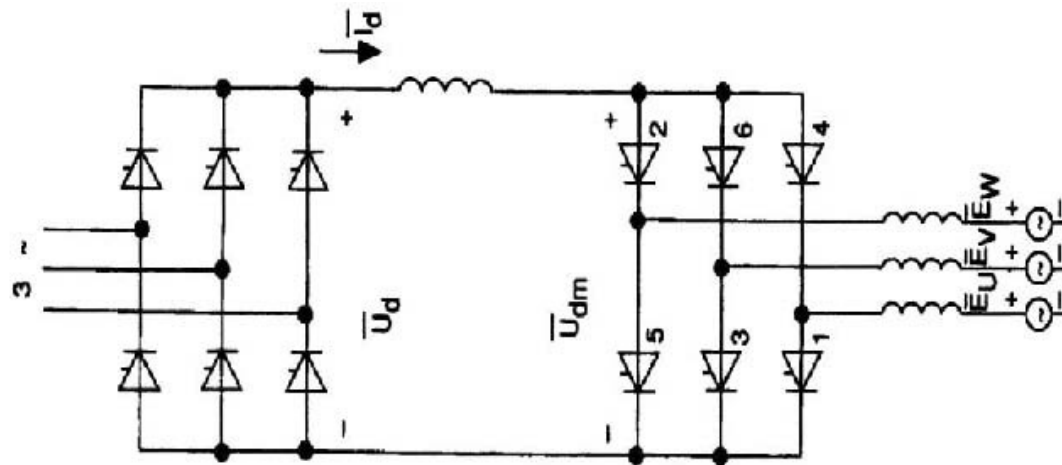


SINCROCONVERTITORI

Prof. Simone CASTELLAN

- [1] B.Wu, *High-power converters and AC drives*, IEEE Press – Wiley Interscience, 2006.
- [2] B.K. Bose, *Modern power electronics and AC drives*, Prentice – Hall, 2002.

INTRODUZIONE



Il sistema è composto da due convertitori trifase a tiristori e da un circuito in corrente continua composto da una reattanza che disaccoppia i due convertitori ed assicura l'indipendenza della frequenza di alimentazione del motore (variabile) da quella della rete (fissa).

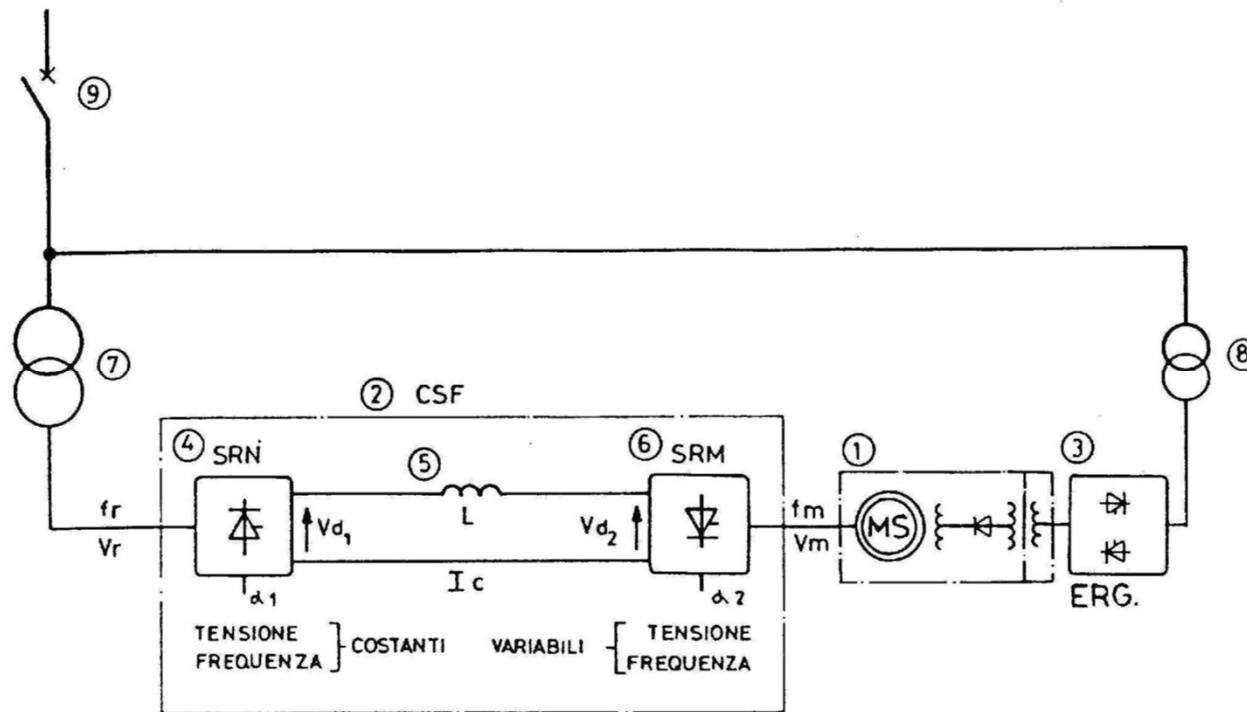
In realtà il disaccoppiamento perfetto fra i due convertitori non è possibile perché richiederebbe una reattanza di valore infinito. Conseguentemente la I_d presenta una certa ondulazione (contenente frequenze derivanti dal funzionamento del convertitore lato rete e soprattutto di quello lato macchina) che determina un maggior disturbo armonico immesso in rete dall'azionamento ed inoltre va ad aumentare le pulsazioni di coppia del motore.

Il sistema può funzionare nei quattro quadranti con senso di marcia e coppia in entrambe le direzioni. Quando la macchina funziona come motore, il convertitore lato rete opera da raddrizzatore mentre quello lato macchina da invertitore. Quando la macchina funziona, durante la frenatura, come generatore, la funzione dei due convertitori si inverte. La tensione del circuito in continua si inverte di polarità mentre la corrente no, e il flusso di energia va dalla macchina alla rete. Il senso di marcia può essere invertito cambiando l'ordine di conduzione delle fasi mediante la variazione della sequenza degli impulsi.

AZIONAMENTI CON SINCRONVERTITORE

Gli azionamenti con sincroconvertitore ricoprono una gamma di potenze che va dai 700kW circa fino ai 40MW, e una gamma di velocità che va dai 3600 giri/min fino ai 6000 giri/min e oltre.

Per merito delle ridotte perdite del convertitore e della semplicità, che rende il sistema meno costoso, nel campo delle applicazioni di elevata potenza questo tipo di azionamenti è particolarmente concorrenziale rispetto ad altre tipologie di azionamenti.



- 1 = motore sincrono
- 2 = sincroconvertitore
- 3 = eccitatrice
- 4 = convertitore lato rete
- 5 = reattanza di limitazione
- 6 = convertitore lato motore
- 7 = trasformatore di alimentazione
- 8 = trasformatore di alimentazione dell'eccitazione
- 9 = interruttore di linea

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Nel convertitore lato rete (SRN) è la tensione di rete che provvede a far commutare i tiristori, mentre nel convertitore lato macchina (SRM) è la f.e.m. della macchina che fa commutare i tiristori. Risulta quindi evidente che la potenza reattiva per la commutazione e regolazione viene fornita dalla rete per il convertitore SRN, e dalla macchina per il convertitore SRM. Pertanto la macchina sincrona deve essere in sovraeccitazione. Negli azionamenti con sincroconvertitore non è possibile utilizzare le macchine asincrone in quanto non sono in grado di fornire la potenza reattiva necessaria al convertitore SRM, ma anzi richiedono esse stesse l'assorbimento di potenza reattiva.

Il sincroconvertitore, per il fatto che le f.e.m. della macchina provvedono alla commutazione dei tiristori del ponte lato motore, è spesso chiamato **LCI** (= *load commutated inverter*) ed il motore si dice funzionante in modalità “*autocontrollata*” o “*autosincrona*”.

Durante il funzionamento come motore il convertitore SRN funziona da raddrizzatore mentre quello SRM funziona da invertitore. Il convertitore SRN lavora con angoli di accensione dei tiristori compresi tra 0 e 90 gradi, mentre il convertitore SRM lavora con angoli compresi tra 90 e 180 gradi. In realtà gli angoli di accensione non possono assumere valori pari a 0 o 180 gradi, a causa rispettivamente dell'angolo minimo di accensione (valore al di sotto del quale il tiristore non può accendersi perché risulta polarizzato inversamente) e dell'angolo massimo di spegnimento (valore al di sopra del quale il tiristore non si spegne perché rimane polarizzato direttamente; in questo caso il valore massimo che può assumere l'angolo di accensione è $180 - \theta_u$, dove θ_u rappresenta l'angolo di sovrapposizione).

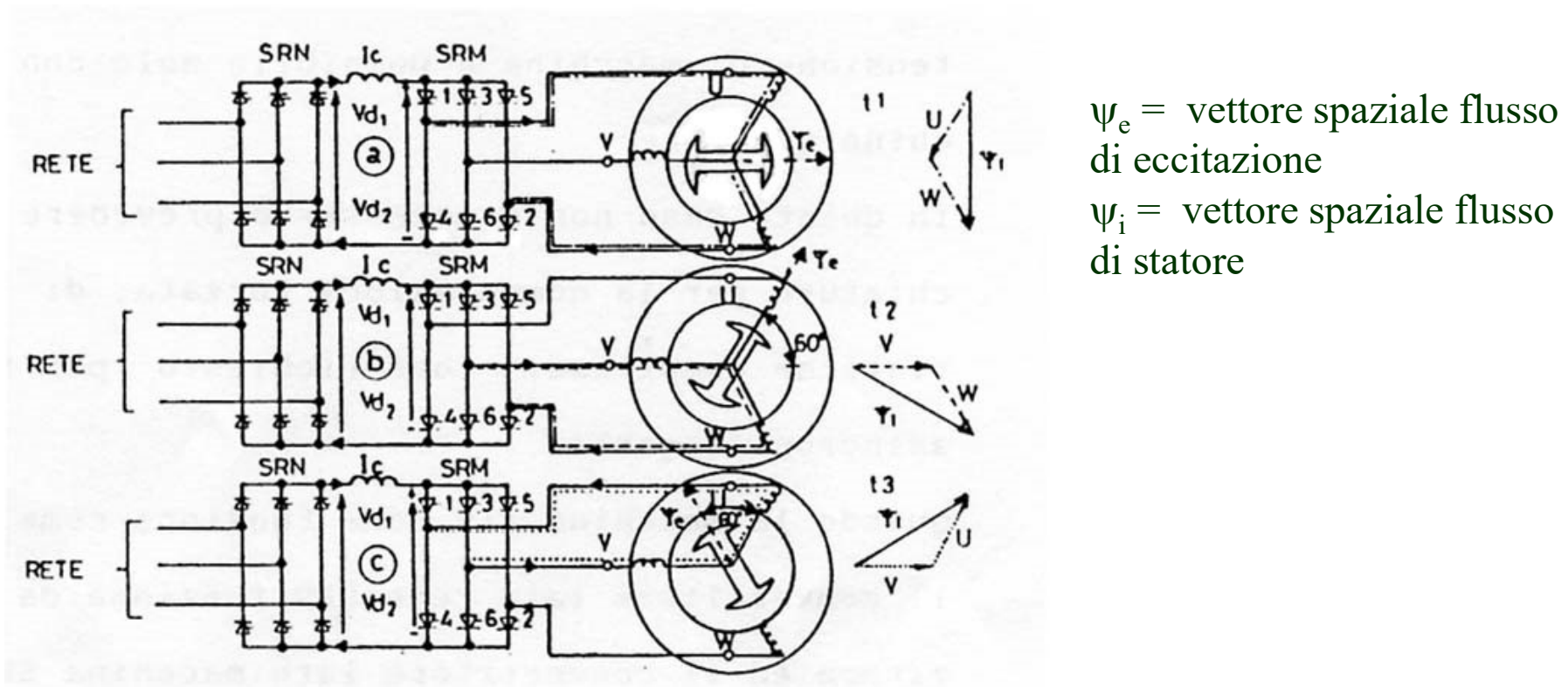
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La macchina sincrona può funzionare anche da generatore (durante la fase di frenatura): in questo caso il convertitore SRM funziona da raddrizzatore mentre il convertitore SRN da invertitore. Questo può avvenire variando l'angolo di accensione dei tiristori del convertitore lato macchina in modo da farlo funzionare da raddrizzatore, cioè con angoli di accensione dei tiristori compresi tra 0 e 90 gradi. Di conseguenza il controllo di corrente porta il convertitore lato rete a funzionare da invertitore, cioè con angoli compresi tra 90 e 180 gradi. Le tensioni V_{d1} e V_{d2} cambiano di segno.

Il valore medio della tensione lato continua del convertitore SRN (V_{d1}) può venire regolato variando l'angolo di accensione dei tiristori del convertitore SRN. Il valore medio della tensione lato continua del convertitore SRM (V_{d2}) è proporzionale alla velocità di rotazione e alla corrente di eccitazione del motore e differisce da V_{d1} solo per una piccola caduta sulla resistenza dell'induttore del lato in continua. Si comprende pertanto che variando l'angolo di accensione dei tiristori del convertitore SRN, cioè variando V_{d1} , si varia la corrente nel lato in continua e quindi la corrente assorbita dal motore. Come conseguenza varia la coppia e quindi il motore accelera o decelera fino a raggiungere una nuova condizione di equilibrio.

Il fattore di potenza del carico visto della rete è circa proporzionale alla velocità (infatti la potenza reattiva assorbita dal convertitore lato rete dipende dal valore di V_{d1} , che differisce poco da V_{d2} , la quale è proporzionale alla velocità del motore).

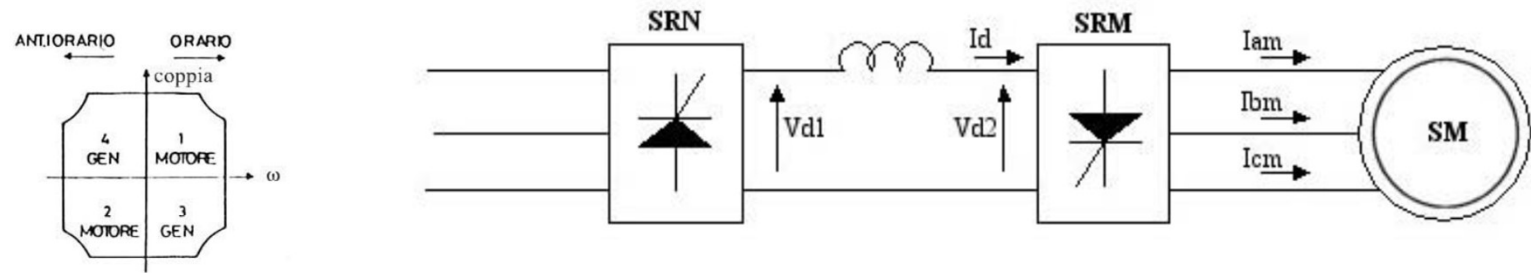
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO



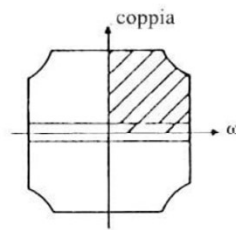
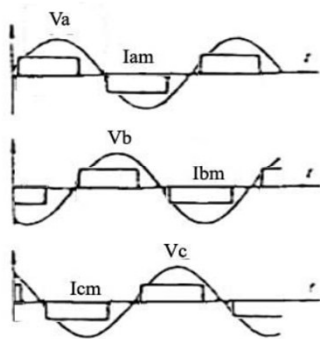
I tiristori del convertitore fanno circolare ciclicamente la corrente su due fasi dello statore, creando così un campo rotante “passo-passo” di frequenza e direzione desiderata; il rotore opportunamente eccitato segue questa rotazione.

Con un convertitore in configurazione a 6 impulsi lato macchina il vettore che rappresenta il flusso di statore può assumere 6 posizioni angolari, mentre con un convertitore in configurazione a 12 impulsi lato macchina (e quindi con un motore con due avvolgimenti di statore) il vettore del flusso di statore può assumere 12 posizioni angolari.

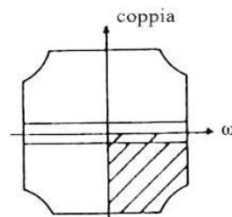
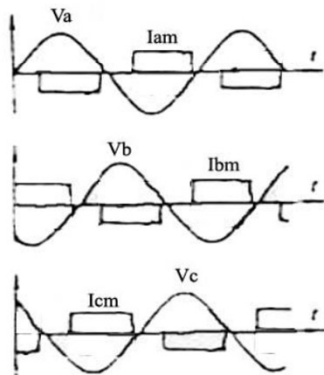
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO



Funzionamento normale



Funzionamento in frenatura



Scegliendo come convenzione per le grandezze elettriche del sincroconvertitore i versi indicati dalle frecce della figura si ottiene che il motore, durante il funzionamento normale, assorbe potenza reattiva capacitiva (quindi il sincroconvertitore eroga potenza reattiva capacitiva, cioè assorbe potenza reattiva induttiva) e la corrente di statore assorbita dal motore è in anticipo rispetto alla tensione di statore di $180-\alpha_2$ gradi.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Quando il convertitore lato motore funziona da invertitore l'angolo α_2 di ritardo di accensione dei tiristori, compreso tra 90° e 180° , viene fissato tenendo conto di due esigenze contrastanti. Da un lato si vuole che esso sia il più vicino possibile a 180° in modo da rendere massimo il $\cos\phi$ del motore e conseguentemente ridurre la corrente nel dc-link a parità di coppia elettromeccanica sviluppata; dall'altro lato si deve garantire che la commutazione dei tiristori possa verificarsi e quindi l'angolo deve essere sufficientemente in anticipo da verificare la condizione: $\alpha_2 + \theta_u < 180^\circ$ (θ_u = angolo di sovrapposizione).

Si definisce anche l'angolo margine $\gamma = 180^\circ - \alpha_2 - \theta_u$.

Poiché il tempo di commutazione è piccolo rispetto al periodo delle correnti di statore, si può ammettere che durante la commutazione la macchina sincrona reagisca con le reattanze subtransitorie. Di solito la macchina sincrona è a poli salienti; pertanto la reattanza di commutazione L_c viene normalmente posta pari al valore medio delle reattanze subtransitorie lungo gli assi d e q .

Il valore dell'angolo di sovrapposizione è:

$$\theta_u = -\alpha_2 + \cos^{-1} \left(\cos \alpha_2 - \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{6}V} \right) \quad V = \text{valore efficace della tensione di fase di alimentazione del motore}$$

Tenendo conto che il motore viene controllato a flusso costante e quindi la tensione del motore risulta proporzionale alla velocità, si può dedurre che l'angolo di commutazione è indipendente dalla velocità del motore.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Ci sono diverse alternative con cui determinare il valore di α_2 quando la macchina funziona da motore.

Un primo metodo consiste nell'imporre un angolo α_2 costante su tutto l'intervallo di velocità ed il valore viene tipicamente calcolato per avere un certo $\cos\varphi$ a pieno carico. Un problema che potrebbe verificarsi è che il valore di α_2 ottimale per il funzionamento a velocità nominale, ai bassi regimi di rotazione, dove la caduta di tensione sulla resistenza di statore non è del tutto trascurabile, può risultare eccessivo.

Fissando l'angolo α_2 si fissa la posizione relativa fra il fasore della corrente di statore e quello della tensione ai morsetti della macchina; in questo modo si previene completamente il fenomeno delle oscillazioni pendolari.

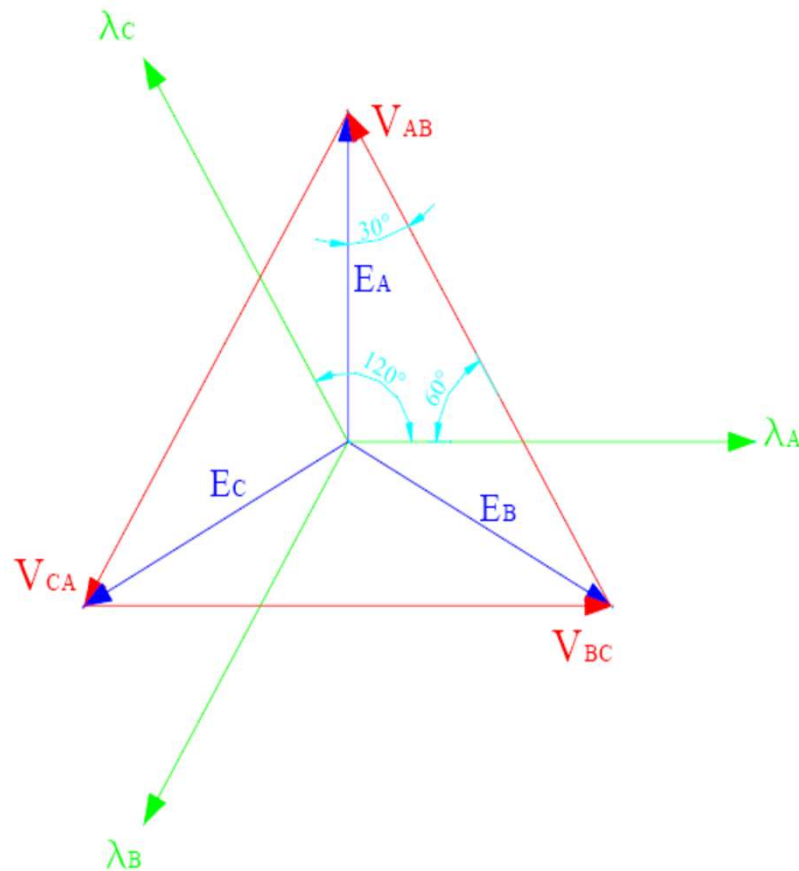
Valori tipici di α_2 sono compresi fra 135° e 150° .

Un altro metodo per determinare α_2 consiste nel controllo in catena chiusa del $\cos\varphi$ del motore. Dalla misura delle tensioni e delle correnti di fase si risale al $\cos\varphi$ a cui sta funzionando la macchina sincrona; questo valore, confrontato con il riferimento, determina la regolazione di α_2 .

Durante la frenatura dinamica, quando il convertitore lato motore funziona da raddrizzatore, deve essere impostato un angolo α_2 compreso fra 0 e 90° . Tipicamente viene scelto un valore di α_2 costante e prossimo a 0 , in modo da massimizzare la potenza frenante.

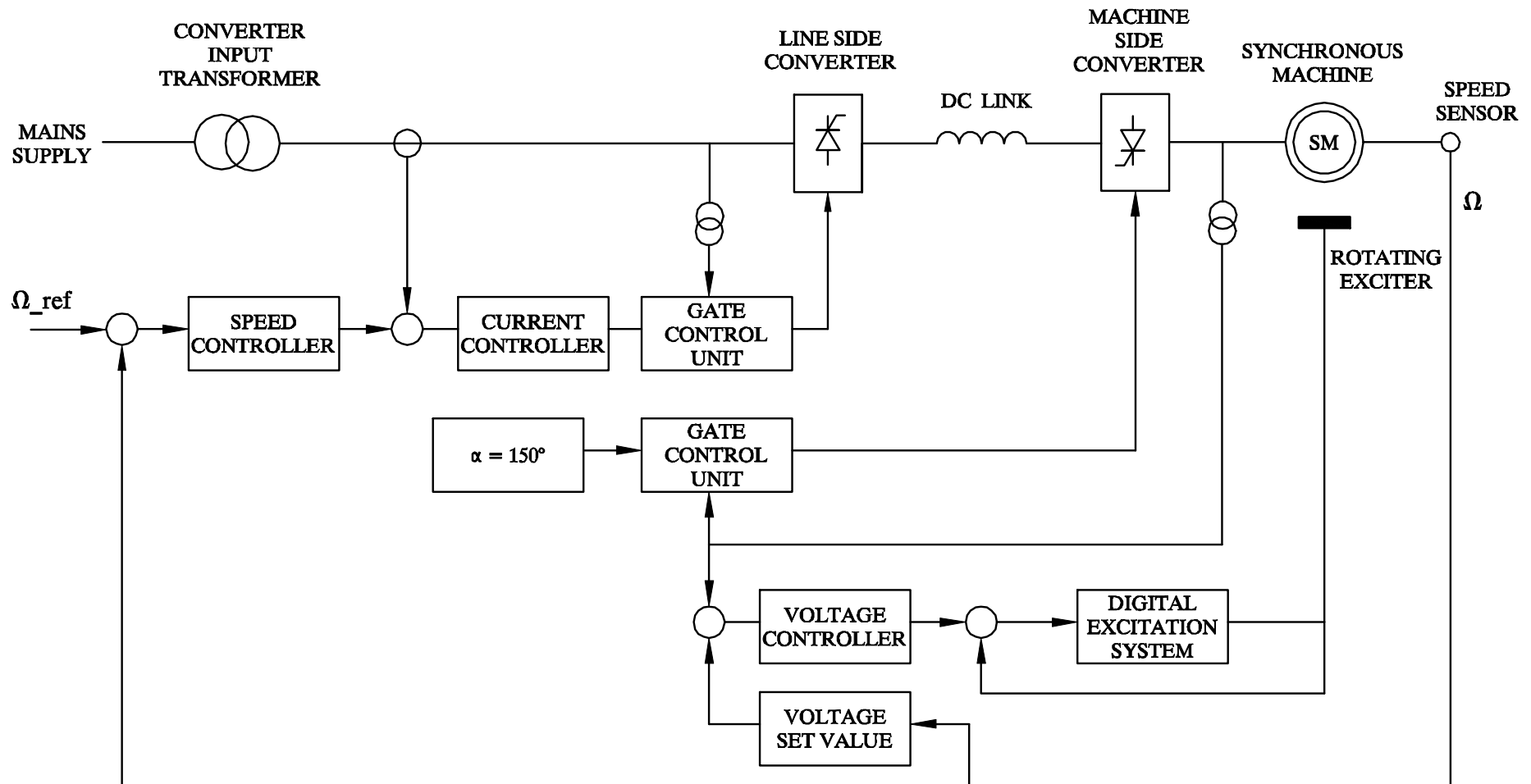
DETERMINAZIONE DEGLI IMPULSI DI ACCENSIONE DEL CONVERTITORE LATO MACCHINA

Poiché gli impulsi di accensione dei tiristori devono essere sincronizzati con le f.e.m. della macchina, le quali sono in definitiva correlate alla posizione del rotore, non è indispensabile la misura diretta della posizione del rotore per determinare l'istante degli impulsi di accensione, ma può essere impiegata una tecnologia cosiddetta "encoderless".



Le f.e.m. della macchina vengono determinate dalla misura della tensione ai morsetti. Poiché però tali tensioni sono molto distorte a causa del funzionamento del convertitore, dovrebbero venire filtrate. Il problema è che un filtro passa-basso causerebbe uno sfasamento che varia con la frequenza, e quindi con la velocità del motore. In modo migliore l'azione filtrante potrebbe essere ottenuta integrando le f.e.m., ottenendo come risultato i flussi di statorio. Tenendo conto che le tensioni concatenate della macchina (a meno della caduta sulla resistenza di statorio e dell'effetto dell'induttanza di commutazione) sono in fase con i flussi di statorio (V_{bc} con λ_a , V_{ca} con λ_b , V_{ab} con λ_c) gli impulsi di accensione dei tiristori possono essere effettivamente sincronizzati con i flussi di statorio.

SISTEMA DI CONTROLLO



SISTEMA DI CONTROLLO

Il controllo di velocità permette di variare la velocità della macchina sincrona agendo sulla coppia, cioè variando la corrente nel circuito in continua. L'anello che agisce sul convertitore lato rete infatti è formato da un regolatore di velocità che pilota un regolatore di corrente in modo da poter controllare la corrente nel circuito a corrente continua.

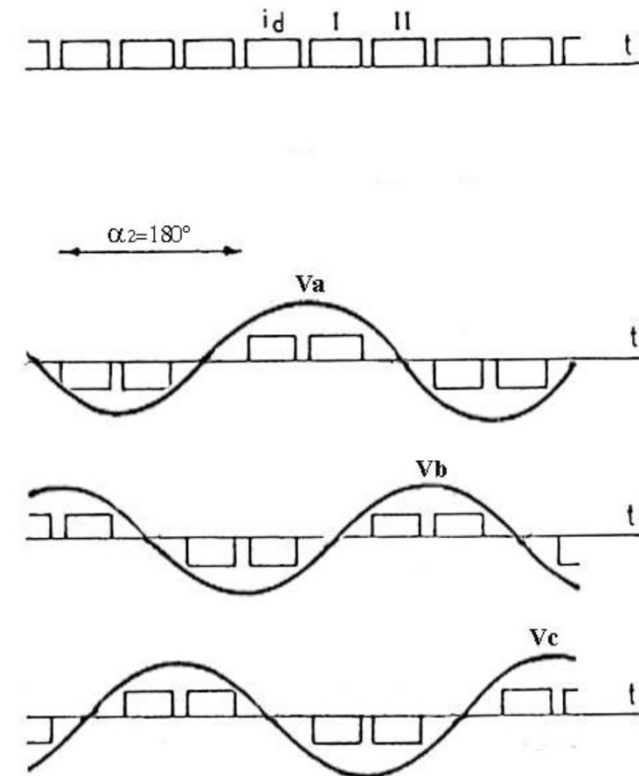
Il secondo anello di regolazione regola la tensione del motore sincrono agendo su un anello di corrente che pilota l'eccitatrice. Il segnale di velocità effettiva del motore, opportunamente elaborato, costituisce il riferimento per il regolatore di tensione. Per velocità fino a quella nominale questo sistema regola la tensione di statore in funzione della frequenza, in modo che il flusso della macchina resti costante, e l'azionamento funziona a coppia disponibile costante. Quando si raggiunge il valore nominale di tensione la velocità e la frequenza possono essere aumentate mantenendo la tensione costante al valore nominale. In questo caso il flusso della macchina diminuisce e l'azionamento funziona a potenza costante.

Se la velocità di rotazione varia, cambia di conseguenza la frequenza delle f.e.m. della macchina sincrona. Poiché il sistema di generazione degli impulsi di accensione del convertitore lato macchina è sincronizzato su queste f.e.m., lo sfasamento tra tensione e corrente sarà sempre pari al valore impostato.

FUNZIONAMENTO AD IMPULSI

Per velocità fino a circa il 10% della velocità nominale le f.e.m. della macchina sono insufficienti per garantire lo spegnimento dei tiristori del convertitore SRM. Per avviare la macchina è necessario utilizzare il cosiddetto “funzionamento ad impulsi”. In questo caso la commutazione della corrente nel convertitore lato macchina viene effettuata dal convertitore lato rete. Quando è necessario commutare la corrente nel convertitore SRM, il convertitore SRN porta a zero la corrente del circuito in continua. Dopo un intervallo di tempo sufficiente per lo spegnimento dei tiristori il convertitore SRN ripristina la tensione nel circuito in continua, e nel convertitore SRM viene fornito l’impulso di accensione ai tiristori relativi alle fasi in cui si vuol far circolare corrente.

In questa situazione la valutazione delle f.e.m. di macchina e della posizione del flusso di statore risulta inaccurata a causa dell’elevata caduta ai capi della resistenza degli avvolgimenti di statore, per cui, soprattutto nel caso di avviamenti lenti e con carichi aventi elevate inerzie, è normalmente necessario ricorrere ad un encoder di posizione montato sull’asse. La posizione del rotore, e quindi del flusso di eccitazione, è determinata dall’encoder. La coppia di tiristori da portare in conduzione è scelta in modo da far lavorare il motore mediamente alla coppia massima.



FUNZIONAMENTO AD IMPULSI

All'atto della commutazione dei tiristori del convertitore SRM sul convertitore SRN viene impostato il massimo angolo consentito nel funzionamento da inverter, in modo tale da portare la corrente nel collegamento in continua a 0 nel più breve tempo possibile. Questo intervallo di tempo non è trascurabile a causa dell'induttanza del DC-link. In applicazioni dove è richiesta un'elevata dinamica, per ridurre l'intervallo di tempo richiesto perché la corrente vada a zero si ricorre ad un tiristore collegato in parallelo all'induttanza, che viene acceso nell'istante di commutazione. In questo modo la corrente che circola nell'induttanza si richiude attraverso il tiristore, consentendo al convertitore di spegnersi più velocemente. Successivamente, quando il convertitore SRN ripristina la tensione nel DC-link il tiristore è polarizzato inversamente e quindi si spegne.

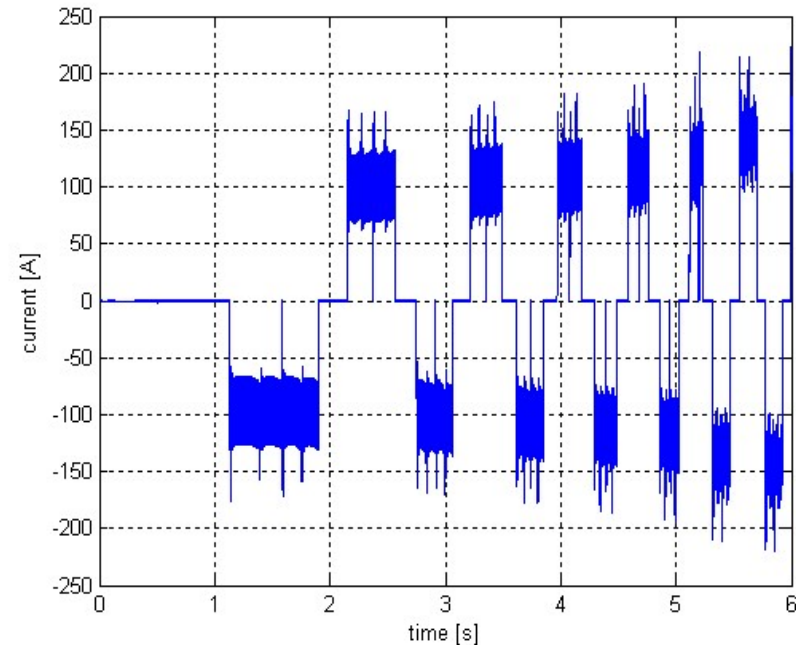
Per il convertitore SRM il funzionamento ad impulsi è a commutazione forzata e quindi il motore sincrono non deve lavorare in sovraeccitazione; normalmente viene pertanto fatto funzionare a $\cos\varphi$ unitario.

L'operazione di avviamento del motore sincrono azionato mediante sincroconvertitore si articola in diverse fasi. Innanzitutto viene determinata la posizione iniziale del rotore mediante l'encoder. Se non è presente l'encoder è necessario ricorrere a metodi indiretti, alcuni dei quali si basano ad esempio sull'anisotropia del rotore ($L_d > L_q$). A questo punto viene alimentato il circuito di eccitazione lasciando che il flusso magnetico raggiunga il valore di riferimento, dopodiché viene abilitato il regolatore di corrente che accende il convertitore SRN.

FUNZIONAMENTO AD IMPULSI

Il valore della corrente di avviamento è proporzionale alla coppia accelerante e non supera il 40-50% del valore nominale; questo sia per ridurre gli effetti delle armoniche dovute all'andamento ad impulsi della corrente nel DC-Link, sia per prevenire fenomeni di surriscaldamento dei tiristori dovuti al fatto che, a velocità molto basse, ciascuna coppia di tiristori del ponte lato motore rimane in conduzione per intervalli di tempo relativamente lunghi. Inoltre il funzionamento ad impulsi ha le stesse caratteristiche del funzionamento a commutazione forzata e quindi comporta delle perdite di commutazione, che devono essere smaltite.

Un altro motivo importante per cui durante il funzionamento ad impulsi è richiesta la limitazione della corrente assorbita dal motore è costituito dalla necessità di evitare la possibile insorgenza di risonanze meccaniche. Infatti durante il funzionamento ad impulsi si hanno delle notevoli oscillazioni di coppia provocate dallo spegnimento della corrente nel DC-Link per brevi intervalli di tempo, durante i quali si annulla, di conseguenza, anche la coppia sviluppata dal motore. Questo può portare ad oscillazioni dell'albero.



PULSAZIONI DI COPPIA

Poiché le correnti assorbite dal motore non sono sinusoidali, esse non producono una f.m.m. di ampiezza costante e ruotante a velocità costante pari a quella del rotore e quindi la coppia elettromagnetica prodotta dal motore non è costante, ma presenta delle oscillazioni.

In particolare le correnti che scorrono nell'avvolgimento trifase di statore, oltre alla fondamentale, che costituisce una terna simmetrica diretta, presentano le armoniche di ordine $h_i=6k-1$ ($k=1, 2, \dots$), che costituiscono delle terne simmetriche inverse, e di ordine $h_d=6k+1$, che costituiscono delle terne simmetriche dirette. Pertanto le armoniche di ordine h_i danno origine a dei campi magnetici che ruotano a velocità $-6k\omega$ rispetto al rotore, mentre quelle di ordine h_d danno origine a dei campi che ruotano a velocità $6k\omega$ rispetto al rotore. Ovviamente questi campi magnetici rotanti, interagendo con il campo magnetico di rotore, producono delle coppie di valore medio nullo, variabili con andamento sinusoidale di pulsazione $6k\omega$.

Alle pulsazioni di coppia prodotte dalle armoniche di ordine intero si aggiungono poi quelle prodotte dalle interarmoniche (= armoniche di ordine non intero), causate dal ripple della corrente nel DC-Link, ovvero dal non perfetto disaccoppiamento fra la frequenza di rete e la frequenza delle tensioni di alimentazione del motore.

Sull'ampiezza delle interarmoniche ha un ruolo fondamentale l'induttanza del DC-Link: più elevato è il suo valore più le interarmoniche sono ridotte. Ciò nonostante nella sua realizzazione ci sono problemi di spazio e di costo che ne limitano il valore. L'ampiezza delle interarmoniche si riduce anche utilizzando lato rete ponti raddrizzatori collegati in serie. Questa soluzione, impiegata per aumentare il numero di impulsi del convertitore lato rete al fine di ridurre il disturbo armonico causato dall'azionamento sulla tensione di rete, è in grado quindi di fornire dei vantaggi anche sul funzionamento del motore.

PULSAZIONI DI COPPIA

Per ridurre l'effetto delle armoniche di ordine intero sulla coppia sviluppata dal motore, vengono utilizzati motori con due avvolgimenti trifase di statore, ciascuno alimentato da un convertitore a 6 impulsi.

I due avvolgimenti sono disposti con uno sfasamento spaziale di 30° . Se ora si considera un sistema di riferimento solidale con il rotore (ad es. un sistema d-q ruotante a velocità ω) si può facilmente constatare che la corrente nei due avvolgimenti trifase di statore contiene armoniche di pulsazione $6k\omega$ ($k=1, 2, \dots$) e che nei due avvolgimenti le armoniche con k dispari sono in opposizione di fase, mentre quelle con k pari sono in fase. Questo significa che il contributo al campo magnetico rotante, e quindi alle armoniche di coppia, delle armoniche di corrente con k dispari è nullo.

Pertanto, mentre nel motore con singolo avvolgimento trifase di statore alimentato da un convertitore a 6 impulsi sono presenti armoniche di coppia di pulsazione $6k\omega$ ($\omega =$ pulsazione della tensione di alimentazione del motore, $k=1, 2, \dots$), nel motore con doppio avvolgimento trifase di statore sono presenti armoniche di coppia di pulsazione $12k\omega$ ($k=1, 2, \dots$).

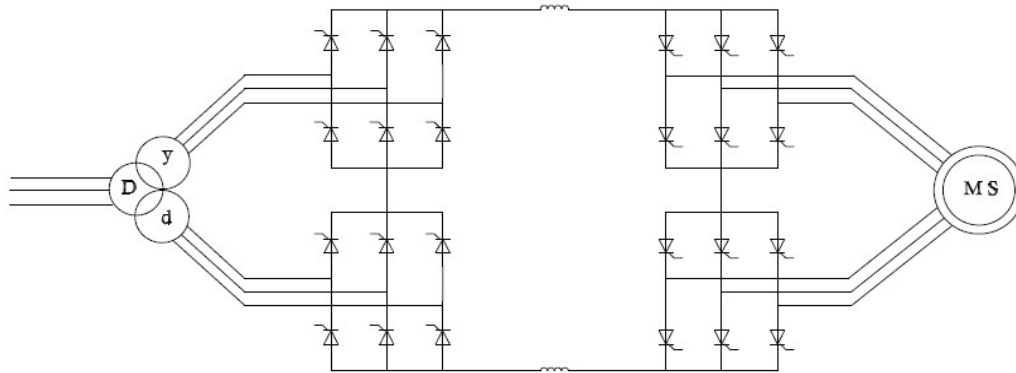
Il ragionamento si può estendere ad un motore con quattro avvolgimenti trifase di statore; nel qual caso le armoniche di coppia presenti sarebbero di pulsazione $24k\omega$.

Eliminare le armoniche di coppia a frequenza più bassa porta il doppio beneficio di diminuire l'ondulazione di coppia (in quanto l'ampiezza delle armoniche di corrente, e di conseguenza delle armoniche di coppia, diminuisce all'aumentare della frequenza) e di aumentarne la frequenza, e quindi renderla più facilmente filtrabile per merito dell'inerzia delle parti rotanti del sistema.

CONFIGURAZIONI A 12 IMPULSI

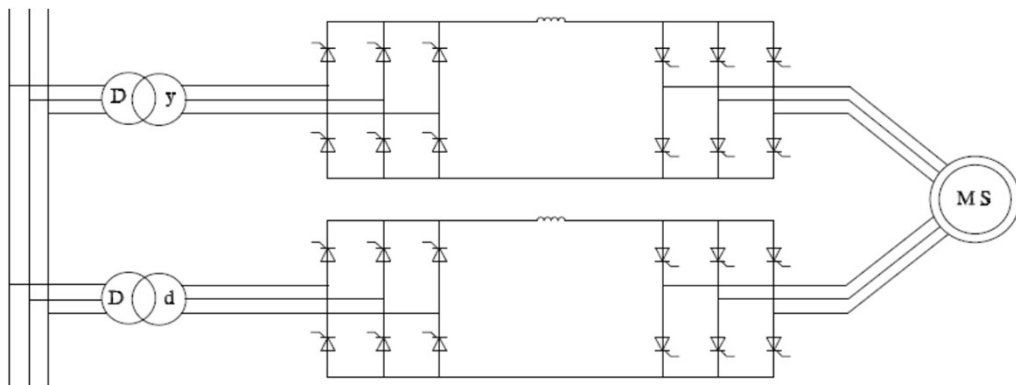
Sono possibili due tipi di configurazioni circuitali a 12 impulsi sia lato rete che lato motore:

a) sia i convertitori lato rete che quelli lato motore sono collegati in serie ed è previsto un unico sistema di controllo, sia lato rete che lato motore, in modo da avere una completa



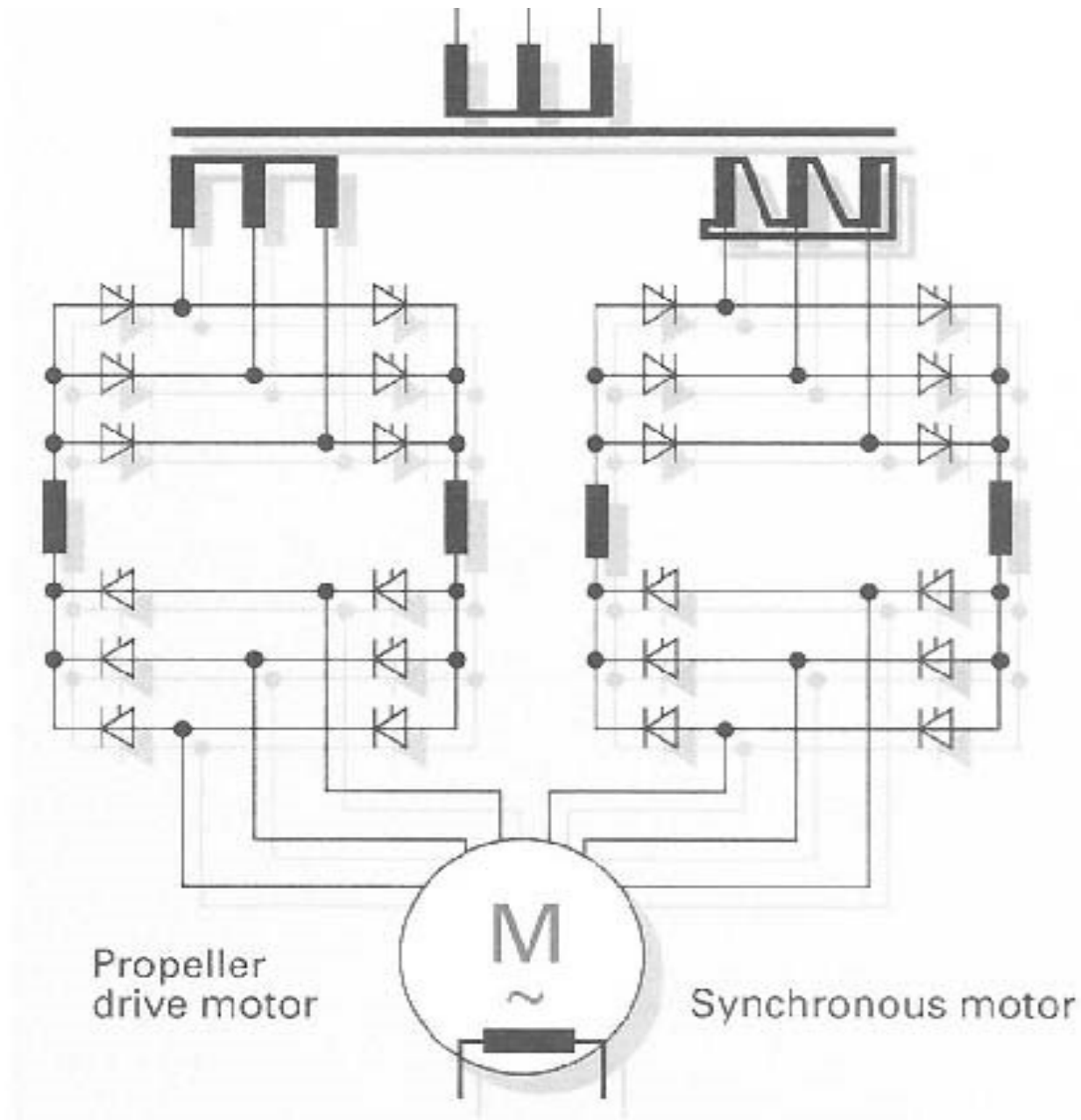
reiezione della 5° e 7° armonica della corrente assorbita in linea dal sincroconvertitore e un coordinamento ottimale delle commutazioni delle correnti di fase sulle due terne di avvolgimenti della macchina sincrona.

b) il motore è alimentato da due sincroconvertitori che operano in modo autonomo. In questo caso viene data maggiore importanza all'affidabilità complessiva del sistema di conversione, in quanto, anche a seguito di un guasto in uno dei due sincroconvertitori, il motore può continuare ad essere alimentato dalla metà sana dell'azionamento funzionando al 50% della



potenza nominale. Poiché i due sincroconvertitori lavorano in modo indipendente l'uno dall'altro, il ripple della corrente nel DC-Link non viene ridotto rispetto ad una configurazione a 6 impulsi lato rete; inoltre, la reazione dodecafase in rete del sistema complessivo può non essere completa.

SINCROCONVERTITORE A 12 IMPULSI LATO RETE



SINCROCONVERTITORE A 24 IMPULSI LATO RETE

