



# Le macchine a riluttanza variabile e il motore a magneti permanenti alimentato da rete

Lucia FROSINI

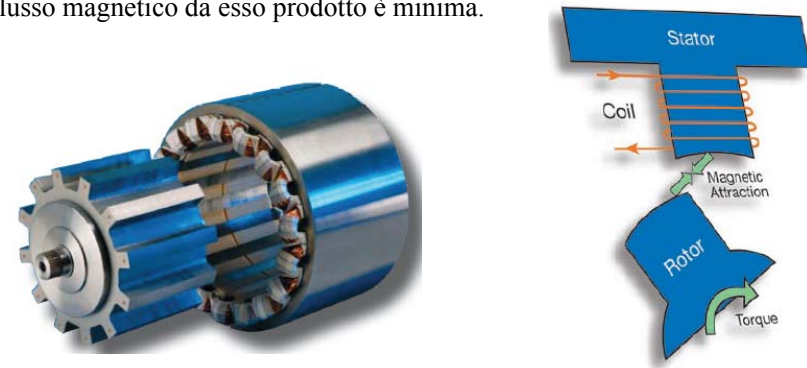
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

## Il motore a riluttanza variabile

Il principio di funzionamento del motore a riluttanza variabile (*variable reluctance motor*) non si basa sulle leggi che governano il funzionamento della maggior parte delle altre macchine elettriche, ma sul principio per cui un'armatura mobile di un sistema elettromagnetico tende a muoversi verso la posizione in cui l'induttanza dell'avvolgimento in cui scorre la corrente è massima, ossia la riluttanza del percorso del flusso magnetico da esso prodotto è minima.



2

L. Frosini

## Il motore a riluttanza variabile

Esistono diversi tipi di motori basati su questo principio, ma quelli di maggiore interesse a livello industriale sono i seguenti:

- 1) motore a **riluttanza commutata** (*switched reluctance motor*, **SRM**);
- 2) motore **sincrono a riluttanza** (*synchronous reluctance motor*, **SynRM**);
- 3) motore **sincrono a riluttanza con magneti permanenti** (*permanent magnet assisted synchronous reluctance motor*, **PMSynRM**).

Caratteristiche comuni dei motori a riluttanza variabile sono:

- ✓ solo lo statore è dotato di avvolgimenti, mentre il rotore non lo è;
- ✓ almeno il rotore è anisotropo.

Tuttavia, la forma costruttiva sia di statore sia di rotore si differenzia a seconda del tipo di motore.

3

L. Frosini

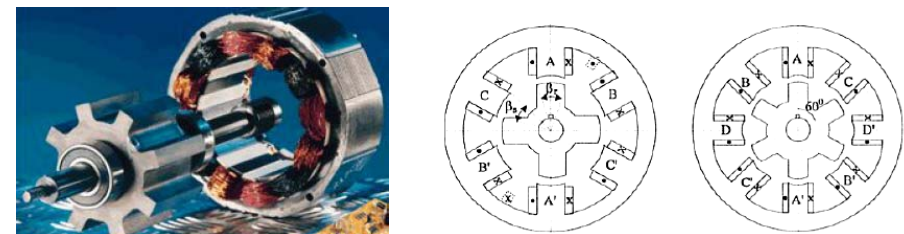
## Motore a riluttanza commutata (SRM)

Il motore a **riluttanza commutata (SRM)** è, in linea di principio, una delle più semplici macchine elettriche: esso presenta una doppia anisotropia, ossia poli salienti, sia sul rotore che sullo statore.

Gli avvolgimenti di statore sono di tipo concentrato, avvolti su ciascun polo.

Lo statore ed il rotore sono costituiti da pacchi di lamierini che presentano un numero di poli salienti diverso sulla loro periferia affacciata al traferro.

Le configurazioni più comuni sono quella 6/4 (6 poli statorici e 4 poli rotorici) e quella 8/6 (8 poli statorici e 6 poli rotorici).



4

## Motore a riluttanza commutata (SRM)

Nel rotore non sono presenti né avvolgimenti né magneti permanenti.

Su ogni polo statorico vi è una bobina.

Le bobine disposte su poli diametralmente opposti sono connesse in serie e formano una fase e, quando sono percorse da corrente continua, creano polarità magnetiche opposte.

Pertanto, alimentando una fase statorica, si genera una coppia che fa muovere il rotore sino a portarlo nella posizione di minima riluttanza.

Con un'adeguata alimentazione sequenziale delle bobine, è possibile produrre una coppia regolabile e quindi far ruotare il motore alla velocità desiderata.

Tali motori richiedono quindi un adeguato **convertitore per commutare la corrente** fra le varie fasi statoriche e un  **sensore di posizione** per individuare gli istanti più idonei per effettuare tali commutazioni.

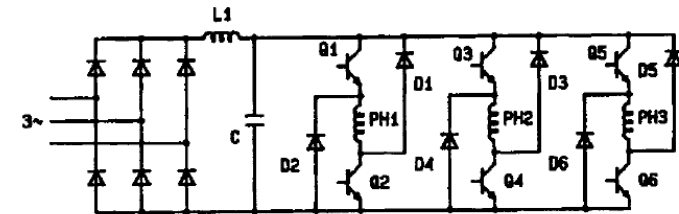
5

## Motore a riluttanza commutata (SRM)

Il tipo di convertitore più comunemente utilizzato è l'inverter asimmetrico, che è costituito da tante gambe, in ognuna delle quali sono presenti due transistori e due diodi, quante sono le fasi del motore (ad es. 3 nello schema seguente).

Se si portano nello stato di conduzione entrambi i transistori di una gamba del convertitore, nella relativa fase la corrente aumenta rapidamente.

Se poi si porta nello stato di interdizione uno dei due transistori della gamba, la corrente continua a circolare nella fase, passando attraverso l'altro transistore e uno dei due diodi di libera circolazione, e diminuisce lentamente di entità.



6

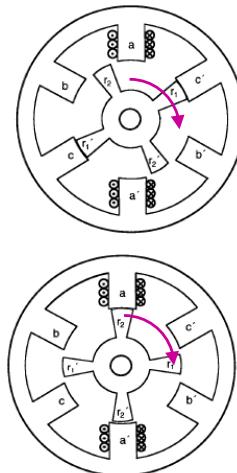
## Motore a riluttanza commutata (SRM)

Se invece si portano nello stato di interdizione entrambi i transistori della gamba, la corrente continua a circolare nella fase, passando attraverso i due diodi di libera circolazione, e diminuisce rapidamente di entità.

Nella prima figura, i poli di rotore  $r_1$  e  $r'_1$  di un SRM trifase 6/4 sono allineati con i poli di statore c e c'.

Se si invia corrente nella fase a, i poli rotorici  $r_2$  e  $r'_2$  vengono attratti dai poli statorici a e a'.

Nella seconda figura, è stata raggiunta la posizione di allineamento tra queste coppie di poli: a partire da questa condizione, se si disalimenta la fase a e si alimenta la fase b, i poli  $r_1$  e  $r'_1$  vengono attratti dai poli statorici b e b' in senso orario e così di seguito.



7

## Motore a riluttanza commutata (SRM)

Per far compiere al rotore un giro completo, le correnti in ogni fase dovranno essere commutate tante volte quanti sono i poli di rotorici.

Per invertire il senso di rotazione basta alimentare le fasi in ordine inverso.

Sebbene il primo prototipo di motore a riluttanza commutata SRM risalga alla metà dell'800, tale motore fu presto abbandonato a causa dei notevoli problemi connessi alla complessità del controllo, all'elevata ondulazione di coppia e agli alti livelli di rumore acustico.

Solo recentemente, grazie agli sviluppi dell'elettronica industriale e alla possibilità di implementare tecniche di controllo più sofisticate, si è determinato un nuovo e crescente interesse nei confronti dei motori SRM, in relazione ai loro molteplici vantaggi rispetto alle altre tipologie di motori.

Il loro utilizzo si sta estendendo a svariati prodotti destinati al grande consumo, quali: automobili, lavatrici, ventilatori, aspirapolvere, pompe, ecc.

8

## Motore a riluttanza commutata (SRM)

I vantaggi che il motore SRM presenta sono:

- ✓ semplicità costruttiva,
- ✓ robustezza,
- ✓ affidabilità,
- ✓ basso costo,
- ✓ alto rendimento,
- ✓ facile asportazione del calore,
- ✓ basso momento di inerzia.

Gli svantaggi principali sono dati dal ripple di coppia e dal rumore acustico, che possono essere ridotti con opportuni metodi di controllo.



Wound Stator



Rotor

9

## Motore a riluttanza commutata (SRM)

Riassumendo ...

Gli avvolgimenti che si trovano diametralmente su poli opposti sono eccitati simultaneamente: a seconda di quale avvolgimento di fase viene alimentato, il rotore si muove affinché l'induttanza di tale avvolgimento sia massima (a seconda della sequenza di alimentazione delle fasi, il rotore può muoversi in verso orario o antiorario).

Per permettere questo movimento, è necessario che il numero di poli di statore e di rotore sia diverso. Generalmente questa differenza deve essere pari a due: si possono avere motori trifase con 6 poli di statore e 4 (o 8) poli di rotore, oppure motori a 4 fasi (più frequentemente utilizzati) con 8 poli di statore e 6 (o 10) poli di rotore.

Al fine di mantenere la rotazione, è necessario disporre di un sistema elettronico di controllo che alimenta e disalimenta in sequenza gli avvolgimenti di poli di statore successivi.

10

## Motore a riluttanza commutata (SRM)

Questo sistema di controllo necessita di conoscere la posizione del rotore istante per istante, pertanto è generalmente presente un sensore di posizione che fornisce al sistema di controllo l'informazione dell'angolo di rotazione di rotore.

È anche possibile ottenere questa informazione tramite altri metodi, detti "sensorless".

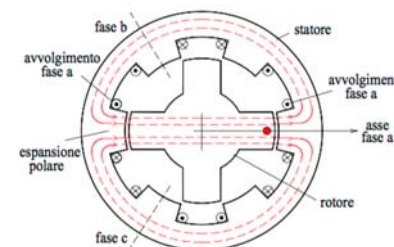
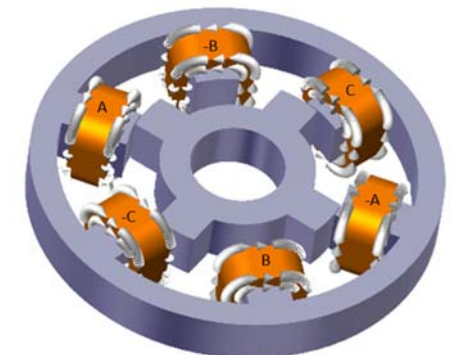
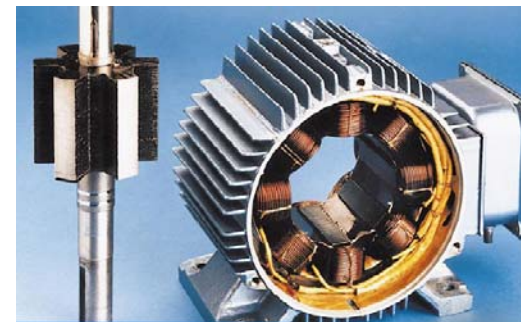
La coppia istantanea è proporzionale alla derivata dell'induttanza rispetto al tempo, pertanto risulta massima nella posizione in cui è massima la variazione dell'induttanza rispetto allo spostamento angolare.

Pertanto, la coppia varierà tra un valore massimo e uno minimo durante la rotazione del rotore, ossia non sarà costante, ma presenterà un cosiddetto "ripple" di coppia (ossia, una differenza tra valore massimo e minimo). Questo ripple di coppia può essere ridotto tramite avanzati metodi di controllo.

La coppia media è proporzionale alla corrente che scorre negli avvolgimenti di fase di statore.

11

## Motore a riluttanza commutata (SRM)



Nota: la macchina a riluttanza commutata (SRM) può essere usata anche come generatore, a patto di avere un circuito di eccitazione separato e quindi di uno stadio di eccitazione e uno di generazione.

12

## Motore sincrono a riluttanza (SynRM)

Il motore sincrono a riluttanza (SynRM) presenta una singola anisotropia, soltanto sul rotore, che però non è ottenuta tramite poli salienti, ma tramite fori opportunamente progettati per ottenere delle “barriere” interne che si oppongono al passaggio del flusso, in modo da incanalarlo verso l’asse diretto.



La costruzione del rotore è quindi tale da rendere massimo il rapporto tra induttanza lungo l’asse diretto e induttanza lungo l’asse in quadratura:  $L_d/L_q \approx 10\div 20$ ,  $L_d - L_q \gg 0$

Questo motore è noto anche come “*singly salient reluctance motor*”.

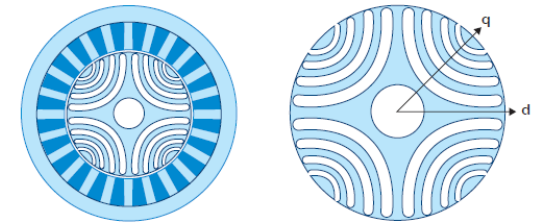
L’avvolgimento di statore è trifase, di tipo distribuito e alimentato con tensione alternata sinusoidale, analogamente a quello di un motore asincrono o brushless.

Si tratta di una macchina sincrona, perché il rotore si muove in sincronismo con il campo magnetico rotante prodotto dall’avvolgimento di statore.

13

## Motore sincrono a riluttanza (SynRM)

Anche il funzionamento di questa macchina necessita di un convertitore di potenza, in questo caso di tipo tradizionale (diversamente dalla SRM), il cui software deve però essere opportunamente adattato, rispetto a quello di un motore asincrono.



Cross-sectional illustration of a four-pole synchronous reluctance motor (left), and the definition of the magnetic d- and q-axes of its rotor (right).

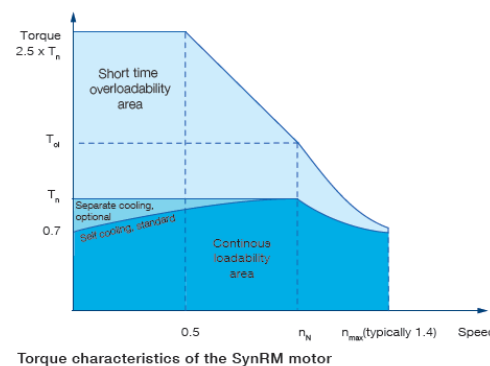


14

## Motore sincrono a riluttanza (SynRM)

I principali punti di forza della macchina SynRM sono:

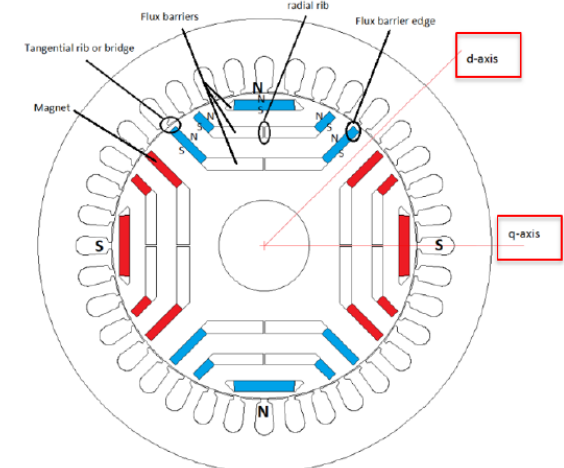
- ✓ elevati valori di rendimento (94-98% a carico nominale), anche a basso carico.
- ✓ assenza di magneti permanenti e conseguente riduzione dei costi (rispetto ai motori brushless e ai PMSynRM).
- ✓ assenza di avvolgimenti rotorici e conseguente abbassamento delle perdite e delle temperature di esercizio (rispetto ai motori asincroni e sincroni tradizionali).
- ✓ relativa semplicità costruttiva (però più complessa rispetto ai SRM).
- ✓ facile manutenzione e alta affidabilità;
- ✓ può sostituire i motori asincroni standard nel range di potenze 5,5-315 kW, velocità 1500-3000 rpm.



15

## Motore sincrono a riluttanza con magneti permanenti (PMSynRM)

Il motore sincrono a riluttanza con magneti permanenti ha una costruzione analoga a quella del SynRM e differisce da questo essenzialmente per il fatto che, in alcune barriere di flusso del rotore, sono inseriti magneti permanenti.



16

## PMSynRM

Il vantaggio dei sistemi PMSynRM nasce dalla possibilità di definire, per ogni applicazione industriale, una messa a punto ideale relazionata allo spessore delle barriere di flusso e al numero di magneti permanenti in esse inseriti.

Il flusso magnetico dipende sia dall'anisotropia di rotore sia dalla presenza dei magneti permanenti.

Il flusso magnetico generato dai magneti permanenti è tuttavia una parte minoritaria del flusso totale (a differenza dei motori brushless) e un numero limitato di magneti è sufficiente a soddisfare questa porzione.

Tale situazione, se inizialmente può sembrare limitante, rappresenta invece uno dei maggiori vantaggi del sistema: i magneti permanenti, costruiti con terre rare, rappresentano il maggiore onere economico della macchina e una loro limitazione ne alleggerisce il costo progettuale.

17

## PMSynRM

Sebbene sia scontato un incremento di coppia dovuto alla presenza dei magneti, è necessario evidenziare però che la parte di corrente magnetizzante necessaria alla creazione della porzione di flusso non generata dai magneti, rispetto ai motori brushless, sarà sempre maggiore, comportando uno scarto prestazionale tra le due macchine.

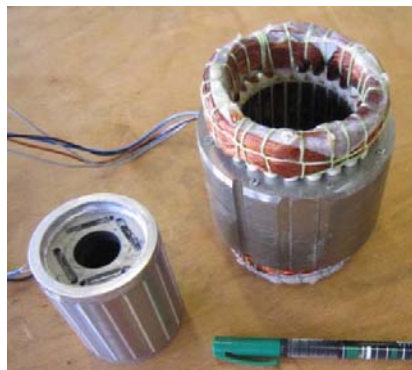
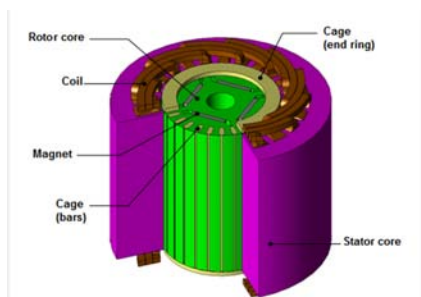
Tuttavia i magneti nei PMSynRM hanno anche il pregio di ridurre la non linearità magnetica e permettere alle linee di flusso di richiudersi completamente all'interno degli spazi presenti tra un segmento e l'altro che, durante il funzionamento, sono saturati dal flusso magnetico.

In generale, sia nei motori SynRM che nei PMSynRM, sono presenti armoniche di coppia (*torque ripple*), che possono essere ridotte significativamente con una opportuna scelta della geometria delle barriere di flusso.

18

## Motore a magneti permanenti alimentato da rete

Il motore a magneti permanenti alimentato da rete (*Line Start Permanent Magnet LSPM* o *Line Fed Permanent Magnet LFPM*) può essere considerato come un motore ibrido che coniuga le prestazioni di due diversi tipi di motore, quello asincrono e quello a magneti permanenti: il suo statore è analogo a quello di un motore asincrono o sincrono, mentre il rotore comprende sia una gabbia di scoiattolo, sia dei magneti permanenti.



19

## Motore a magneti permanenti alimentato da rete

La sua costruzione prevede due fasi di progettazione:

- 1) progetto del motore sincrono a magneti permanenti (PMSM) che corrisponda alle specifiche nominali a velocità di sincronismo;
- 2) progetto del motore asincrono a gabbia di scoiattolo che assicuri l'avviamento a pieno carico da rete.

Entrambi i progetti devono condividere gli stessi nuclei laminati di statore e rotore e i relativi avvolgimenti. La corretta interazione tra i due progetti fa sì che il motore si avvii come un motore asincrono, raggiunga la velocità sincrona e continui a funzionare a regime in sincronismo.

In questo modo, vengono combinate le caratteristiche positive dei due motori, ossia si ottiene un motore che si avvia da rete, non necessita di inverter, ma presenta un rendimento decisamente più elevato rispetto al motore asincrono tradizionale.

Così facendo, è possibile raggiungere i rendimenti IE4 (*super premium efficiency*).

20

## **Motore a magneti permanenti alimentato da rete**

Quando il motore ruota in sincronismo, nella gabbia di rotore non scorre corrente e di conseguenza non sono presenti le relative perdite per effetto Joule di rotore.

In sincronismo, il motore LSPM fornisce una coppia elevata e mantiene la velocità costante anche al variare del carico.

Il punto debole di questo motore è che la coppia diminuisce drasticamente quando il motore devia dal suo sincronismo, con conseguente perdita di passo.

Per questo è necessaria una approfondita analisi magnetica ad elementi finiti per definire preliminarmente tutti i requisiti di questa macchina.

Le potenze raggiungibili sono nell'ordine di alcuni kW.

Questo motore, così come l'asincrono tradizionale e il brushless tradizionale, può essere progettato sia nella versione trifase che monofase.