

1222-2022  
800  
ANNI



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova  
Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

---



Tesi di Laurea

**UNO STUDIO COMPARATIVO TRA LE PRESTAZIONI DEI  
MOTORI ELETTRICI ASINCRONI E DEI MOTORI  
ELETTRICI SINCRONI A MAGNETI PERMANENTI**

Relatore: Prof. Sonato Piergiorgio

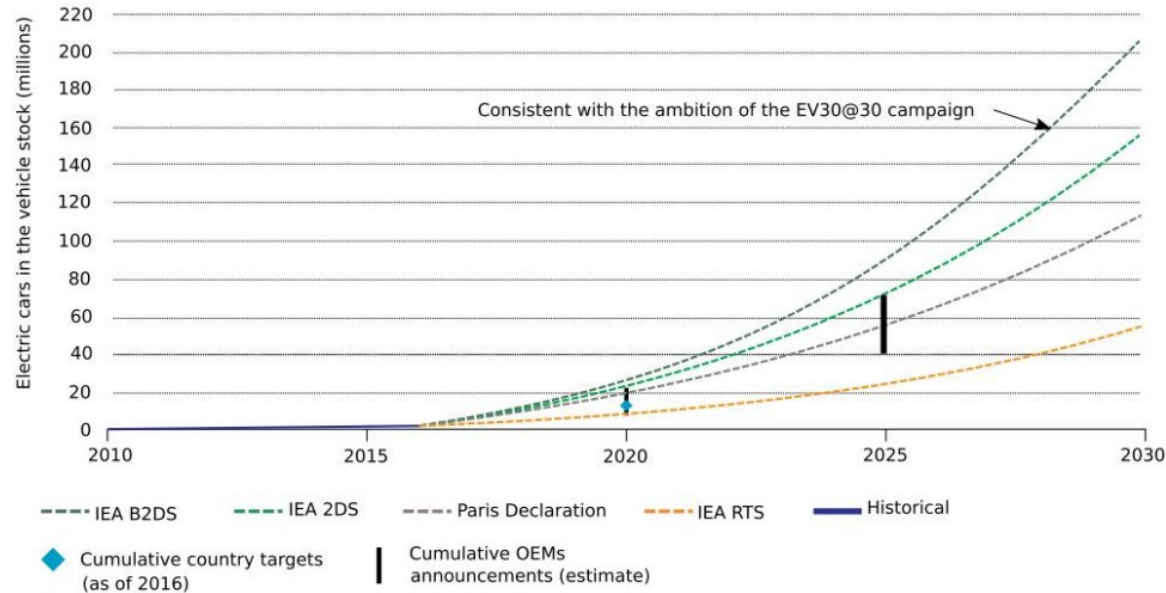
Laureando: Bottazzo Nicholas

12 Settembre 2022

Anno Accademico 2021/2022

---

## Introduzione e motivazione della Tesi:

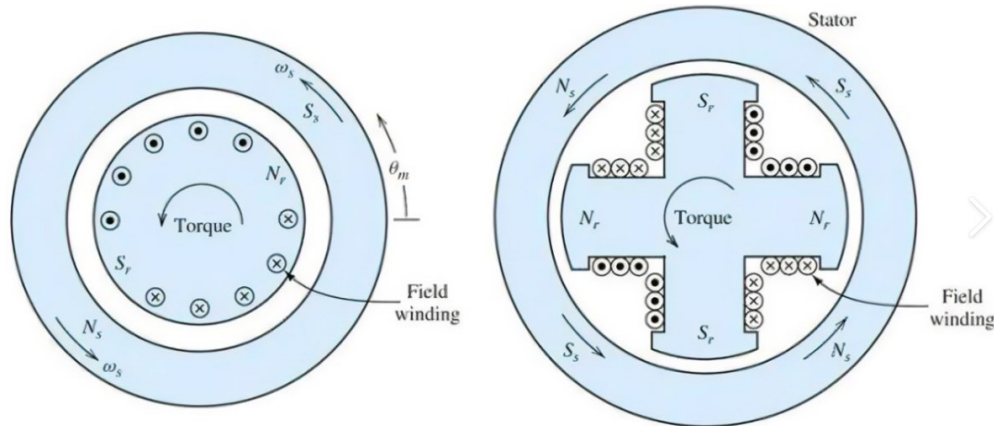
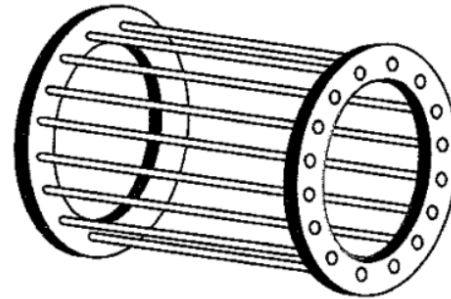
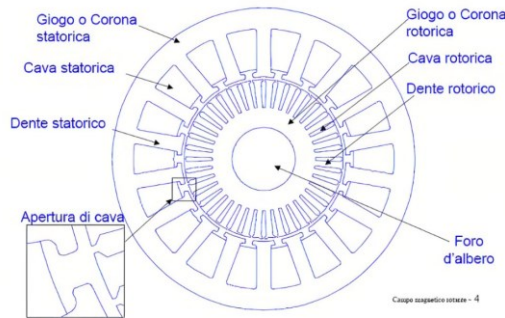


Characteristic	Electric motor			Power electronics		
	2010	2015	2020	2010	2015	2020
Specific power (kW/kg)	1.2	1.3	1.6	10.8	12	14.1
Power density (kW/l)	3.7	5.0	5.7	8.7	12	13.4
Efficiency (%)	90	92	93	91	94	97
Cost (\$/kW)	11.1	7	4.7	7.9	5	3.3

- Azionamenti elettrici come protagonisti futuri del settore dei trasporti

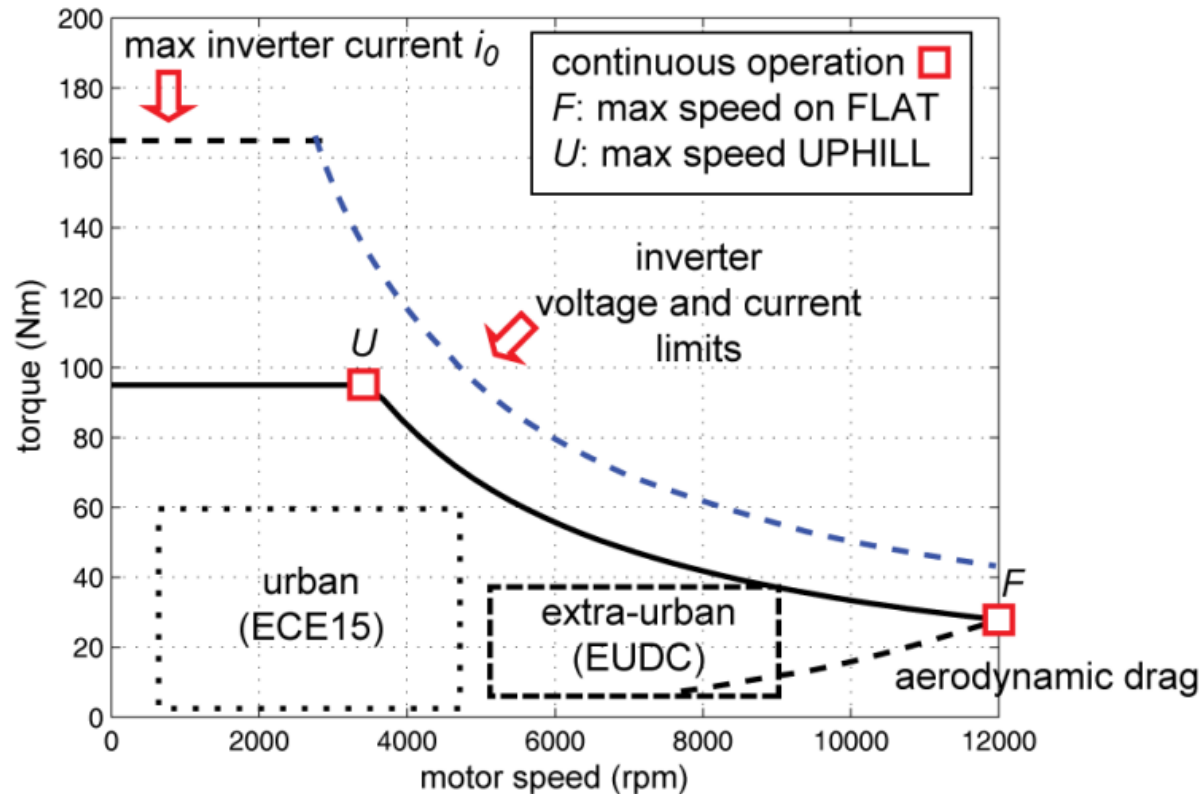
- Obiettivi quantitativi e qualitativi in termini di efficienza, affidabilità, perdite di potenza, densità di potenza e costi economici che devono essere sostenuti

## Tipologie di motori elettrici



- Motore asincrono (o a induzione) con rotore liscio ad avvolgimenti o a gabbia di scoiattolo
- Motore sincrono con rotore liscio, a poli salienti o a magneti permanenti
- Motore sincrono a riluttanza variabile eventualmente assistito da magneti permanenti

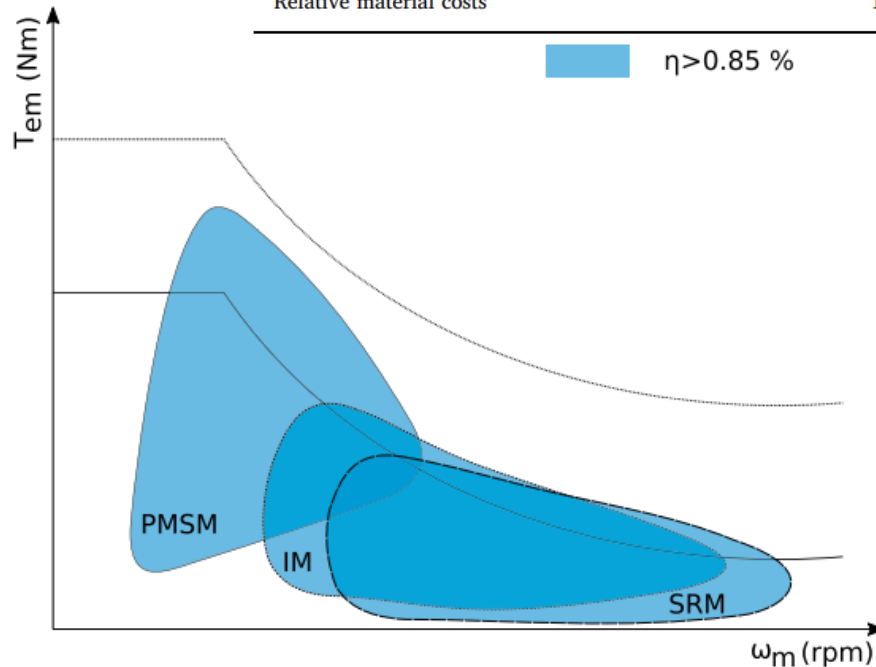
## Principio di funzionamento di un motore elettrico



- Regione operativa a coppia costante a velocità di funzionamento basse
- Intervallo di funzionamento a potenza costante quando il motore opera a massimo regime
- Il punto F contrassegna la massima velocità del veicolo in piano
- Il punto U determina la coppia resistente massima che il veicolo può vincere all'avviamento

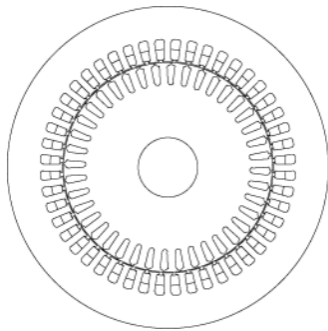
## Obiettivi della tesi

Efficiency and power densities	PMSM	PM-assist. SynRM	IM	SRM
Typical efficiencies at constant torque region <sup>(4)</sup>	91.3–95.8%	87.0–93.0%	79.0–86.0%	85.1–89.0%
Power densities of current technologies (kW/l) <sup>(5)</sup>	3.3–10.2 kW/l	6.8 kW/l	2.5 kW/l	2.6–4.5 kW/l
Costs	PMSM	PM-assist. SynRM	IM	SRM
Overall technology costs	high	medium	medium	low
Relative material costs	10/10 <sup>(6)</sup>	4.8/10 <sup>(7)</sup>	5.9/10 <sup>(6)</sup>	3.1/10 <sup>(6)</sup>

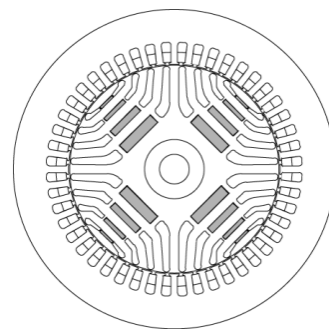


- Confronto delle prestazioni e dei consumi di un particolare motore asincrono, di un motore sincro a magneti permanenti a configurazione radiale e di un motore sincro a magneti permanenti a configurazione circonferenziale
- Si vuole determinare la tipologia che offre la migliore efficienza complessiva durante il ciclo di vita a cui il veicolo è sottoposto
- Si mostreranno particolari soluzioni costruttive atte a ridurre i costi e a massimizzare le prestazioni

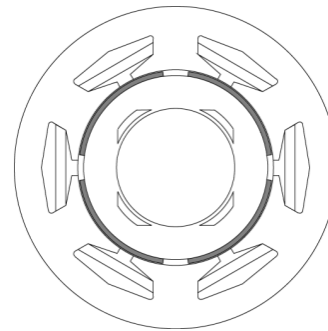
## Confronto delle curve di potenza dei tre motori ottenute con FEA



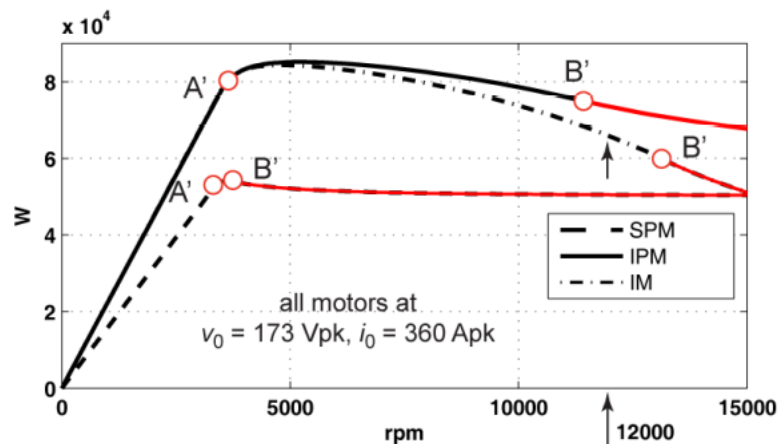
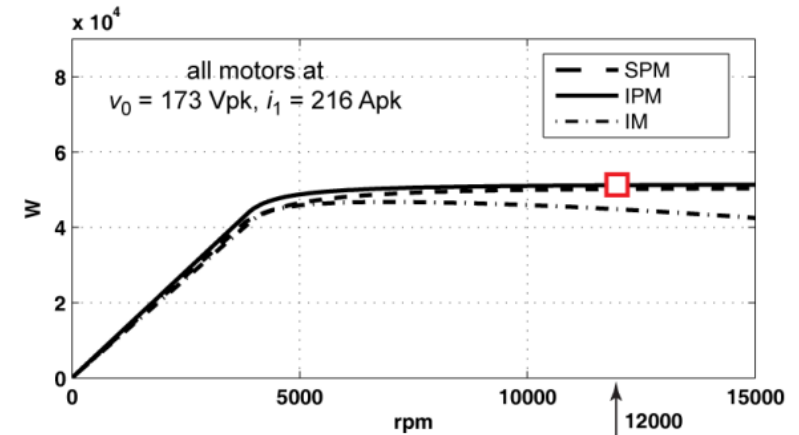
(IM)



(IPM)

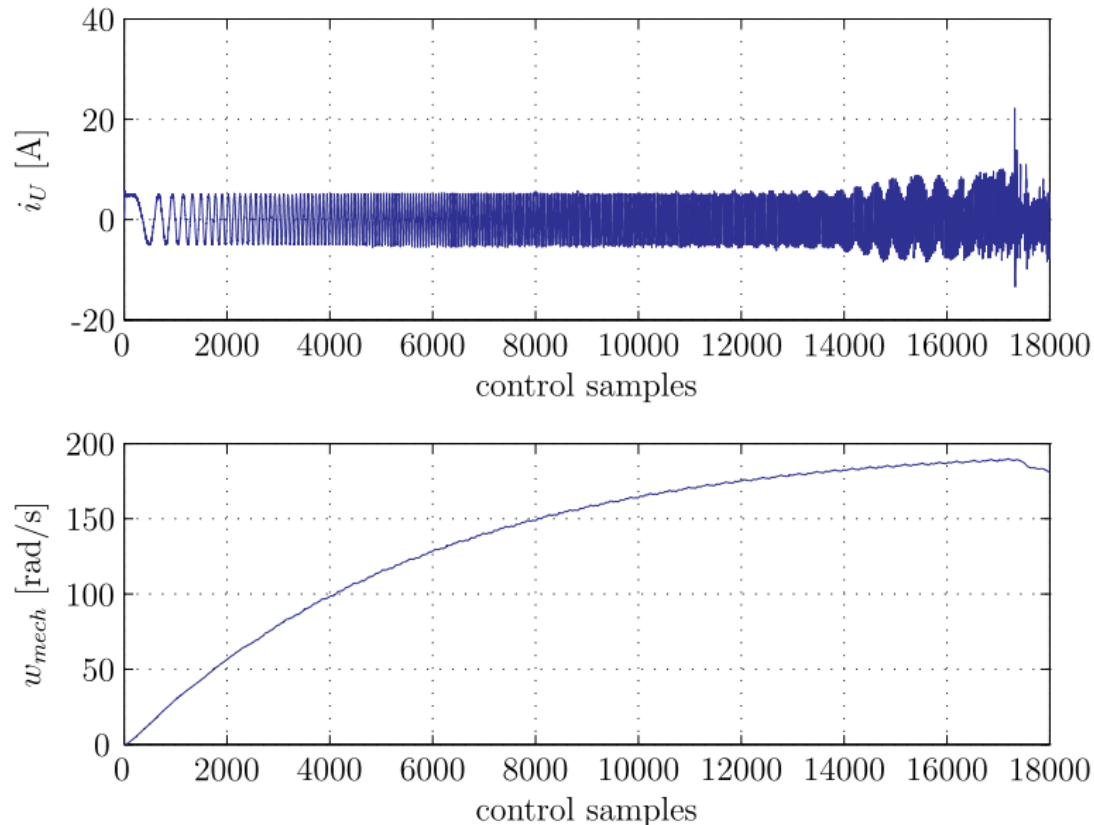


(SPM)



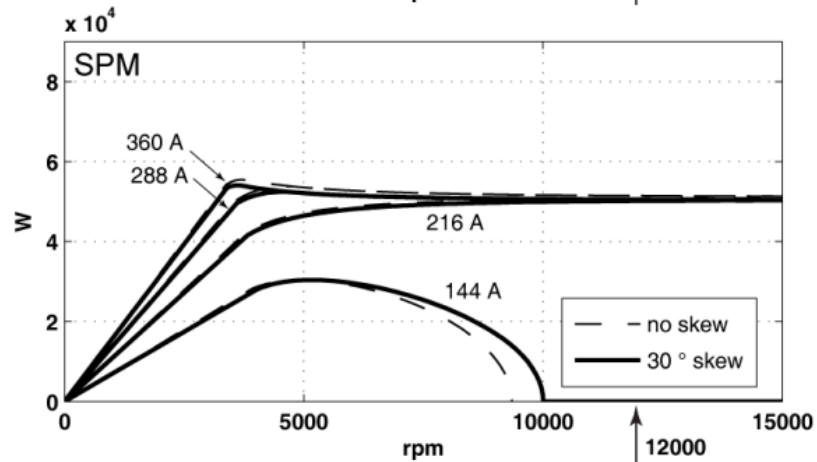
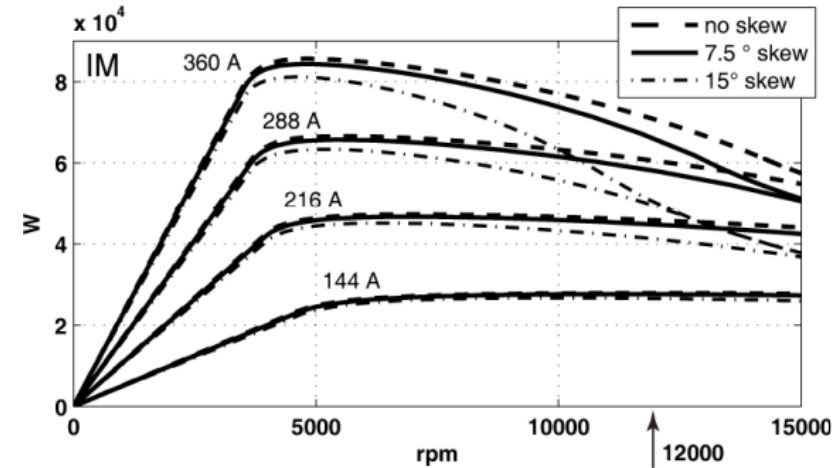
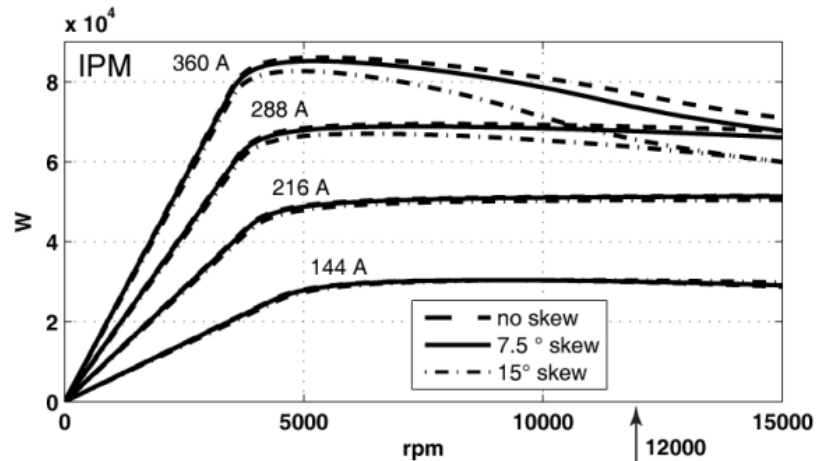
- Con la corrente nominale hanno una coppia iniziale simile; i due motori sincroni erogano una potenza a 12000 rpm pressoché identica, mentre il motore a induzione esplica una potenza inferiore
- Con la corrente di sovraccarico, il motore sincrono con configurazione circonferenziale mostra una coppia e una potenza di uscita a 12000 rpm inferiore

## Controllo della coppia con dispositivi elettronici



- Monitoraggio di tensione e corrente forniti al motore e regolazione della quantità di potenza per evitare la presenza di regioni statoriche interessate da indebolimenti di flusso
- Produce miglioramenti di efficienza ma sono possibili regolazioni errate che originano delle perdite
- Il sistema più utilizzato è il Field Oriented Control (FOC)

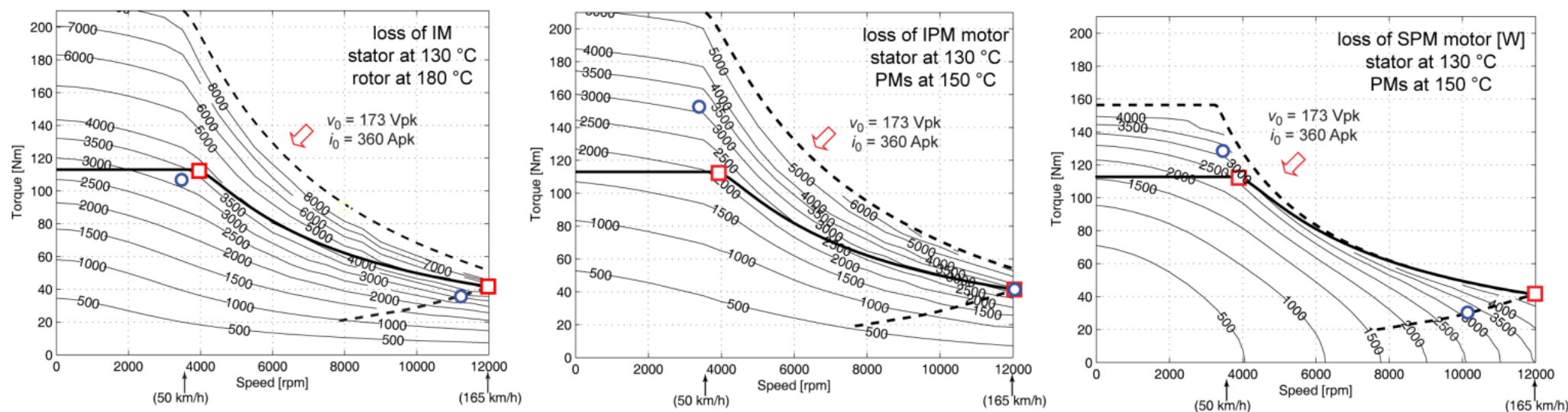
## Soluzioni costruttive per limitare l'ondulazione di coppia



- Si è scelto di inclinare di un angolo specifico gli avvolgimenti del rotore rispetto all'asse del motore
- Non si registra una significativa perdita di potenza all'uscita: riteniamo valida la soluzione adottata

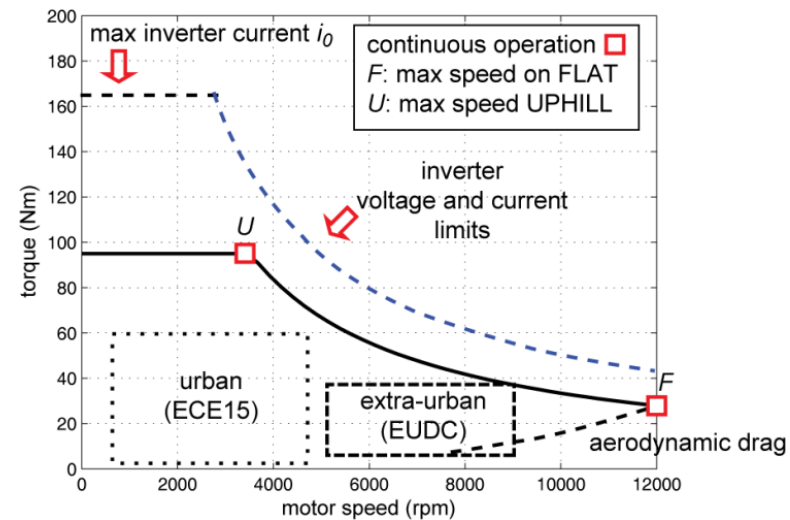
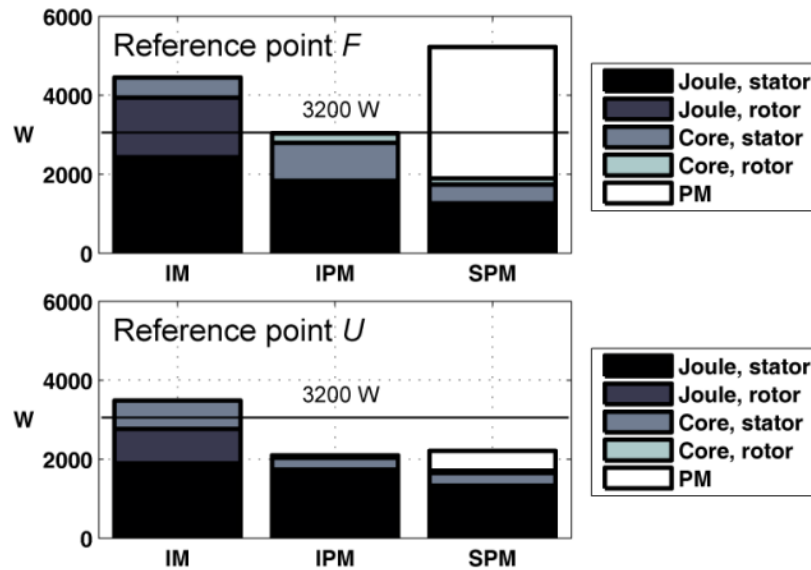


## Confronto delle perdite dei tre motori



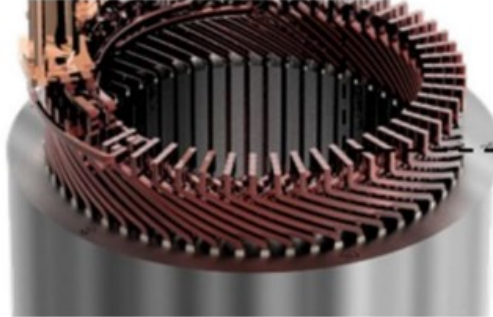
- Valutazione delle perdite totali per mezzo di Analisi a Elementi Finiti
- Mappe di perdita che evidenziano le dissipazioni dei tre motori sia con corrente nominale che con corrente di sovraccarico
- Il motore a induzione è il meno efficiente alle basse velocità; il motore a magneti permanenti con configurazione circonferenziale ha le perdite maggiori nelle alte velocità; quello con configurazione radiale è il più efficiente

## Confronto delle perdite dei tre motori



- Valutazione delle perdite nei punti specifici F (a velocità massima) e U (regione di coppia massima e costante)
- Alle basse velocità i due motori sincroni presentano le perdite più basse
- Alle alte velocità il motore a induzione ha consistenti perdite per effetto Joule; il motore a magneti permanenti con configurazione circonferenziale presenta forti dissipazioni per isteresi e correnti parassite nei magneti

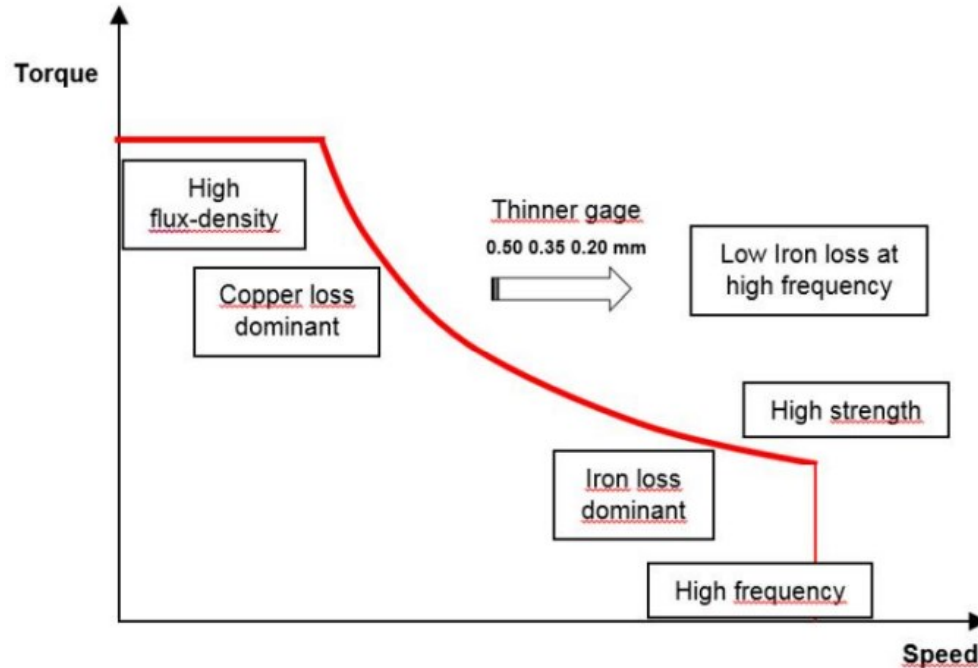
## Soluzioni costruttive per minimizzare le perdite



- I conduttori a filo piatto presentano molti vantaggi rispetto ai fili tondi, come, per esempio, fattore di riempimento delle fessure fino all'80%, riduzione delle perdite per effetto Joule e migliore dissipazione del calore
- La soluzione più economica per la produzione dei rotori dei motori a induzione è mediante pressofusione di alluminio nella gabbia di scoiattolo, mentre utilizzando il rame si hanno notevoli miglioramenti nell'efficienza



## Tecnologie per la realizzazione dei motori elettrici



- Necessità di soluzioni costruttive che includano motori prive di terre rare o propulsori con quantità di PM ridotte per limitare i costi
- L'acciaio elettrico è molto lavorabile ed economico oltre a presentare buone proprietà magnetiche
- A seconda della sua composizione e delle lavorazioni cambiano le sue caratteristiche magnetiche e lo rendono adatto ad un particolare utilizzo
- La lega CoFe dà macchine elettriche con densità di potenza elevate a discapito dei costi

---

## Conclusioni

- Il settore della trazione elettrica è in rapida crescita ed è importante conseguire gli obiettivi di prestazione imposti senza far lievitare i costi in maniera eccessiva
- Dal confronto tra le tre tipologie di motore si evince che il motore a induzione necessita di una corrente maggiore per erogare la stessa potenza ad alte velocità e presenta perdite maggiori. Alle alte velocità il motore sincrono con magneti a configurazione circonferenziale è meno efficiente rispetto all'altra tipologia, che risulta essere la migliore in tutti i casi, essendo, tuttavia, la più costosa
- A causa anche della ridotta disponibilità di terre rare diventa necessario cercare delle soluzioni alternative come quelle precedentemente illustrate
- I motori a induzione e i motori a riluttanza commutata rappresentano delle valide alternative, anche se occorre prestare attenzione nel dimensionamento del motore e nella scelta dell'acciaio elettrico per soddisfare i requisiti di prestazione ed evitare un aumento dei costi di produzione