

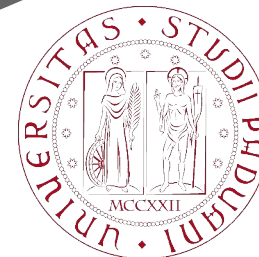
STUDIO DELLA CONFIGURAZIONE HALBACH E DELLA SUA APPLICAZIONE A MOTORI ELETTRICI PER LA PROPULSIONE MOTOCICLISTICA

Study of Halbach array and its application to electric motors for motorcycle propulsion

Tutor accademico: **Prof. Piergiorgio Sonato**

Laureando: **Luca Marcucci**

dii DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
INDUSTRIALE



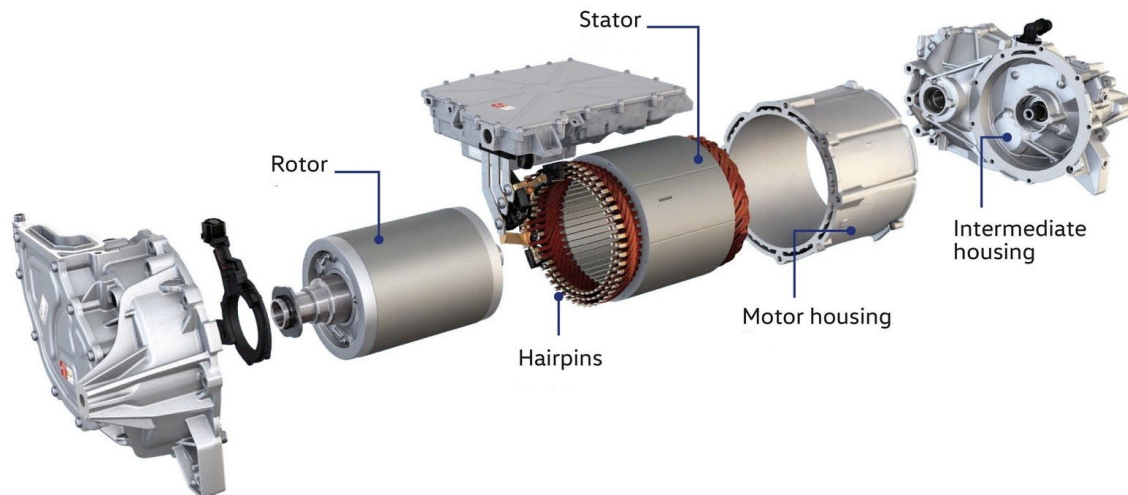
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Quale può essere una valida alternativa ai motori a combustione?

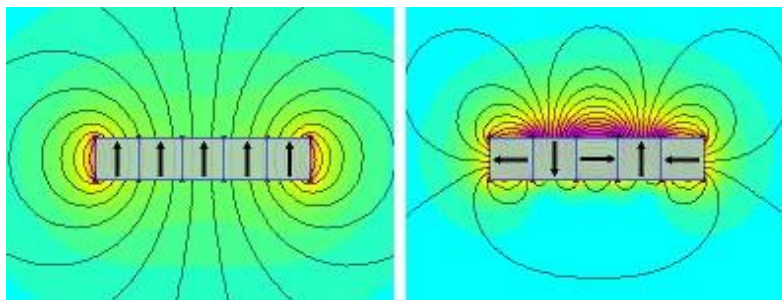
il MOTORE ELETTRICO

Il **motore elettrico** viene utilizzato per trasformare energia elettrica proveniente dalla batteria in energia meccanica disponibile all'albero, al fine di produrre **movimento**.

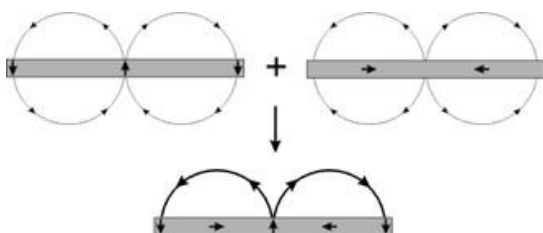
Il motore è caratterizzato da uno **statore** (componente fisso), il quale è caratterizzato dalla presenza di una o più coppie polari e il **rotore** (componente mobile) composto da fili di rame o magneti, il quale crea un **campo elettromagnetico** al passaggio di corrente.



FUNZIONAMENTO

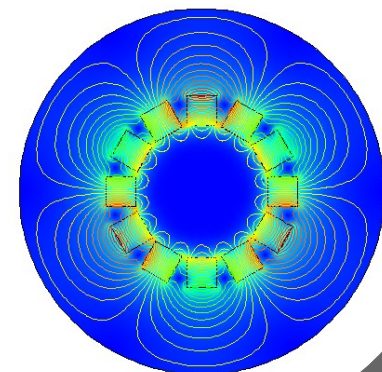


La disposizione di **magneti permanenti** secondo la configurazione Halbach consente di **aumentare il campo magnetico** in una zona dello spazio e ridurlo ad un valore trascurabile, prossimo a zero, in quella opposta.



Questa disposizione consente di ottenere un flusso unilaterale e ciò può essere spiegato studiando la sovrapposizione degli effetti di due configurazioni di magneti. (**diagrammi di Millison**)

Esistono diverse strutture di Halbach array, tra le più note vi è quella **circolare** o **cilindrica**. Nel caso **ideale** la struttura viene realizzata da un cilindro di materiale ferromagnetico di lunghezza infinita con la direzione di magnetizzazione che varia continuamente. Il campo prodotto è **perfettamente uniforme e limitato** ad una sola zona (interna o esterna) del cilindro.

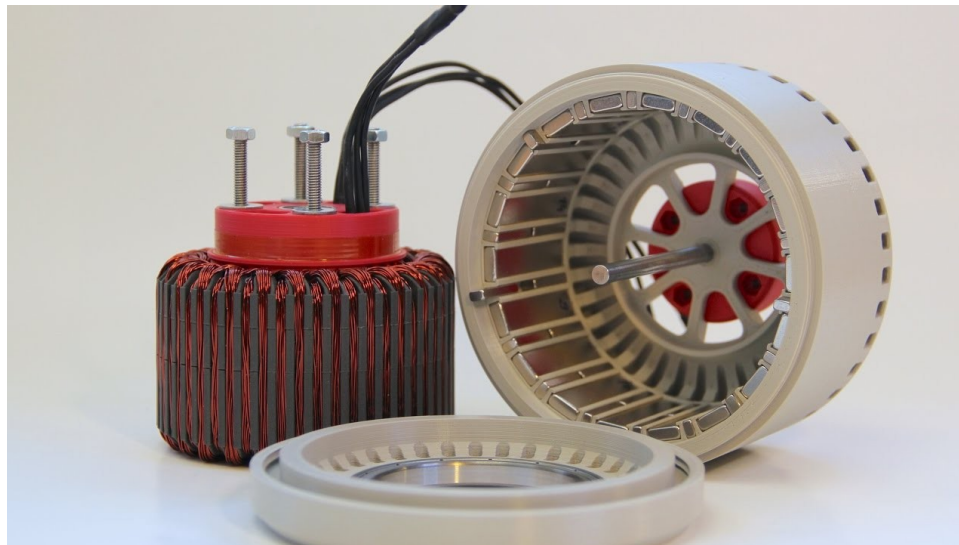


APPLICAZIONI

Considerando la **configurazione cilindrica** tra le principali applicazioni vi sono:

Motori brushless e alternatori in cui tutto il flusso è confinato al centro del foro.

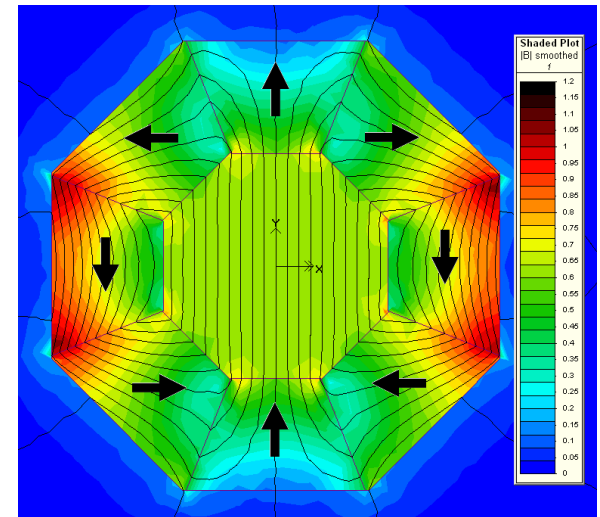
L'array Halbach può essere **fisso**, con gli avvolgimenti rotanti, oppure può fungere da elemento **rotante**, con gli avvolgimenti fissi.



VANTAGGI E SVANTAGGI

Vantaggi nell'utilizzo di MP disposti secondo **Halbach** array rispetto ad una disposizione **tradizionale**:

- **riduzione di peso**, data dalla sostituzione di ferro con traferro;
- **maggiore efficienza** del circuito magnetico;
- i motori brushless e alternatori autoprotettivi che utilizzano una configurazione cilindrica di tipo halbach producono una **maggiore coppia** o un'uscita più elevata rispetto ai modelli di motore o alternatore convenzionali riducendo il momento d'inerzia del motore;
- Il motore realizzato con l'ausilio dell'array Halbach **non richiede laminazione**; ciò riduce significativamente le perdite per correnti parassite e le perdite per isteresi.



Svantaggi nell'utilizzo di MP disposti secondo Halbach array rispetto ad una disposizione tradizionale:

- **Maggiore costo** e maggiore complessità costruttiva
- Problematiche di applicazione alle **alte temperature** a causa dell'effetto smagnetizzante

MOTORE A DOPPIO ROTORE

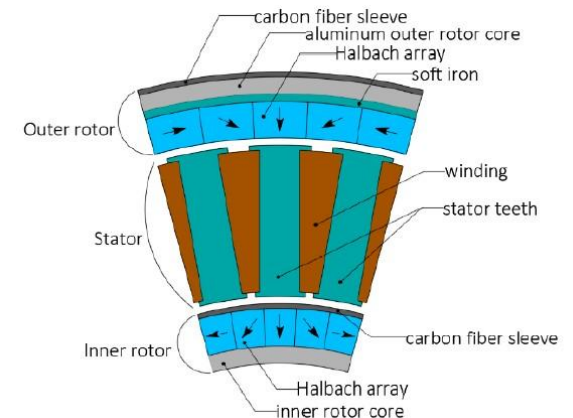
DIMENSIONAMENTO DEL MOTORE

L'università di Nottingham ha sviluppato un motore elettrico per una superbike al fine di competere nel Isle of Man TT- Zero.

Considerando le limitazioni imposte il **motore a doppio rotore** è risultata la soluzione migliore.



La macchina è composta da **due rotori** uniti su un lato tra i quali è allocato lo statore. Il rotore esterno è caratterizzato da una configurazione **Halbach** di magneti permanenti che consentono di ottenere un campo magnetico interno alla struttura. Ogni polo è caratterizzato da magneti permanenti disposti tangenzialmente, in direzione **radiale, diagonale e tangenziale**. Questa configurazione permette la ricezione di un **flusso con caratteristiche sinusoidali** al traferro nel caso ideale.

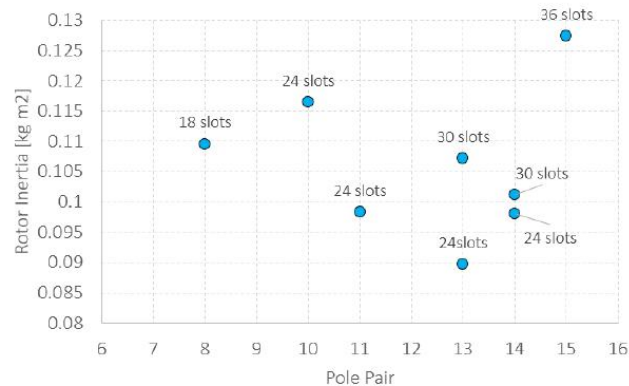
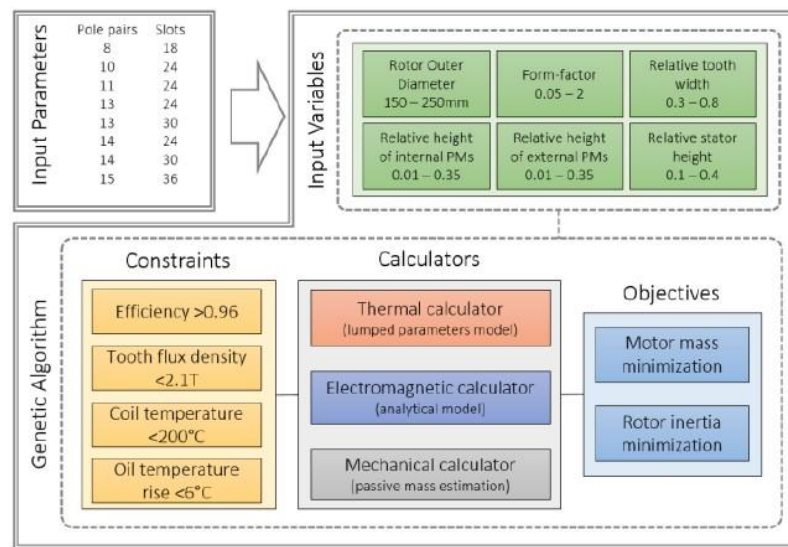


OTTIMIZZAZIONE

Per **umentare il rendimento** della macchina è necessario **ridurre massa** e **inerzia** della stessa, per fare ciò si attua un processo di ottimizzazione.

Il motore caratterizzato da **24 slot e 14 coppie** polari risulta il migliore per lo scopo che si vuole perseguire.

Esso mostra il **miglior rapporto peso/potenza** di 18 kW/kg e un inerzia vicina al valore ottimale



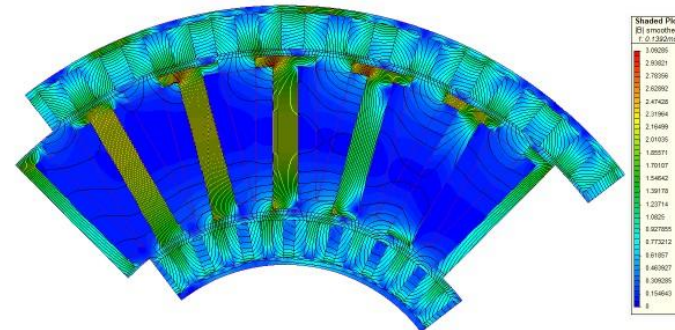
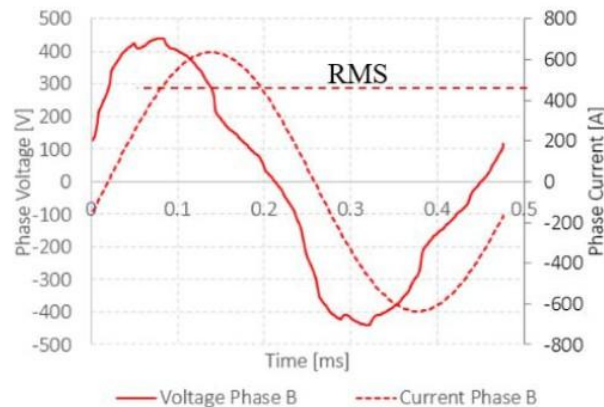
MODELLAZIONE ELETTROMAGNETICA

Dall'ottimizzazione si ricavano i dati riportati in tabella.

La **modellazione elettromagnetica** consente di ricavare i valori di **tensione** e **corrente** nella macchina.

Alla coppia nominale di 300 Nm e velocità di 9000 giri/min la macchina ha un'efficienza del **96.6%** con perdite del ferro nei denti pari a circa 1.5 kW e perdite del rame negli avvolgimenti dello statore di circa 7.8 kW.

Parameter	Value
Phase Current, rms [A]	450
Phase Voltage, rms [V]	295
bEMF, rms [V]	230
Fundamental frequency [Hz]	2100
Reference speed [rpm]	9000
Reference torque [Nm]	300
Reference power [kW]	283
Number of pole pairs	14
Number of slots	24
Efficiency	96.6%
Current density [A/mm ²]	27
Power density [kW/kg]	18.6
Total mass [kg]	15.2
Rotor inertia [kg·m ²]	0.067



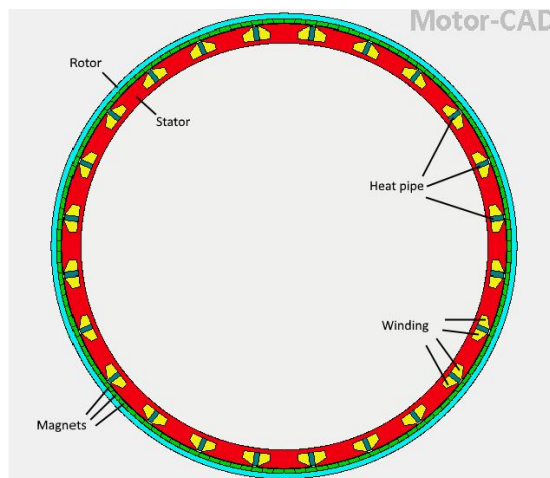
DIMENSIONAMENTO DEL MOTORE

In questo capitolo si vuole presentare un motore ad anello denominato LS-180 con design a rotore esterno.

È una macchina **sincrona** composta da **magneti permanenti** disposti secondo **Halbach** array, al fine di minimizzare lo spessore del rotore e di conseguenza il **peso** del motore.

Questa tecnologia utilizza un **sistema trifase** per garantire un'elevata coppia costante in uscita.

Le dimensioni del motore sono vincolate alle **dimensioni della ruota** che ne costituisce l'alloggio.



Dimension	Value	Units
Rotor outer diameter	426	mm
Rotor inner diameter	416	mm
Stator outer diameter	406	mm
Stator inner diameter	372	mm
Air gap	0,5	mm
Axial length	65	mm
Tooth width	26	mm
Sloth depth	12	mm
Magnet thickness	4	mm
Magnet segments	5	
End winding thickness	8	mm
Slots	24	
Poles	26	
Turns	13	
Parallel windings	2	
Magnet arrangement	Halbach	
Magnet material	N42SH	
Stator and Rotor material	Hiperco 50	
Frequency	507,5	Hz
Active region weigh	16,36	kg
Rated power	32	kW
Rated speed	2342	RPM
Output torque	131	Nm
Ripple torque	13	%
Current density	5,5	A/mm ²
Efficiency	97,8	%

ANALISI DINAMICA E TERMICA

Le forze in gioco, che contrastano il moto sono la **resistenza al rotolamento** dipendente dall'attrito tra asfalto e pneumatico e la **resistenza data dall'aria** sulla carenatura (drag).

$$F = m \cdot g \cdot f_r + 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_w \cdot A_{vehicle}$$

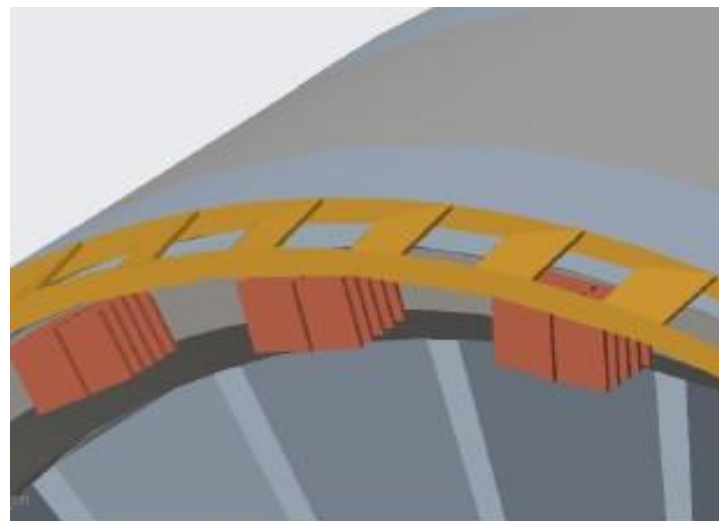
Dai risultati si ricava che il design a **motore singolo** con trasmissione a catena risulta più efficiente rispetto ad un design con motore disposto su entrambe le ruote

$$a = \frac{F}{m} = \frac{\frac{T_m}{r_w} - (m \cdot g \cdot f_r + 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_w \cdot A_{vehicle})}{m}$$

L'**analisi termica** è un aspetto critico sia per quanto concerne il motore che il peso della moto.

Per questo motore è stato selezionato un metodo di **raffreddamento ad aria** autopompato.

Il motore è stato progettato per rientrare nella **classe H** pertanto viene utilizzato un isolante che trattiene fino al 10% in più del valore limite della classe per gestire l'**assenza di moti convettivi** nel breve periodo.

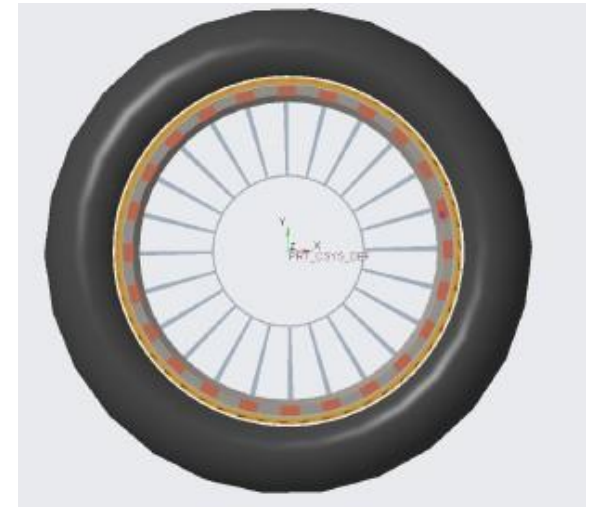
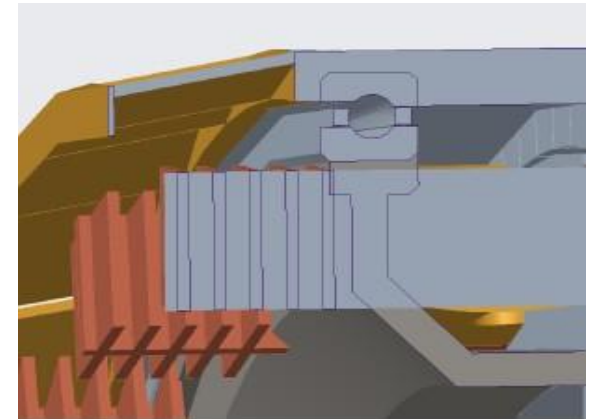


ASSEMBLAGGIO

Uno degli aspetti più critici di questo tipo di motore è il design del **rotore esterno** che deve essere adattato alla ruota che lo ospiterà.

Il punto più sottile nella fessura dello statore misura 5 mm ed è soggetto a problemi di **deformazione sotto shock**, per evitare deformazioni massive viene utilizzato un supporto di **rinforzo** che funge anche da **dissipatore** di calore.

La macchina finale risulta abbastanza **pesante** a causa dell'elevata densità dei materiali utilizzati rispetto ad una ruota standard ma risulta anche notevolmente **compatto** se paragonato ad un motore tradizionale.





CONCLUSIONI

In conclusione il motore elettrico rappresenta una soluzione concreta alla necessità di veicoli non inquinanti e in particolare la configurazione **Halbach** permette di ottimizzare e ridurre peso e perdite presenti in un motore elettrico tradizionale senza perdere le caratteristiche di elevata **coppia** e **affidabilità** che lo contraddistinguono.

