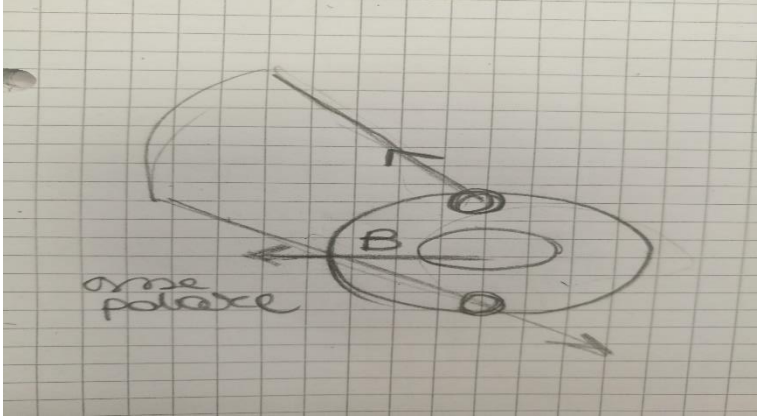


MACCHINE ASINCRONE:

(non vi sono differenze costruttive tra motori e generatori)

Si basano sul fenomeno fisico che degli avvolgimenti polifase (ovvero avvolgimenti opportunamente disposti nello spazio ed alimentati con tensioni che realizzano un sistema bifase o trifase) siano in grado di generare un CAMPO MAGNETICO ROTANTE. Tutte le macchine elettriche rotanti si fondano sulla possibilità di stabilirsi al loro interno un CMR.

Come si genera un CMR?



Il conduttore viene alloggiato all'interno della cava statorica, si arriva alla estremità opposta della cava, il conduttore esce, segue la corona circolare statorica e a passo diametrale ci sarà un'altra cava sulla quale andremo ad inserire il conduttore. Arriviamo quindi sulla testa frontale anteriore, usciamo dalla cava e rientriamo; continuando così andiamo a realizzare un certo numero di spire desiderato. Partenza ed arrivo del conduttore saranno disponibili ai morsetti o dove occorre. Andando ad alimentare la matassa (solenoid) in modo tale che da una parte la corrente entri (punta della freccia) ed esca (dalla coda) per la regola della mano dx il campo magnetico prodotto all'interno della matassa (che sarà di tipo radiale) è orientato come l'asse polare, ovvero l'asse su cui si trovano i poli della matassa che ha generato il campo magnetico. RIC: l'asse polare è quello in cui il campo magnetico è max

RIC: la legge di Hopkinson è duale alla legge di Ohm: la fmm sostituisce la fem, la riluttanza la resistenza, il flusso del campo induzione magnetica la corrente

In un circuito magnetico, la "causa" da cosa è rappresentata? Dalla forza magnetomotrice (generata dalla corrente che circola negli avvolgimenti precedentemente descritti), mentre l'effetto è il flusso del campo induzione magnetica, ovvero B . In generale le macchine asincrone sono macchine a comportamento fortemente non lineare perché realizzate con un materiale non lineare che in particolare esegue un ciclo di isteresi, ovvero una curva a due valori. Ciò detto per analizzare il comportamento della macchina, non potremmo usare il principio di sovrapposizione degli effetti essendo l'ipotesi alla base della sua applicabilità proprio la linearità. Per semplificare comunque la trattazione effettuiamo questa assunzione: non possiamo applicare la sovrapposizione degli effetti, ma possiamo applicare la sovrapposizione delle cause. Riferiamoci quindi studio alle forze magnetomotrici che possiamo tranquillamente sommare.

Quale sarà l'andamento della forza magnetomotrice all'interno del traferro?

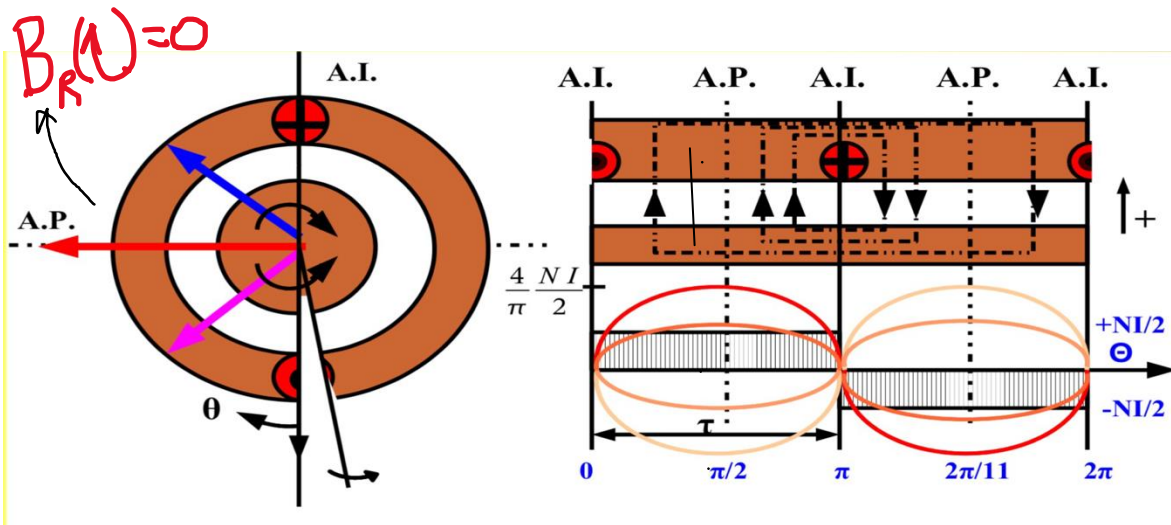
(Dobbiamo necessariamente determinarlo in quanto a questo andamento corrisponderà un certo flusso di induzione magnetica).

Partendo dall'asse interpolare della macchina (quello a 90 gradi con l'asse polare) iniziamo a considerare delle linee chiuse e valutiamo la forza magnetomotrice che si concatena con queste linee chiuse.

Questa linea chiusa concatenerà una forza magnetomotrice pari a $Ni/2$ perché è interessata metà cava e se N è il numero di spire della matassa, considerandone la metà la forza magnetomotrice risultante sarà appunto $Ni/2$. (la linea chiusa massima che consideriamo è una semicirconferenza). Prima di iniziare a tracciare il diagramma di forza magnetomotrice dobbiamo fissare la convenzione che ci consente di stabilire il segno del modulo di tale forza; assumiamo come positive le forze magnetomotrici che danno luogo a delle linee di forza del campo magnetico entranti nel pacco statorico.

Nota: guarda il disegno sotto e i rettangolini: la forza magnetomotrice è diretta come la corrente, entrante sul + e questa genera delle linee di flusso che vanno come la regola della mano destra.

Andando ad aumentare le superfici che concatenano il flusso, andremo a concatenare N spire percorse da una corrente di verso opposto:



Non riusciremmo però a trattarla “bene” analiticamente avendo un andamento rettangolare, possiamo quindi farne lo sviluppo in serie di Fourier e per semplificare ulteriormente possiamo fermare la nostra analisi all’ armonica fondamentale ovvero alla prima sinusoide rappresentativa dello sviluppo in serie di Fourier di tale unità quadra. Dallo sviluppo, possiamo apprezzare che il massimo di questa sinusoide (prima armonica dell’onda quadra) sta a $(4/\pi)Ni/2$. L’espressione dell’armonica fondamentale della forza magnetomotrice è:

$$i(t) = I \cos(\omega t)$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t) = \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta - \omega t)$$

Questa espressione, significa che la forza magnetomotrice al traferro della macchina, ovvero lungo l’ascissa curvilinea θ è funzione di θ stesso e del tempo perché anche la corrente che circola avrà certamente un andamento sinusoidale. Questa quantità là si può scindere in due componenti:

Queste due componenti formano son due onde “controrotanti”, ovvero una viaggia in un verso ed una nel verso opposto. Notiamo come i punti di 0 e di massimo (delle due componenti) rimangono invariati nello spazio cambiando solo di valore. Un campo con queste caratteristiche viene detto CAMPO PULSANTE.

Nota: le due componenti controrotanti ruotano ma la loro risultante non ruota ma cambia solo in modulo. Quindi il massimo e minimo non cambiano nello spazio. Sarebbero una serie di freccettine

<<<<<<----->>>>>>

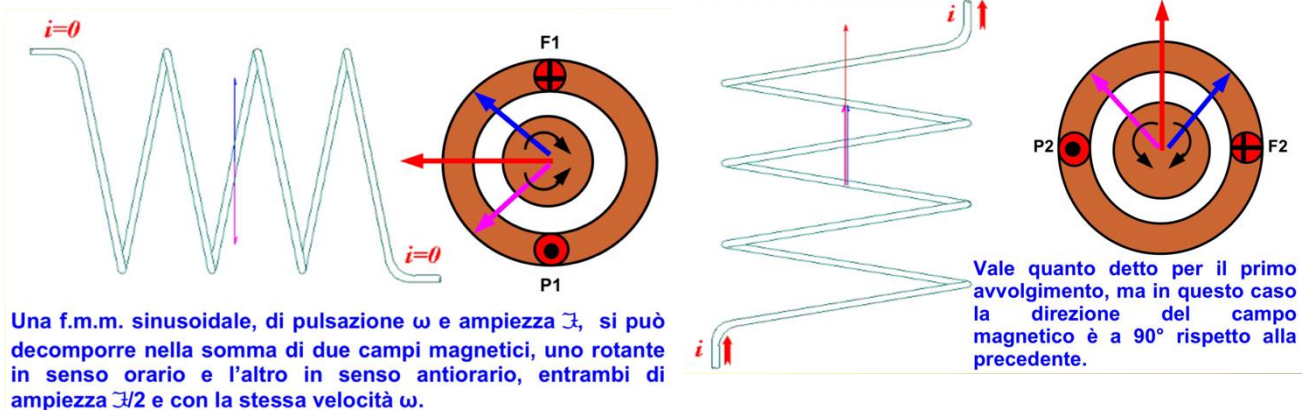
Di questo abbiamo dimostrato analiticamente che si può decomporre in due onde controrotanti una diretta ed una inversa. Quello che abbiamo fatto è in pratica una rappresentazione fasoriale della forza magnetomotrice a cui è associato un campo pulsante.

Questo è l’andamento che ritroviamo in una qualsiasi macchina elettrica in cui abbiamo inserito una matassa a passo diametrale che andiamo poi ad alimentare con una corrente sinusoidale.

A questa forza magnetomotrice pulsante sarà associato un campo di induzione magnetica anch’esso pulsante essendo il legame tra le due grandezze di proporzionalità mediante la legge Hopkinson.

Se andiamo a disporre la matassa su un piano orizzontale anziché verticale ovvero l’asse polare si sposta di novanta gradi (disposto verticalmente) cosa cambia? NULLA. Avremo sempre un campo pulsante che si può decomporre in due onde controrotanti:

Vediamo cosa accade ora se andiamo ad inserire sul pacco statorico due matasse, una che giace sul piano orizzontale, ed una sul piano verticale:



Possiamo calcolare la forza magnetomotrice risultante sommando le due (che è lecito fare) ma con un'accortezza, ovvero l'alimentazione delle due matasse deve essere fatta in maniera tale che su una scorre la stessa corrente che scorre sull'altra sfasata di $\pi/2$: (lo sfasamento potrebbe essere anche di un altro angolo

$$i_1(t) = I \cos(\omega t) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_1(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t)$$

$$i_2(t) = I \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_2(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \sin(\theta + \frac{\pi}{2}) \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_1(\theta, t) + \mathcal{F}_2(\theta, t) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \sin(\theta + \frac{\pi}{2}) \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) =$$

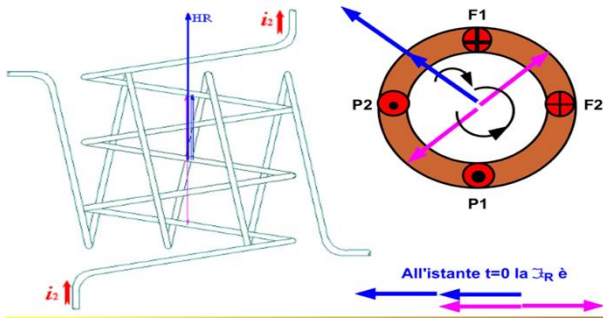
$$= \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta - \omega t) +$$

$$+ \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \frac{\pi}{2} + \omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \frac{\pi}{2} - \omega t - \frac{\pi}{2}) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \omega t + \pi) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \sin(\theta - \omega t)$$

ma questo è comodo per fare i calcoli.

Di cui possiamo fare anche la rappresentazione fasoriale associata:



La forza magnetomotrice risultante, quindi il campo induzione magnetica associato non sta più fisso nello spazio e varia la sua ampiezza, bensì otteniamo un campo magnetico che ruota all'interno della macchina, infatti il suo fasore rappresentativo ruota nel tempo con una velocità angolare ω corrisponde alla pulsazione della rete di alimentazione.

Questo risultato lo si può dimostrare qualitativamente mediante quella rappresentazione dinamica o possiamo studiarlo analiticamente andando a considerare la femm risultante dalla somma delle due matasse:

$$F_{RIS}(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{4} \sin(\theta + \omega t + \pi) + \frac{4}{\pi} \frac{NI}{2} \sin(\theta - \omega t)$$

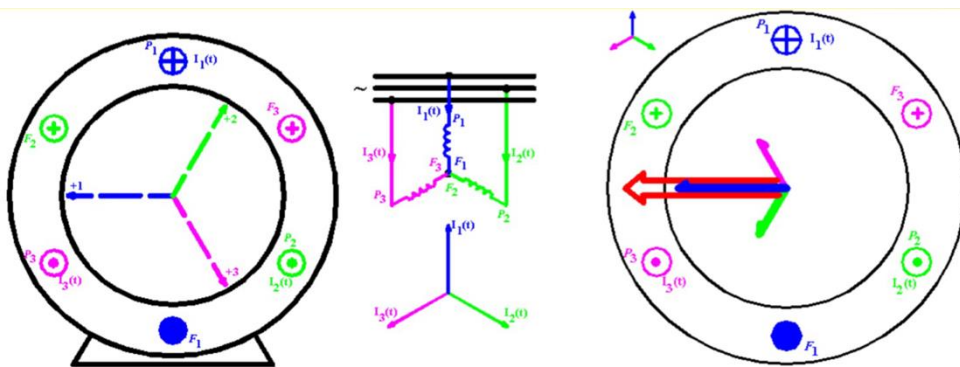
Queste due componenti hanno la stessa ampiezza e sono in opposizione di fase ovvero la loro risultante sarà NULLA.

La componente blu ruota in senso diretto a velocità ω e la sua ampiezza è doppia di quella delle singole componenti in quanto si sommano le due componenti dirette in fase.

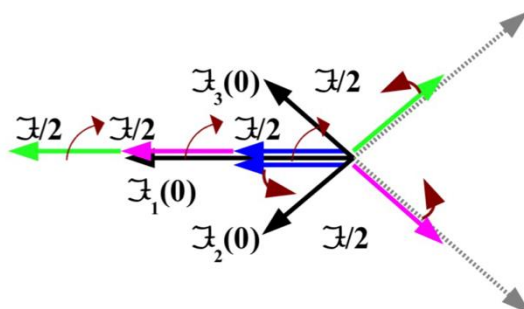
RIASSUMENDO(Galileo Ferraris): sistemando opportunamente nello spazio due matasse opportunamente alimentate, al traferro di queste macchine si ottiene un campo di induzione magnetica che varia nello spazio e nel tempo (onda di campo magnetico).

MACCHINE TRIFASE:

Sullo statore della macchina andiamo ora a sistemare un avvolgimento trifase, ovvero tre matasse a passo diametrale i cui principi sono mutuamente sfasati di 120 gradi e sono alimentati da una terna di correnti anch esse sfasate di 120 gradi ed uguale modulo(sistema equilibrato di correnti).



Avvolgimento statorico trifase a passo diametrale (i principi degli avvolgimenti distano mutuamente 120° e le fini distano 180° dai corrispondenti principi) con una coppia polare ($p = 1$) e con una cava per polo e per fase.



Se andiamo a farne anche uno sviluppo analitico partendo dall'armonica fondamentale delle tre forze magnetomotrici e facendone la somma:

$$i_1(t) = I \cos(\omega t) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_1(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin(\theta) \cos(\omega t)$$

$$i_2(t) = I \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_2(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin(\theta + \frac{2}{3} \pi) \cos(\omega t + \frac{2}{3} \pi)$$

$$i_3(t) = I \cos(\omega t + \frac{4}{3} \pi) \quad \rightarrow \quad \mathcal{F}_3(\theta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{N I}{2} \sin(\theta + \frac{4}{3} \pi) \cos(\omega t + \frac{4}{3} \pi)$$

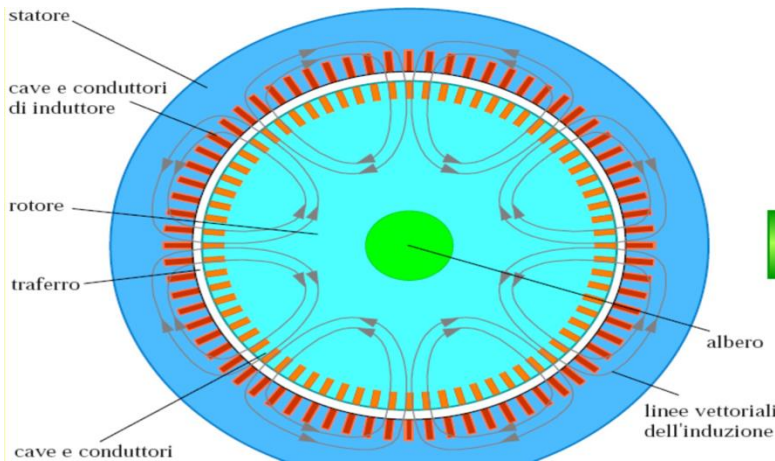
$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\theta, t) &= \mathcal{F}_1(\theta, t) + \mathcal{F}_2(\theta, t) + \mathcal{F}_3(\theta, t) = \\ &= \dots \\ &= \dots \\ &= \dots \\ &= \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta + \omega t) + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta + \omega t + \frac{2}{3} \pi) + \\ &\quad + \frac{4}{\pi} \frac{N I}{4} \sin(\theta + \omega t + \frac{4}{3} \pi) + \frac{4}{\pi} \frac{3 N I}{4} \sin(\theta - \omega t) \end{aligned}$$

Le 3 componenti in rosa sono uguali in modulo e mutuamente sfasate di 120 gradi, ovvero realizzano una stella simmetrica di componenti la cui risultante è nulla. Per cui l'unico contributo sarà dato dal contributo del termine in blu, ovvero un'onda di forza magnetomotrice la cui ampiezza è il triplo di quella delle singole componenti e che ruota nello spazio con velocità angolare ω .

(Ovvero quello che accade è che le componenti che ruotano in senso diretto si sommano, mentre quelle che ruotano in senso inverso si elidono).

All'istante $t=0$ tre forze magnetomotrici nella figura precedente sono quelle in nero.

Torniamo ora alla macchina asincrona di cui riportiamo una sezione trasversale:



Sul pacco statorico è sistemato l'avvolgimento statorico che per come è alimentato produce il campo magnetico rappresentato in figura. Quante coppie polari ha questo campo magnetico? (ovvero quante alternanze nord sud?) 4 coppie polari. In una porzione di angolo meccanico di 90 gradi ovvero in un quarto della nostra macchina, che tipo di avvolgimento possiamo installare? Mono-Bi o trifase?

Se avessimo un numero di cave adeguato si andrebbe certamente ad installare un avvolgimento trifase; su questa macchina c'è un avvolgimento trifase che per come è disposto ci realizza 4 coppie polari (dipende da come disponiamo i conduttori, ovvero da come infiliamo le matasse e da come le colleghiamo).

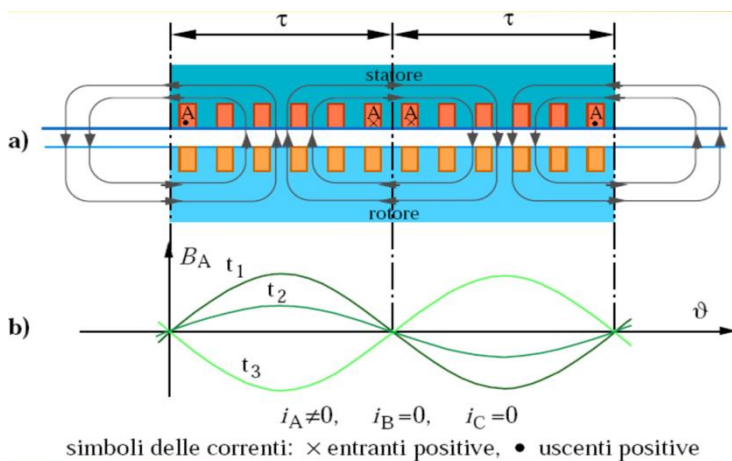
Il numero delle coppie polari come influenza il comportamento della macchina? (Non ci ha più risposto comunque della formula del numero di giri della macchina $n_c = 60f/p$, possiamo quantomeno affermare che fissata la frequenza a 50 Hz, variando il numero di coppie polari varia il numero di giri associato alla macchina.

(Guardando questa macchina in 360 gradi meccanici, quanti gradi elettrici ci sono?)

Sicuramente non 360, perché se per una macchina con una sola coppia polare a 360 gradi meccanici corrispondevano 360 gradi elettrici, gradi elettrici che deducevamo dall'andamento della sinusoide ovvero detto volgarmente avendo una sola sinusoide avevamo una sola alternanza nord sud mentre in questo caso sono 4 coppie polari per cui a 360 gradi meccanici corrisponderanno $p \cdot 360$ gradi elettrici ovvero 4 sinusoidi una di fianco all'altra)

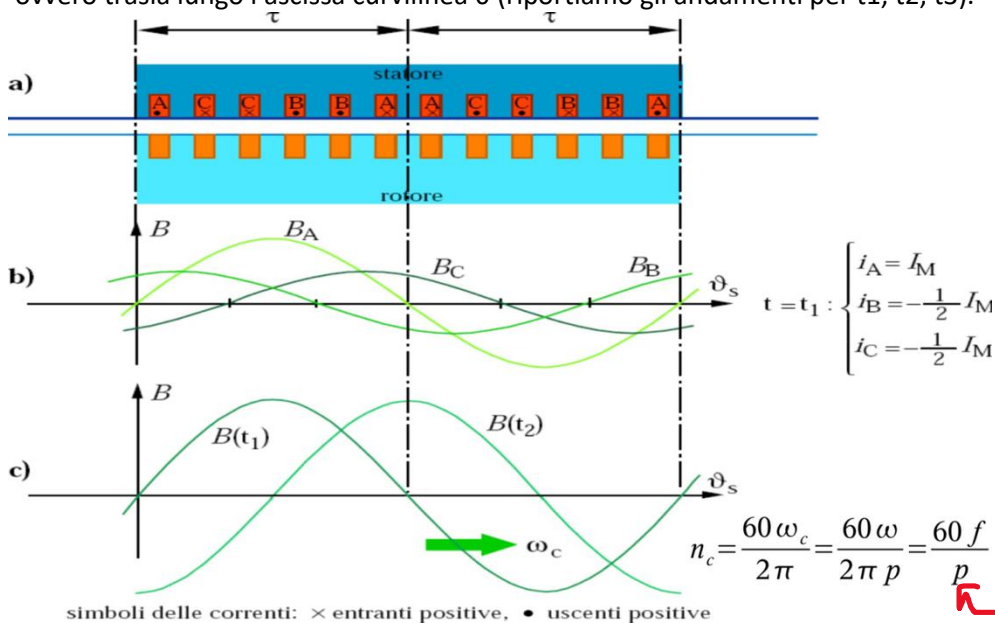
NB il rotore deve avere lo stesso numero di coppie polari dello statore, altrimenti sulla macchina si possono instaurare delle oscillazioni che possono distruggere la macchina.

Fissiamo l'attenzione su una delle coppie polari:



In funzione del tempo (per t_1, t_2, t_3 ecc.), se l'avvolgimento è monofase, vedremo un'onda di induzione magnetica che pulserà in questi 360 gradi elettrici. RIC: se l'avvolgimento è monofase, il campo induzione magnetica associato alla forza magnetomotrice che si genera al traferro della macchina non è un CMR, ma un campo pulsante. Questo in funzione del tempo varierà come in figura, ovvero cambieranno i valori dei max e dei min che rimarranno sempre in corrispondenza dello stesso valore dell'ascissa curvilinea perché il campo non ruota

Se invece realizziamo un avvolgimento di tipo trifase, nello stesso intervallo angolare considerato, (90 gradi meccanici, 360 elettrici) vedremo un campo di induzione magnetica che nel tempo ruota con velocità ω , ovvero trasla lungo l'ascissa curvilinea θ (riportiamo gli andamenti per t_1, t_2, t_3).



NB: non abbiamo detto la pulsazione di rete perché la velocità angolare con cui il campo magnetico ruota dipende dal numero di coppie polari, maggiore è il numero di coppie polari, minore è la velocità di rotazione del campo magnetico a parità di frequenza di rete. In particolare la velocità di rotazione del campo magnetico è dato dalla formula

Abbiamo visto come il campo di induzione magnetica ruota in corrispondenza del traferro della macchina e nel caso di una macchina con 4 coppie polari, avremo 4 sinusoidi in rotazione con una velocità pari a $314/4$ (rad/s) (la velocità sarebbe spazio fratto tempo, ovvero spazio per frequenza $2\pi \cdot 50$ però dobbiamo dividere per p perché non è detto che la frequenza sia quindi quella di rete); se ci mettiamo solidali ad una cava rotorica, cosa vedremo? Un campo magnetico che varia nel tempo con legge sinusoidale e con una pulsazione pari a $314/p$, ovvero il rotore della macchina è spazzolato dal campo di induzione magnetica prodotto dall'avvolgimento statorico. Nel caso di 4 coppie polari, quale sarà la frequenza delle grandezze elettriche indotte da questo campo quando il rotore è fermo? Sarà esattamente la pulsazione della grandezza elettrica attraverso la quale abbiamo prodotto il campo di induzione magnetica in quanto saranno 4 le alternanze nord sud viste in un periodo.

MODELLO CIRCUITALE

Vediamo ora qual è il modello circuitale associato, che fortunatamente è molto simile a quello del trasformatore con l'unica differenza che sta nei parametri che lo caratterizzano:

La macchina è infatti costituita da un materiale ferromagnetico all'interno del quale si sviluppa l'induzione magnetica, fatta eccezione per il traferro necessario al moto relativo del rotore rispetto allo statore; vi è poi un avvolgimento induttore tipicamente posizionato sul pacco statorico ed un avvolgimento indotto tipicamente sistemato sul pacco rotorico. Sostanzialmente si ripropone quanto avevamo visto per il primario è per il secondario di un trasformatore. L'accoppiamento tra i due avviene per induzione magnetica, in particolare, quando il rotore è bloccato, la macchina funziona come un trasformatore, per cui in questa condizione il circuito equivalente sarà analogo a quello del trasformatore.

Saranno quindi presenti una resistenza ed una reattanza sull'avvolgimento primario, ovvero quello induttore, una impedenza di magnetizzazione che rappresenta la magnetizzazione del nucleo ferromagnetico e le perdite nel ferro, una resistenza e una reattanza al secondario ovvero (l'indotto) che rappresentano le perdite per effetto joule nell'avvolgimento e la reattanza di dispersione dell'avvolgimento. (erano dovute all'accoppiamento di linee di campo con l'aria che in questo caso saranno maggiori perché abbiamo anche il traferro!!! Ovvero più aria in cui si concatenano le linee).

Dov'è che possiamo aspettare significative variazioni dei parametri (relative alle diversità costruttive delle due macchine..)?

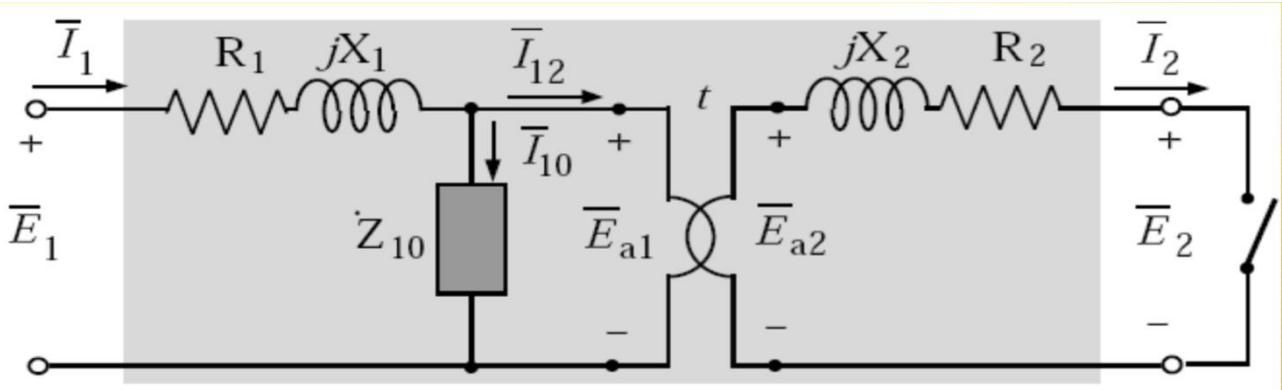
Certamente nella reattanza di dispersione:

Mentre nel trasformatore questa sarà molto piccola per le caratteristiche costruttive degli avvolgimenti stessi, nella macchina asincrona, vi è una zona d'aria, ovvero il traferro che per quanto possa essere

realizzato bene e piccolo sarà comunque significativo perché ci saranno molte più linee di flusso che a richiederanno in aria senza concatenare entrambi gli avvolgimenti.

CIRCUITO EQUIVALENTE A ROTORE BLOCCATO:

Blocciamo il rotore meccanicamente (ovvero non deve ruotare per effetto del campo magnetico rotante prodotto dall'avvolgimento induttore) e teniamo l'indotto aperto:



In questa condizione ovviamente non circolerà corrente sull'indotto ovvero sull'avvolgimento rotorico sarà pari a 0. Nel primario (quello collegato alla rete) ovvero l'avvolgimento induttore verrà assorbita una certa corrente che servirà a generare e sostenere il flusso di induzione magnetica nel ferro della macchina e per bilanciare le perdite per effetto joule nell'avvolgimento e le perdite nel ferro.

L'equazione di equilibrio per questa condizione è la seconda legge di Kirchhoff applicata alla maglia corrispondente all'induttore della macchina.

$$E_{a1} = 2k_{a1}k_f N_1 \Phi f \quad E_{a2} = 2k_{a2}k_f N_2 \Phi f \quad t = \frac{m_1 E_{a1}}{m_2 E_{a2}} = \frac{m_1 k_{a1} N_1}{m_2 k_{a2} N_2}$$

$$\hookrightarrow Z_{10} \bar{I}_{10}$$

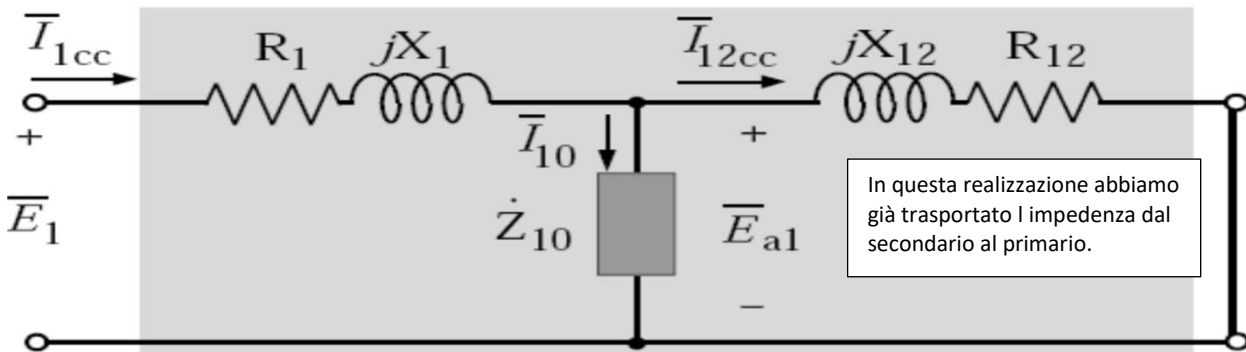
Per l'avvolgimento a gabbia: $N_2 = 1$ $k_{a2} = 1$ ed $m_2 = \frac{N_s}{p}$

A vuoto $\bar{I}_2 = 0$ da cui segue $\bar{I}_{12} = \frac{\bar{I}_2}{t} = 0$

Pertanto si ha $\bar{I}_1 = \bar{I}_{10}$ e quindi $\bar{E}_1 = \bar{E}_{a1} + (R_1 + jX_1)\bar{I}_{10}$

In questo caso quindi la corrente assorbita a vuoto coincide con quella di magnetizzazione essendo il sendario aperto.

AVVOLGIMENTO ROTORICO CHIUSO IN CORTOCIRCUITO (collegando le spazzole agli anelli nota: gli anelli sono i morsetti a cui colleghiamo il carico, le spazzole sono in contatto con gli anelli mediante contatto



strisciante) e al di fuori realizziamo un cortocircuito fra i tre morsetti dell'avvolgimento trifase rotorico) In questo caso nell'avvolgimento rotorico circolerà una corrente perché il campo di induzione magnetica rotante prodotto dall'avvolgimento statorico, sta spazzolando i conduttori dell'avvolgimento rotorico e per la legge dell'induzione magnetica $E=LvXB$ (dove l è la lunghezza del filo, questa equazione discende dalla forza di Lorentz, passando da F a fem dividendo per q e moltiplicando per L) verrà indotta nell'avvolgimento rotorico una forza elettromotrice indotta. (questo per ogni conduttore dell'avvolgimento rotorico); nella precedente espressione, v è la velocità con cui il conduttore rotorico vede spostarsi il campo di induzione magnetica che possiamo ricavare nota la velocità angolare (ovvero dobbiamo calcolare la velocità tangenziale ωr dove ω è la velocità di rotazione del campo magnetico rotante). Il campo di induzione magnetica infatti essendo radiale è ortogonale alla velocità. La conseguenza di questa femm indotta nell'avvolgimento rotorico, è che essendo questo chiuso in corto circuito, comincerà a scorrere una corrente che possiamo facilmente calcolare mediante l'equivalente circuitale:

(Notiamo come sia legittimo fare questo perché tutte le grandezze stanno operando alla frequenza di rete)

$$I_{2cc}^- = \frac{\bar{E}_{a2}}{R_2 + jX_2} \quad I_{1cc}^- = \bar{I}_{10} + I_{12cc}^- = \bar{I}_{10} + \frac{1}{t} I_{2cc}^- \quad \bar{E}_1 = \bar{E}_{al} + (R_1 + jX_1) I_{1cc}^-$$

Riportando al primario $R_{12} = t^2 R_2$ e $X_{12} = t^2 X_2$ si ha

$$I_{12cc}^- = \frac{\bar{E}_{al}}{R_{12} + jX_{12}} \quad I_{1cc}^- = \bar{I}_{10} + I_{12cc}^- \quad \bar{E}_1 = \bar{E}_{al} + (R_1 + jX_1) I_{1cc}^-$$

Fino ad ora non abbiamo visto praticamente nulla di nuovo rispetto a quanto non avessimo già fatto per il trasformatore.

Andiamo ora a rimuovere il fermo meccanico che teneva fermo il rotore della macchina; cosa accade? Sappiamo che nell'avvolgimento rotorico sta circolando una corrente legata alla forza elettromotrice indotta sull'avvolgimento rotorico. Questa corrente scorre nei conduttori, e in particolare in quelli più radiali della macchina che sono sempre spazzolati da un campo magnetico che sta ruotando e quindi su questi conduttori inizierà a manifestarsi una forza ponderomotrice, la cui espressione sarà: $F=LixB$ questa forza (tangenziale) con la componente duale opposta genererà una coppia ponderomotrice che tenderà a mettere in movimento il rotore della macchina. (nota: in generale una spira percorsa da corrente elettrica è soggetta ad un momento magnetico che tenderà ad allineare la spira con le linee di forza del campo magnetico. In questo caso, essendo il campo magnetico rotante, la spira ovvero in questo caso il rotore comincia a girare). Se tale coppia è abbastanza forte da vincere gli attriti di primo distacco della macchina, il rotore inizierà a ruotare. La trattazione quindi si complica.

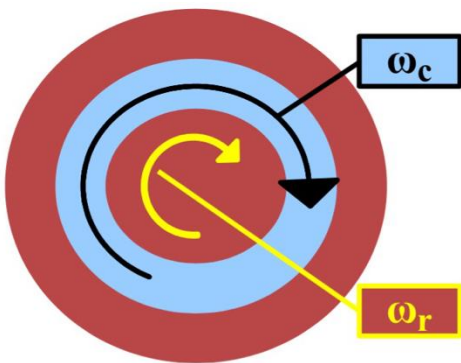
Prima di affrontare la trattazione analitica, cerchiamo di capire come vanno le cose fisicamente:

Se prendiamo un sistema fisico in generale, se questo è in equilibrio, e ne perturbiamo tale condizione, questo reagirà tentando di ristabilire l'equilibrio ovvero cercherà di annullare la causa che ha prodotto la variazione del suo stato di equilibrio; a partire da tale condizione possiamo andare a capire il funzionamento della macchina: consideriamo un rotore a gabbia di scoiattolo:

Le sbarre del rotore subiscono questo campo magnetico che ruota quindi vedono una variazione nel tempo del campo magnetico; questa variazione produce delle forze elettromotrici indotte (diverse da sbarra a sbarra perché diverso il campo magnetico che le interessa) ed essendo le sbarre chiuse in cortocircuito, comincerà a scorrere una corrente. Se il rotore è libero di muoversi, a questa circolazione di corrente, per l'interazione campo corrente, apparirà una forza che tenderà a mettere in movimento il rotore. Il rotore però non si mette in movimento per la presenza della forza ma perché da un punto di vista generale questo tenderà ad annullare la causa che ha prodotto il movimento, ovvero la velocità relativa tra la rotore ed il campo. Per cui il rotore spontaneamente inseguirà il campo magnetico perché se questo riuscisse a raggiungere la velocità di rotazione del campo magnetico, annullerebbe l'interazione campo magnetico corrente quindi sarebbe ripristinato l'equilibrio iniziale. Questa è una situazione ideale perché nel momento in cui il rotore raggiunge la velocità del campo magnetico rotante, (si annulla la forza magnetomotrice, si annulla la corrente indotta, si annulla la coppia ponderomotrice) questo comincerà a rallentare per la presenza di attriti legati agli scorrimenti ecc, e non appena rallenta si ricreerà un certo gap tra le due velocità ed il rotore tenderà a riaccelerare. Il rotore si porta quindi a funzionare in un punto di equilibrio che è molto vicino alla velocità del campo magnetico rotante (velocità di sincronismo) ma leggermente inferiore, quel tanto che basta a vincere tutte le resistenze presenti all'interno della macchina, sostanzialmente ventilazioni ed attriti.

TRATTAZIONE ANALITICA

Questo comportamento della macchina viene descritto attraverso un fenomeno detto SCORRIMENTO (numero puro) rapporto tra la differenza di velocità di rotazione del campo magnetico e la velocità di rotazione del rotore sulla velocità del campo magnetico. Tutti i possibili stati di funzionamento del motore asincrono sono descritti dal valore dello scorrimento, infatti possiamo esprimere il numero di giri del rotore rispetto allo scorrimento e alla velocità di rotazione del campo magnetico.



$$s = \frac{\omega_c - \omega_r}{\omega_c} = \frac{\frac{60}{2\pi}(\omega_c - \omega_r)}{\frac{60}{2\pi}\omega_c} = \frac{n_c - n_r}{n_c}$$

$$n_r = n_c(1 - s) \quad \omega_r = \omega_c(1 - s) = \frac{\omega}{p}(1 - s)$$

Infatti per $s=0$, scorrimento unitario, la velocità di rotazione del rotore è uguale a quella del campo magnetico (rotore e campo sincroni) che ricordiamo essere una condizione limite di funzionamento a cui la macchina non potrà mai portarsi spontaneamente.

Scorrimento uguale a 1 ($s=1$) significa che la velocità di rotazione del rotore è uguale a 0 ovvero il rotore è fermo (avviamento della macchina)

Frequenza di sfasamento

con rotore bloccato $n_r = 0 - s = 1$
 al sincronismo $n_r = n_c - s = 0$

$$\omega_c - \omega_r = s\omega_c \quad f_s = s f$$

$$\bar{E}_{a2s} = s \bar{E}_{a2} \quad X_{2s} = s X_2$$

$$\bar{I}_{2s} = \frac{E_{a2s}}{R_2 + jX_{2s}}$$

$$\bar{I}_{2s} = \frac{s E_{a2}}{R_2 + jsX_2} = \frac{E_{a2}}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

$$\bar{I}_{1cc} = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} = \bar{I}_{10} + \frac{\bar{I}_2}{t}$$

Consideriamo ora una macchina con una sola coppia polare; se ci mettiamo solidali con un conduttore rotorico a rotore bloccato vediamo passare il campo magnetico prodotto dall'avvolgimento statorico (che ha una sola coppia polare ovviamente); sul conduttore in cui ci troviamo, viene indotta una forza elettromotrice e conseguentemente una corrente (se l'avvolgimento è chiuso in cortocircuito). Qual è la frequenza di tale corrente e della forza elettromotrice? Sarà la stessa delle grandezze elettriche inducenti (50Hz). Una volta indotta questa corrente, se sblocciamo il rotore e quindi questo si mette in moto, quale sarà la frequenza che ci ritroviamo sui conduttori dell'avvolgimento rotorico? Certamente minore, perché il rotore comincerà ad inseguire il campo magnetico riducendo la differenza di velocità tra campo magnetico rotante e conduttori rotorici. In particolare questa si ridurrà di una quota pari allo scarto di velocità di rotazione del rotore e quella del campo magnetico statorico, scarto che è misurato dallo scorrimento (questo infatti non è altro che una misura percentuale dello scarto tra le due velocità). Con il rotore in movimento quindi la frequenza delle grandezze indotte nel rotore sarà pari a S volte la frequenza delle grandezze inducenti, $f = S * 50\text{Hz}$. (Infatti per $S=1$, $f=50\text{Hz}$ mentre quando si raggiunge la velocità di sincronismo, lo scorrimento vale 0 segue che la frequenza sarà pari a 0 perché abbiamo annullato il moto relativo tra campo magnetico e rotore).

Dobbiamo ora studiare la macchina in una certa condizione di funzionamento, ovvero ad un certo valore dello scorrimento. Tuttavia possiamo usare il metodo simbolico solo se tutte le grandezze sono isofrequenziali, in caso contrario non possiamo usare il metodo simbolico per studiare circuiti in corrente alternata. Nel nostro caso è evidente che le grandezze non sono isofrequenziali, infatti nello statore avremo sempre 50Hz mentre nel rotore avremo una frequenza Sf che varia tra 0 e 50 Hz. Non possiamo quindi rappresentare su uno stello modello circuitale in forma simbolica statore e rotore. Nella pratica però se ci limitiamo a considerare il solo rotore, la corrente che circola in esso possiamo scriverla come il rapporto tra la forza elettromotrice indotta nell'avvolgimento e l'impedenza dell'avvolgimento. Per cui limitandoci al secondario questa relazione in forma simbolica possiamo scriverla.

La forza elettromotrice indotta nell'avvolgimento rotorico possiamo scriverla come la fem indotta a rotore bloccato ($S=1$) moltiplicata lo scorrimento ed è lecito fare questo perché la femm dipende dalla velocità tangenziale ($E=lv \times B$) che è legato alla velocità angolare dalla relazione $v = \omega R$ (con omega di rotazione del rotore) se la macchina ha una coppia polare, esprimendola in funzione della frequenza di rete, usando $P=1$, $\omega(c) = \omega = 2\pi f$ per cui il legame tra la pulsazione delle grandezze rotoriche e la pulsazione di rete è proprio S. Poiché E dipende da ω possiamo scrivere che la fem indotta dell'avvolgimento rotorico in corrispondenza dello scorrimento S è uguale a S per la fem indotta sull'avvolgimento rotorico a rotore bloccato ovvero quella a 50 Hz discorso analogo per la X_{2s} :

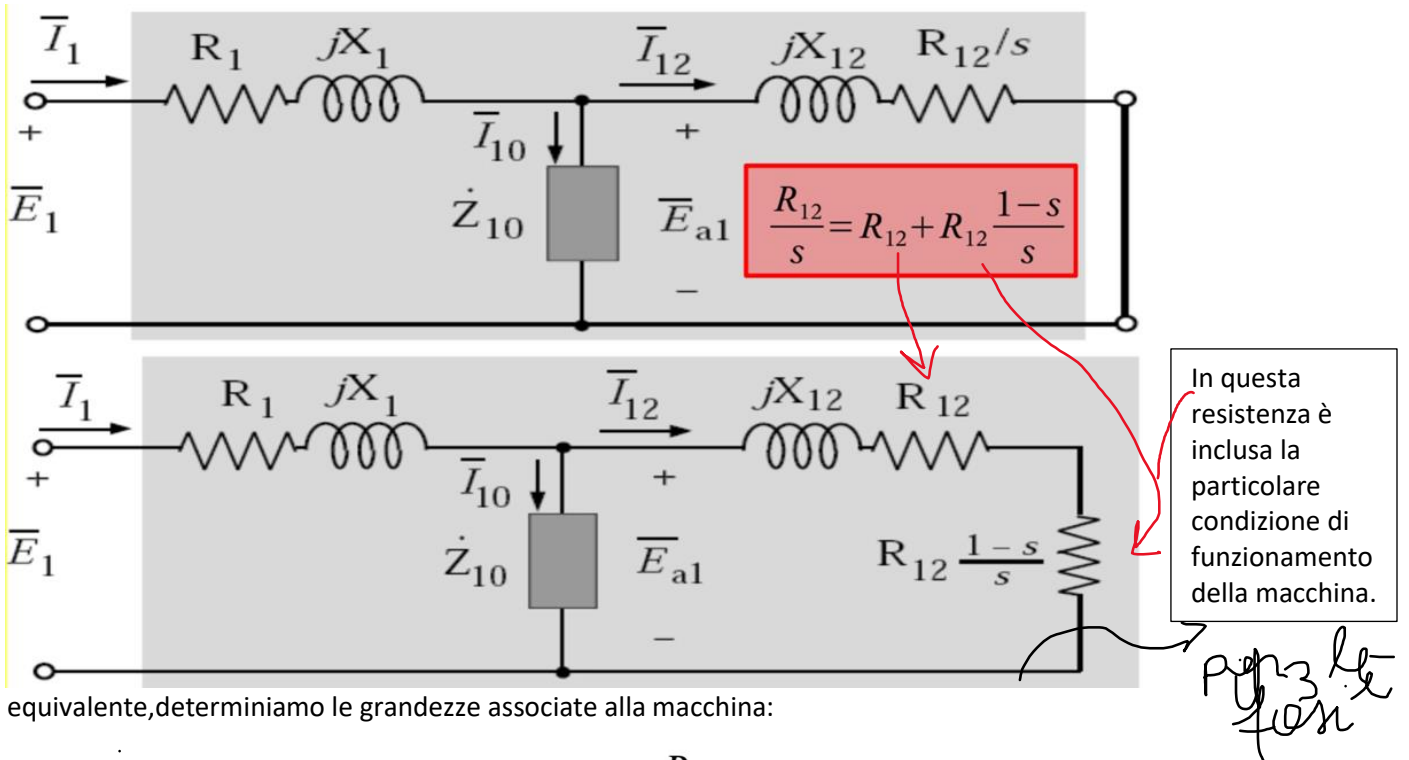
$$\bar{E}_{a_{2s}} = S \bar{E}_{a_2} \quad X_{2s} = S X_2$$

In queste relazioni ora tutte le grandezze sono espresse a 50 Hz per cui il valore delle correnti sarà:

$$\bar{I}_{2s} = \frac{E_{a_{2s}}}{R_2 + jX_{2s}} \quad \bar{I}_{2s} = \frac{S E_{a_2}}{R_2 + jS X_2} = \frac{E_{a_2}}{\frac{R_2}{S} + jX_2} \quad \bar{I}_{1cc} = \bar{I}_{10} + \bar{I}_{12} = \bar{I}_{10} + \frac{\bar{I}_2}{t}$$

Questo ci sta perché la componente resistiva è in fase quindi non dipende mentre dalla fase della corrente che dipende dalla fem ovvero dalla velocità di rotazione quindi dallo scorrimento

Possiamo quindi andare a studiare il comportamento della macchina mediante un circuito elettrico in forma simbolica. La presenza dello scorrimento è relegato al termine resistivo. Visto il circuito



equivalente, determiniamo le grandezze associate alla macchina:

Potenza trasferita al rotore

(Attiva) trasferita dallo statore al rotore per accoppiamento elettromagnetico

$$P_r = 3 \frac{R_{12}}{s} I_{12}^2 = 3 R_{12} I_{12}^2 + 3 R_{12s} I_{12}^2$$

Potenza trasferita all'asse

$$P_m = 3 R_{12s} I_{12}^2 = 3 R_{12} \frac{1-s}{s} I_{12}^2 = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2$$

Coppia elettromeccanica

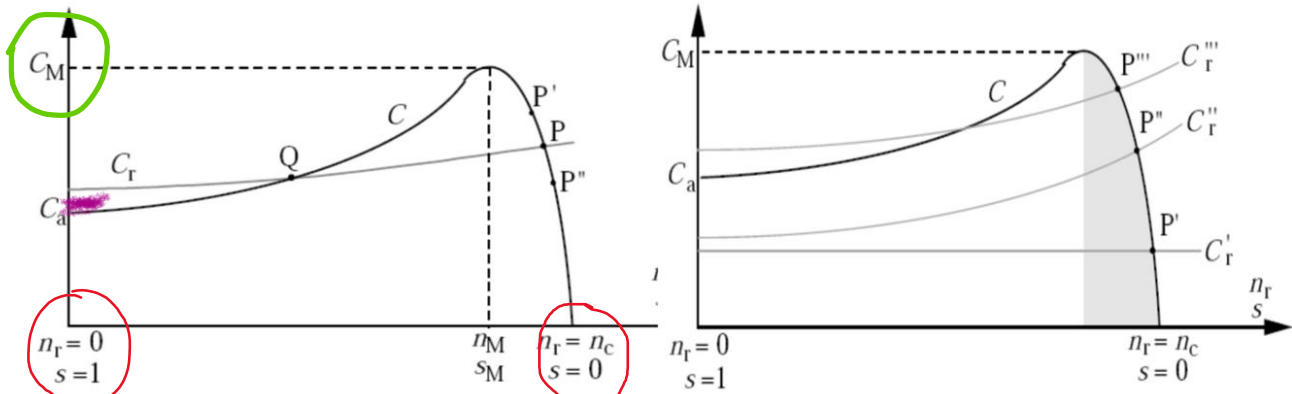
$$C = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2}{\frac{\omega}{p}(1-s)} = \frac{p}{\omega} \frac{3 R_2 I_2^2}{s} = \frac{p}{\omega} P_r$$

Rendimento

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_{mecc}}{P_{mecc} + \sum P_{diss}}$$

Caratteristica meccanica e stabilità di funzionamento di un motore asincrono:

Se andiamo a tracciare l'andamento della coppia elettromeccanica in funzione dello scorrimento otteniamo un andamento di questo tipo:



$$C(s) = \frac{p}{\omega} \frac{3 R_2 I_2^2}{s} = \frac{3 p s R_2 E_{a2}^2}{\omega (R_2^2 + s^2 X_2^2)} = \frac{3 p E_{a2}^2}{\omega} \frac{s R_2}{R_2^2 + s^2 X_2^2}$$

Coppia di spunto ($s=1$) $C_a = \frac{3 p E_{a2}^2}{\omega} \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2}$ Dipende sia dalla resistenza che dalla reattanza

$$\frac{dC(s)}{ds} = 0 \quad s_M = \frac{R_2}{X_2} \quad C_M = \frac{3 p E_{a2}^2}{\omega} \frac{1}{2 X_2^2} \quad n_M = n_c (1 - s_M) = n_c \left(1 - \frac{R_2}{X_2}\right)$$

Osserviamo come il valore in corrispondenza del quale abbiamo la coppia massima, dipende dalla resistenza dell'avvolgimento rotorico. Il valore della coppia massima non dipende da tale valore di resistenza.

Se andiamo a considerare il grafico precedente, in cui sono rappresentati C_r e C_a , se riusciamo ad avviare la macchina, nel punto Q la coppia motrice eguaglia la coppia di carico, per cui è una condizione di funzionamento, ma è un punto di equilibrio instabile perché operando una piccola variazione di velocità della macchina la macchina accelererà, il punto di funzionamento si sposterà lungo la caratteristica fino al punto P dove si stabilisce un nuovo equilibrio, e la condizione di funzionamento rimane quella.

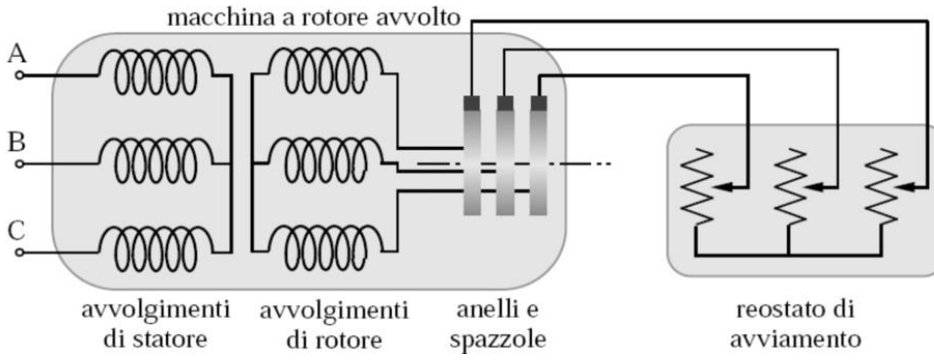
Se invece da Q freniamo la macchina, accade che la coppia resistente supera la motrice e la macchina finisce per spegnersi.

Il punto P è un punto di funzionamento stabile perché pur perturbando il punto P, accelerando o decelerando ci troveremo in P' o P'' ma la condizione di funzionamento si riporterà sempre su P. Tutto il ramo di dx dopo la coppia massima è di funzionamento stabile e nelle macchine deve essere il più ripido possibile perché in questo modo le variazioni di velocità rispetto alla coppia resistente sono piccole.

AVVIAMENTO DEL MOTORE:

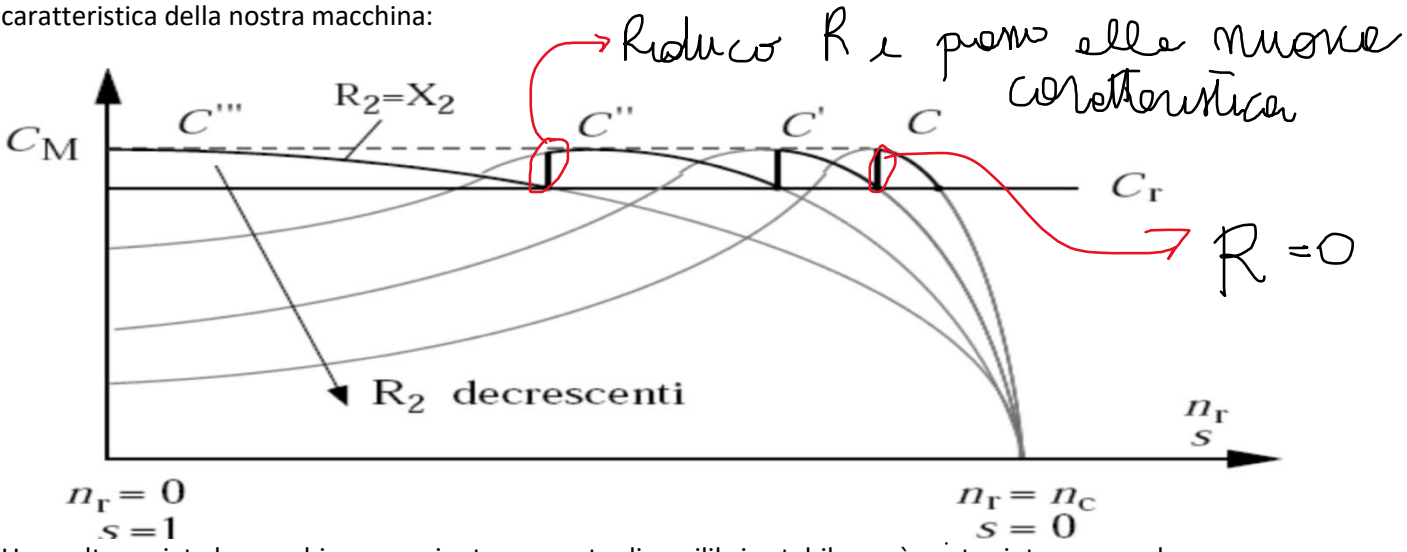
Quando la coppia di avviamento è inferiore della coppia resistente, la macchina non può partire spontaneamente. Per farla partire, possiamo sfruttare il fatto che lo scorrimento in corrispondenza del quale si ha il valore massimo della coppia è funzione di R_2 mentre il valore massimo non è funzione di R_2 .

Ecco una macchina trifase con rotore avvolto:



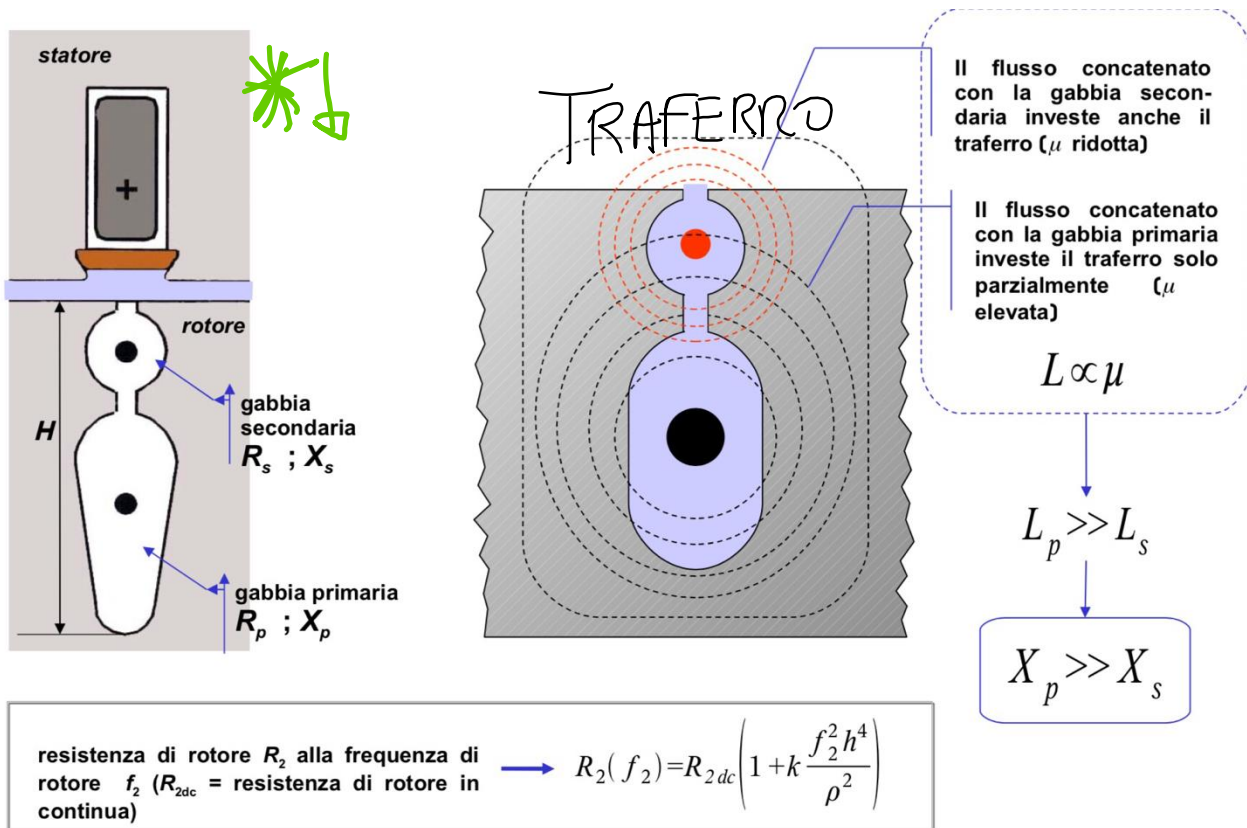
Tramite anelli e spazzole possiamo collegarci con l'esterno, a cui andiamo a collegare un reostato trifase, ovvero 3 resistenze collegate a stella che possiamo regolare tra 0 ed un valore fissato di resistenza. Variando questi valori facciamo variare la resistenza apparente dell'avvolgimento rotorico. Essendo che il punto in cui si ha il massimo dello scorrimento dipende da questa resistenza, aumentando questa resistenza, il punto in corrispondenza del quale si ha il massimo dello scorrimento si sposta verso sx, fino ad arrivare in corrispondenza dello scorrimento unitario ovvero avere la coppia massima all'avviamento. Tale valore massimo non essendo $f(R_2)$ rimane costante.

Facendo variare la resistenza del reostato, possiamo modificare la caratteristica della nostra macchina:



Una volta avviata la macchina e raggiunto un punto di equilibrio stabile, sarà nostro interesse andare a disinserire tutte le resistenze del reostato per rendere minima la resistenza dell'avvolgimento rotorico, quindi per ridurre le perdite e per avere il ramo stabile quanto più verticale possibile.

Nel caso in cui il nostro rotore sia a gabbia di scoiattolo, non possiamo variare la resistenza del rotore della macchina essendo quello un blocco unico di metallo, si opera quindi in un altro modo, realizzando un rotore a doppia gabbia o a gabbia stretta e profonda:



In questo modo si riesce a variare la caratteristica coppia scorrimento del motore ed avere all'avviamento una coppia di avviamento molto elevata mediante un principio che possiamo analizzare qualitativamente nella doppia gabbia (graficamente)

I conduttori sistemati nella gabbia interna avranno un'induttanza, quindi una reattanza molto elevata essendo tante le linee di forza del campo induzione magnetica prodotte da questi conduttori che si concatenano solo con questi conduttori. Questa reattanza possiamo modularla regolando la lunghezza di quei traferri, più saranno profondi, più saranno le linee che "autoconcatenano". E quindi non concatenano il traferro.

Così facendo l'induttanza di dispersione della gabbia primaria sarà molto maggiore dell'induttanza di dispersione della gabbia secondaria. Inoltre, viste le diverse sezioni, la resistenza dei conduttori della gabbia primaria è molto minore di quella della secondaria perché $R = \rho L/S$; e essendo queste due gabbie chiuse in cortocircuito frontalmente e posteriormente, ci troviamo di fronte ad una situazione di questo tipo:

Quando verrà indotta la fem, a rotore bloccato come si ripartirà la corrente?

Prevale certamente la reattanza perché a rotore bloccato la pulsazione della grandezza sinusoidale è la massima possibile, e la corrente si ripartirà quasi esclusivamente sulla gabbia secondaria, che ha una resistenza molto superiore della primaria; segue che il punto in cui si realizza il valore massimo della coppia si sposta verso lo scorrimento unitario. Man mano che la macchina si avvia, il peso della reattanza tende a 0 perché la pulsazione tende a 0 (tendendo a 0 la frequenza) e la ripartizione della corrente è stabilita dalla resistenza ed essendo quella della gabbia secondaria molto maggiore, la corrente tende a scorrere maggiormente nella gabbia primaria, ed il massimo si sposta verso lo scorrimento nullo.

Realizzando un rotore con gabbia secondaria e primaria accadrà che:

Nella gabbia primaria (quella grande) avremo un'induttanza di dispersione molto maggiore di quella primaria (ovvero quella grossa) perché ci saranno molte più linee che si autoconcatenano senza il traferro.

la resistenza invece è molto maggiore quella della gabbia secondaria (piccola) perché $R=\rho L/(Sezione)$. La corrente nel rotore, in avviamento avente frequenza massima ovvero quella di rete sarà influenzata principalmente dalla componente reattiva essendo la reattanza $J\omega$.(ovvero trascuriamo il bipolo resistivo). La corrente si ripartirà quasi esclusivamente nella gabbia secondaria.(perché ha reattanza minore, ricorda partitore di corrente) quando il rotore comincia a girare, la frequenza diminuisce e prevale la componente resistiva che è maggiore nella gabbia secondaria quindi la corrente si ripartirà maggiormente nella gabbia primaria!!

AVVIAMENTO STELLA/TRIANGOLO:

Normalmente, gli avvolgimenti della macchina sono collegati a triangolo per cui a questi avvolgimenti è imposta la tensione concatenata; questo comporta che le correnti che possono essere richiamate all'avviamento della macchina possono essere anche molto elevate. Per ridurre queste correnti si può effettuare l'avviamento stella triangolo, ovvero nella fase iniziale si mantengono gli avvolgimenti della macchina a stella con la tensione che è quella concatenata/ $\sqrt{3}$ la corrente quindi diminuisce ma parallelamente anche la coppia diventa $1/3$ per cui non è detto che riusciamo ad avviare la nostra macchina in questo modo. Ci riusciamo solo se la coppia resistente è minore della coppia di avviamento a stella.

REGOLAZIONE DELLA VELOCITÀ:

Può essere effettuata variando la frequenza, perché la macchina è alimentata da un inverter, Oppure variando le coppie polari.