

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

*Relazione per la prova finale*

***Milestones e tendenze nello sviluppo  
delle macchine elettriche rotanti:  
due esempi di macchine a flusso assiale***

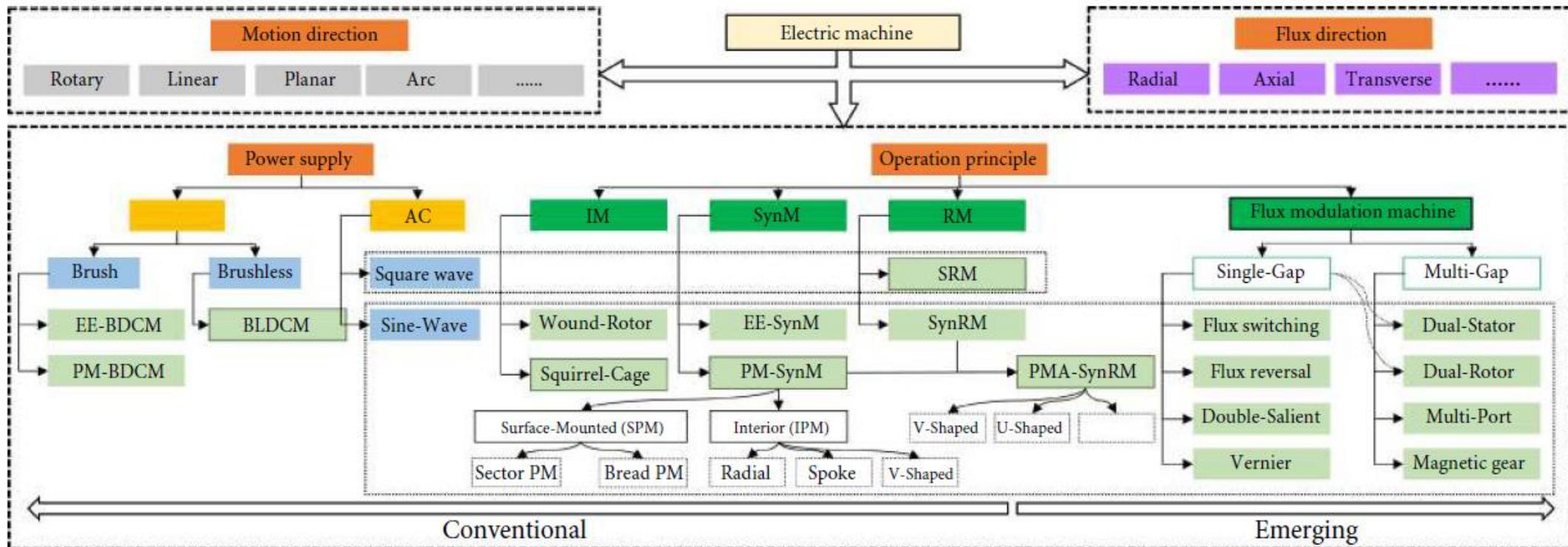
Tutor universitario: Prof. Piergiorgio Sonato

Laureando: *Dalla Valle Lorenzo*

Padova, 19/9/2023

Le macchine elettriche si possono distinguere in base a quattro diverse caratteristiche: tipologia di alimentazione, principio di funzionamento, direzione del flusso magnetico e direzione di movimento.

Tra le macchine emergenti troviamo quelle **a riluttanza assistite da magneti permanenti (PMA-SynRM)** e quelle a **flusso modulabile**. A queste due tipologie possiamo aggiungere anche le macchine elettriche a flusso assiale, in particolar modo quelle **YASA**. Le caratteristiche che prediligono queste macchine sono un' **elevata densità di coppia e potenza**.

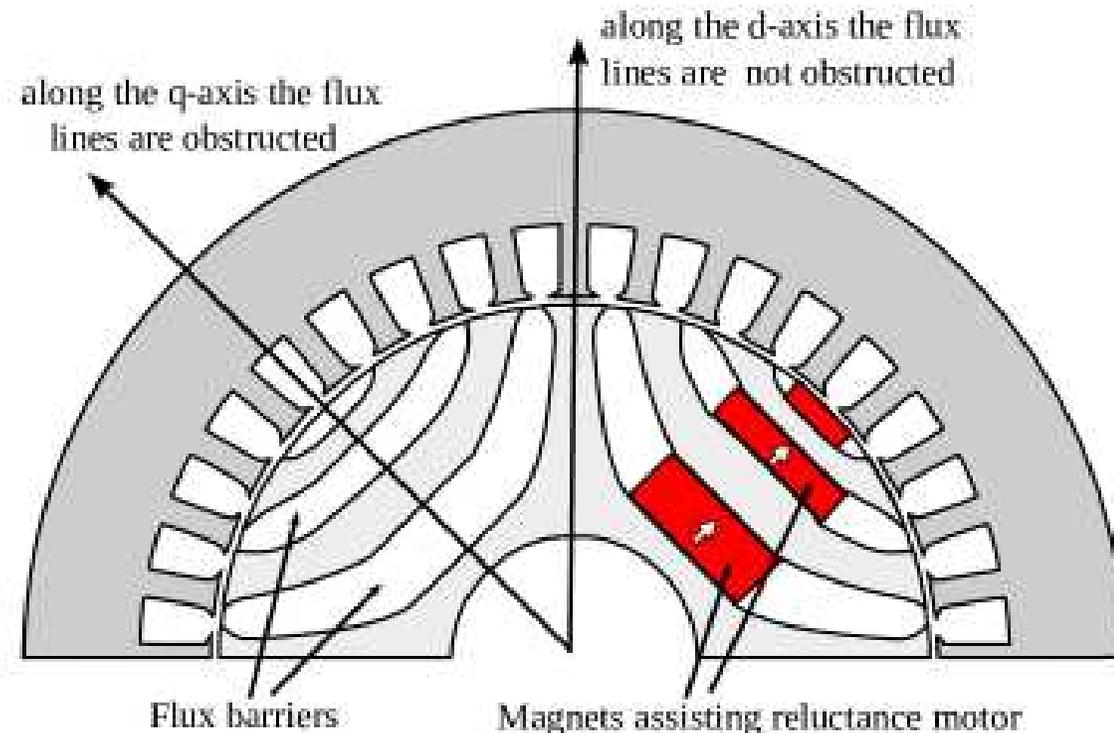


Il principio di funzionamento delle macchine a riluttanza si basa sulla tendenza della coppia rotore-statore a massimizzare l'interazione del flusso magnetico.

Le PMA-SynRM vengono ottenute posizionando nelle barriere di flusso delle macchine sincrone a riluttanza dei **magneti permanenti**. L'aggiunta permette di aumentare la differenza tra le induttanze  $L_d$  ed  $L_q$  e, dunque, il rapporto di salienza.

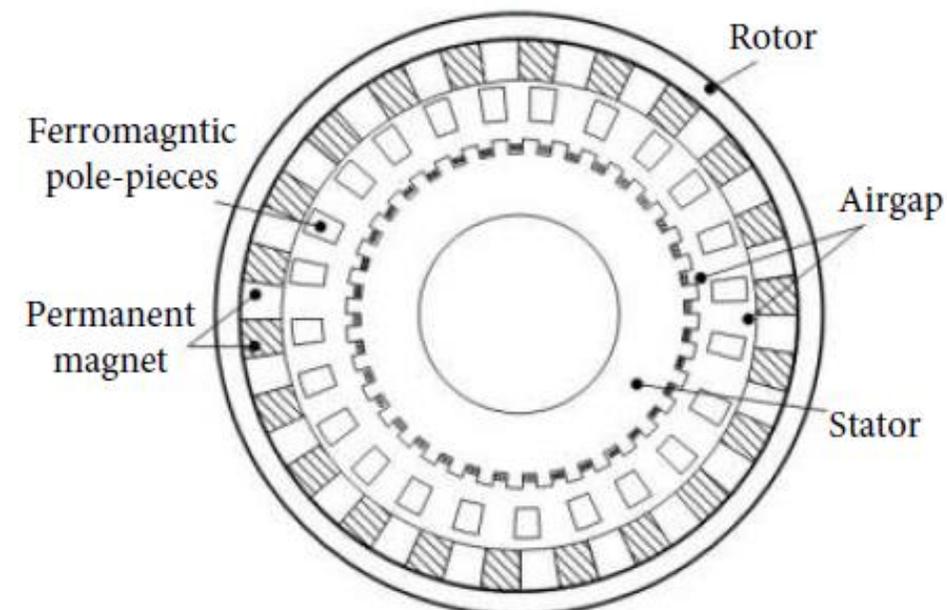
Una limitazione di queste macchine è la **velocità di rotazione**. La presenza delle barriere di flusso indebolisce particolarmente la struttura del rotore nei confronti delle **forze centrifughe**.

Un secondario problema di queste macchine è l'incapacità di auto avviamento.

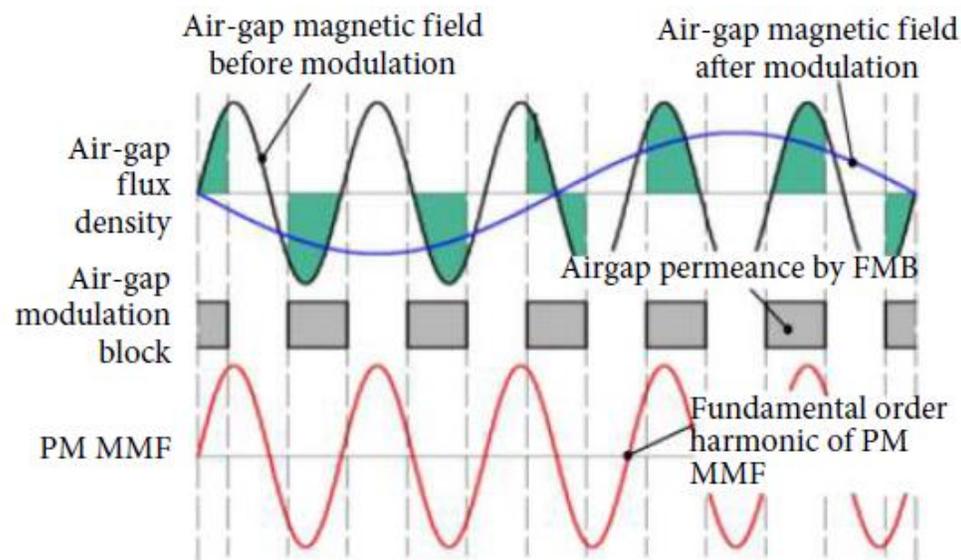


Queste macchine operano su base del principio di modulazione del flusso degli ingranaggi magnetici. La loro struttura può essere, infatti, assimilata all'unione tra una macchina elettrica sincrona a magneti permanenti e un semplice ingranaggio magnetico.

Per replicare il funzionamento di un ingranaggio magnetico è presente un **blocco di modulazione del flusso**. Quest'ultimo si occupa di modulare il flusso prodotto dallo statore.



Flux modulation PM machine



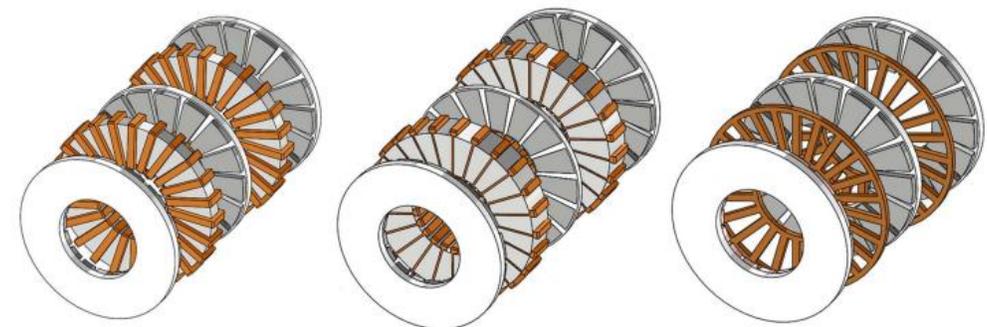
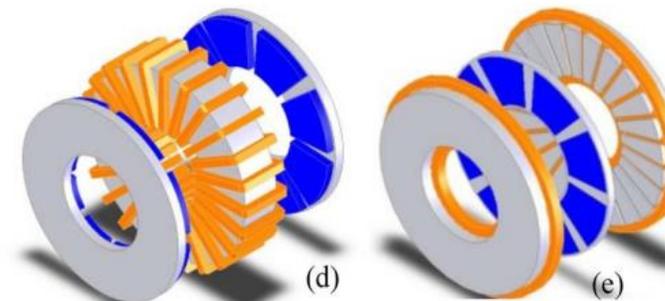
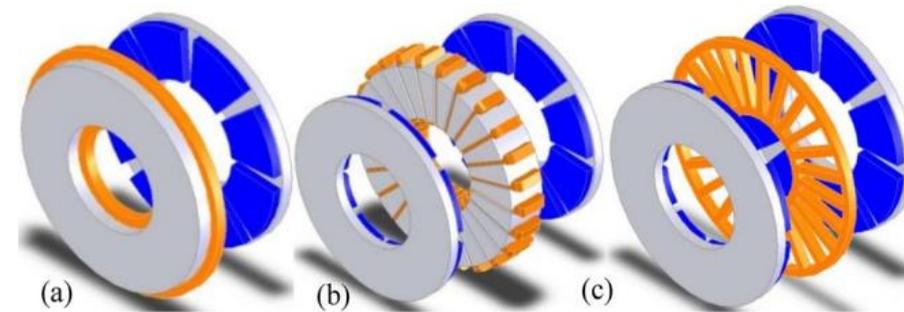
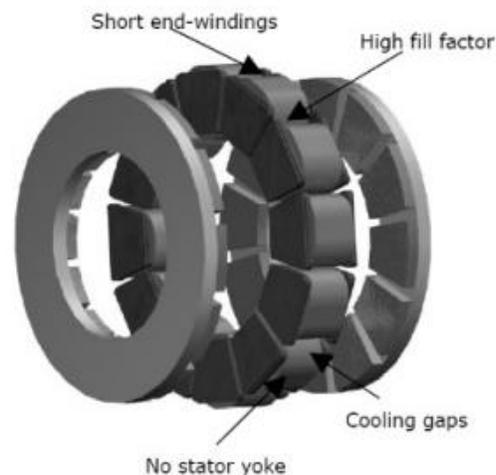
Le macchine elettriche a flusso assiale hanno cominciato ad essere sviluppate con l'avvento dei materiali **SMC** (Soft Magnetic Material) che hanno permesso la creazione di strutture ferromagnetiche meccanicamente resistenti.

Le principali caratteristiche che contraddistinguono queste macchine sono:

- **Elevate densità di coppia;**
- **Compattezza assiale;**
- **Traferri planari e regolabili** durante l'assemblaggio;
- **Scalabilità**, con la possibilità di realizzare strutture multistadio;

Una macchina emergente a flusso assiale è la macchina **YASA** (*Yokeless and Segmented Armature*).

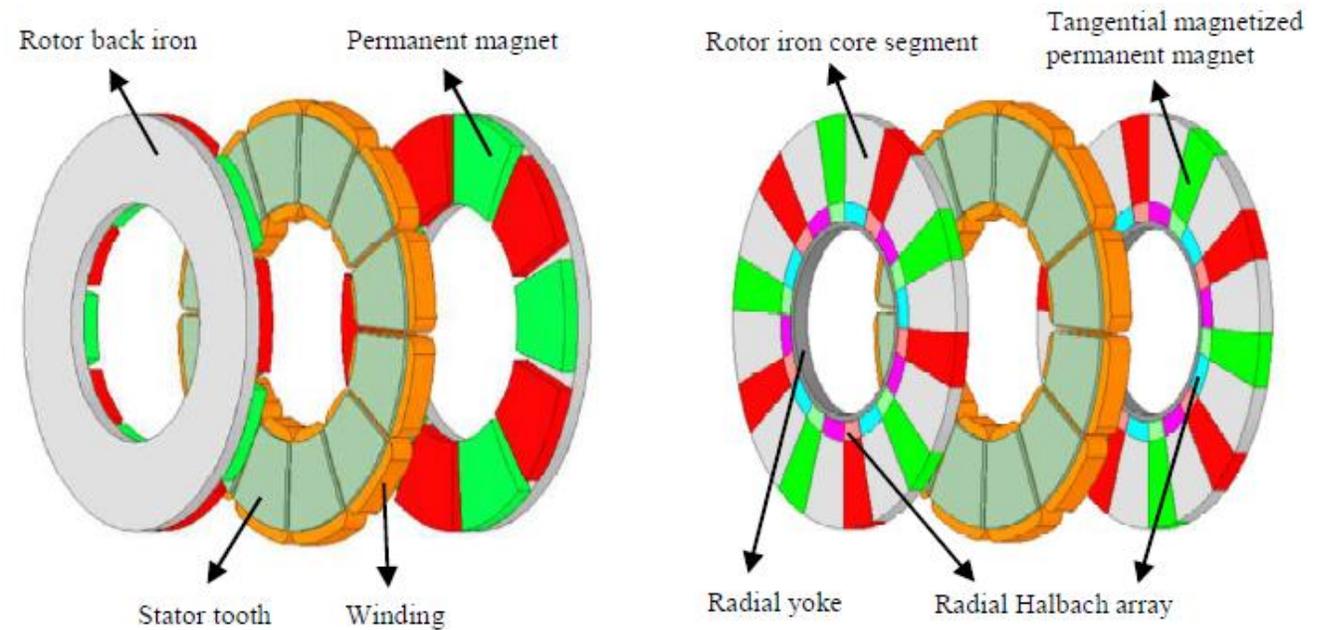
Questa, essendo caratterizzata da elevati valori di densità di coppia, ha iniziato ad essere considerata come sistema per applicazione **in-wheel**.



La prima innovazione tecnologica analizzata per una macchina YASA è un **circuito magnetico rotorico in parallelo**.

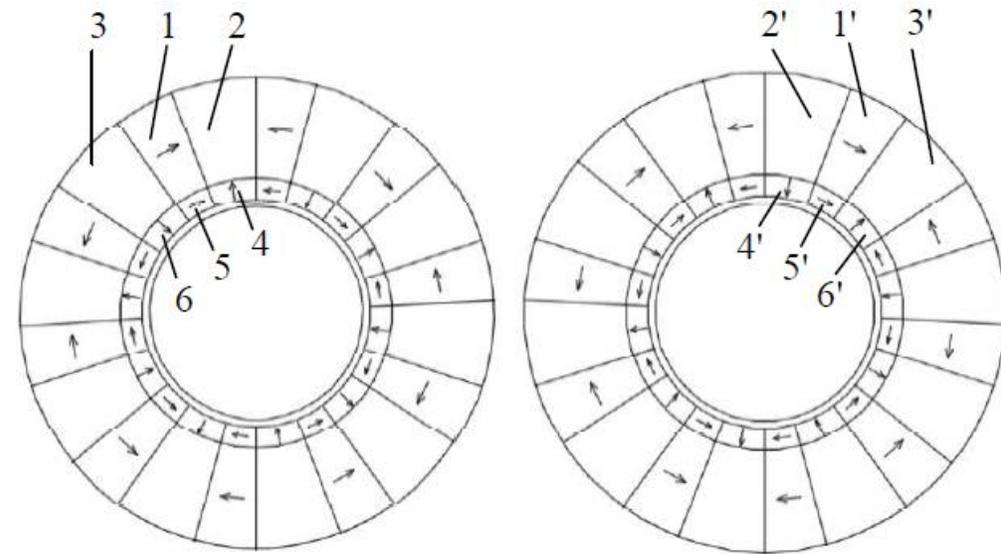
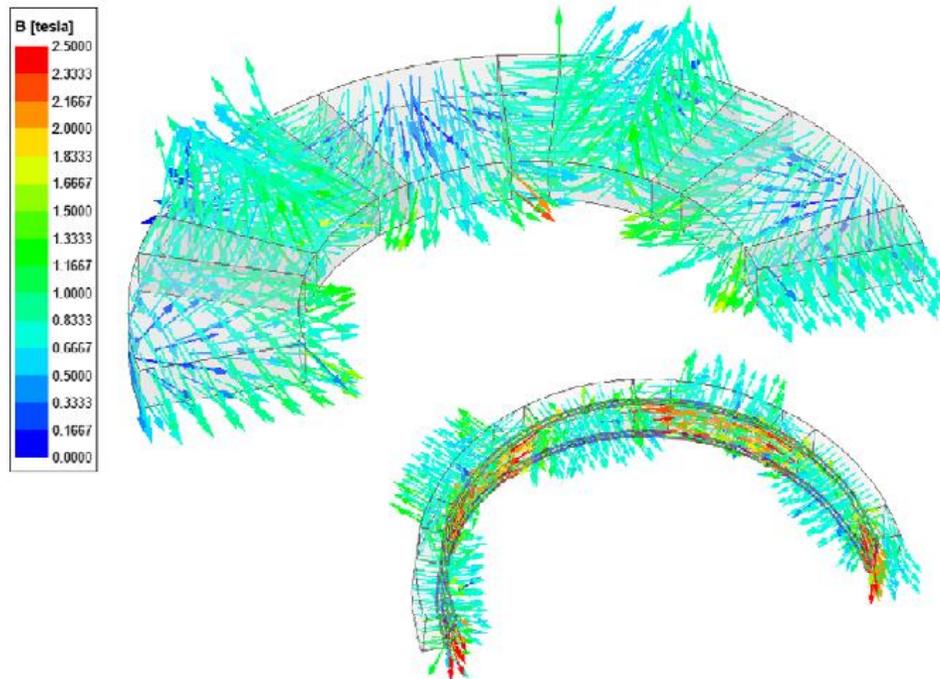
Per valutare le prestazioni della macchina PMC-YASA verranno simulati 5 parametri (densità di flusso al traferro, forza contro elettromotrice indotta, induttanza, coppia e perdite a rotore) successivamente comparati con quelli di una tradizionale macchina YASA da 10 kW di potenza nominale.

Per confrontare al meglio le prestazioni dei due motori, gli statori vengono mantenuti uguali, mentre per i rotori si applica il principio di conservazione del volume.



Descrizione	Valore	Descrizione	Valore
Tensione di alimentazione [V]	320	Diametro esterno dello statore/rotore [mm]	328
Velocità nominale [giri/min]	640	Diametro interno dello statore/rotore [mm]	189
Picco di Potenza [kW]	20	Lunghezza assiale dello statore [mm]	23
Numero di poli	10	Traferro [mm]	1.5
Numero di slot	12	Lunghezza assiale del rotore [mm]	20

Il circuito magnetico di una macchina PMC-YASA è caratterizzato da una **radiale configurazione Halbach** in parallelo con una **Spoke**, ovvero magneti permanenti tangenzialmente magnetizzati ed intervallati da segmenti in materiale ferromagnetico.

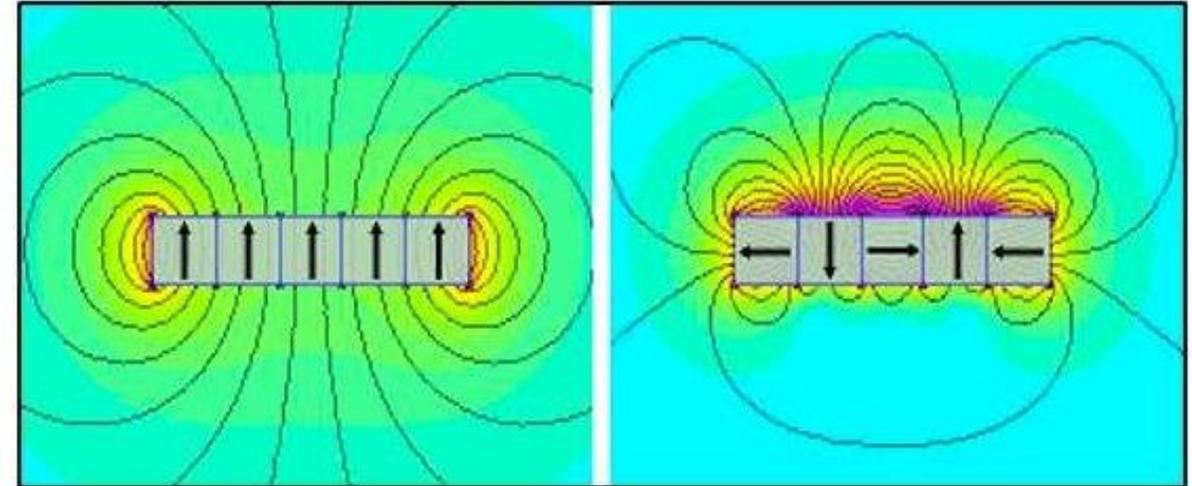
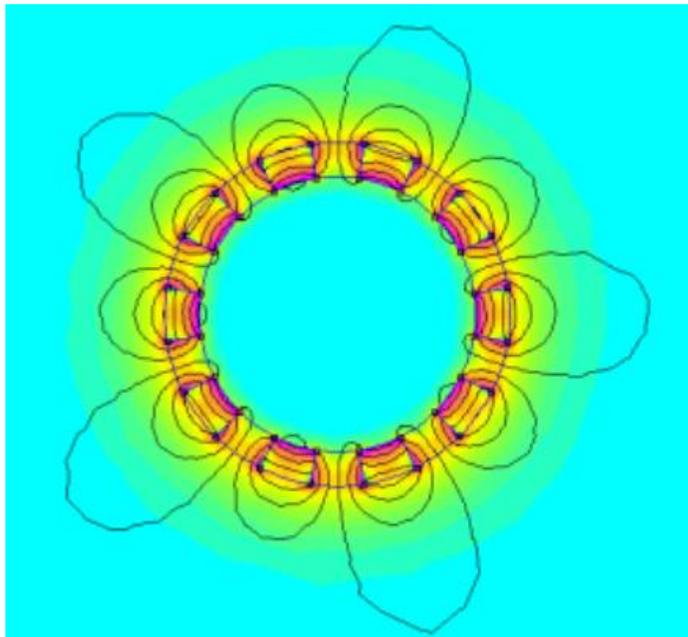


I vantaggi di questa disposizione sono:

- miglior utilizzo dello spazio interno;
- **riduzione del 38%** nell'utilizzo di materiale magnetico duro;
- eliminazione del giogo ferromagnetico su cui erano montati i magneti della macchina YASA.

Quest'ultimo beneficio si traduce per la macchina PMC-YASA in un minor ingombro assiale e in un minor peso.

La configurazione Halbach è una particolare **disposizione dei magneti permanenti** che consente di rafforzare il campo magnetico su una faccia dell'Array, diminuendo al contempo, ad un valore prossimo a zero, quello sulla faccia opposta.



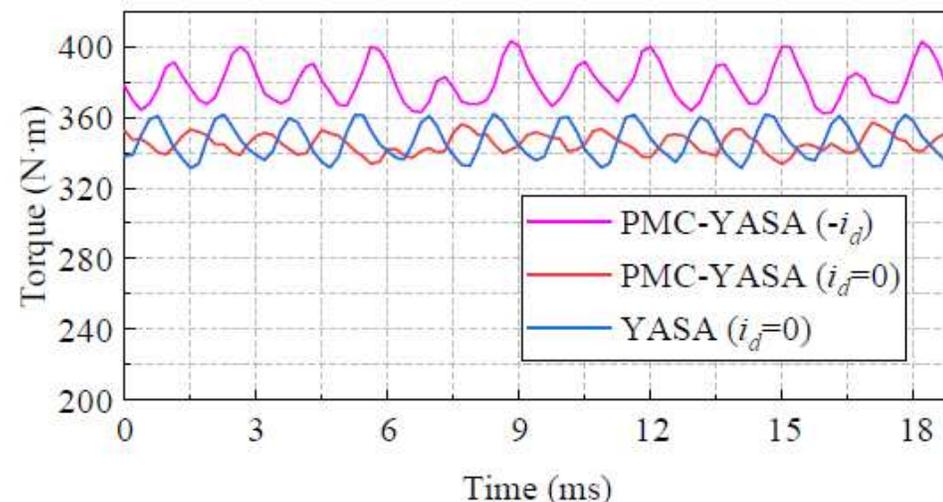
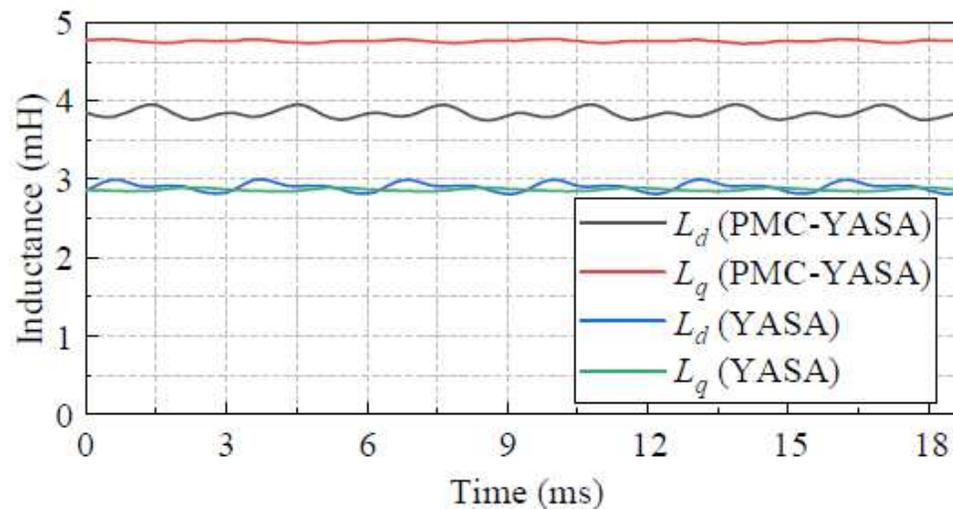
Tra le configurazioni Halbach più note troviamo quelle **lineari** e quelle **radiali**. Queste seconde vengono semplicemente ottenute richiudendo in forma circolare le prime. Ciò che le accumuna è, quindi, la sequenza di impilaggio dei vari magneti permanenti che risultano essere **ruotati** di  $\pi/2$  rispetto al precedente.

Le simulazioni de vari parametri oggetto di studio sono state condotte a  $n = 640 \text{ giri/min}$  e  $i = 83 \text{ A}$ .

L'ampiezza dell'armonica fondamentale della **Back - EMF** della macchina PMC-YASA è risultata minore del 4.1% rispetto al motore YASA. Questo risultato è la diretta conseguenza di un più **debole campo magnetico**, giustificato, però, da un minor utilizzo di magneti permanenti. Tutto ciò a sostegno dell'effettivo rafforzamento dato dalla Configurazione Halbach.

Per quanto riguarda le **induttanze**, per la macchina YASA  $L_d$  ed  $L_q$  sono equiparabili, mentre nel motore PMC-YASA sono maggiori diverse;  $L_d = 3.85 \text{ mH}$ , mentre  $L_q = 4.77 \text{ mH}$ . Tale differenza è sintomo di **asimmetria magnetica del rotore**.

Infine, la **coppia** della macchina PMC-YASA è leggermente inferiore rispetto a quella del motore YASA. Ricordando l'asimmetria del rotore e applicando una corrente di smagnetizzazione  $-i_d$ , la coppia massima e la densità di coppia aumentano del 9%.



Descrizione	Motore YASA	Motore PMC-YASA
Perdite nel ferro di rotore [W]	9.36	56.29
Perdite per correnti parassite nei PM [W]	318	88.78
Perdite a rotore [W]	327.36	145.07

Nel complesso le perdite nella macchina PMC-YASA sono minori che nel motore YASA.

Le perdite nel ferro sono maggiori per un più elevato utilizzo di materiale ferromagnetico, mentre quelle per correnti parassite nei magneti permanenti sono molto minori. La spiegazione è da ritrovarsi nell'utilizzo di 5 magneti per polo, dunque, nella segmentazione dei magneti permanenti.

In conclusione, i vantaggi che apporta il circuito magnetico in parallelo sono:

- **Minore ingombro assiale** del rotore; 18 mm del motore PMC-YASA contro i 20 mm del YASA.
- **Economicità** per un utilizzo del 38% inferiore di magneti permanenti.
- Aumento del 9% della coppia grazie al contributo della riluttanza.
- Minore corrente di eccitazione per ottenere gli stessi valori di coppia del motore YASA.
- **Minori perdite** a rotore.

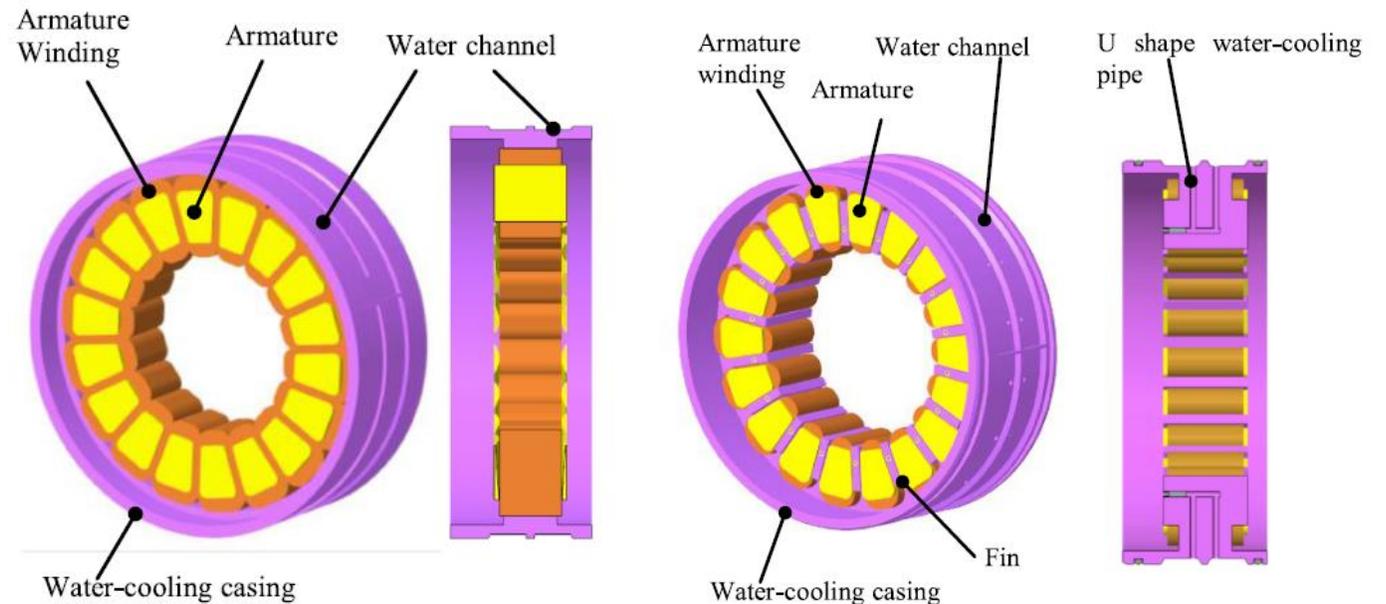
La potenza di una macchina YASA è principalmente limitata dalla **temperatura di esercizio**.

Questa, oltre ad aumentare la resistività del materiale degli avvolgimenti, diminuisce anche le prestazioni dei magneti permanenti.

A tale scopo si vuole confrontare il valore di potenza e di coppia di una macchina YASA con e senza migliorie al sistema di raffreddamento.

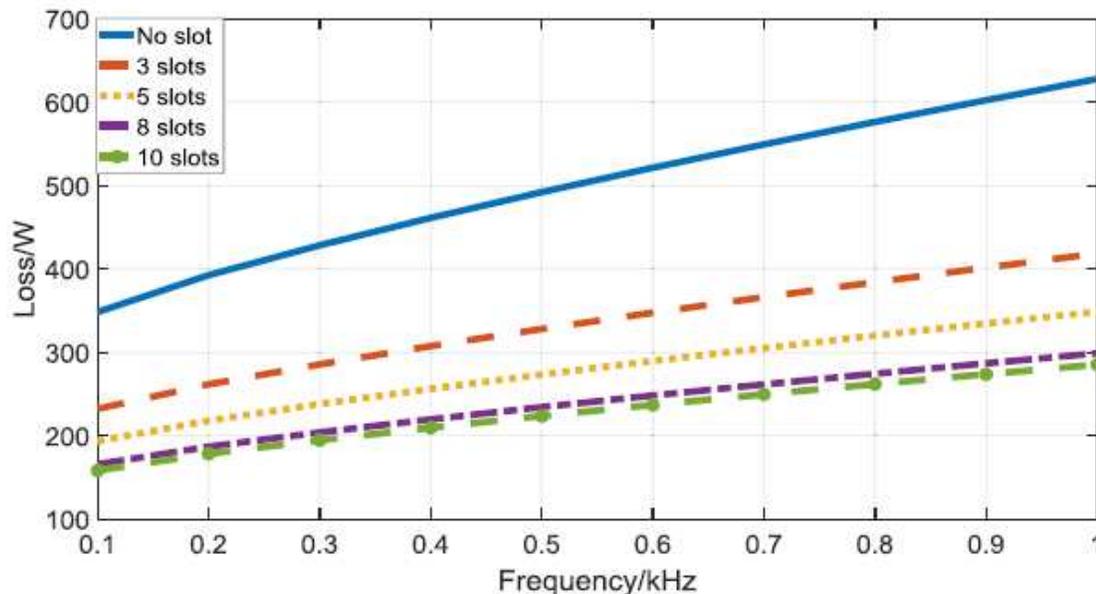
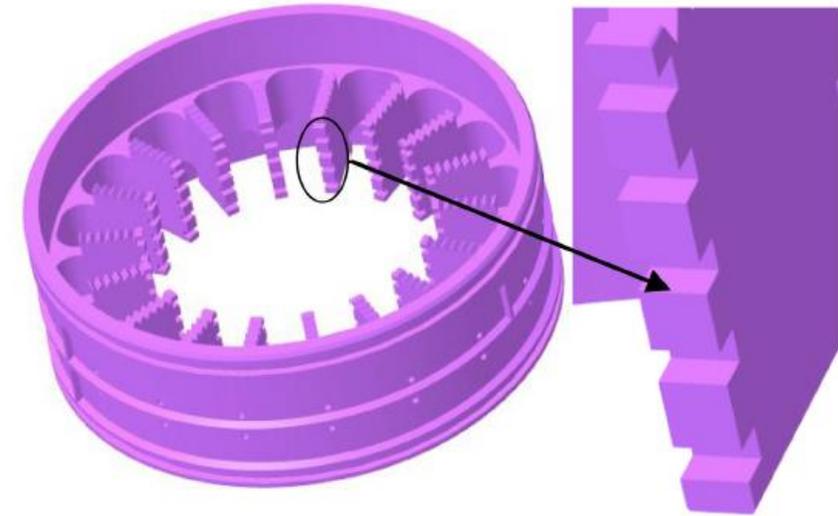
Il nuovo sistema di raffreddamento propone delle **alette di estrazione del calore**, poste sulla superficie interna dell'involucro e in contatto con gli avvolgimenti. All'interno di queste sono, poi, presenti dei **canali** a forma di U per il passaggio del liquido di raffreddamento.

Descrizione	Valore	Descrizione	Valore
Diametro esterno - $D_o$ [mm]	187	Tensione nominale - $V_r$ [VDC]	350
Diametro interno - $D_i$ [mm]	123	Potenza massima - $P_{max}$ [KW]	50
Lunghezza assiale - $L_a$ [mm]	66	Coppia massima - $T_{max}$ [Nm]	600
Numero di poli - p	20	Potenza nominale - $P_{nom}$ [KW]	30
Numero di segmenti di statore - $N_s$	18	Coppia nominale - $T_{nom}$ [Nm]	409
Traferro - $L_g$ [mm]	1.2	Velocità massima - $V_{max}$ [giri/min]	1200



Le alette vengono realizzate in **alluminio** per ridurre al minimo la resistenza termica al flusso di calore tra avvolgimento e liquido di raffreddamento.

Tuttavia, a causa dei flussi dispersi, all'interno delle alette si vengono a generare delle **correnti parassite**. Per ridurre al minimo questo indesiderato fenomeno si realizzano delle **fessure** sulle estremità delle alette stesse.



Per valutare il numero di fessure che riduce le perdite per correnti parassite viene eseguita un'analisi agli elementi finiti. Dai risultati ottenuti, considerando anche le difficoltà di realizzazione delle fessure stesse, si stabilisce un numero pari a 5.

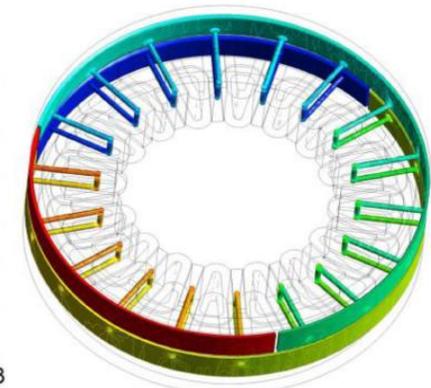
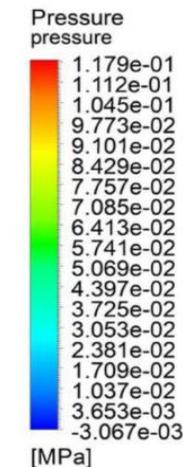
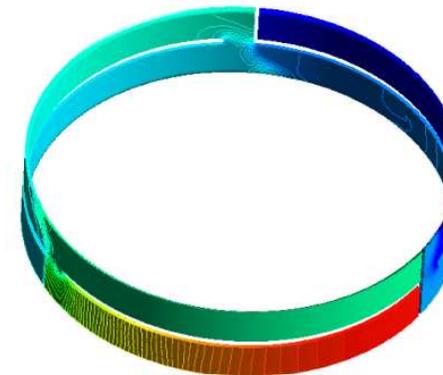
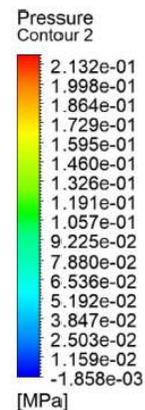
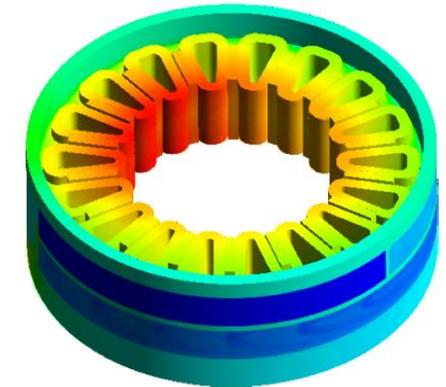
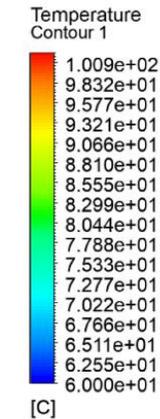
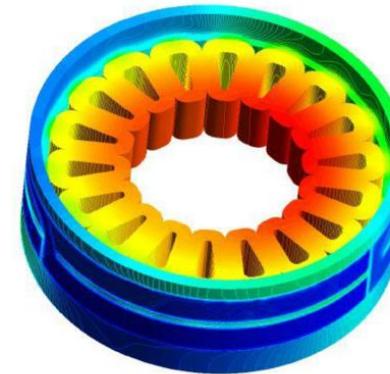
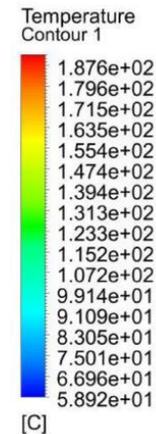
Un secondario problema dell'inserimento delle alette è la diminuzione dello spazio disponibile ai segmenti statorici, che risulteranno di conseguenza più piccoli.

Per valutare l'efficacia del sistema di raffreddamento è stato stilato un modello analitico per la determinazione del diametro dei tubi e del numero di questi in parallelo.

Successivamente, è stata eseguita un'analisi CFD per la valutazione della distribuzione di temperatura statorica e di pressione nel liquido.

Per quanto riguarda la temperatura si nota una migliore uniformità di colore (e quindi di temperatura) negli avvolgimenti, a parte che per un breve tratto circonferenziale, corrispondente all'ultimo gruppo di tubi in parallelo del sistema di raffreddamento. In termini quantitativi, la massima temperatura degli avvolgimenti passa da 187.6 °C a 100.9 °C.

Per quanto riguarda la perdita di pressione, questa passa dall'essere prossima a 200 kPa a 95.4 kPa.



Dalle prove sperimentali eseguite a  $n = 500 \text{ giri/min}$ , la miglioria al sistema di raffreddamento comporta un aumento di  $15 \text{ kW}$  della potenza massima della macchina YASA (**incremento del 30%**). In termini di coppia, invece, si parla di  $100 \text{ Nm}$ .

Infine, con delle prove a  $i = 150 \text{ A}$  viene valutata la perdita di pressione e l'andamento della temperatura.

Per la perdita di pressione, i test sperimentali riportano  **$98 \text{ kPa}$** , contro i  $95.4 \text{ kPa}$  della simulazione CFD.

Per la temperatura, invece, i risultati non vedono compatibilità. Una possibile spiegazione della maggiore temperatura ottenuta dai test sperimentali risiede nella possibile presenza di resina epossidica nelle cavità presenti tra avvolgimenti e alette.

Parametri	Prototipo	Dopo Miglioramento
Picco di potenza	$50 \text{ kW}$	$65 \text{ kW}$
Picco di coppia	$600 \text{ Nm}$	$700 \text{ Nm}$
Potenza nominale	$30 \text{ kW}$	$45 \text{ kW}$
Coppia nominale	$409 \text{ Nm}$	$450 \text{ Nm}$
Velocità massima	$1200 \text{ rpm}$	$1200 \text{ rpm}$
Peso totale	$22.5 \text{ kg}$	$21.2 \text{ kg}$
Densità di potenza	$2.22 \text{ kW/kg}$	$3.07 \text{ kW/kg}$

