / P_{nom}}{\Delta \Omega / \Omega_{nom}} = \frac{\Omega_{nom}}{P_{nom}} G(s) = \frac{\Omega_{nom} K_o (1 + sT_2)}{P_{nom} (1 + sT_1)}$$

Dalle definizioni degli statismi segue che b_p può essere ricavato ponendo nell'inverso della precedente $s=0$ e analogamente calcolando b_t per $s=\infty$. In definitiva:

$$b_p = P_{nom} / \Omega_{nom} K_o$$

$$b_t = P_{nom} T_1 / \Omega_{nom} K_o T_2 = b_p T_1 / T_2$$

e la risposta $G(s)$ può essere riscritta introducendo b_p e b_t come:

$$\begin{aligned} G(s) &= (P_{nom} / \Omega_{nom}) \frac{(1 + sT_2)}{b_p (1 + sT_1)} = (P_{nom} / \Omega_{nom}) \frac{(1 + sT_2)}{b_p + sT_1 b_p} = \\ &= (P_{nom} / \Omega_{nom}) \frac{(1 + sT_2)}{b_p + sT_2 b_t} \end{aligned}$$

che è la seconda parte della (8).

A.2 - Il metodo dei residui

Sia $F(s)$ la funzione trasformata secondo Laplace della funzione temporale $f(t)$. Supponiamo che la $F(s)$ possieda n poli $s_1, s_2, s_3, \dots, s_k, \dots, s_n$, ciascuno di molteplicità $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k, \dots, r_n$. Se $H(s)$ è una funzione regolare nel piano complesso cosicché si possa scrivere la $F(s)$ nella forma:

$$F(s) = \frac{H(s)}{\prod_k (s - s_k)^{r_k}}$$

allora la antitrasformata di $F(s)$ si può trovare calcolando i residui e cioè:

$$f(t) = \sum_k \frac{1}{(r_k - 1)!} \left\{ \frac{d^{r_k - 1}}{ds^{r_k - 1}} [(s - s_k)^{r_k} F(s) \exp(st)] \right\}_{s=s_k}$$

Nel nostro caso, dalla (16) è facile vedere che la nostra $F(s)$ ha esattamente la forma richiesta per l'applicazione del metodo dei residui quando si consideri che:

$$H(s) = \omega_0 \alpha b_t$$

Ciò considerato, l'applicazione del metodo porta immediatamente al risultato espresso dalla (18).

Edito dall' **ENEA**
Unità Comunicazione e Informazione
Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
Stampa: COM - Centro Stampa Tecnografico - C. R. Frascati

Finito di stampare nel mese di febbraio 1997