



Zeno Martini (admin)

PILOTARE L'ASINCRONO

22 February 2006

PREMESSA

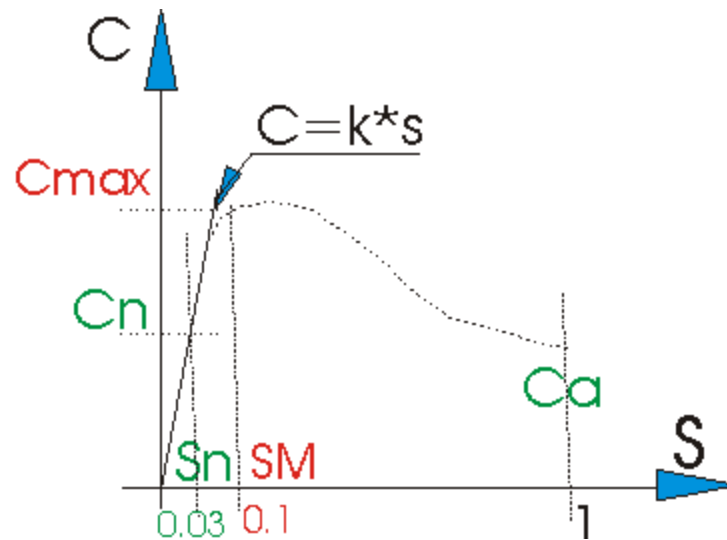
L'[articolo](#) sul controllo di velocità dell'asincrono è tra i più letti tra quelli pubblicati nel sito. L'argomento è sentito ed attuale. Addirittura un afflusso più numeroso registra la breve [lezione](#) che descrive il funzionamento di questo motore che, senza aver mai avuto momenti di crisi, ha trovato nell'elettronica le risorse per conquistare, nel campo degli azionamenti, territori che sembravano gli fossero preclusi.

Questo nuovo articolo si affianca ai precedenti proponendo maggiori dettagli, ma mantenendo comunque un taglio descrittivo, direi preparatorio per la ricerca degli approfondimenti su testi specialistici.

Nasce dalla lettura di *Electric motors and drives* di *Austin Hughes* un testo non specialistico, ma molto efficace per aiutare a ragionare sui principi di funzionamento delle macchine elettriche e dei relativi sistemi di alimentazione, perché sa ben utilizzare le conoscenze fisiche di base usando la matematica più semplice, nell'intento, direi riuscito, di stimolare l'intuizione e le capacità di ragionamento del lettore.

MODELLO SEMPLIFICATO DEL MOTORE ASINCRONO

La zona di funzionamento stabile del motore è compresa tra la velocità a cui si ha la coppia massima e la velocità di sincronismo. La coppia nominale è circa metà della coppia massima. In questa zona lo scorrimento è piccolo, di qualche percento. La fig. inv.1 mostra il grafico della coppia in funzione dello scorrimento. Nella zona stabile la caratteristica è approssimabile con una retta.



inv. 1

Per comprendere il funzionamento del motore asincrono alimentato da inverter, è allora sufficiente considerare, almeno in una prima fase di studio, un modello matematico della macchina molto semplificato.

1. la velocità del campo rotante, o velocità di sincronismo (praticamente la velocità a vuoto del motore), è direttamente proporzionale alla frequenza di alimentazione f .

$$n \propto f \quad \text{i.1}$$

2. Il flusso del campo magnetico rotante è proporzionale al rapporto tra la tensione e la frequenza.

$$\Phi \propto \frac{U}{f} \quad \text{i.2}$$

3. La corrente che si sviluppa nei conduttori di rotore, I_r , è proporzionale alla tensione indotta dal flusso del campo rotante, quindi alla tensione di alimentazione ed allo scorrimento.

$$I_r \propto s \cdot U \quad \text{i.3}$$

o anche, per la i.2

$$I_r = s \cdot f \cdot \Phi \quad \text{i.4}$$

4. La coppia motrice **C**, è proporzionale al prodotto del flusso magnetico per la corrente di rotore. Quindi si possono scrivere le espressioni:

$$C \propto \Phi \cdot I_r \quad \text{i.5}$$

$$C \propto s \cdot f \cdot \Phi^2 \quad \text{i.6}$$

$$C \propto s \cdot \frac{U^2}{f} \quad \text{i.7}$$

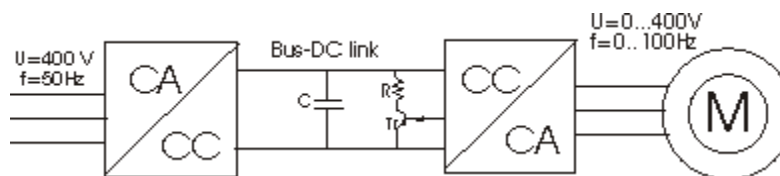
$$C \propto s \cdot \Phi \cdot U \quad \text{i.8}$$

Per un funzionamento regolare del motore occorre che i valori di flusso, corrente e tensione nominali non siano superati.

Inverter: schema a blocchi

Poiché nella zona di funzionamento stabile lo scorrimento è solo di qualche percento ed il motore asincrono può essere assimilato ad un generatore di velocità il cui valore dipende unicamente dalla frequenza. La frequenza varia la velocità a vuoto, quindi anche la velocità a carico che differirà di poco. L'inverter è l'apparecchiatura elettronica che converte dapprima la tensione di rete, alternata, in tensione continua, creando quello che comunemente è detto BUS della continua o DC LINK; quindi mediante interruttori elettronici, trasforma la continua in alternata, con la possibilità di ottenere frequenza e valore efficaci desiderati per la tensione elettrica che alimenterà il motore.

Lo schema a blocchi è dunque del tipo di fig. inv.2:



inv. 2

MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO

La variazione di frequenza influenza il flusso. Se la frequenza scende sotto il valore nominale (50 Hz) per mantenere costante il flusso occorre diminuire proporzionalmente la tensione (per la i.2 si ha $U/f = \text{costante}$). Alla frequenza nominale la tensione è la nominale.

Se f supera il valore nominale, il flusso non può mantenere il valore nominale perché si dovrebbe aumentare la tensione. Il flusso pertanto diminuisce (deflussaggio).

Poiché la corrente non può superare il valore nominale, finché il flusso mantiene il valore nominale, quindi per frequenze inferiori alla nominale, si può avere la coppia nominale; quando invece il flusso diminuisce, necessariamente la coppia continuativa erogabile dal motore diminuisce.

Se il rotore, qualunque sia la frequenza, gira a vuoto lo scorrimento è piccolissimo e, praticamente, come già detto, la sua velocità è quella di sincronismo. Quando all'albero è applicato un carico, cioè una coppia resistente, mentre tensione e frequenza sono mantenute costanti, la sua velocità diminuisce rispetto a quella del campo rotante, cioè lo scorrimento cresce. Il motore assorbe allora una corrente maggiore e la coppia motrice aumenta fino ad eguagliare la coppia resistente. A questo punto la velocità si stabilizza. Il valore della velocità di regime dipende perciò, oltre che dalla frequenza, anche dal carico. Esiste cioè un errore di velocità dovuto allo scorrimento. L'entità dello scorrimento è, a parità di coppia, inversamente proporzionale al flusso ed al valore efficace della tensione (i.8). A parità di coppia quindi lo scorrimento aumenta a frequenze diverse dalla nominale perché il prodotto $U \cdot F$ diminuisce in ogni caso.

ANELLO APERTO ED ANELLO CHIUSO

Il controllo di velocità può essere effettuato con o senza retroazione.

Lo scorrimento piccolo dà la possibilità di un controllo accettabile anche senza retroazione, o, come si dice, ad anello aperto (fig. inv.2). L'errore di velocità dipende dal carico. La velocità impostata con la frequenza f è, indicando con p le coppie polari, $n_0 = 60f/p$, ma la velocità effettiva è $n = n_0 \cdot (1-s)$ con s dipendente dalla coppia resistente del carico.

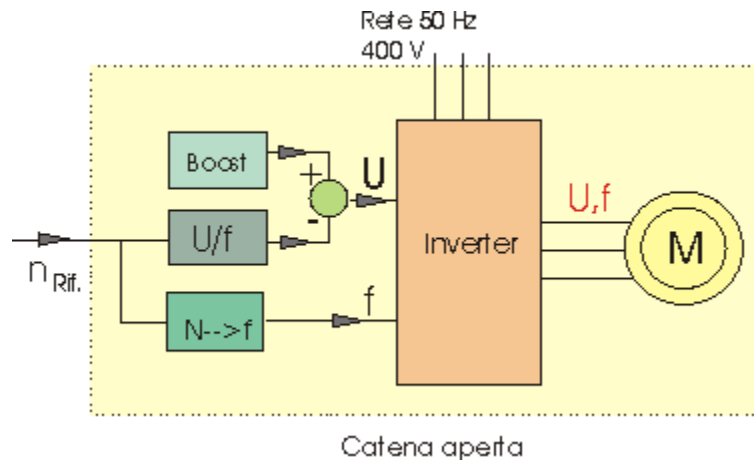
L'errore di velocità può essere compensato da un'opportuna regolazione della frequenza e si possono raggiungere precisioni dell'1%.

Per eliminarlo completamente occorre un anello di retroazione (fig. inv. 3). Si misura in tal caso l'effettiva velocità, la si confronta con quella impostata, e si aggiusta la frequenza fino ad ottenere a carico la velocità desiderata.

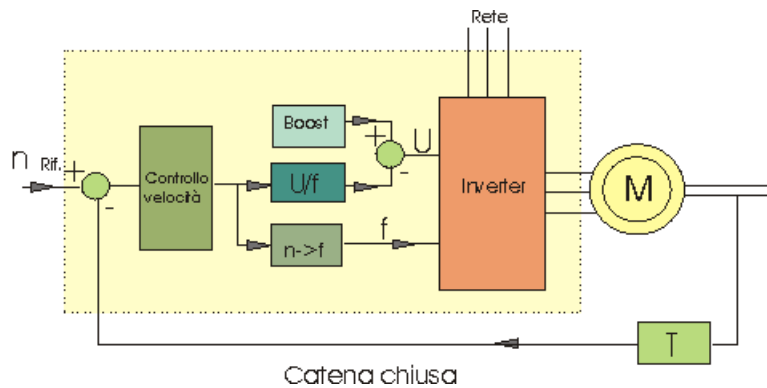
La regolazione $U/f = \text{costante}$ è però inadeguata alle basse frequenze perché non garantisce la costanza della coppia erogabile legata alla costanza del flusso. La proporzionalità del flusso al rapporto tensione/frequenza è accettabile finché la caduta di tensione resistiva negli avvolgimenti è trascurabile. Ciò che occorre mantenere costante è in realtà il rapporto tra la tensione applicata diminuita della

caduta resistiva, e la frequenza. A frequenze inferiori ai 10 Hz è indispensabile aumentare la tensione per contrastare l'indebolimento del flusso dovuto alla caduta ohmica. Ci sono vari criteri per farlo e la tecnica è nota come "low-speed voltage boosting".

Le figure mostrano gli schemi a blocchi di un controllo ad anello aperto e controreazionato



inv. 3



inv. 4

Nella catena chiusa c'è un trasduttore di velocità (T: analogico: dinamo tachimetrica o, per una maggior precisione un encoder digitale) ed il segnale della velocità effettiva è confrontato con il segnale di riferimento impostato ($n_{Rif.}$). Il risultato del confronto, non direttamente il segnale di riferimento come nella catena aperta, pilota i blocchi circuitali che variano frequenza e tensione in uscita dall'inverter.

PARAMETRI DI REGOLAZIONE DI UN INVERTER SCALARE

Negli inverter scalari oltre alla frequenza si varia solamente il valore efficace della tensione. Non ci si occupa cioè delle relazioni di fase tra tensioni e correnti che si riflettono nella posizione relativa dei campi magnetici di statore e di rotore, e che influenza sensibilmente la coppia per elevati scorrimenti.

La frequenza d'uscita, quindi la velocità a vuoto del motore, è impostata con un segnale di riferimento analogico (n_{Rif}), una tensione (0-10 V) o una corrente (4 -20 mA), che può essere fornito o da un semplice potenziometro o da un convertitore digitale analogico comandato da un computer. La regolazione del tipo U/f ha opzioni impostabili dall'utente. Ad esempio, l'incremento di tensione (boost) alle basse velocità, la velocità massima e minima, le accelerazioni.

Se la coppia resistente supera la coppia nominale, intervengono le protezioni interne di massima corrente per impedire che l'eccessivo rallentamento porti il motore a funzionare nella zona instabile.

Improvvisi modifiche del riferimento sono trasformate internamente in una rampa che obbliga la frequenza a variare gradualmente.

Se l'inerzia complessiva è bassa la velocità di regime è raggiunta senza problemi di eccessivo assorbimento di corrente.

Se l'inerzia è elevata l'accelerazione avviene secondo le modalità seguenti, illustrate con la figura inv.5.

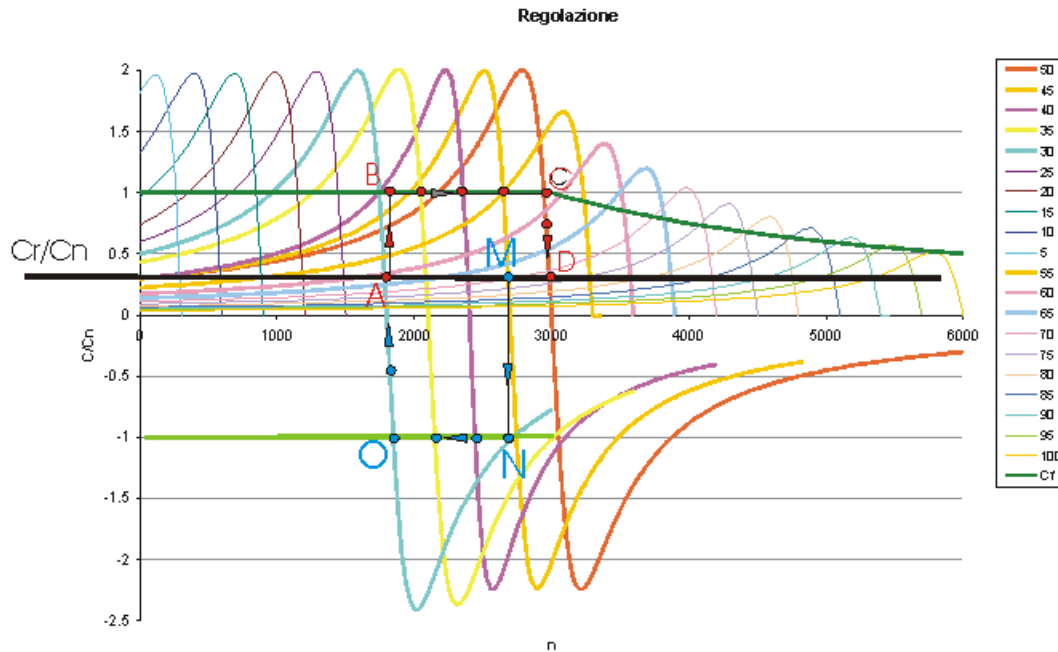
AUMENTO DI VELOCITÀ

Supponiamo che il motore stia funzionando nel punto A (curva azzurra). Gli viene richiesto un aumento di velocità mentre la coppia resistente rimane costante. La richiesta è attuata mediante un incremento del segnale di riferimento che aumenta la frequenza dell'alimentazione. Sul grafico C-n ciò corrisponde a considerare caratteristiche meccaniche che si succedono verso destra secondo la rampa di frequenza impostata. L'inerzia meccanica del motore impedisce che la velocità corrisponda immediatamente ad un punto della caratteristica a frequenza più alta. Sulla nuova caratteristica (una qualsiasi compresa tra l'azzurra e la gialla) alla velocità iniziale corrisponde un maggiore scorrimento (è aumentata la velocità del campo rotante), quindi una corrente assorbita maggiore, quindi una maggiore coppia motrice. La coppia resistente, come detto, è costante per cui il motore accelera. Se la corrente raggiunge il limite impostato, il sistema elettronico di alimentazione ne

impedisce la crescita ulteriore. La coppia motrice è perciò mantenuta costante e con essa l'accelerazione. Se la frequenza finale impostata è quella corrispondente alla curva rossa, il punto di funzionamento del motore si sposta da A a C seguendo, sul grafico, la traiettoria (A->B->C) indicata dai punti rossi. In C la coppia è motrice è ancora maggiore della coppia resistente. Il motore è dunque ancora in fase di accelerazione, ma lo scorrimento diminuisce e con esso corrente e coppia. In D l'accelerazione finisce ed il motore si assesta sulla nuova velocità. Si ha cioè la nuova situazione di regime ad una velocità maggiore, molto vicina a quella a vuoto impostata, ma non uguale. La precisione di regolazione è in questo modo di qualche percento, dipendendo dallo scorrimento, cioè dalla coppia resistente del carico. Ciò significa che a identico segnale di riferimento corrispondono velocità leggermente diverse a seconda del carico.

DIMINUZIONE DELLA VELOCITÀ

Il motore sta funzionando, ad esempio, nel punto M mentre gli viene richiesta una diminuzione della velocità con coppia resistente che rimane costante. Anche in questo caso l'inerzia meccanica impedisce l'immediato adeguamento della velocità. Alle caratteristiche a sinistra della curva giallo-scuro, corrispondono velocità di sincronismo inferiori alla velocità di partenza. Lo scorrimento è negativo e la coppia sviluppata dal motore è negativa. Il 'motore' in realtà è, in questa fase un generatore, per cui l'energia fluisce verso la rete di alimentazione. L'energia cinetica del sistema meccanico si trasforma perciò in energia elettrica. L'inverter può essere di due tipi. Può cioè permettere il flusso dell'energia elettrica generata verso la rete oppure no. In questo secondo caso, che generalmente è adottato per potenze non molto grandi, l'energia elettrica generata è dissipata su una resistenza. Con riferimento all'fig. inv. 1: la resistenza (R) è collegata sul BUS della continua in serie ad un interruttore elettronico (tr) e la serie è in parallelo al condensatore di livellamento (C). L'eccesso di energia cinetica fa allora crescere la tensione del BUS, caricando il condensatore e, quando tale tensione raggiunge un valore massimo stabilito, l'interruttore elettronico inserisce la resistenza scaricando il condensatore. Anche in fase di decelerazione la corrente può arrivare al valore limite che viene mantenuto dall'elettronica. La traiettoria seguita dal punto di funzionamento è M->N->O->A.



inv. 5

Inverter vettoriale

Se le accelerazioni richieste all'azionamento non sono particolarmente gravose, come capita per la maggior parte delle applicazioni, è sufficiente l'inverter descritto :U/f o scalare. Per questo tipo di applicazioni l'asincrono ha praticamente soppiantato il motore a corrente continua.

Quando invece le esigenze dinamiche diventano notevoli, come nell'azionamento di mandrini di macchine utensili ad alta velocità, l'inverter scalare non è più sufficiente. In questo campo l'azionamento con motore a corrente continua si dimostra nettamente superiore, soprattutto per la possibilità di poter regolare facilmente la coppia mediante il controllo della corrente di armatura.

La tecnologia basata sull'inverter ha però fatto guadagnare rapidamente spazio all'asincrono anche in questo campo. Le carenze dell'inverter scalare sono superate con l'inverter a vettoriale. La teoria del suo funzionamento è matematicamente complessa e qui si cercherà di illustrare i concetti su cui essa si fonda.

Partiamo dalla terminologia: scalare e vettoriale.

L'inverter scalare modifica, oltre alla frequenza, il valore efficace della tensione, ma non interviene sulla fase delle grandezze elettriche in modo attivo, come detto. Nell'inverter vettoriale invece la variazione della frequenza e del valore efficace di corrente avvengono unitamente ad una variazione della fase. Da qui il nome

vettoriale: della grandezza elettrica di comando, una grandezza alternata, quindi riconducibile ad una sinusoidale, rappresentabile come noto con un vettore, quindi con un'ampiezza ed un angolo di fase che ne individua direzione e verso, si controllano entrambi i parametri.

Il motivo della variazione di fase si impone per il controllo del flusso magnetico.

La coppia motrice, sia nei motori a corrente continua che nei motori ad induzione, è prodotta dall'interazione tra l'induzione magnetica risultante al traferro e la corrente circolante nei conduttori di rotore. Per modificare la coppia si può intervenire sull'induzione, cioè sul flusso, sulla corrente di rotore, o su entrambi. Se si desidera un cambio improvviso della coppia, cioè, come si dice, una sua variazione a gradino, per ottenere forti accelerazioni, la modifica delle grandezze deve essere pressoché istantanea. Poiché ogni campo magnetico è un "contenitore di energia" la variazione 'istantanea' del flusso magnetico non è possibile poiché la variazione di energia in un tempo nullo richiede una potenza infinita. La stessa cosa succede del resto nei motori a corrente continua quando si varia la velocità mediante la corrente di eccitazione, quindi variando il flusso. La coppia varia, ma l'elevata induttanza del circuito di eccitazione comporta tempi di risposta molto più lunghi rispetto a quelli che si ottengono con la variazione della corrente di armatura che ha un'induttanza inferiore. E' perciò possibile ottenere rapidissime variazioni della corrente d'armatura, quindi di coppia, applicando una tensione elevata per un tempo breve. Tutto ciò lo si fa automaticamente con il controllo in retroazione della corrente: la corrente d'armatura è misurata da un trasduttore che fornisce il segnale per il confronto con il riferimento della corrente, quindi della coppia desiderata. Il risultato del confronto pilota l'alimentatore che fornisce immediatamente la tensione opportuna.

Nell'asincrono le cose sono più complicate in quanto non si ha accesso diretto alla corrente di rotore. Si può agire solo sull'alimentazione degli avvolgimenti di statore che sono anche i produttori del campo magnetico. Quindi se non si adottano strategie adatte, si varia anche ciò che non si vorrebbe variare, cioè il flusso magnetico. Però, essendo gli avvolgimenti di statore e rotore ben accoppiati magneticamente attraverso il traferro, le variazioni della corrente di statore si traducono istantaneamente in variazioni della corrente di rotore. Tutti i circuiti magneticamente accoppiati si comportano in questo modo. Nel trasformatore ad una modifica della corrente secondaria corrisponde un'immediata modifica della corrente primaria. Riuscire a modificare nel modo desiderato la corrente di rotore è l'obiettivo degli inverter vettoriali. L'induttanza dei circuiti di statore è abbastanza piccola, coincidendo con l'induttanza di dispersione. E' perciò possibile variare rapidamente la corrente di statore applicando brevi impulsi di tensione agli avvolgimenti. La corrente di statore può dunque essere controllata allo stesso modo della corrente di armatura di una macchina a corrente continua. Nelle macchine a corrente continua,

alla variazione della corrente d'armatura corrisponde un'immediata variazione della coppia, mentre il flusso magnetico, quindi l'energia del campo magnetico, rimane costante. E' ciò che si deve anche ottenere nell'asincrono, se si vogliono avvicinare le sue prestazioni dinamiche a quelle del motore a corrente continua.

Bisogna quindi variare la corrente di statore in modo da evitare una significativa variazione dell'energia del campo magnetico, fonte di ritardi nella risposta: il flusso risultante deve perciò rimanere praticamente costante.

La coppia dipende dal prodotto del flusso risultante al traferro per la corrente di rotore, ma anche dall'angolo di sfasamento tra l'asse del campo magnetico risultante al traferro e l'asse del campo magnetico prodotto dalle correnti di rotore, **d**. La i.5, valida per piccoli scorrimenti, va dunque modificata per il caso più generale in quanto nel momento in cui si modifica la frequenza, il campo rotante assume immediatamente la nuova velocità di sincronismo ma il rotore, per inerzia meccanica, richiede un certo tempo per portarsi alla nuova velocità. In questa fase dunque lo scorrimento è notevole e l'espressione da considerare è allora, indicando con *p* le coppie polari:

$$C \propto \Phi \cdot I_r \cdot \sin(p \cdot \delta) \quad \text{i.9}$$

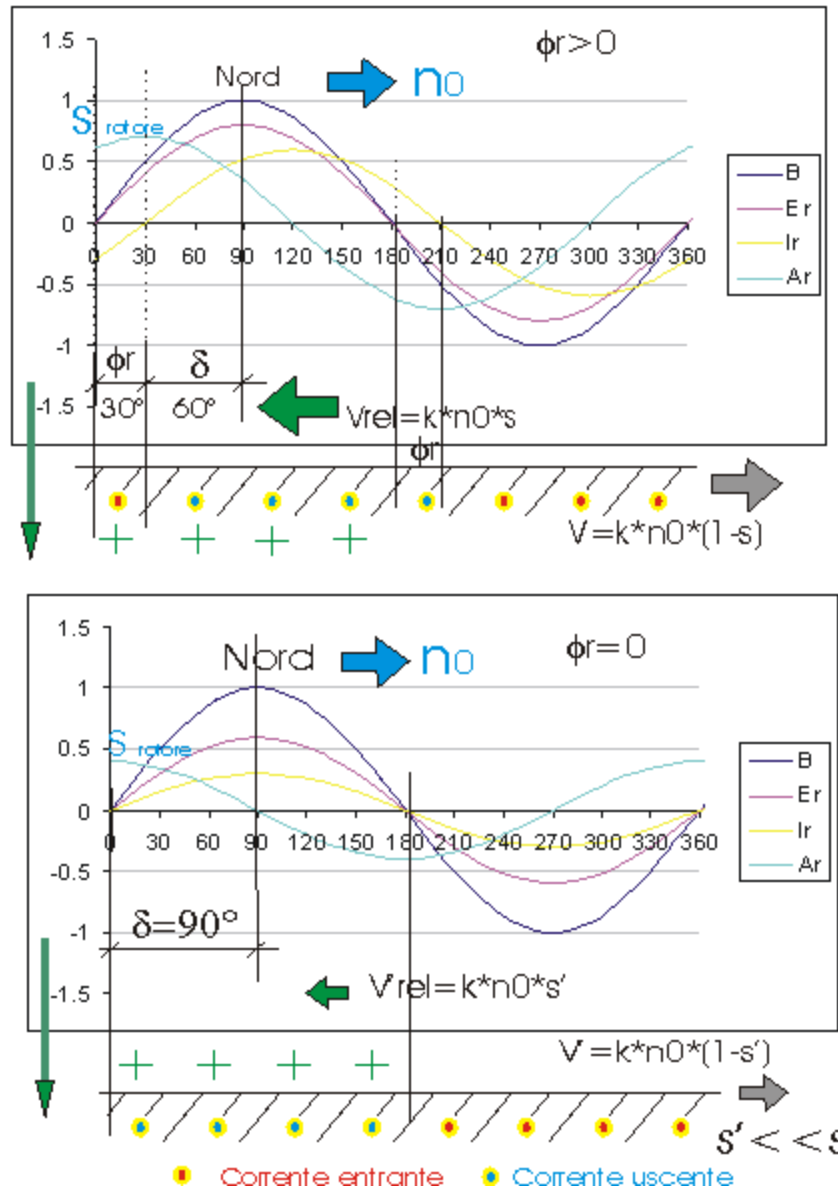
L'obiettivo è di modificare la coppia senza alterare il flusso e di modificare I_r e **d** contemporaneamente.

Se potessimo osservare la forza magnetomotrice (fmm) quando all'inverter vettoriale si richiede un improvviso mutamento di coppia e di velocità, assumendo per semplicità che il rotore mantenga inalterata la sua velocità mentre cambiano pressoché istantaneamente le grandezze elettriche, vedremmo un'immediata variazione in ampiezza della fmm di statore che assume istantaneamente la nuova velocità di sincronismo; contemporaneamente ne vedremmo un "salto" che le fa mantenere la posizione corretta rispetto alla fmm di rotore ($p \cdot d$ praticamente uguale 90°). Nel rotore si ha un istantaneo aumento della corrente, quindi della coppia, che viene mantenuto dall'elevata corrente di statore e dallo scorrimento. L'angolo **d** è determinato dallo sfasamento, **f_r**, tra la tensione indotta nei conduttori di rotore e la corrente, che dipende dallo scorrimento in quanto la reattanza di rotore varia con esso. Si ha **$p \cdot d = 90^\circ - f_r$** .

La fig. inv.6 schematizza le situazioni che si hanno con scorrimento piccolo e con scorrimento elevato. Il verso positivo del campo magnetico al traferro è stato assunto nella direzione statore-rotore, dall'alto verso il basso, come indicato dalla frecce verdi sulla sinistra. Hanno dunque valore positivo i Sud prodotti dalle correnti di rotore, oltre ai Nord del campo risultante. **B** rappresenta l'andamento dell'induzione risultante al traferro, ipotizzata sinusoidale; ricordiamo che il

flusso che compare nella i.9 è dato dal valore medio dell'induzione per la superficie polare; $\mathbf{E}_r$ è l'andamento delle fem indotte nei conduttori di rotore ricavabili con $E_r = B \cdot l \cdot v_{rel}$ dove v_{rel} è la velocità relativa dei conduttori di rotore rispetto al campo rotante, proporzionale allo scorrimento; E_r ha quindi lo stesso andamento dell'induzione. Il polo positivo dei conduttori (indicato con +) è quello che sta dalla parte dell'osservatore per i conduttori sotto il Nord (vedere in [questa lezione](#) il principio del generatore); $\mathbf{I}_r$ è la corrente nei conduttori di rotore; $\mathbf{A}_r$ il campo magnetico da essi prodotto. Il campo risultante è costante nelle due situazioni. Nella prima figura lo scorrimento s è notevole e la $\mathbf{I}_r$ è sfasata di $\mathbf{f}_r$ rispetto alla fem indotta $\mathbf{E}_r$. Nel secondo, lo scorrimento è molto piccolo e la $\mathbf{I}_r$ è praticamente in fase con la $\mathbf{E}_r$ poiché la reattanza è trascurabile. Nel primo caso $\mathbf{E}_r$ è maggiore che nel secondo, e con essa anche $\mathbf{I}_r$, ma essendo $\mathbf{f}_r > 0$, d è minore di 90° e la coppia può essere minore che nel secondo caso per la i.9.

Si noti anche che quando $\mathbf{I}_r$ ritarda rispetto ad $\mathbf{E}_r$ c'è una porzione di conduttori, quella compresa in $\mathbf{f}_r$, in cui la corrente è 'contraria' all $\mathbf{E}_r$ cioè non esce dal polo positivo di questa ma vi entra. Essi danno un contributo negativo alla coppia in quanto la forza trasversale è opposta alla velocità del rotore (formula di riferimento $F = I \cdot B \cdot l$, regola della mano sinistra. Vedere la in [questa lezione](#) il principio del motore)



inv. 6 NB: la figura presuppone $p=1$

Sia prima che dopo le modifiche istantanee descritte, il motore funziona nel modo normale.

Il controllo vettoriale è dunque unicamente il mezzo per ottenere la transizione istantanea dalle condizioni elettromagnetiche operative di un regime di funzionamento ad un altro. L'unica caratteristica che diversifica l'inverter vettoriale dall'inverter scalare, il quale, ricordiamo, modifica solamente ampiezza e frequenza della fmm di statore quando è richiesta una diversa coppia, è che l'immediata modifica della posizione della fmm di statore, consente la transizione istantanea da uno stato al successivo, senza che le variabili che caratterizzano la nuova condizione

di funzionamento, si modifichino spontaneamente prima di assestarsi sul valore di regime. In particolare ciò consente di superare l'ostacolo dell'elevata costante di tempo relativa ai conduttori di rotore, responsabile della lenta risposta del motore asincrono durante un transitorio. Poiché, ovviamente, il rotore non mantiene costante la sua velocità con la modifica della coppia, è necessario conoscere l'esatta posizione del flusso di rotore. Il modo in cui la posizione è rilevata, dà luogo a due diversi tipi di inverter: quelli che usano un trasduttore di posizione per riconoscerla (metodo diretto) e quelli che si affidano esclusivamente ai calcoli effettuati in base al modello matematico del motore (metodo indiretto). Il metodo diretto è più preciso in quanto è meno sensibile alla variazione dei parametri che definiscono il modello della macchina. Richiede però un trasduttore quindi un motore appositamente costruito. L'indiretto può invece essere usato anche con i motori standard. Entrambi i tipi richiedono ad ogni modo calcoli molto elaborati, poiché il modello matematico dell'asincrono in condizione transitorie è estremamente complesso. Solo lo sviluppo enorme dell'integrazione elettronica e delle capacità di calcolo dei microelaboratori ha consentito negli ultimi vent'anni la realizzazione dell'inverter vettoriale.