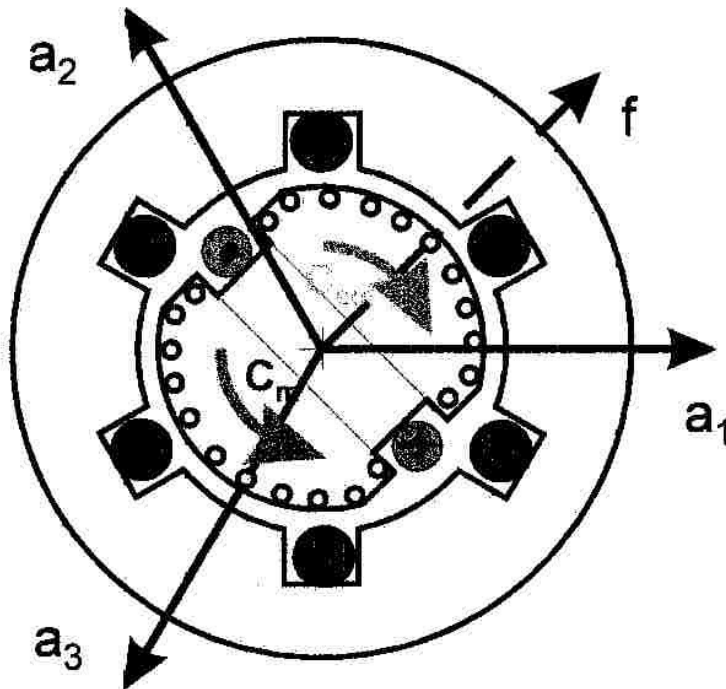


TRANSITORI ELETTROMECCANICI NEI SISTEMI ELETTRICI PER L'ENERGIA.

guasto

CONSEGUENZE DEL GUASTO

- La rete elettrica non è più in grado di trasferire la potenza dai nodi di generazione ai nodi di carico.
- Vi è quindi uno squilibrio tra la coppia meccanica all'asse dei generatori e la coppia elettromagnetica con conseguente variazione della velocità dei rotori delle macchine.
- Un tale fenomeno può portare alla perdita del sincronismo (passo) dei generatori.



Prima del guasto

$$C_{em} = C_m$$

In seguito ad un guasto

$$C_{acc} = C_m - C_{em}$$

NO

instabilità del
punto di
funzionamento

L'angolo di coppia
si mantiene limitato
durante il transitorio?

SI

stabilità del
punto di
funzionamento

IL PROBLEMA

Valutare se vi è o meno perdita di stabilità del trasferimento della potenza in seguito a possibili guasti (eventi anomali) sulla rete.

Per :

- **in fase di progetto**, verificare il corretto dimensionamento del sistema e delle protezioni;

- **in fase di esercizio**, verificare se le logiche di gestione e la taratura delle protezioni sono adeguate al fine di non perdere la stabilità in caso di eventi anomali;

- **in fase post mortem**, analizzare il comportamento del sistema e delle protezioni al fine di definire le modifiche strutturali e/o di gestione .

IPOTESI GENERALI DI CALCOLO

(componente elettromeccanica)

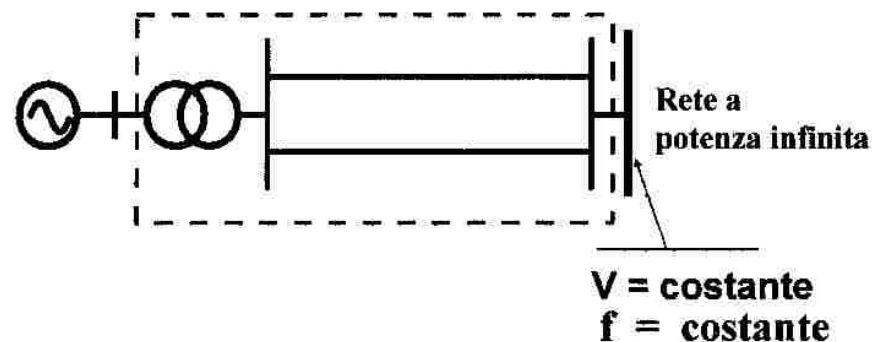
- Si decide sulla perdita o meno del sincronismo analizzando solo la prima oscillazione delle macchine; è quindi breve l'intervallo di tempo in esame (dell'ordine del secondo).
- In tale intervallo di tempo si suppone che la potenza meccanica trasferita dai motori primi ai generatori rimanga costante (i regolatori della potenza non hanno il tempo di intervenire).

IPOTESI GENERALI DI CALCOLO

(componente elettromagnetica)

- Può essere adottato per i generatori il modello a f.e.m. e reattanza costanti ipotizzando che i fenomeni elettromagnetici, molto più veloci di quelli elettromeccanici, si siano esauriti.
- Vista la durata del fenomeno (dell'ordine del secondo), si adotta il modello transitorio (f.e.m. e reattanza transitorie costanti in modulo).
- In questo modello di prima approssimazione non si considera l'effetto del regolatore di tensione (ipotesi cautelativa)

GENERATORE SINCRONO COLLEGATO AD UNA RETE DI POTENZA INFINITA



EQUAZIONI DEL SISTEMA

- Equazione dinamica costituita dall'equazione differenziale che descrive l'equilibrio meccanico delle parti rotanti (albero/i) del sistema di conversione (motore primo-macchina sincrona) (equazione elettromeccanica).
- Equazione algebrica della coppia elettromagnetica che dipende dalla potenza trasferita alla rete (load flow).

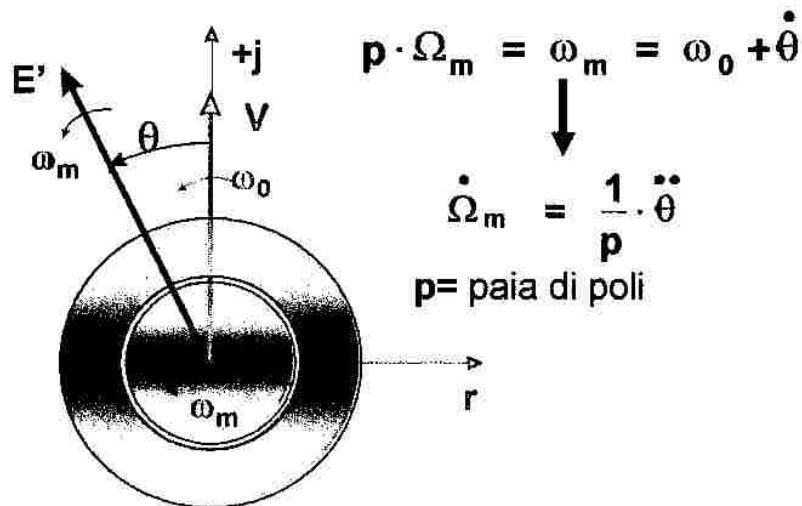
EQUAZIONE ELETTROMECCANICA

$$I \cdot \dot{\Omega}_m = C_m - C_{em}$$

$$\downarrow$$

$$I \cdot \dot{\Omega}_m = \frac{1}{\Omega_m} (P_m - P_{em})$$

Nell'ipotesi di albero infinitamente rigido.



N.B. La pulsazione di E' è ω_m nell'ipotesi che E' rimanga solidale con il rotore.

L'EQUAZIONE ELETTROMECCANICA diventa

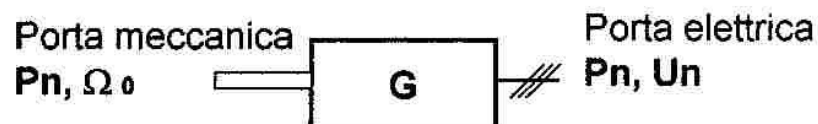
$$\frac{I}{p} \ddot{\theta} = \frac{1}{\Omega_m} (P_m - P_{em}) \cong$$

$$\cong \frac{1}{\Omega_0} (P_m - P_{em})$$

Ω_0 = velocità di riferimento o nominale

N.B. tutto questo nell'ipotesi che le variazioni di velocità durante il transitorio siano piccole rispetto alla velocità nominale.

L'EQUAZIONE ELETTROMECCANICA IN p.u.



$$\frac{I \cdot \Omega_0}{p \cdot P_n} \cdot \ddot{\theta} = P_{m,p.u.} - P_{em,p.u.} = C_{m,p.u.} - C_{em,p.u.}$$

IL MOMENTO D'INERZIA PUO' ESSERE ESPRESSO:

- in valore assoluto fornendo il "GD²" del rotore che è uguale a 4 volte il momento d'inerzia ($J = GD^2 / 4$);
- attraverso il "tempo di avviamento" che consente un facile calcolo della costante d'inerzia [$J\Omega_0 / (pP_n)$] nell'equazione in p.u.

IL TEMPO DI AVVIAMENTO

- E', per definizione, il tempo necessario affinché il rotore raggiunga la velocità nominale partendo da fermo quando è sottoposto ad una coppia accelerante costante pari alla coppia nominale.

$$T_{avv} = \frac{I \cdot \Omega_0^2}{P_n}$$

↓

$$\frac{I \cdot \Omega_0}{p \cdot P_n} = \frac{T_{avv}}{p \cdot \Omega_0} = \frac{T_{avv}}{\omega_0}$$

OSSERVAZIONE

Talvolta viene fornito invece del "tempo di avviamento", la cosiddetta "costante d'inerzia" H definita come:

il rapporto tra l'energia cinetica del rotore alla velocità di esercizio e la potenza nominale della macchina sincrona.

Tale costante d'inerzia ha ancora le dimensioni di un tempo e si dimostra immediatamente che è pari alla metà del tempo di avviamento :

$$T_{avv} = 2H.$$

VALORI MEDI DEI TEMPI DI AVVIAMENTO DI DIVERSI TIPI DI MACCHINE IN SECONDI

Turbogeneratori	12
Gruppi idraulici	8
Motori sincroni	4
Compensatori sincroni	1.5
Motori asincroni	1

Nel seguito l'equazione elettromeccanica
sarà comunque indicata da:

$$J \cdot \ddot{\theta} = C_m - C_{em} \quad \text{ove } J \text{ vale:}$$

$$J = \frac{I}{p} \quad \text{se l'equazione è in grandezze assolute.}$$

$$J = \frac{I \cdot \Omega_0}{p \cdot P_n} \quad \text{se l'equazione è in valori relativi.}$$

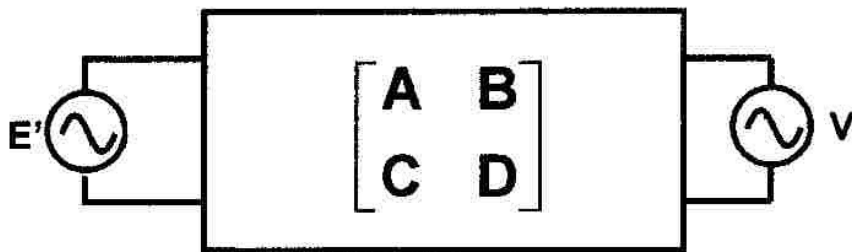
e le coppie sono ottenute:

dalle potenze dividendole per Ω_0 nel caso di equazione in valori assoluti,

risultano uguali alle potenze in p.u. nel caso di equazione in valori relativi,

ESPRESSIONE DELLA COPPIA ELETTROMAGNETICA

(modello di rete)



ESPRESSIONE DELLA POTENZA TRASMESSA

$$P_{em} = E'^2 \cdot \frac{D}{B} \cdot \cos(\beta - \delta) + \frac{E' \cdot V}{B} \cdot \cos(\beta + \theta)$$



$$C_{em} = P_{em} / \Omega_0 \quad \text{in valori assoluti}$$

$$c_{em} = p_{em} \quad \text{in valori p.u.}$$

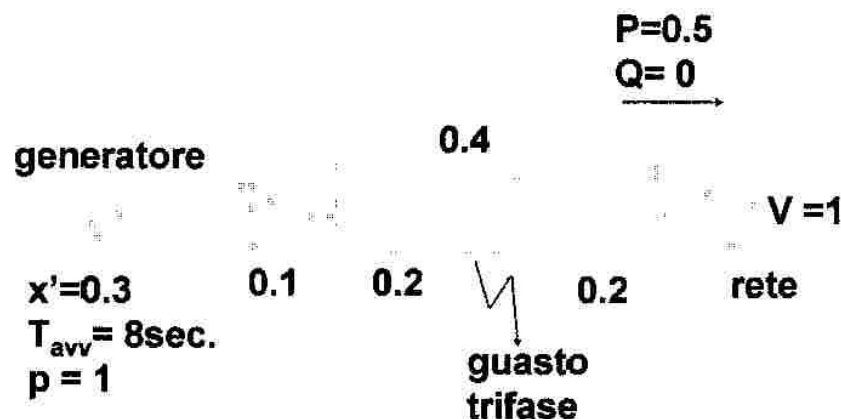
IPOTESI DI RETE NON DISSIPATIVA

- Le costanti A e D sono reali.
- La costante B è immaginaria pura ed uguale a “- j X_m”, ove X_m è la reattanza longitudinale dell'equivalente a pi-greco del doppio bipolo.
- Per cui :

$$P_{em} = \frac{E' \cdot V}{X_m} \cdot \sin(\theta)$$

$$J \cdot \ddot{\theta} = C_m - C_{max} \sin(\theta)$$

UN SEMPLICE CASO: TRANSITORIO ELETTROMECCANICO DOVUTO AD UN SOLO CAMBIAMENTO DI CONFIGURAZIONE DI RETE



STUDIO DEL TRANSITORIO ELETTROMECCANICO

- Si deve integrare l'equazione elettromeccanica nel tempo ed in relazione alle diverse configurazioni di rete che si possono creare (ad esempio durante un guasto), al fine di osservare se l'andamento nel tempo dell'angolo “θ” diverge o rimane limitato.
- L'equazione differenziale da integrare è non lineare per cui è necessario procedere ad una integrazione numerica passo-passo

SITUAZIONE PREGUASTO

(calcolo di E' e θ₀ di nell'ipotesi di rete non dissipativa)

