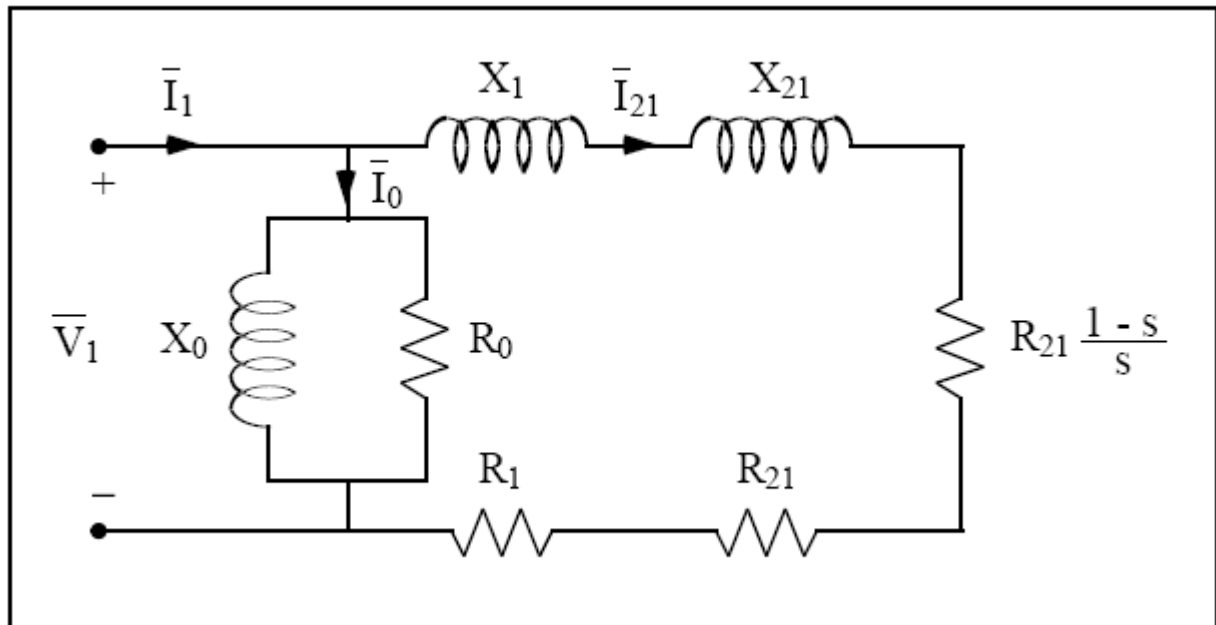


REGOLAZIONE DEI MOTORI ASINCRONI TRIFASE

A cura del prof: Ing. Fusco Ferdinando

Regolazione dei M.A.T.



Circuito equivalente riportato al primario (modello a flusso bloccato)

Espressione matematica della caratteristica meccanica del motore, che lega la coppia allo scorrimento.

$$C = \frac{3 p}{\omega_1} V_1^2 \frac{\frac{R_{21}}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s} \right)^2 + X_T^2} .$$

C coppia meccanica;

p n. coppie polari;

ω_1 pulsazione di rete;

V_1 tensione di alimentazione;

R_1 resistenza degli avvolgimenti statorici

R_{21} resistenza degli avvolgimenti rotorici riportata al primario;

X_T reattanza di dispersione totale riportata al primario ($X_1 + X_{21}$);

S scorrimento;

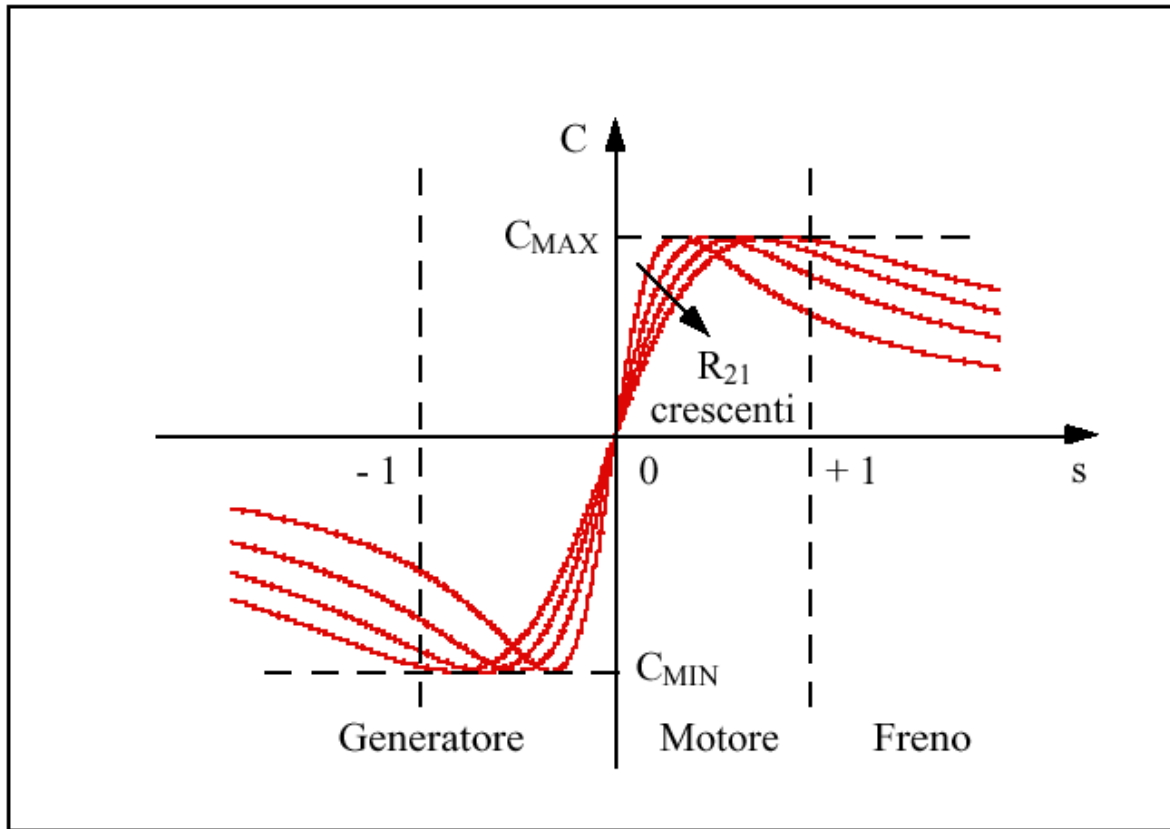


Figura 1: caratteristica meccanica di una Macchina Asincrona Trifase al variare di R_{21}

La coppia è nulla per $s = 0$ (sincronismo), la coppia cresce all'aumentare di s fino a raggiungere il valore massimo

$$C_{MAX} = \frac{3 p}{\omega_1} V_1^2 \frac{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}}{R_1^2 + X_T^2 + R_1 \sqrt{R_1^2 + X_T^2}},$$

che si ottiene in corrispondenza dello scorrimento

$$s^* = \frac{R_{21}}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}},$$

con s^* generalmente variabile nell'intervallo $0.1 \leq s^* \leq 0.2$.

Generalmente R_1 è trascurabile rispetto a X_T , per cui le formule sopra riportate si possono semplificare in

$$s^* \cong \frac{R_{21}}{X_T}, \quad C_{MAX} \cong \frac{3 p}{\omega_1} V_1^2 \frac{1}{X_T}, \quad \text{per piccoli valori di } R_1 .$$

Come si vede la C_{MAX} è inversamente proporzionale alla reattanza di dispersione Totale X_T e per questo motivo il traferro si fa il più piccolo possibile, mentre è indipendente dalla resistenza dei circuiti rotorici. La resistenza dei circuiti rotorici interviene solamente a determinare il valore di s^* , in corrispondenza del quale si realizza il valore massimo della coppia. Ciò vuol dire che aumentando R_{21} , la C_{MAX} rimane costante, ma ad una velocità inferiore, cioè con un aumento di s^* (Figura 2).

Per $s = 1$ si ha la coppia di spunto o di avviamento, pari a

$$C_{AVV} \cong \frac{3 p}{\omega_1} V_1^2 \frac{R_{21}}{(R_1 + R_{21})^2 + X_T^2},$$

che è direttamente proporzionale ad R_{21} , potendo trascurare R_1+R_{21} rispetto a X_T . La C_{AVV} cresce al crescere di R_{21} , fino a divenire uguale a C_{MAX} quando

$$C_{AVV} = C_{MAX} \rightarrow R_1 + R_{21} = X_T .$$

Per ulteriori aumenti di R_{21} la coppia di avviamento diminuisce, in quanto C_{MAX} si sposta oltre il valore $s = 1$.

Dall'analisi della caratteristica meccanica si evince che il MAT presenta, all'avviamento, cioè per $s = 1$, una non elevata coppia di spunto compresa nell'intervallo $0.2 C_{MAX} \leq C_{AVV} \leq 0.5 C_{MAX}$; inoltre, in queste condizioni, presenta il tipico funzionamento del trasformatore in corto circuito.

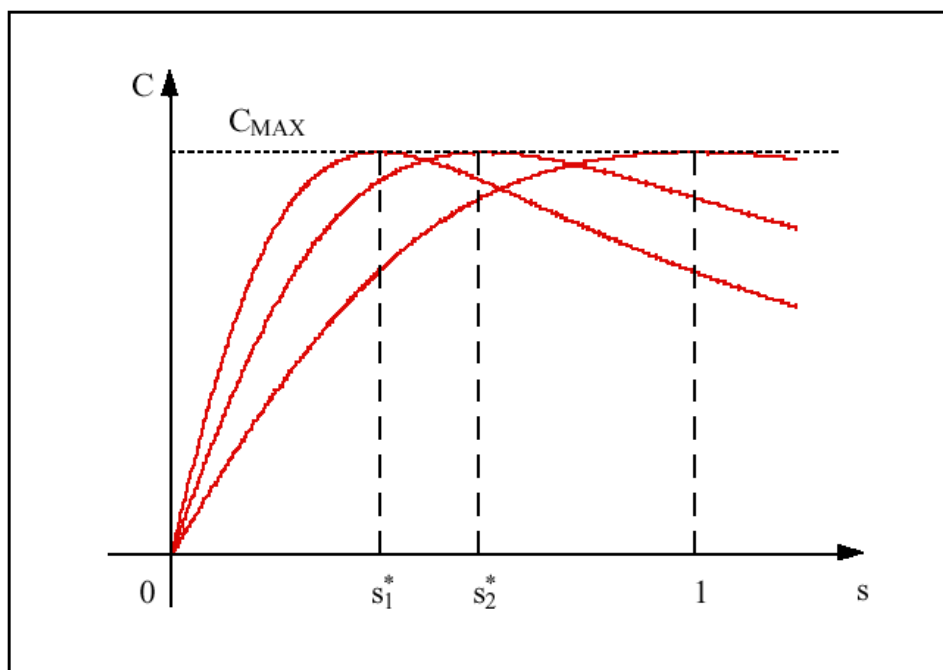


Figura 2: aumento della coppia di spunto al crescere della resistenza rotorica.

Esaminando la caratteristica di Figura 3 nell'intervallo $0 \leq n \leq n_0$, notiamo che essa si compone di due rami, il primo, quello ascendente, cui corrisponde un funzionamento instabile, l'altro discendente, cui corrisponde un funzionamento stabile: il punto di C_{MAX} segna il valore critico di confine tra queste due zone.

Il secondo tratto è stabile perché, ad ogni aumento della coppia resistente, il motore rallenta e si porta a funzionare stabilmente ad un nuovo scorrimento cui corrisponde una coppia motrice maggiore, di valore pari al nuovo valore della coppia resistente richiesta. Questa nuova condizione di equilibrio sarà raggiunta dopo una serie di oscillazioni intorno al punto di equilibrio, oscillazioni dipendenti dalla rapidità della variazione del carico, dall'inerzia delle masse ruotanti ed alla presenza di attriti e smorzamenti del moto. Nell'altro tratto, invece, ad ogni aumento della coppia resistente il motore rallenta, con conseguente diminuzione della coppia motrice ed ulteriore rallentamento, sicché, dopo poco, smaltita l'energia cinetica delle masse rotanti, il motore si ferma.

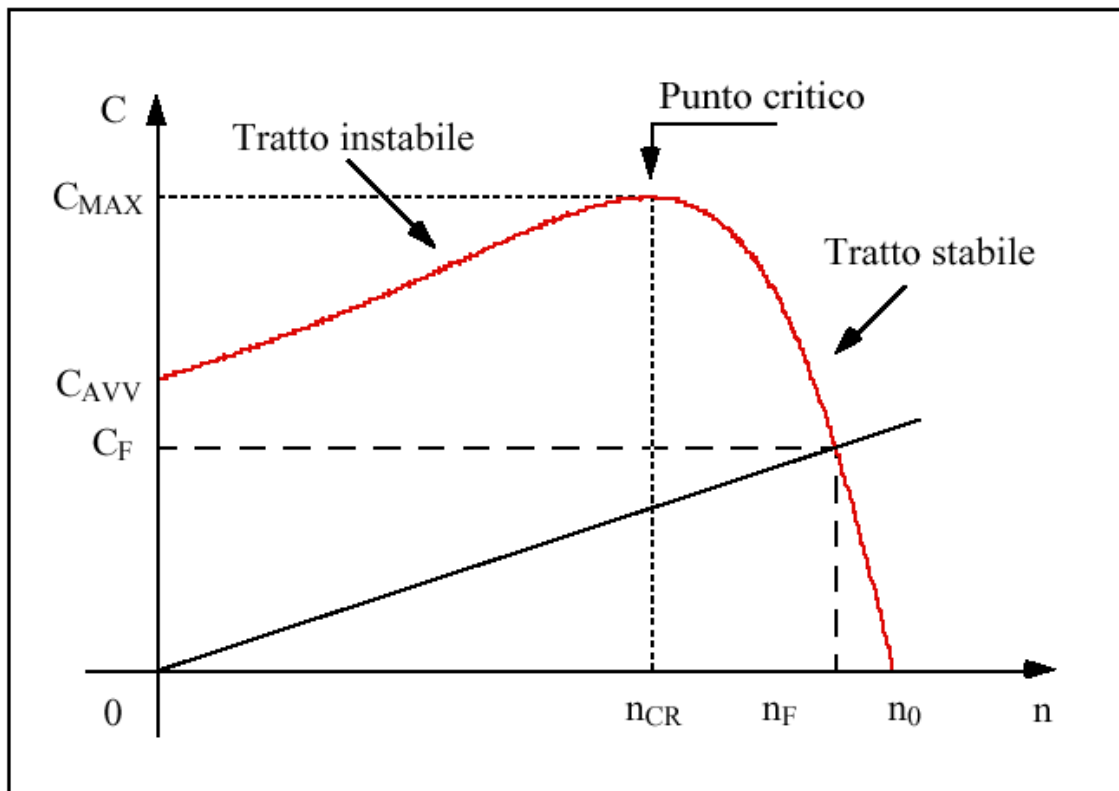


Figura 3: caratteristica meccanica e punto di lavoro.

Il punto di normale funzionamento (anche detto punto di lavoro), caratterizzato dalla coppia $n = n_F$ e $C = C_F$, si trova nel secondo tratto, quello stabile e come si può vedere dispone ancora di un buon margine di coppia perché di solito $C_{MAX}/3 \leq C_F \leq C_{MAX}/2$. Inoltre, poiché il secondo tratto della caratteristica è molto ripido, a regime la velocità è pressoché costante al variare del carico ($0.03 \leq s \leq 0.1$).

Avviamento, inversione di marcia e regolazione della velocità

L'applicazione pratica di tutte le conoscenze finora acquisite sul funzionamento del MAT si trova ogni qualvolta si tratta di portare il motore stesso da una ad un'altra condizione di funzionamento.

Uno dei comandi più consueti è l'avviamento, che consiste nel portare la velocità del motore da zero a quella nominale. Affinché il motore possa avviarsi ed accelerare, è necessario che la coppia di spunto sia superiore alla coppia resistente, sempre all'avviamento, del carico. Inizialmente il rotore è fermo e lo statore non alimentato; la tensione e la frequenza nominali del motore sono uguali a quelli della linea di alimentazione. Quando si chiude l'interruttore che collega la linea al motore (rotore fermo, $s = 1$) questo si comporta come un trasformatore chiuso in cortocircuito e nel primo istante di avviamento, come più volte ribadito, assorbe dalla linea la massima corrente, così elevata (4 ÷ 8 volte la corrente nominale) che può dar luogo a diversi inconvenienti, tra i quali un eccessivo riscaldamento degli avvolgimenti e della linea, se l'avviamento è lento, ad un'elevata caduta di tensione lungo la linea, con problemi agli utilizzatori se questi sono particolarmente sensibili alla tensione, e, se anche l'avviamento fosse rapido, un intempestivo intervento delle protezioni sulla linea. Si accennerà ora agli accorgimenti usati per ovviare a questi inconvenienti.

• Avviamento del motore con rotore avvolto

Se il motore è a rotore avvolto, sarà dotato di anelli, spazzole e resistenze variabili sul circuito di rotore, Figura 4 questa terna di resistenze è chiamata reostato d'avviamento ed avviamento reostatico il tipo di avviamento per tali motori.

La presenza di una elevata resistenza rotorica all'atto dell'avviamento e con tensione di alimentazione costante, ha un duplice scopo: da un lato l'impedenza rotorica aumenta di modulo con una conseguente diminuzione della corrente assorbita dal motore all'avviamento; dall'altro l'aumento della resistenza comporta una diminuzione dello sfasamento delle correnti rotoriche con conseguente aumento del valore della coppia di avviamento e quindi dell'accelerazione.

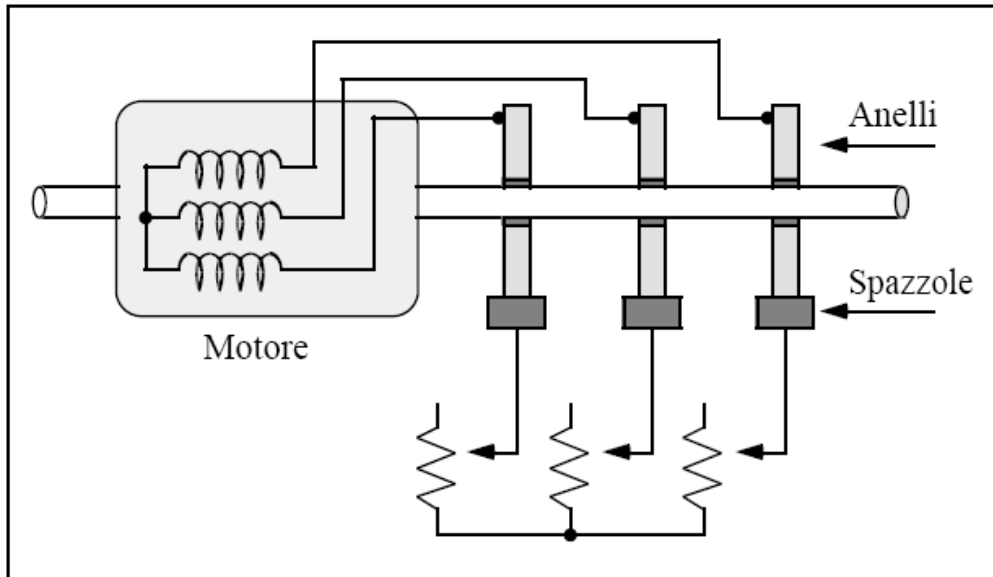


Figura 4: schema del motore con rotore avvolto e reostato di avviamento.

Il reostato, completamente inserito all'atto dell'avviamento, verrà gradualmente disinserito man mano che la velocità aumenta, Figura 5, verrà escluso completamente quando la velocità avrà raggiunto quasi il suo valore nominale (80% circa).

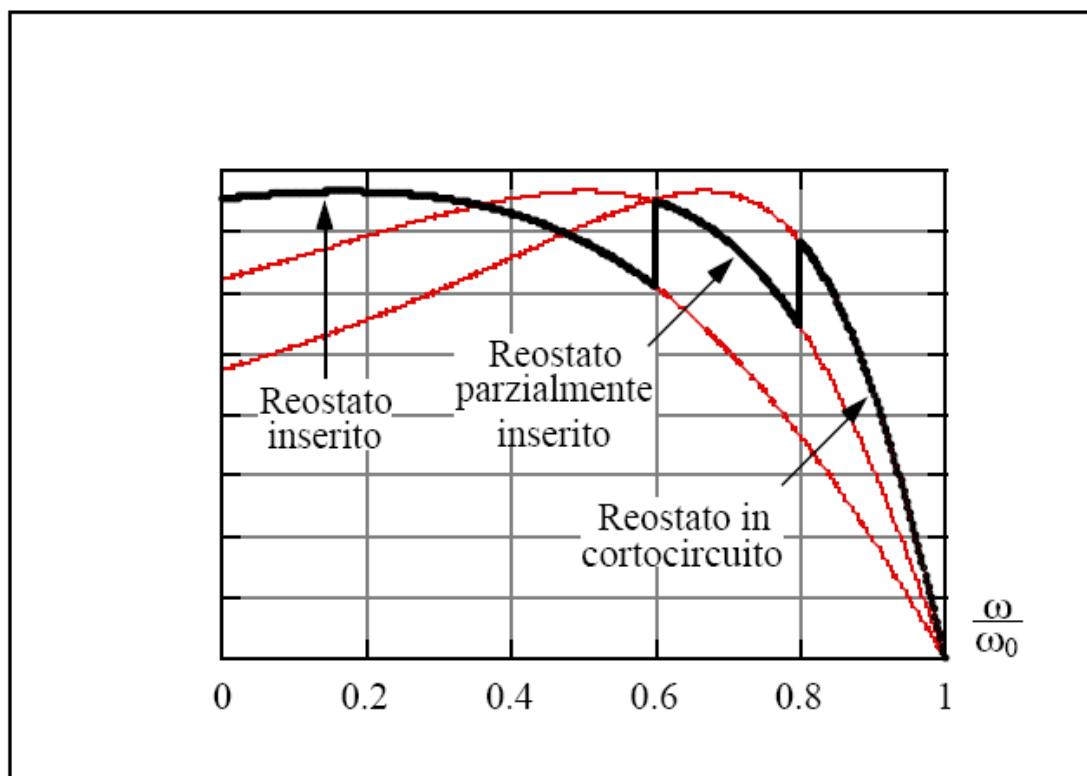


Figura 5: effetto sulla caratteristica del reostato di avviamento

• Avviamento del motore con rotore a gabbia

Per i motori con rotore a gabbia (o con rotore in cortocircuito) non è possibile inserire resistenze nei circuiti rotorici per cui, all'avviamento, le correnti di spunto sono elevate. Ora, essendo il circuito fortemente induttivo (la gabbia rotorica è immersa nel ferro), le correnti sono notevolmente sfasate rispetto alle f.e.m., cioè piccola è la potenza assorbita e tale risulta anche la coppia motrice. Di conseguenza, si possono avere due tipi fondamentali sistemi di avviamento.

Si ha **avviamento diretto** quando la potenza del motore è piccola (10 kW al massimo), per cui questi motori vengono avviati senza alcun accorgimento particolare perché la corrente di spunto risulta di piccola intensità, (3 ÷ 6) iN, e, quindi, non crea problemi alla linea e la coppia di spunto è pressappoco uguale a quella nominale (0.5 ÷ 1) cN. Si ha, invece, **avviamento a tensione ridotta** quando, non essendo possibile avere allo spunto correnti relativamente ridotte con coppie relativamente alte, si mira essenzialmente a limitare la corrente di spunto riducendo la tensione di alimentazione. In questo modo, però, si riduce anche la coppia di spunto che è proporzionale al quadrato della tensione applicata al motore, Figura 6, per cui questo metodo può essere usato solo quando la coppia resistente all'avviamento presenta piccoli valori, oppure quando il motore possiede una coppia di spunto tanto elevata per cui la riduzione di tensione non pregiudica l'avviamento.

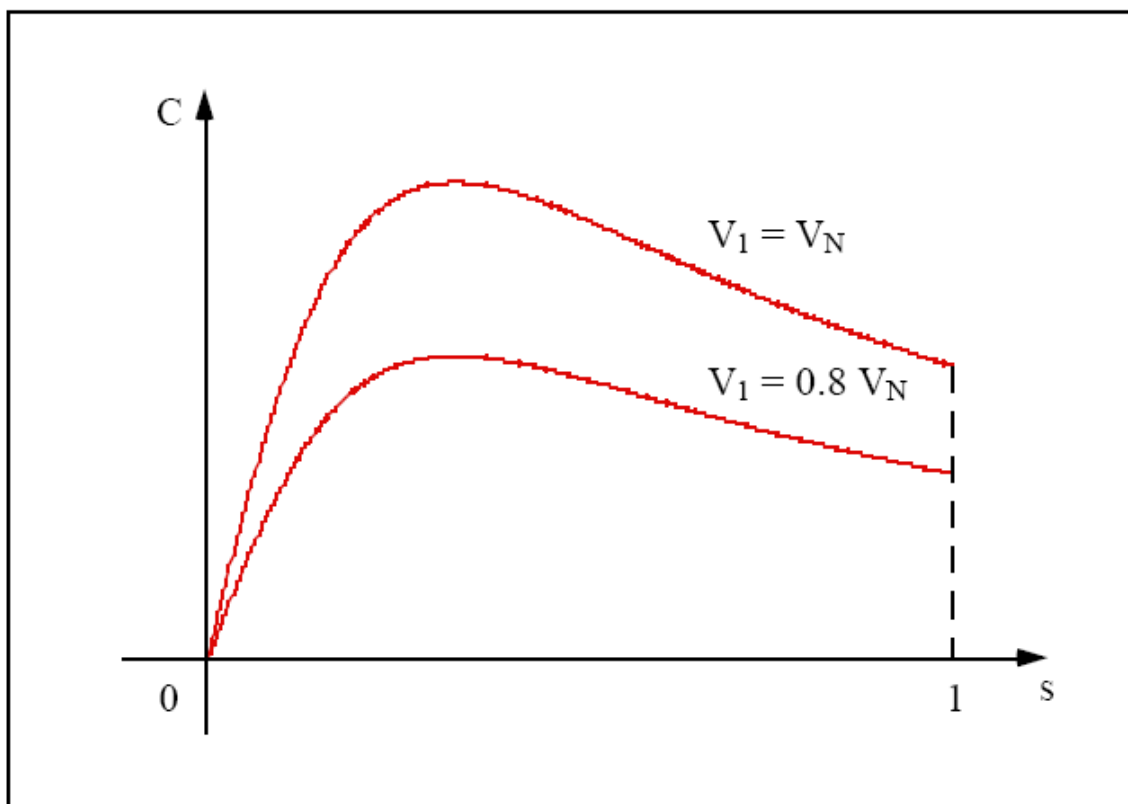


Figura 6: coppia motrice per due diversi valori della tensione d'alimentazione

Vari possono essere i sistemi per ridurre la tensione di alimentazione all'avviamento. In particolare, abbiamo l'avviamento mediante l'inserzione di resistenze statoriche, mostrata in Figura 7: si tratta di resistori da inserire, all'avviamento, in serie ad ogni fase statorica. La tensione si riduce per effetto delle caduta di tensione sulle resistenze aggiunte, da escludere a regime, ed è evidente che si hanno notevoli perdite per effetto Joule.

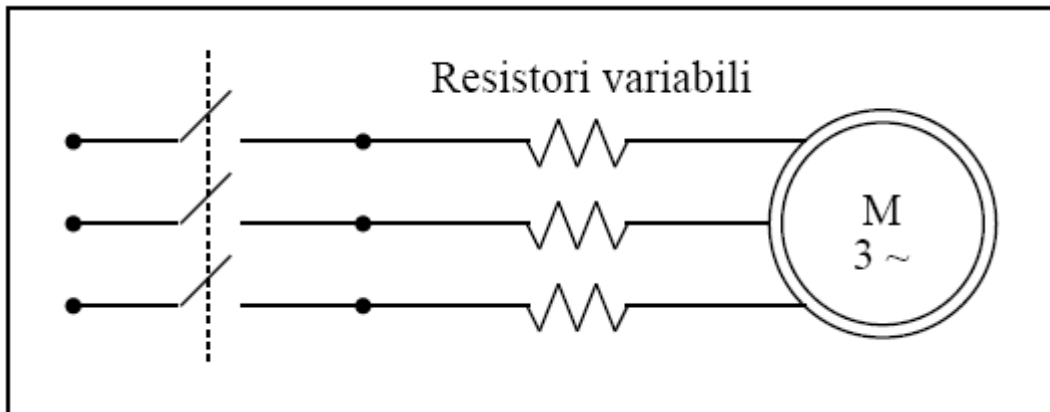


Figura 7: avviamento mediante resistenze statoriche

L'alimentazione tramite autotrasformatore, ad una o più prese intermedie, è schematizzata in Figura 8: lo svantaggio è dovuto alla necessità di avere un'altra macchina, l'autotrasformatore, costosa, impiegata per breve tempo, e con perdita di potenza. Inoltre, non può essere usato per motori con frequenti avviamenti.

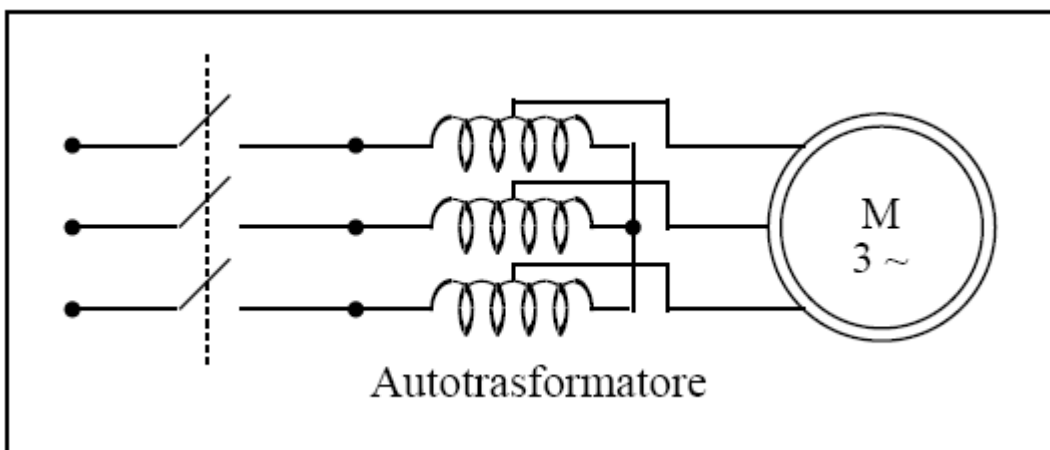


Figura 8: avviamento mediante autotrasformatore

L'avviamento stella-triangolo, mostrato in Figura 9, viene utilizzato per quei motori la cui tensione nominale, per ciascuno dei suoi avvolgimenti statorici, sia uguale alla tensione concatenata della linea di alimentazione. All'avviamento le fasi del motore vengono collegate a stella, a triangolo durante la marcia normale.

All'avviamento gli avvolgimenti statorici, collegati a stella, saranno soggetti ad una tensione ridotta 3 volte, la corrente di linea assorbita dal motore si riduce di un terzo come pure la coppia di spunto, proporzionale al quadrato della tensione.

Questo metodo, molto usato in passato, ha l'inconveniente di presentare un brusco aumento della corrente e della coppia nel passaggio da stella a triangolo.

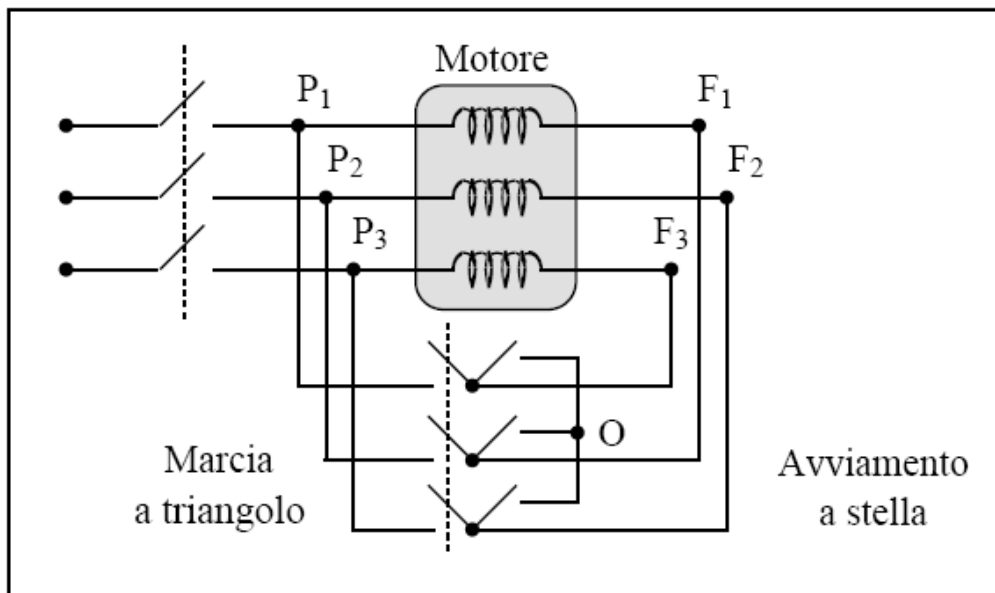


Figura 9: avviamento mediante commutatore stella triangolo

Infine, l'alimentazione mediante regolatori elettronici di tensione è attualmente il metodo più usato perché consente di fornire una tensione alternata sinusoidale trifase regolabile a frequenza costante, come suggerito dalla Figura 10.

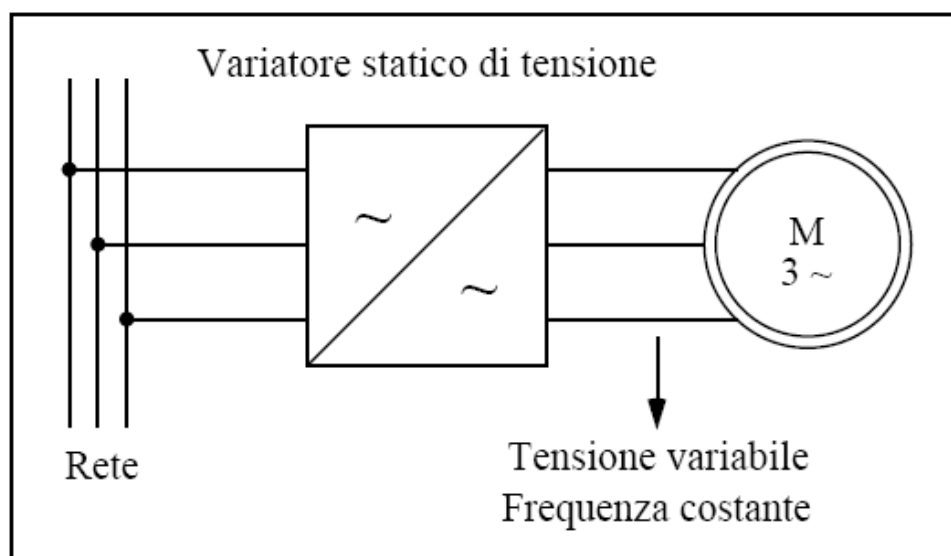


Figura 10: alimentazione di un MAT tramite convertitore statico

• Regolazione della velocità

Come abbiamo avuto modo di sottolineare, il MAT presenta innegabili vantaggi; tuttavia presenta la caratteristica di conservare pressoché costante la velocità al variare del carico. In molti casi occorre variare la velocità del motore in un ampio campo con un determinato valore di momento motore (regolazione a coppia costante) oppure con una coppia inversamente proporzionale alla velocità (regolazione a potenza costante). La velocità del motore asincrono è pari a

$$\omega = \frac{60 f}{p} (1 - s) ,$$

per cui, per variare la velocità di un MAT, occorrerà variare o lo scorrimento, o il numero delle coppie polari, o la frequenza della linea di alimentazione.

- *Variazione dello scorrimento*

Abbiamo già avuto modo di sottolineare l'effetto dell'inserzione di resistenze addizionali in serie a quelle rotoriche durante l'avviamento del motore. Le stesse resistenze possono essere efficacemente utilizzate per variare anche la velocità del motore. Infatti, l'aggiunta di resistenze in serie al rotore comporta un aumento dello scorrimento, cioè una diminuzione della velocità del motore, in quanto modifica la forma della caratteristica meccanica del motore, come indica la Figura 11.

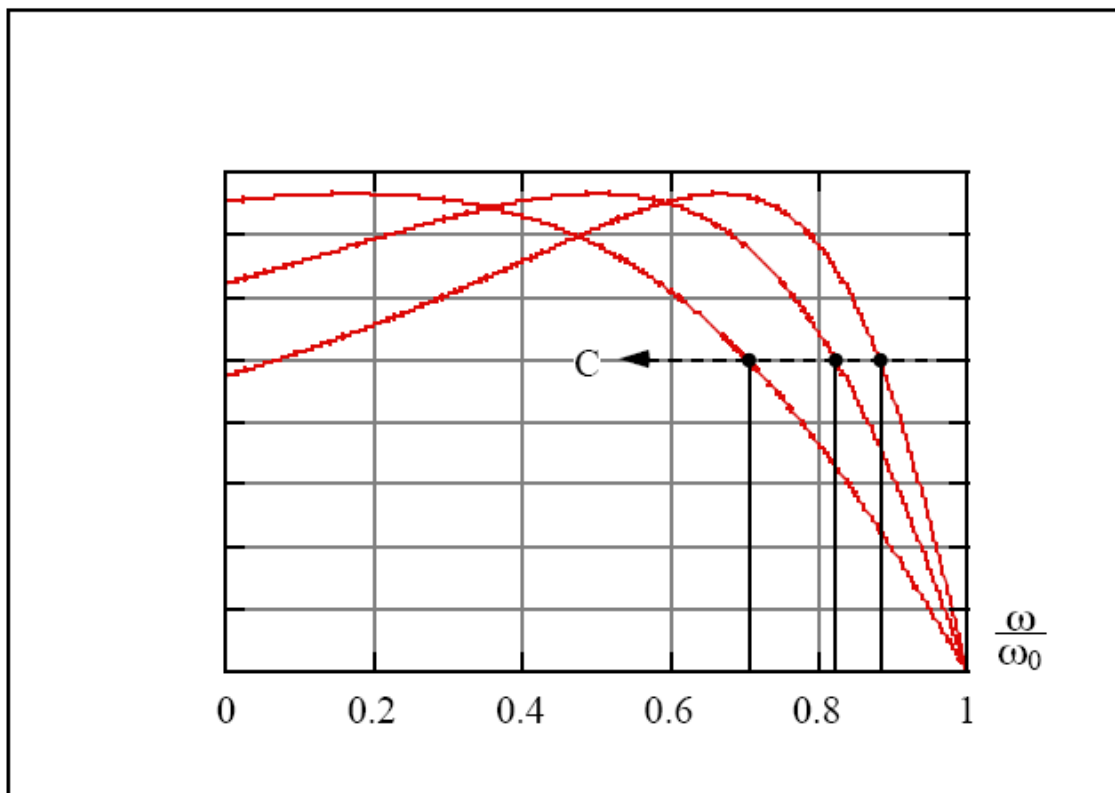


Figura 11: regolazione della velocità con resistenze in serie al rotore

Si può notare che le variazioni di velocità, per una stessa resistenza, dipendono dal carico: esse sono alte a carichi elevati, trascurabili a bassi carichi. Inoltre, qualunque

diminuzione di velocità si traduce in un corrispondente aumento delle perdite, in calore, nelle resistenze addizionali con abbassamento del rendimento.

- Variazione del numero delle coppie di poli

Viene realizzata costruendo l'avvolgimento statorico (avvolgimento Dalhander) in modo da ottenere tale variazione, raddoppio, con il semplice scambio di poche connessioni sulla morsettiera delle bobine di uno stesso avvolgimento con conseguente dimezzamento della velocità.

In questo caso è indispensabile che il rotore sia a gabbia, potendo funzionare sotto un qualsiasi numero di poli, senza nessuna costruzione particolare. Questo sistema consente però di avere solo poche velocità diverse, due, e a salti, inoltre è da ricordare che aumentando il numero di poli diminuiscono il fattore di potenza ed il rendimento.

- Variazione della frequenza

La rete di distribuzione è a frequenza fissa, per cui per avere una sorgente a frequenza variabile si ha la necessità di un convertitore di frequenza, come indicato in Figura 12.

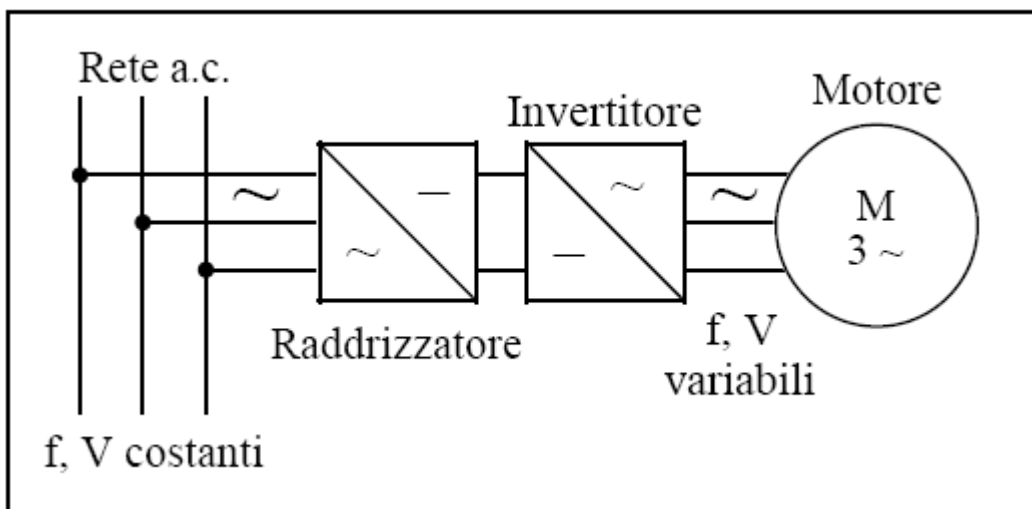


Figura 12: Alimentazione con frequenza e tensione variabili

Le variazioni di frequenza di alimentazione comportano una corrispondente variazione di velocità del campo rotante

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p}, \quad \text{ovvero} \quad n = \frac{60 f}{p},$$

e, quindi, anche della velocità di rotazione del motore

$$\omega = \omega_0 (1 - s) .$$

È da tener presente che frequenza, tensione e flusso sono legati dalla relazione approssimata:

$$V \cong k f \Phi .$$

Da ciò segue che si potranno verificare due casi:

a) Diminuzione della frequenza nominale e della velocità

Questo comporta la contestuale diminuzione della tensione di alimentazione, in modo tale da far rimanere il flusso costante. Un suo aumento comporterebbe problemi di saturazione del nucleo, aumento della corrente magnetizzante e delle perdite nel ferro.

b) Aumento della frequenza nominale e della velocità

Si preferisce, in questo caso, mantenere costante la tensione di alimentazione, con conseguente diminuzione del flusso, questo per compensare l'aumento delle perdite nel ferro dovute all'aumento della frequenza (ricordate che le perdite per correnti parassite sono proporzionali al quadrato della frequenza, mentre quelle per isteresi sono direttamente proporzionali alla frequenza).

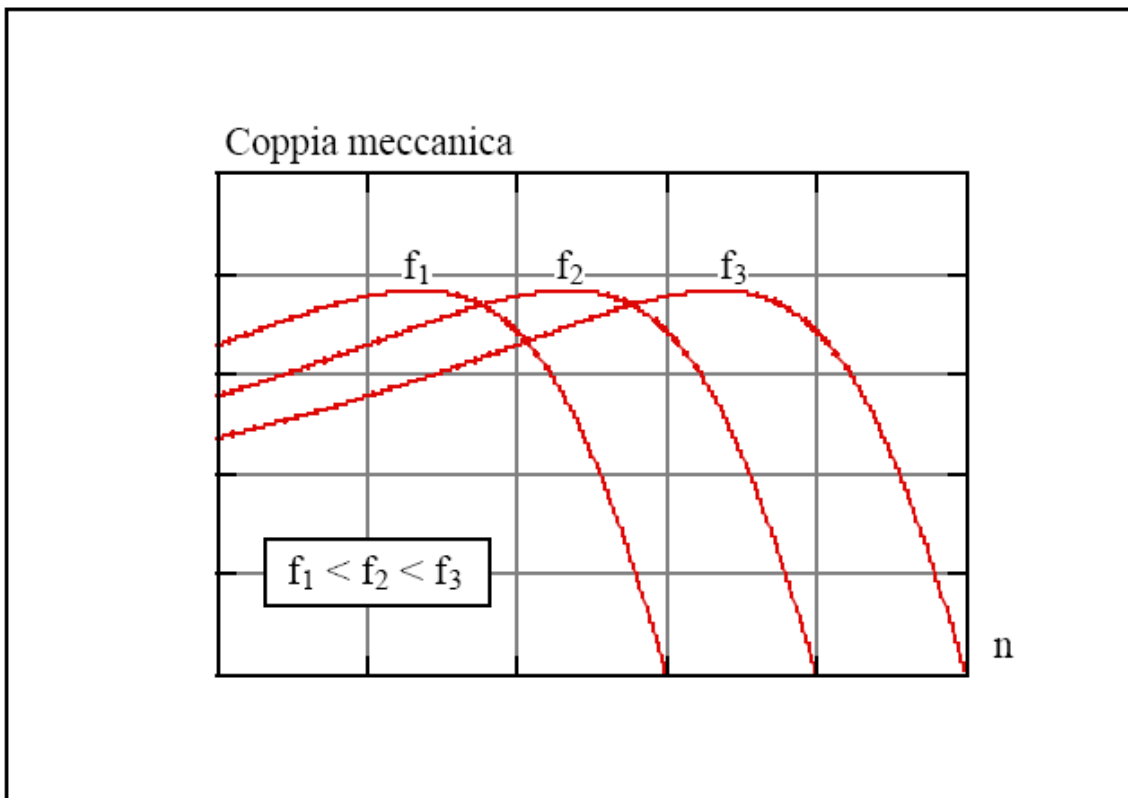


Figura 13: Caratteristiche meccaniche a flusso costante

Dalle Figura 13 e 14 si può vedere che nel primo caso (flusso costante) la coppia massima e quella di avviamento rimangono praticamente costanti, mentre nel secondo caso (tensione costante) invece diminuiscono.

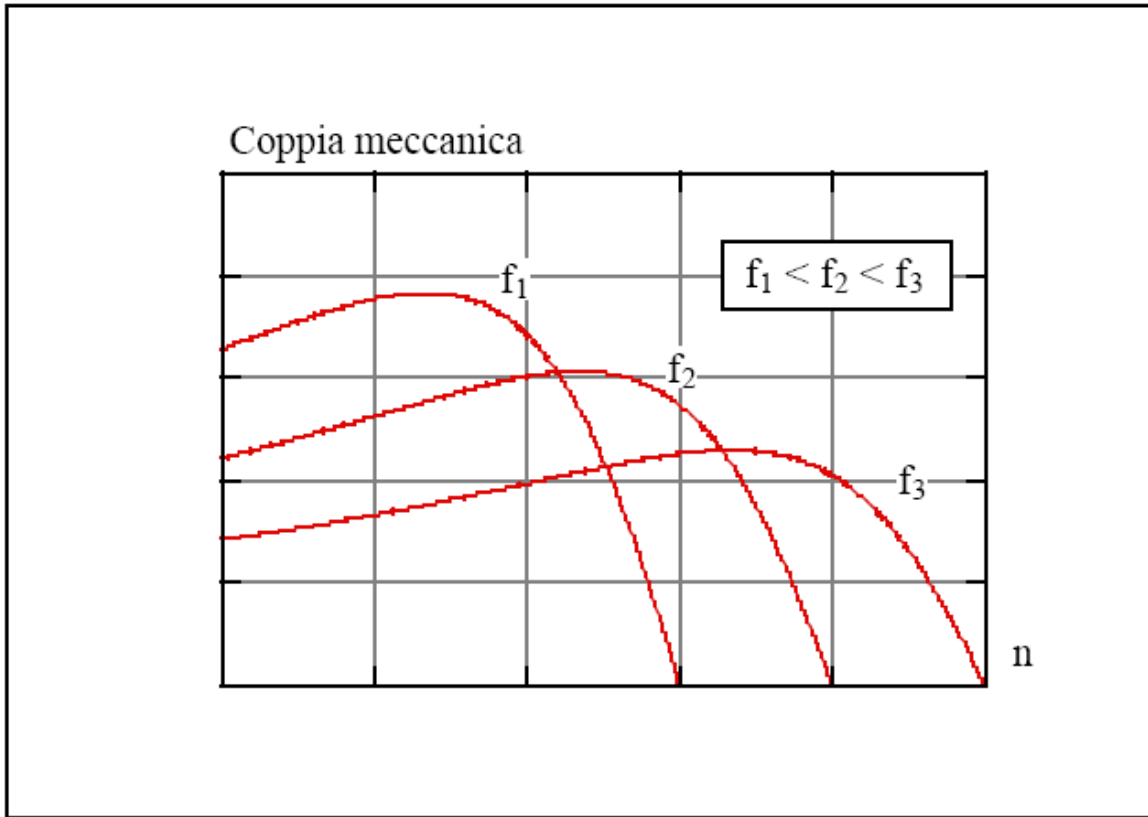


Figura 14: Caratteristiche meccaniche a tensione costante