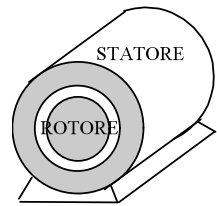


MACCHINA ASINCRONA TRIFASE

E' una macchina elettrica rotante. Si chiama asincrona perché il rotore ruota ad una velocità diversa dal campo rotante.

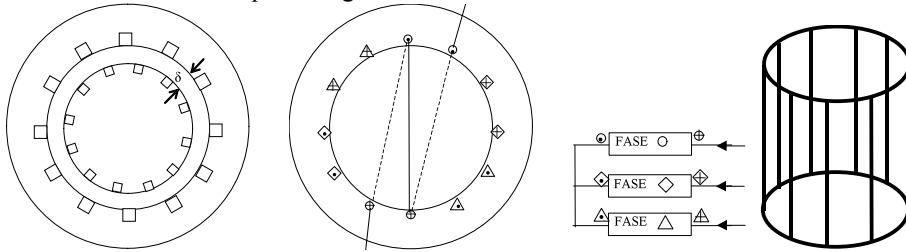
STRUTTURA. La struttura è la stessa di quella analizzata per studiare il campo rotante: due cilindri ferromagnetici, uno pieno, interno, rotante (rotore), l'altro cavo, esterno, stazionario (statore), separati da un sottile spessore d'aria (traferro), che è il minimo compatibilmente con le esigenze meccaniche.



In ciascun cilindro sono ricavate delle cave, in cui sono alloggiati dei conduttori elettrici.

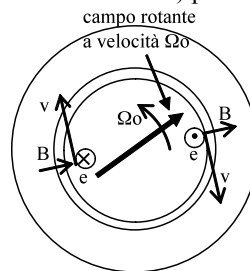
Sullo statore c'è un avvolgimento trifase: 3 bobine sfasate di 120° , collegate a triangolo o stella, così da presentare 3 morsetti liberi, cui è collegata l'alimentazione trifase.

Sul rotore c'è un altro avvolgimento trifase, chiuso in corto circuito, oppure delle sbarre chiuse da due anelli frontali, in modo da formare una specie di gabbia.

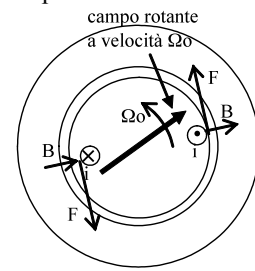


PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO COME MOTORE. Alimentando lo statore con una terna simmetrica di tensioni, si genera una terna simmetrica di correnti (gli avvolgimenti sono uguali, \Rightarrow le impedenze di carico sono uguali \Rightarrow il sistema trifase è equilibrato). Come visto, un avvolgimento trifase (3 bobine uguali sfasate di 120° meccanici) percorso da una terna equilibrata di correnti (3 correnti uguali, sfasate di 120° elettrici) produce un campo rotante.

I conduttori elettrici vedono un flusso che varia nel tempo, per cui in essi viene indotta una fem $e = d\phi / dt$. Se si analizza il verso di tale fem, si verifica che nello statore essa si oppone alla corrente; nel rotore invece, tale fem, applicata all'impedenza del rotore, fa circolare una corrente. Ma allora i conduttori di rotore sono percorsi da corrente ed immersi in un campo magnetico \Rightarrow sui conduttori agisce una forza $F = B I l$. L'insieme di tali forze produce una coppia, che mette in rotazione il rotore.



fem indotta nel rotore



forza agente sul rotore

Dal punto di vista energetico, lo statore si comporta da utilizzatore elettrico, dato che la fem e è opposta alla corrente i \Rightarrow assorbe una potenza elettrica $3ei$. Tramite il campo magnetico rotante, tale potenza elettrica si converte in potenza meccanica $C\Omega$, per far ruotare il carico meccanico (una quota parte della potenza elettrica assorbita viene dissipata in perdite nel ferro e negli avvolgimenti).

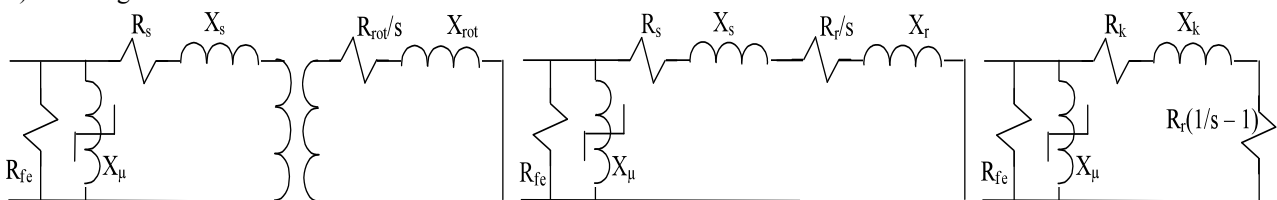
La presenza del carico meccanico fa sì che il rotore non raggiunga mai la velocità del campo rotante, ma sia sempre un po' più lento (da qui il nome di macchina asincrona). Detta Ω_0 la velocità del campo, e Ω quella del rotore, la differenza di velocità relativa (riferita a Ω_0) è detta scorrimento, e si indica con s $s = (\Omega_0 - \Omega) / \Omega_0 = 1 - \Omega / \Omega_0$

CIRCUITO EQUIVALENTE.

Se la macchina è ferma, essa si comporta come un trasformatore con il secondario chiuso in corto circuito \Rightarrow il circuito equivalente è quello di un trasformatore con il secondario chiuso in corto circuito. Se il rotore ruota, il circuito equivalente è lo stesso, ma si può dimostrare che la resistenza del rotore va divisa per lo scorrimento s .

Poi si applicano alcune trasformazioni, e si ottiene il circuito equivalente a 4 parametri:

- 1) si riportano a statore i parametri del rotore R_{rot} / s e X_{rot} , ottenendo R_r / s e X_r ;
- 2) si elimina il trasformatore ideale, che essendo chiuso in corto non influisce;
- 3) si scompone R_r / s in $R_r + R_r (1/s - 1)$;
- 4) si congloba $R_s + R_r = R_k$ e $X_s + X_r = X_k$



Il significato di R_{fe} , X_{μ} , R_k , X_k è lo stesso del trasformatore. Ne segue che $R_r(1/s - 1)$ rappresenta la potenza meccanica resa all'albero, perché è l'unico termine cui è associata potenza attiva, e che non sia potenza persa (R_k ed R_{fe} sono per loro natura rappresentative di potenza persa).

METODI PER RICAVALARE I PARAMETRI del circuito equivalente

Come per il trasformatore, si effettuano delle prove, per diversi valori dello scorrimento.

$s = 0$. Significa $\Omega = \Omega_0$, cioè il rotore è fatto ruotare dall'esterno alla velocità Ω_0 . In tal caso $R_r(1/s - 1) \rightarrow \infty \Rightarrow$ il ramo $R_k X_k$ è aperto \Rightarrow la potenza entrante è associata solo a $R_{fe} X_{\mu} \Rightarrow$ da questa prova si ricavano $R_{fe} X_{\mu}$.

$s = 1$. Significa $\Omega = 0$, cioè il rotore è mantenuto fermo (rotore bloccato). In tal caso $R_r(1/s - 1) = 0 \Rightarrow$ nel ramo $R_k X_k$ non ci sono altri parametri \Rightarrow noti $R_{fe} X_{\mu}$, da questa prova si ricavano $R_k X_k$ (tramite Boucherot).

$s = s_n$. Significa $\Omega = \Omega_n = \Omega_0 (1 - s_n)$, cioè il rotore sta ruotando a velocità nominale \Rightarrow sta anche erogando la potenza nominale, ed assorbendo la corrente nominale. Allora, noti $R_{fe} X_{\mu}$ e le grandezze nominali, da questa prova si ricavano $R_k X_k$ (sempre tramite Boucherot).

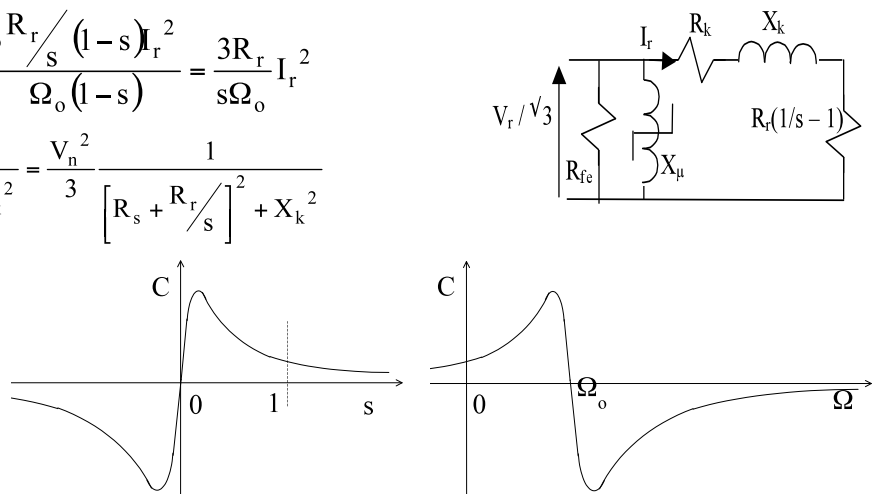
COPPIA E CARATTERISTICA MECCANICA

$$C = \frac{P_{mecc}}{\Omega} = \frac{3R_r \left(\frac{1}{s} - 1\right)^2}{\Omega} = \frac{3R_r \left(\frac{1-s}{s}\right)^2}{\Omega_0(1-s)} = \frac{3R_r}{s\Omega_0} I_r^2$$

$$I_r^2 = \left(\frac{V_n}{\sqrt{3}}\right)^2 \frac{1}{\left[R_k + R_r \left(\frac{1}{s} - 1\right)\right]^2 + X_k^2} = \frac{V_n^2}{3} \frac{1}{\left[R_s + R_r/s\right]^2 + X_k^2}$$

$$C(s) = \frac{R_r}{s\Omega_0} \frac{V_n^2}{\left[R_s + R_r/s\right]^2 + X_k^2}$$

Dato che $\Omega = \Omega_0 (1 - s)$, dalla $C(s)$ si ricava la $C(\Omega)$.



Sul piano $C-\Omega$, si possono identificare le varie zone di funzionamento:

$C > 0, \Omega > 0 \Rightarrow$ motore

$C < 0, \Omega > 0 \Rightarrow$ generatore

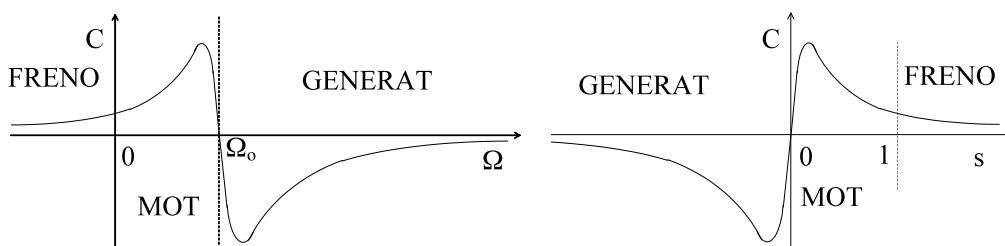
$C < 0, \Omega < 0 \Rightarrow$ freno

Queste si riportano poi sul piano $C-s$, ottenendo:

$s < 0 \Rightarrow$ generatore

$0 < s < 1 \Rightarrow$ motore

$s > 1 \Rightarrow$ freno



Nell'espressione di $C(s)$, ponendo $s = 1$ si ricava la coppia di spunto C_k (coppia per velocità nulla):

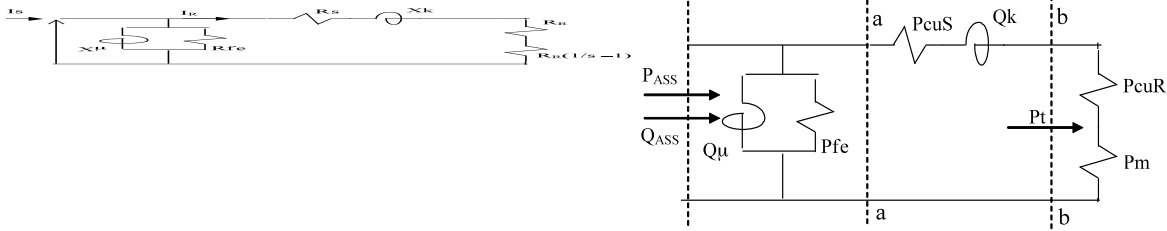
$$C_k = C(s=1) = \frac{R_r}{\Omega_0} \frac{V_n^2}{\left[R_s + R_r\right]^2 + X_k^2} = \frac{R_r}{\Omega_0} \frac{V_n^2}{R_k^2 + X_k^2}$$

Sempre da $C(s)$, derivando e uguagliando a 0, si ha il valore di scorrimento s_{Cmax} che rende massima la coppia:

$$C(s) = \frac{R_r V_n^2}{\Omega_0} \frac{s}{\left[sR_s + R_r\right]^2 + s^2 X_k^2} \quad \frac{dC(s)}{ds} = 0 \Rightarrow \left[sR_s + R_r\right]^2 + s^2 X_k^2 - s \left\{2[sR_s + R_r]R_s + 2sX_k^2\right\} = 0$$

$$s_{Cmax} = \pm \frac{R_r}{Z_{sk}} \quad Z_{sk} = \sqrt{R_s^2 + X_k^2} \quad C_{max} = C(s_{Cmax}) = \frac{V_n^2}{2\Omega_0 Z_{sk}} \frac{1}{\left(1 + R_s/Z_{sk}\right)}$$

POTENZE



$$\eta = P_m / P_{ASS}$$

$$\cos \varphi = P_{ASS} / A_{ASS}$$

$$A_{ASS} = P_m / (\eta \cos \varphi) = \sqrt{3} V_{lim} I_s$$

$$P_t = 3 (R_r/s) I_r^2$$

$$P_{cuR} = 3 R_r I_r^2$$

$$P_m = P_t - P_{cuR} \Rightarrow P_m = 3 R_r (1/s - 1) I_r^2$$

$$P_{cuR} = s P_t$$

$$P_m = (1 - s) P_t$$

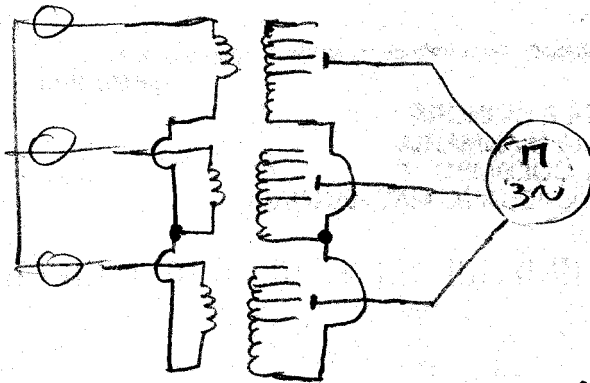
AVVIAMENTO DI MACCHINA ASINCRONA

All'avviamento si ha scorrimento unitario ($s = 1$) \Rightarrow l'impedenza del circuito rotorico è bassa (R_r / s è bassa) \Rightarrow la corrente assorbita è elevata (6-7 volte la corrente nominale della macchina) \Rightarrow possono esserci problemi. Si cerca allora di ridurre la corrente all'avviamento. Ci sono 3 modi principali: 1) si riduce la tensione di alimentazione V_{lim} ; 2) si aumenta la resistenza rotorica R_r ; 3) si effettua una regolazione elettronica della corrente.

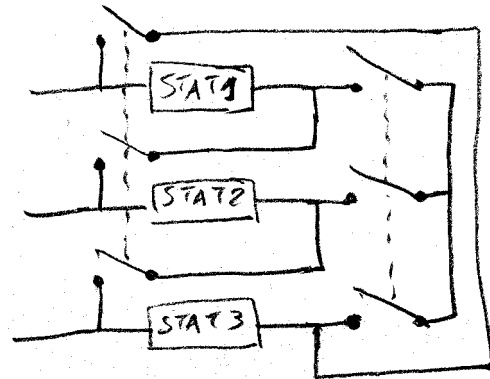
RIDUZIONE di V_{lim} . Ci sono due metodi principali: a) utilizzare un trasformatore a prese: si tratta di un trasformatore con più uscite, ciascuna con un valore di tensione; collegando il motore a uscite diverse, si varia V_{lim} ; b) effettuare un avviamento stella-triangolo: gli avvolgimenti di statore sono inizialmente collegati a stella, in modo che la tensione sugli avvolgimenti è quella di fase ($V_{lim}/\sqrt{3}$); poi si passa al collegamento a triangolo, e sugli avvolgimenti c'è la tensione concatenata V_{lim} .

Sono metodi semplici, ma la coppia cala molto (la coppia è proporzionale al quadrato della tensione) \Rightarrow questi metodi vanno bene solo se la coppia di spunto del carico è bassa.

TRASFORMATORE A PRESE



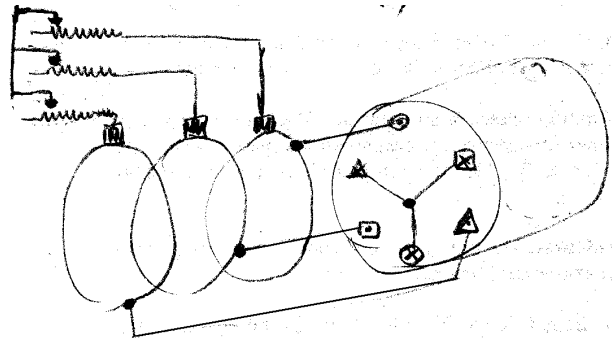
AVVIAMENTO YΔ



AUMENTO di R_r . Si utilizza un reostato sul rotore \Rightarrow serve un sistema di anelli e spazzole per collegare il reostato (che è fisso) con il rotore (che ruota).

Dall'espressione della coppia di spunto C_k e della corrente di spunto I_k , si osserva che se R_r aumenta, C_k aumenta, ma I_k cala. Gli inconvenienti di questo metodo sono che si abbassa il rendimento (perché il reostato introduce perdite ulteriori), e che si può fare solo con rotori ad avvolgimento (non con rotori a gabbia).

REGOLAZIONE ELETTRONICA. Sono metodi più complessi, ma decisamente più flessibili. Vedremo degli esempi parlando dei metodi di regolazione di C e Ω .



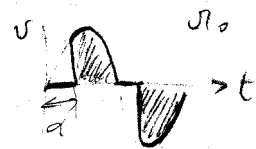
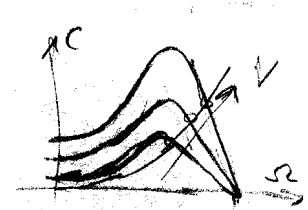
METODI DI REGOLAZIONE DI COPPIA E VELOCITA' IN UNA MACCHINA ASINCRONA

A. CAMBIA SOLO L'AMPIEZZA DELLA CARATTERISTICA NATURALE.

Si ottiene regolando il valor efficace della tensione di alimentazione V_{alim} . Infatti la coppia è proporzionale al quadrato della tensione, per cui riducendo la tensione di alimentazione di un fattore k , la coppia si riduce di k^2 .

$$C(s) = \frac{R_r}{s\Omega_o} \frac{V_{\text{alim}}^2}{\left[R_s + \frac{R_r}{s} \right]^2 + X_k^2}$$

Per ridurre la tensione, si può usare un TRIAC, una valvola elettronica che parzializza la sinusoide di alimentazione \Rightarrow si riduce il valor efficace della tensione applicata. Tale valore è regolabile a piacere, perché è regolabile l'angolo di parzializzazione α . Questo metodo è molto economico, ma fornisce basse prestazioni, perché la forma d'onda della tensione è distorta, per cui il motore non lavora bene.



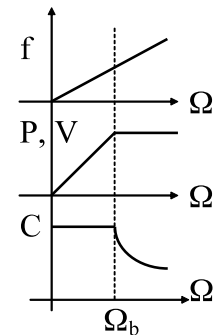
B. CAMBIA LA FORMA DELLA CARATTERISTICA NATURALE. Si ottiene regolando contemporaneamente forma, valore, frequenza, della tensione di alimentazione, tramite un convertitore CA/CA. Un convertitore CA/CA è un dispositivo che, partendo dalla tensione di rete (forma d'onda sinusoidale, valore efficace $V = 400$ V, frequenza $f = 50$ Hz) produce una tensione di forma, valore e frequenza desiderate. Questo metodo è più costoso, ma fornisce ottime prestazioni, perché consente di andare a lavorare in un punto qualsiasi del piano $C-\Omega$ (compatibilmente con i limiti meccanici, termici, elettrici, dei vari dispositivi).

ESEMPIO DI REGOLAZIONE DI C ed Ω : METODO "VOLT SU HERTZ".

Questo metodo è il più semplice. Si definisce velocità base Ω_b quella per cui la tensione di alimentazione (variabile) V_{alim} è pari alla tensione nominale V_n .

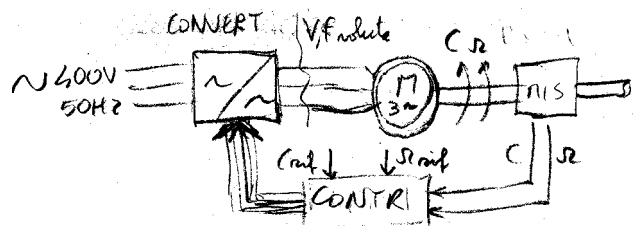
Per $0 < \Omega < \Omega_b$, si regolano V_{alim} e frequenza f in modo che siano proporzionali alla velocità di rotazione Ω . In tal modo, $V_{\text{alim}}/f = \text{cost}$ (da qui il nome "volt su Hertz"). Si dimostra che la conseguenza è che la coppia è pressoché costante: $C = \text{cost}$.

Al crescere di Ω cresce anche V_{alim} , finché per $\Omega = \Omega_b$ si raggiunge V_n . Per $\Omega > \Omega_b$, si pone $V_{\text{alim}} = V_n = \text{cost}$ (V_{alim} non può aumentare ulteriormente, perché ha raggiunto il valore nominale, che di solito è il massimo ammissibile per il convertitore e per l'isolamento della macchina). Inoltre si fa in modo che la frequenza sia proporzionale alla velocità. Si dimostra che la conseguenza è che la coppia è inversamente proporzionale alla velocità, per cui la potenza è costante: $C \propto 1/\Omega \Rightarrow P = C\Omega = \text{cost}$.



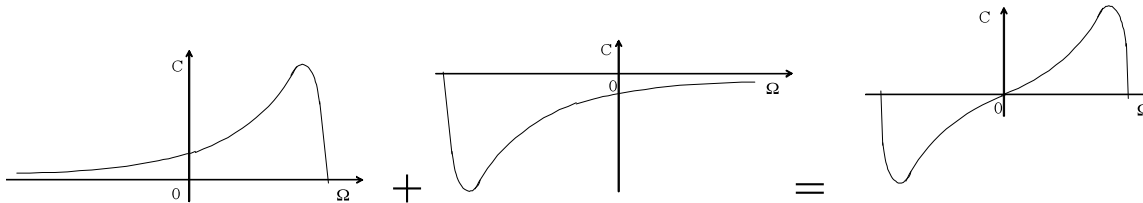
ESEMPIO DI SISTEMA DI REGOLAZIONE

Per realizzare un sistema di regolazione, oltre al convertitore CA/CA è necessario un sistema di misura di C ed Ω , ed un sistema di controllo che, in base ai valori attuali e di riferimento di C ed Ω , decida come pilotare il convertitore, per ottenere V ed f necessarie per avere C ed Ω volute.



MOTORI ASINCRONI MONOFASI

Un motore asincrono (MA) monofase puro è un motore che ha la stessa struttura meccanica di un MA trifase, ha rotore a gabbia, ed ha 1 solo avvolgimento di statore. Si è visto che un avvolgimento monofase genera un campo pulsante, che un campo pulsante è equivalente a due campi controrotanti, e che ad un campo rotante è associabile il circuito equivalente di un MA trifase. Ne segue che ad un avvolgimento monofase sono associabili i circuiti equivalenti di 2 MA trifasi controrotanti. Quindi, anche la caratteristica meccanica di un MA monofase puro è quella che si ottiene sovrapponendo le caratteristiche meccaniche di 2 MA trifasi controrotanti. Ma, se cambia il senso di rotazione, cambia anche il verso della coppia \Rightarrow le caratteristiche meccaniche dei due motori sono simmetriche rispetto all'origine, e la caratteristica risultante passa per l'origine.

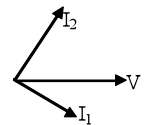


Dato che la caratteristica passa per l'origine, la coppia di spunto è nulla, per cui un MA monofase puro non riesce ad avviarsi. Tuttavia, se viene avviato in un verso, riesce poi a portarsi a regime, in quel verso di rotazione.

Un motore che non si avvia è però poco utile. Per ovviare, si cerca di realizzare un MA bifase.

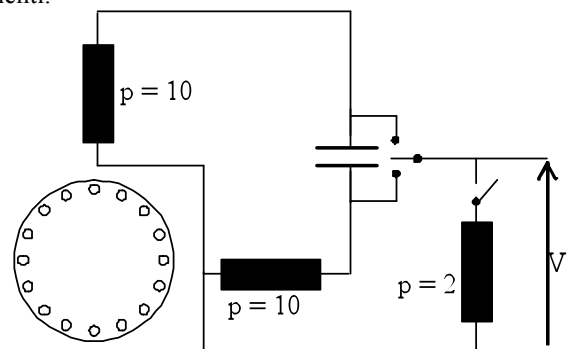
Un MA bifase puro è un motore che ha la stessa struttura meccanica di un MA trifase, ha rotore a gabbia, ed ha 2 avvolgimenti di statore, sfasati di 90° meccanici, e percorsi da due correnti uguali in modulo e sfasate di 90° elettrici. Per quanto riguarda i campi magnetici, la situazione che si viene a creare è simile a quella di un MA trifase: ogni avvolgimento genera 2 campi controrotanti, per cui si hanno 4 campi rotanti, ma 2 campi sono costantemente in opposizione di fase e si elidono, mentre 2 sono in fase e si sommano; il risultato è un unico campo rotante, per cui anche la caratteristica meccanica è come quella di un MA trifase. Partendo da una alimentazione monofase è in linea teorica possibile ottenere due correnti uguali in modulo e sfasate di 90° elettrici: è sufficiente avere due impedenze \bar{Z}_1 e \bar{Z}_2 tali che $\bar{Z}_2 = -j\bar{Z}_1$, in modo che le due correnti sono in quadratura:

$$I_2 = \frac{V}{Z_2} = \frac{V}{-jZ_1} = j \frac{V}{Z_1} = jI_1.$$



La condizione $\bar{Z}_2 = -j\bar{Z}_1$ non è però ottenibile sempre (perché le impedenze variano con lo scorrimento, e quindi con la velocità); inoltre, la corrente dipende anche dalle fem indotte, non solo dalle impedenze; il risultato è che non si riesce ad avere due correnti uguali in quadratura. Ne segue che i MA monofasi sono dei MA bifasi approssimati, nel senso che le correnti sono in generale diverse in modulo, e non in quadratura. Lo sfasamento fra le due correnti è ottenuto nella pratica ponendo un condensatore in serie ad uno dei due avvolgimenti.

Es.: motori di una lavatrici di qualche anno fa. E' un MA bifase con condensatore. C'è poi un deviatore che consente di collegare alternativamente il condensatore in serie all'uno o all'altro dei due avvolgimenti, così le impedenze degli avvolgimenti si scambiano \Rightarrow le correnti del diagramma vettoriale si scambiano di posizione \Rightarrow si inverte il senso di rotazione del rotore (questo per avere un lavaggio migliore). I due avvolgimenti hanno un numero di poli p elevato, così la velocità di rotazione N è bassa ($N = 120 f / p$). Per ridurre ulteriormente la velocità di rotazione del cestello, di solito vi è anche un accoppiamento meccanico a cinghia e puleggia, con raggi diversi delle due pulegge. Vi è poi un 3° avvolgimento con p basso (di solito $p = 2$), che serve per la centrifuga. Questo avvolgimento è singolo, perché non richiede l'avviamento (il rotore è già in rotazione grazie agli altri due avvolgimenti).



Es.: supponiamo che gli avvolgimenti per il lavaggio abbiano $p_{\text{lav}} = 10$ poli, l'avvolgimento per la centrifuga abbia $p_{\text{cent}} = 2$ poli, e che il rapporto tra i raggi delle pulegge sia $\tau = 10$. Allora, le velocità di rotazione del rotore durante il lavaggio e la centrifuga sono $N_{\text{lav}} = 600$ giri/min, $N_{\text{cent}} = 3000$ giri/min, mentre le velocità del cestello sono $N_{\text{lav_cest}} = 60$ giri/min = 1 giro/s, $N_{\text{cent_cest}} = 300$ giri/min = 5 giri/s.