

Dimensionamento di massima di motore a corrente continua

Si individuino i parametri principali di una macchina a corrente continua eccitazione indipendente in grado di muovere un tram veloce note che siano le seguenti specifiche:

Tensione di alimentazione della linea 600 V

Velocità nominale di rotazione del motore 314 rad/s

rendimento 0.9, trascurando la potenza necessaria per l'eccitazione e le perdite nel ferro

La macchina deve essere in grado di accelerare, con accelerazione costante, una vettura portandola da 0 a 60 km/h in 25 s. La vettura ha massa a vuoto di 10 T ed ha capienza di 200 persone (la persona *standard* sia di 80 kg).

E' noto inoltre che la coppia di attrito può essere considerata proporzionale alla velocità ed, alla velocità nominale è pari ad un terzo della coppia accelerante richiesta a quella velocità.

Svolgimento

Si inizia valutando la potenza accelerante richiesta al motore (cioè la potenza richiesta per ottenere il profilo di velocità voluto in assenza di forze resistenti).

La potenza massima richiesta si avrà, ovviamente, quando la vettura è a pieno carico ed a massima velocità.

La massa a pieno carico della vettura è:

$$m_{TOT} = 200 \cdot 80 \text{ kg} + 10 \text{ T} = 26 \text{ T}$$

La velocità massima espressa in metri al secondo e l'accelerazione voluta sono:

$$v_{\max} = 60 \text{ km/h} \cdot \frac{1000}{3600} = 16.7 \text{ m/s}$$
$$a = \frac{v_{\max}}{t} = \frac{16.7 \text{ m/s}}{25 \text{ s}} = 0.668 \text{ m/s}^2$$

Pertanto la massima potenza accelerante richiesta può essere calcolata come:

$$P_{acc} = m_{TOT} \cdot a \cdot v_{\max} = 290 \text{ kW}$$

D'altra parte, alla velocità massima anche la potenza necessaria per vincere gli attriti è la massima e sarà pari ad un terzo della coppia accelerante richiesta a quella velocità. La potenza nominale della macchina sarà pertanto:

$$P_n = P_{acc} + P_{attriti} = \frac{4}{3} P_{acc} = 387 \text{ kW}$$

Dal rendimento del circuito di armatura, dalla potenza nominale e dalla velocità nominale è possibile ricavare la corrente nominale e la coppia nominale:

$$I_n = \frac{P_n}{\eta V_n} = \frac{387 \text{ kW}}{0.9 \cdot 600 \text{ V}} = 716 \text{ A}$$
$$C_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{387 \text{ kW}}{314 \text{ rad/s}} = 1232 \text{ Nm}$$

Dalla conoscenza di coppia e corrente nominale si può ricavare il prodotto della costante di macchina per la corrente di eccitazione:

$$k I_{ecc} = \frac{C_n}{I_n} = 1.72 \text{ Wb}$$

Dall'espressione del rendimento di armatura si ottengono immediatamente la resistenza e la tensione indotta come:

$$R I_n^2 = (1 - \eta) V_n I_n \Rightarrow R = (1 - \eta) \frac{V_n}{I_n} = 0.08 \Omega$$

$$E_n I_n = \eta V_n I_n \Rightarrow E_n = \eta V_n = 540 \text{ V}$$

Il momento di inerzia del veicolo che sarà visto dal motore può essere ottenuto eguagliando le energie cinetiche delle masse in movimento a quelle di masse rotanti. Si ha:

$$\frac{1}{2} m_{TOT} v_{\max}^2 = \frac{1}{2} J_{eq} \omega_n^2 \Rightarrow J_{eq} = m_{TOT} \frac{v_{\max}^2}{\omega_n^2} = 73.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Regolazione di un generatore in corrente continua che alimenta un carico variabile

Sia dato il generatore in corrente continua eccitazione indipendente i cui dati principali sono i seguenti:

$$P_n = 20 \text{ kW}$$

$$V_n = 400 \text{ V}$$

$$R_{a\%} = 2\%$$

$$n_n = 1500 \text{ r.p.m.}$$

$$V_{ecc,n} = 200 \text{ V}$$

$$I_{ecc,n} = 1 \text{ A}$$

$$C_{att} = B \omega_r, B = 0.025 \text{ N m s}$$

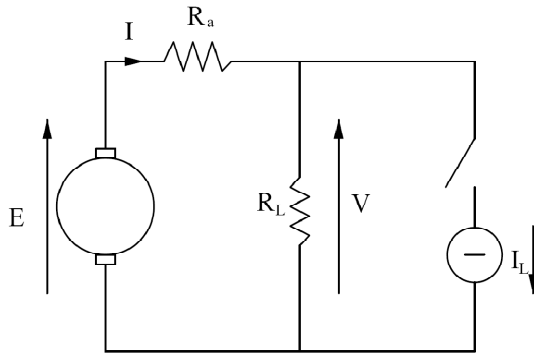


Fig. 1. Circuito equivalente del sistema

Il generatore alimenta un carico resistivo di 10Ω con tensione nominale di 400 V . Si determinino la coppia che deve sviluppare un motore primo che muove il generatore e la velocità di rotazione a cui deve ruotare il gruppo di generazione affinché il carico sia alimentato a tensione nominale, in assenza di regolazione dell'eccitazione.

Ad un certo istante, l'interruttore S in figura viene chiuso e il generatore deve alimentare, in parallelo al carico resistivo, un generatore di corrente che assorbe una corrente di 10 A . Si determinino:

1. la tensione a cui viene alimentato il carico se il motore mantiene costante la velocità di rotazione;
2. la tensione a cui viene alimentato il carico se il motore mantiene costante la coppia motrice (senza considerare la variazione della coppia di attrito);
3. i rendimenti del sistema nelle quattro condizioni di funzionamento e il rendimento nominale del generatore.

Svolgimento

Si adotti la convenzione del generatore e si usino le lettere come indicato in figura. I parametri di macchina in condizioni nominali sono immediatamente ottenibili come:

$$I_n = \frac{P_n}{V_n} = 50 \text{ A}$$

$$R_a = R_{a\%} \frac{V_n}{I_n} = 0.16 \Omega$$

$$E_n = V_n + R_a I_n = 408 \text{ V}$$

$$\omega_n = n_n \frac{2\pi}{60} = 157 \text{ rad/s}$$

$$k I_{ecc,n} = \frac{E_n}{\omega_n} = 2.6 \text{ Wb}$$

$$C_{el,n} = k I_{ecc,n} I_n = 130 \text{ Nm}$$

$$C_{m,n} = C_{el,n} + C_{att} = C_{el,n} + B \omega_n = 133.9 \text{ Nm}$$

dove si è indicato con $C_{el,n}$ l'aliquota di coppia motrice bilanciata dalla coppia elettromagnetica in condizioni nominali mentre con $C_{m,n}$ la coppia motrice nominale.

Il rendimento in condizioni nominali può essere quindi calcolato come rapporto tra la potenza uscente e la somma delle potenze entranti. Si ha:

$$\eta_n = \frac{P_n}{C_{m,n} \omega_n + P_{ecc,n}} = \frac{P_n}{C_{m,n} \omega_n + V_{ecc,n} I_{ecc,n}} = 94.2\%$$

Prima della chiusura dell'interruttore l'unico carico alimentato è il carico resistivo da 10 Ω . Se alimentato a tensione nominale tale carico assorbe una corrente di 40 A. Si ha:

$$E = V_R + R_a I_R = 406.4 \text{ V}$$

$$\omega = \frac{E}{E_n} \omega_n = 156.4 \text{ rad/s}$$

$$C_{el} = \frac{I_R}{I_n} C_{el,n} = 104 \text{ Nm}$$

$$C_m = C_{el} + B \omega = 107.9 \text{ Nm}$$

$$\eta = \frac{V_R I_R}{C_m \omega + P_{ecc,n}} = 93.7\%$$

A questo punto si chiude l'interruttore e il carico cambia. Si consideri dapprima il punto 1: la velocità rimane costante a 156.4 rad/s. In questo caso, non variando la corrente di eccitazione anche la tensione indotta rimane costante a 406.4 V. Il circuito equivalente del sistema diviene quello in fig. 2.

Risolvendo il circuito di figura 2 si ottiene:

$$V = \frac{R_L}{R_L + R_a} (E - R_a I_L) = 398.4 \text{ V}$$

$$I = \frac{V}{R_L} + I_L = 49.8 \text{ A}$$

$$C_{el} = \frac{I}{I_n} C_{el,n} = 129.5 \text{ Nm}$$

$$C_m = C_{el} + B \omega = 133.4 \text{ Nm}$$

$$\eta = \frac{V^2 / R_L + V I_L}{C_m \omega + P_{ecc,n}} = 93.9\%$$

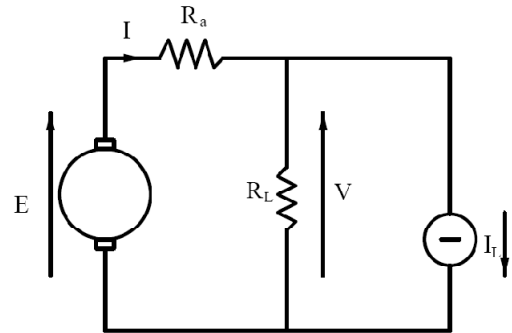


Fig. 2. Circuito equivalente del sistema

Per il punto 2, invece si suppone costante la coppia elettromagnetica impressa e quindi $C_{el} = 104 \text{ Nm}$. Se la coppia elettromagnetica è costante, a corrente di eccitazione costante la corrente erogata dal generatore è costante e pari a 40 A. Il circuito equivalente è quello riportato in fig. 3.

Risolvendo il circuito equivalente di fig. 3 si ottiene

facilmente:

$$I_R = I - I_L = 30 \text{ A}$$

$$V = R_L I_L = 300 \text{ V}$$

$$E = V + R_a I = 306.4 \text{ V}$$

$$\omega = \frac{E}{E_n} \omega_n = 117.9 \text{ rad/s}$$

$$C_m = C_{el} + B \omega = 106.9 \text{ Nm}$$

$$\eta = \frac{V^2 / R_L + V I_L}{C_m \omega + P_{ecc,n}} = 93.7\%$$

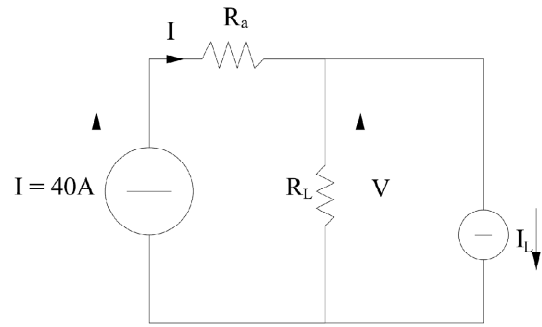


Fig. 3. Circuito equivalente del sistema

Si osservi che la soluzione al problema può essere cercata anche per via grafica. Nel primo caso, quando la velocità è mantenuta costante la caratteristica del generatore è una retta a pendenza negativa data dalla resistenza R_a che intercetta l'asse delle tensioni nel punto di valore E . La caratteristica del carico resistivo è una retta di pendenza R_L passante per l'origine. Quando si chiude l'interruttore la caratteristica del carico trasla verso destra di una quantità pari ad I_L . La caduta di tensione può essere approssimativamente stimata come il prodotto $R_a I_L = 1.6 \text{ V}$ che dà un'ottima stima del risultato preciso ottenuto svolgendo l'esercizio. Il tutto è illustrato in fig. 4.

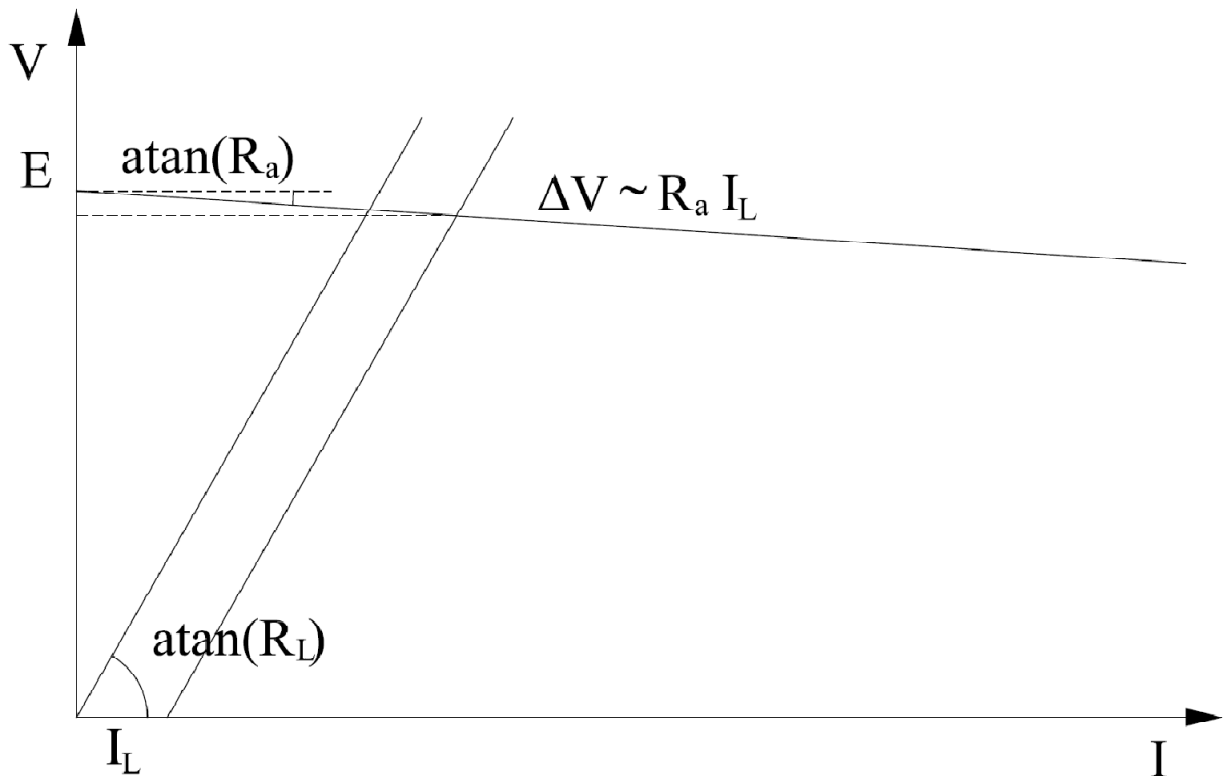


Fig. 4. Caratteristica del generatore a velocità costante

Quando invece è mantenuta costante la coppia, e quindi la corrente, la caratteristica del generatore è una retta verticale. La caduta di tensione può essere quindi valutata esattamente come il prodotto $R_L I_L$ ottenendo lo stesso risultato che si è ottenuto in precedenza. La soluzione grafica è illustrata in fig. 5.

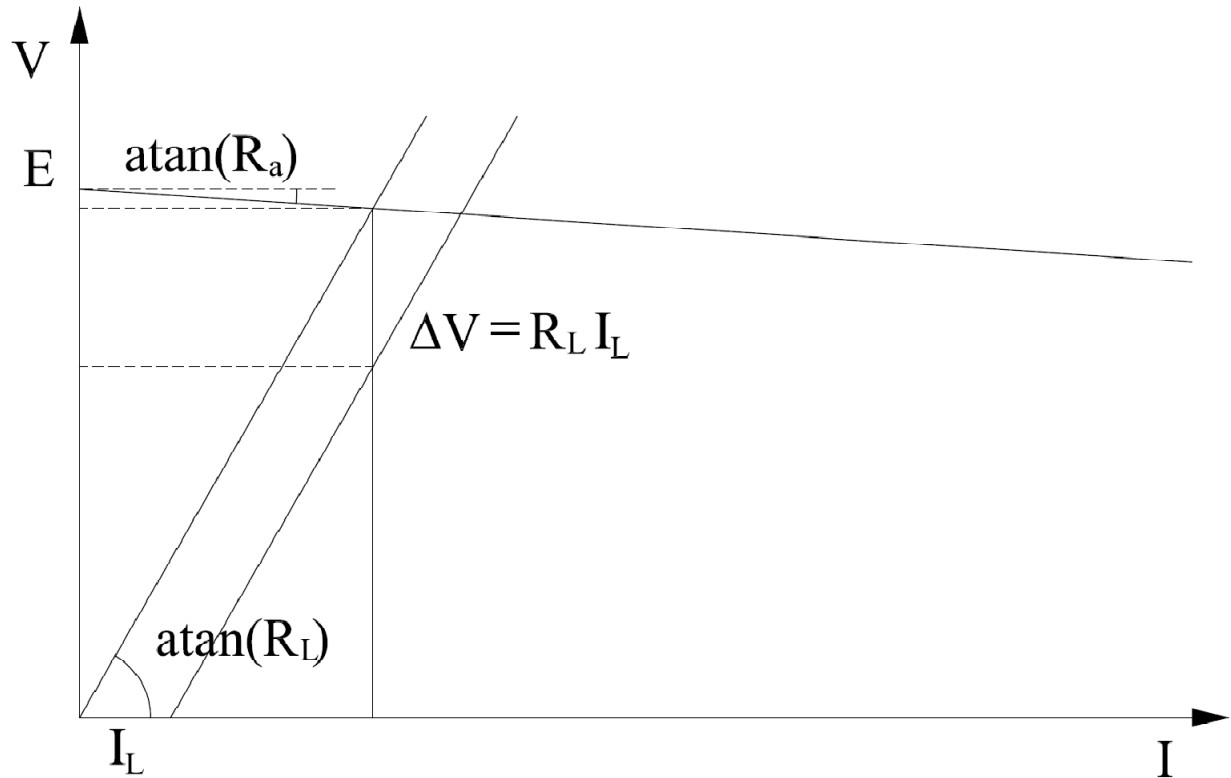


Fig. 5. Caratteristica del generatore a coppia elettromagnetica costante

Motore cc alimentato da un generatore cc

Sia dato il motore in corrente continua eccitazione indipendente i cui dati principali sono i seguenti:

$$P_{m,n} = 10 \text{ kW}$$

$$V_{m,n} = 200 \text{ V}$$

$$R_{m\%} = 2\%$$

$$n_{m,n} = 1500 \text{ r.p.m.}$$

$$V_{eccm,n} = 200 \text{ V}$$

$$I_{eccm,n} = 1 \text{ A}$$

$$C_{atm} = B_m \omega_m, B_m = 0.025 \text{ Nms}$$

Il motore deve muovere un carico che assorbe 5 kW a 100 rad/s. Il motore, a sua volta, è alimentato da un generatore in corrente continua ad eccitazione indipendente i cui dati principali sono i seguenti:

$$P_{g,n} = 16 \text{ kW}$$

$$V_{g,n} = 200 \text{ V}$$

$$R_g = 100 \text{ m}\Omega$$

$$n_{g,n} = 1500 \text{ r.p.m.}$$

$$V_{eccg,n} = 48 \text{ V}$$

$$I_{eccg,n} = 5 \text{ A}$$

$$C_{atg} = B_g \omega_g, B_g = 0.025 \text{ Nms}$$

Si determinino la coppia motrice da sviluppare all'albero del generatore e la velocità di rotazione del generatore. Si determini, inoltre, il rendimento globale.

Svolgimento

Si adotti la convenzione del motore per il motore e la convenzione del generatore per il generatore.

Il circuito equivalente è quello riportato in fig. 1.

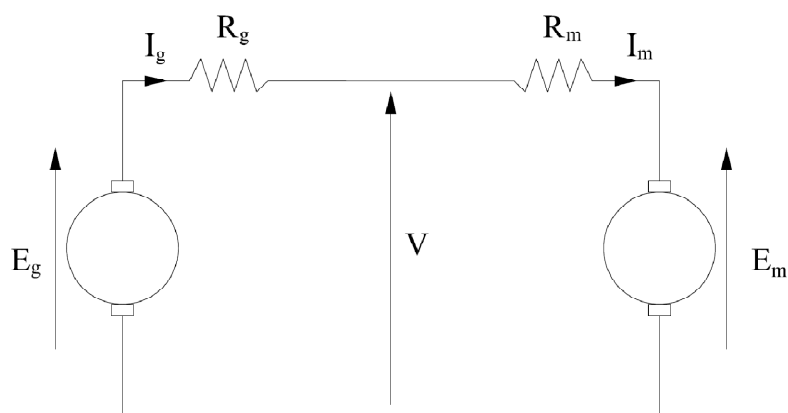


Fig. 1. Schema equivalente del circuito

Si inizi con la caratterizzazione del motore.

Essendo:

$$V_{m,n} = E_{m,n} + R_m I_{m,n} \Rightarrow V_{m,n} I_{m,n} = P_{m,n} + R_m I_{m,n}^2 \Rightarrow V_{m,n} I_{m,n} = P_{m,n} + \frac{R_m\%}{100} V_{m,n} I_{m,n}$$

ed indicando con R_{pu} la resistenza espressa in per unit si ha:

$$I_{m,n} = \frac{P_{m,n}}{V_{m,n} (1 - R_{m,pu})} = 51 \text{ A}$$

Si ottiene poi:

$$C_{m,n} = \frac{P_{m,n}}{\omega_{m,n}} = 63.7 \text{ Nm}$$

$$R_m = R_{m,pu} \frac{V_{m,n}}{I_{m,n}} = 78.4 \text{ m}\Omega$$

$$E_{m,n} = V_{m,n} - R_m I_{m,n} = 196 \text{ V}$$

Dai dati del carico meccanico e tenendo conto degli attriti si può ottenere la tensione a cui deve essere alimentata la macchina:

$$C_L = \frac{P_L}{\omega_L} = 50 \text{ Nm}$$

$$C_m = C_L + C_{attm} = 52.5 \text{ Nm}$$

$$I_m = \frac{C_m}{C_{m,n}} I_{m,n} = 42 \text{ A}$$

$$E_m = \frac{\omega_m}{\omega_{m,n}} E_{m,n} = 124.8 \text{ V}$$

$$V_{m,n} = E_{m,n} + R_m I_{m,n} = 128.1 \text{ V}$$

Si passa ora a caratterizzare il generatore.

$$I_{g,n} = \frac{P_{g,n}}{V_{g,n}} = 80 \text{ A}$$

$$E_{g,n} = V_{g,n} + R_g I_{m,n} = 208 \text{ V}$$

$$C_{g,n} = \frac{E_{g,n} I_{g,n}}{\omega_{g,n}} = 106 \text{ Nm}$$

Tenendo conto della tensione a cui bisogna alimentare il motore e della corrente che questo assorbe si ha:

$$I_g = I_m = 40 \text{ A}$$

$$V_g = V_m = 128.1 \text{ V}$$

$$E_g = V_g + R_g I_g = 132.3 \text{ V}$$

$$\omega_g = \frac{E_g}{E_{g,n}} \omega_{g,n} = 99.9 \text{ rad/s}$$

$$C_g = \frac{I_g}{I_{g,n}} C_{g,n} = 55.6 \text{ Nm}$$

La velocità a cui far muovere il generatore è quindi 99.9 rad/s mentre la coppia motrice, tenendo conto degli attriti sul generatore risulta:

$$C_{mot} = C_g + B_g \omega_g = 58.1 \text{ Nm}$$

Il rendimento può essere calcolato come potenza utile (quella fornita al carico meccanico) divisa per la potenza meccanica in ingresso al generatore elettrico a cui vanno sommate le potenze necessarie per l'eccitazione delle due macchine. Si ha:

$$\eta = \frac{P_L}{C_{mot} \omega_g + V_{eccm,n} I_{eccm,n} + V_{eccg,n} I_{eccg,n}} = 80\%$$