



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA ED AEROSPAZIALE

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2021/2022

Ottobre 2022

**Simulazione numerica del comportamento
termomeccanico e prestazionale di un
propulsore elettrico a due velocità per
applicazioni off-road**

Relatori

Prof. Aurelio Somà

Prof. Francesco Mocera

Candidato

Leonardo Gasponi

277454

Sommario

A partire dagli anni '70 del XX secolo è iniziata a crescere l'attenzione nei confronti dei veicoli elettrici, sulla spinta di fattori socio-economici come la crisi petrolifera degli anni '70 e gli effetti su persone ed ambiente. Per ridurre l'inquinamento globale, dovuto per lo più alle emissioni di CO_2 , una delle soluzioni adottate riguarda la sostituzione dei veicoli equipaggiati con motori a combustione interna con i veicoli a propulsione elettrica. Grazie all'evoluzione dell'elettronica di potenza, della tecnologia delle batterie ed al potenziamento delle infrastrutture per la ricarica, si stima che in futuro l'utilizzo dei veicoli elettrici sarà sempre più ampio. I principali requisiti per un motore elettrico sono l'elevata affidabilità, elevata efficienza, il costo ragionevole, un'alta densità di potenza e sovraccarico di coppia a basse velocità. I motori a magneti permanenti sono la tipologia di motori più diffusa, grazie alla loro alta efficienza ed alla elevata potenza specifica. Proprio perchè l'efficienza è uno dei requisiti chiave per un motore elettrico, questa tesi mira all'incremento di efficienza dell'interno sistema di propulsione di un motore elettrico, descrivendo la soluzione adottata per raggiungere questo obiettivo. Tramite l'utilizzo di Motor-CAD, software agli elementi finiti, si analizzano le caratteristiche elettromagnetiche del motore sincrono a magneti permanenti, le prestazioni del motore durante un ciclo di lavoro e l'incremento di prestazioni dovute all'integrazione di un sistema di raffreddamento. Infine si studia la variazione, rispetto alla configurazione originale del motore a magneti permanenti, delle grandezze elettriche tramite l'utilizzo del software Matlab-Simulink.

Ringraziamenti

Prima di cominciare vorrei ringraziare il Prof. Aurelio Somà ed il Prof. Francesco Mocera per l'opportunità offertami, per la disponibilità e supporto datomi durante l'intero sviluppo di questo lavoro di tesi. Senza dimenticare la gentilezza e l'aiuto dell'ing. Stefano Venuti, vorrei ringraziarlo per il tempo dedicatomi e per la condivisione delle sue conoscenze e competenze.

Vorrei dedicare questa tesi ai miei genitori, per tutti gli sforzi e i sacrifici da loro fatti, sperando di renderli orgogliosi con questo lavoro e nei giorni futuri.

Ai miei nonni ed ai miei zii, per tutto il loro amore.

Alla mia fidanzata Daniela, sempre pronta ad aiutarmi nei momenti di sconforto ed ad avere condiviso gran parte delle gioie di questo capitolo.

A tutti i miei amici, per tutti questi giorni trascorsi insieme, i bei momenti, le risate, grazie per aver fatto parte di questa avventura.

Infine, grazie a me stesso, ricordando tutti i momenti in cui non ho mollato e mi sono rialzato, fino a raggiungere questo traguardo.

Indice

Lista delle figure	V
Lista delle tabelle	VII
1 Introduzione	1
1.1 Veicoli elettrici	2
1.2 Veicoli ibridi	3
1.3 Obiettivo della tesi e analisi della letteratura	5
2 Motore sincrono a magneti permanenti	9
2.1 Tipologia di motori	10
2.1.1 Motori in corrente continua	10
2.1.2 Motore asincrono	11
2.1.3 Motore sincrono a magneti permanenti	12
2.1.4 Motore a riluttanza magnetica	13
2.2 Richiami di elettromagnetismo	14
2.3 Principi di funzionamento	15
2.4 Modello del circuito elettrico del motore PM sincrono	16
2.5 Definizione delle costanti del motore	19
3 Geometria del motore originale	22
3.1 Avvolgimenti di statore	24
4 Nuova configurazione del motore elettrico	27
4.1 Differenze con motore originale	28
4.2 Confronto tra le due configurazioni	29
4.2.1 Parametri del circuito elettrico e costanti	30
4.2.2 Mappe di efficienza	31
5 Confronto tra motore originale e nuova configurazione	35
5.1 Potenza dissipata ed efficienza del motore a magneti permanenti	35
5.2 Efficienza motore originale e nuova configurazione	37
5.3 Efficienza in un ciclo di lavoro	39
5.3.1 Definizione del ciclo di lavoro	39
5.3.2 Simulazioni del ciclo di lavoro	41
6 Sistema di raffreddamento	44
6.1 Geometria del sistema di raffreddamento	46
6.2 Simulazione del ciclo di lavoro	47
6.3 Efficienza con sistema di raffreddamento	51
6.4 Transitorio termico e involuppo termico	51

7 Modello MATLAB Simulink	56
7.1 Parametri per il modello Simulink	57
7.2 Validazione modello	58
7.3 Calcolo analitico dei parametri del modello	61
7.4 Risultati del doppio avvolgimento	67
8 Conclusioni	71

Lista delle figure

1.1	Esperimento di Michael Faraday	1
1.1.1	Schema propulsione elettrica	3
1.2.1	Schema ibrido serie	4
1.2.2	Schema ibrido parallelo	4
1.2.3	Schema ibrido serie-parallelo	5
1.3.1	Curva coppia-velocità (blu) e curva potenza-velocità (rosso) per un motore elettrico	6
2.1	Classificazione motori elettrici	9
2.1.1.1	Motore DC	11
2.1.2.1	Motore asincrono	12
2.1.3.1	Motore sincrono a magneti permanenti.	12
2.1.4.1	Motore a riluttanza commutata	13
2.1.4.2	Motore a riluttanza sincrona	13
2.3.1	Magnete libero di ruotare all'interno di un anello di ferro con due poli	15
2.4.1	Vista radiale del motore PM sincrono	174
2.4.2	Piano abc (assi magnetici degli avvolgimenti di statore) e piano ab.	17
2.4.3	Sistema di riferimento $\alpha\beta$ e dq	18
3.1	Vista radiale (a) e assiale (b) del motore a magneti permanenti	23
4.1	Curva caratteristica convenzionale	28
4.2	Curva caratteristica del motore con doppio avvolgimento	28
4.2.1	Collegamento degli avvolgimenti di fase	30
4.2.2.1	: Mappe di efficienza per il motore a doppio avvolgimento	32
5.1.1	Schema lineare degli avvolgimenti per la nuova configurazione	36
5.1.2	Schema lineare degli avvolgimenti per il motore originale	37
5.2.1	Confronto tra le mappe di efficienza.	38
5.3.1.1	Dati acquisiti	41
5.3.2.1	Potenza erogata ottenuta da Motor-CAD	41
5.3.2.2	Temperature dei due motori	42
6.1	Temperature dei componenti in quattro cicli di lavoro consecutivi	44
6.1.1	Sezione assiale del sistema di raffreddamento	47
6.2.1	Andamento temperature con o senza sistema di raffreddamento per un ciclo di lavoro	49
6.2.2	Andamento temperature con o senza sistema di raffreddamento per quattro cicli di lavoro	50
6.4.1	Transitorio termico alle condizioni nominali per il motore senza sistema di raffreddamento	52

6.4.2 Transitorio termico alle condizioni nominali per il motore con sistema di raffreddamento	52
6.4.3 Curve di smagnetizzazione N30UH	53
6.4.4 Curva di involuppo e curva caratteristica per il motore con sistema di raffreddamento	54
7.1 Modello simulink del motore a magneti permanenti	57
7.1.1 Flusso concatenato dei magneti permanenti durante un ciclo di lavoro	58
7.2.1 Validazione modello Simulink	60
7.3.1 Approssimazione delle testate degli avvolgimenti di statore	62
7.3.2 Circuito magnetico per il calcolo dell'induttanza nel traferro	63
7.3.3 Flusso disperso negli slot	64
7.3.4 Confronto grandezze simulate	66
7.4.1 Confronto delle correnti nel motore a doppio avvolgimento	68
7.4.2 Confronto delle tensioni nel motore a doppio avvolgimento	69

Lista delle tabelle

1.2.1 Grado di ibridazione	5
2.1 Motori elettrici utilizzati nei veicoli commerciali	10
3.1 Specifiche tecniche	22
3.2 Specifiche geometriche	23
3.1.1 Descrizione avvolgimenti	245
3.1.2 Parametri motore originale	25
4.1.1 Descrizione avvolgimenti	279
4.1.2 Parametri nuova configurazione	29
4.2.1.1 Parametri per la configurazione parallelo	31
4.2.1.2 Parametri per la configurazione serie	31
4.2.2.1 Valori di efficienza	33
5.2.1 Valori di efficienza	39
5.3.2.1 Analisi efficienza da Motor-CAD	45
6.1 Caratteristiche per il rame	45
6.2 Efficienza del motore a diverse temperature	45
6.1.1 Dimensioni canali di raffreddamento	46
6.1.2 Proprietà del fluido di raffreddamento	47
6.3.1 Efficienza del motore con e senza circuito di raffreddamento	51
6.4.1 Classe di isolamento degli avvolgimenti di statore	53
7.2.1 Confronto dei risultati del modello	60

Capitolo 1

Introduzione

La sfida più grande del *XXI* secolo riguarda l'emergenza della crisi climatica dovuta al surriscaldamento globale, causato dall'attività dell'uomo. Gli accordi di Parigi del 2015 mirano a limitare l'aumento della temperatura sotto agli 1,5°C rispetto ai livelli pre-industriali, grazie alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera. [1]

Una delle misure adottate per affrontare questa crisi consiste nell'utilizzo di veicoli elettrici in sostituzione ai vecchi veicoli a combustione interna. Oggigiorno, in qualsiasi settore della mobilità sono presenti sempre più veicoli a propulsione elettrica, sia nel trasporto pubblico, con bus, tram e treni, sia nei mezzi privati, come automobili e motocicli. Nel 2021, infatti, si stima che siano stati venduti 6,5 milioni di veicoli elettrici in tutto il mondo, con un aumento del 109% rispetto al 2020 [2] e con un trend in continua crescita.

Il primo motore elettrico è stato sperimentato intorno agli anni '40 del *XVIII* secolo dal monaco Andrew Gordon e dallo sperimentatore Benjamin Franklin e consisteva in un semplice dispositivo elettrostatico. Nel 1820 il fisico e chimico Hans Christian Ørsted scoprì che un filo percorso da corrente genera un campo magnetico che esercita una forza su un magnete. La prima dimostrazione della conversione di energia elettrica in moto rotatorio è stata data da Michael Faraday nel 1821.

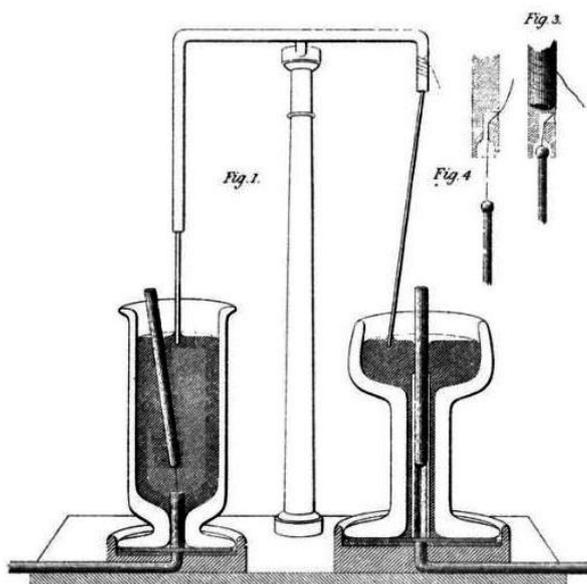


Fig.1.1: Esperimento di Michael Faraday [3]

Nel 1827 il fisico ungherese Ányos Jedlik iniziò i suoi esperimenti sulle bobine elettromagnetiche, ottenendo una rotazione continua del motore grazie all'invenzione del commutatore. I primi sviluppi si concentrarono su motori DC, poiché potevano essere alimentati da sistemi di distribuzione di energia esistenti. Inoltre, la velocità poteva essere controllata variando la tensione di alimentazione o l'intensità della corrente negli avvolgimenti. Il problema dei motori DC però era la necessità di spazzole, che richiedevano una costante manutenzione.

Per arrivare al primo veicolo elettrico per il trasporto di essere umani bisogna risalire al 1881, grazie all'inventore francese Gustave Trouvè, il quale sfruttò lo sviluppo in quegli anni delle batterie ricaricabili.

L'interesse per i veicoli elettrici aumentò negli anni a cavallo del 1900, raggiungendo un'adozione due volte superiore ai veicoli a benzina, grazie a numerosi vantaggi, come l'autoavviamento, la silenziosità, l'elevato rendimento, l'elevata affidabilità ed il fatto di essere a zero emissioni. Nonostante questo, i veicoli elettrici avevano poca autonomia, erano pesanti ed ingombranti e la ricarica richiedeva una certa infrastruttura.

In seguito, grazie all'invenzione del motorino di avviamento per i motori a benzina, unito ai difetti della trazione elettrica, quest'ultima cadde in disuso fino agli anni '60.

L'attenzione ai veicoli elettrici è tornata a partire dagli anni '70, dovuta a fattori socio-economici e grazie all'evoluzione delle tecnologie. Grazie all'avvento dell'elettronica di potenza, i motori DC sono stati sostituiti dai motori AC, i quali non richiedono manutenzione e sono caratterizzata da elevata efficienza.

1.1 Veicoli elettrici

L'elettronica di potenza e la microelettronica hanno fatto progressi significativi negli ultimi anni, consentendo ai propulsori di tipo elettrico di competere in termini di prestazioni con i motori a combustione interna. Sebbene non ci siano stati sviluppi comparabili nello stoccaggio di energia nelle batterie, i progressi delle tecniche di produzione e dei materiali hanno offerto soluzioni per raggiungere gli obiettivi dei motori elettrici. Il minor impatto ambientale dell'elettricità rispetto alla benzina è il fattore principale alla base della rinascita dell'interesse per i veicoli elettrici.[4]

Nella sua forma più elementare, il sistema di azionamento elettrico è composto da una batteria, un convertitore, un motore, un rapporto di trasmissione e un ingranaggio differenziale, come mostrato in Fig.1.1.1.

Oltre alla ripartizione della coppia con l'ausilio del differenziale è possibile anche una propulsione a due (o quattro) motori, posizionati sui mozzi delle ruote. In questo caso, ogni motore necessita di un proprio convertitore con controllo di velocità e coppia, garantendo in ogni circostanza la ripartizione della coppia richiesta. [5]

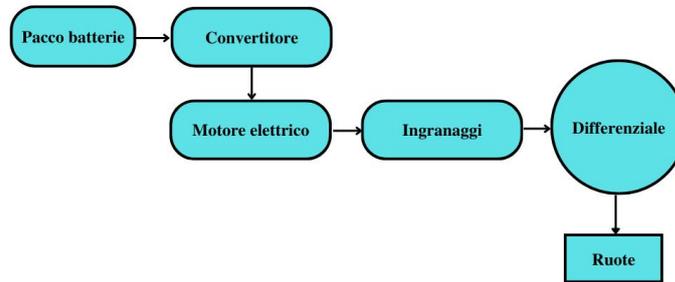


Fig.1.1.1: Schema propulsione elettrica

In un sistema di propulsione elettrica, il convertitore DC-DC è un dispositivo che converte una tensione in ingresso DC non regolata in un altro livello regolato di tensione di uscita DC, con un'efficienza di conversione superiore al 90%. [6]

Nei motori elettrici in corrente alternata è necessario l'utilizzo di un inverter, che è un dispositivo che permette di convertire un corrente continua in ingresso in una corrente alternata in uscita, variandone i parametri di ampiezza e frequenza. [7]

1.2 Veicoli ibridi

Il motivo dell'esistenza di veicoli ibridi è dovuta all'idea che una fonte di energia aggiuntiva, come un motore a combustione interna, possa aumentare l'autonomia di un veicolo elettrico.

Un veicolo elettrico ibrido è un tipo di veicolo che combina un motore a combustione interna convenzionale con un sistema di propulsione elettrico [8] e può essere classificato nei seguenti modi.

Ibrido serie: il motore elettrico fornisce la potenza di trazione mentre il motore a combustione interna genera elettricità attraverso un generatore per alimentare il motore elettrico. Il pacco batterie accumula quindi l'energia extra. Il motore a combustione interna può funzionare principalmente nella zona di efficienza ottimale poiché è isolato dalle ruote motrici. L'energia del motore a combustione interna viene trasformata due volte prima di essere utilizzata per azionare le ruote. Di conseguenza, il sistema è meno efficiente di quello parallelo.

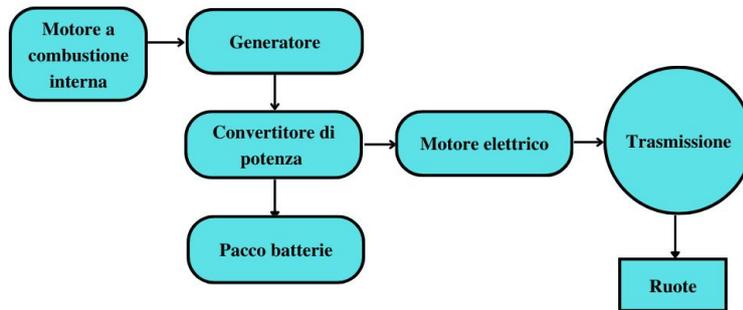


Fig.1.2.1: Schema ibrido serie

Ibrido parallelo: Le ruote e il propulsore ibrido sono collegati meccanicamente in modo diretto. Le ruote sono azionate da un motore elettrico che può recuperare parte dell'energia frenante per ricaricare le batterie o supportare il motore a combustione interna durante l'accelerazione. La macchina elettrica può quindi essere costruita con capacità minori, il che riduce costi e volume. Il motore a combustione interna e il motore elettrico possono essere accoppiati meccanicamente con diverse configurazioni.

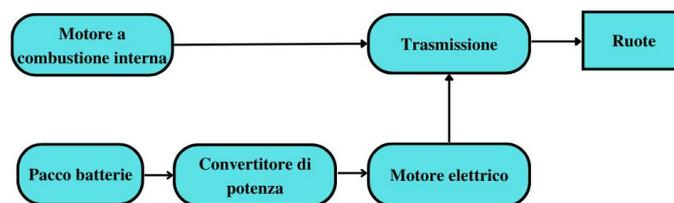


Fig.1.2.2: Schema ibrido parallelo

Ibrido serie-parallelo: Vengono uniti insieme la struttura serie e la struttura parallela per ottenere i vantaggi di entrambe le configurazioni. Il motore a combustione interna contemporaneamente alimenta il motore elettrico e ricarica la batteria tramite il generatore.

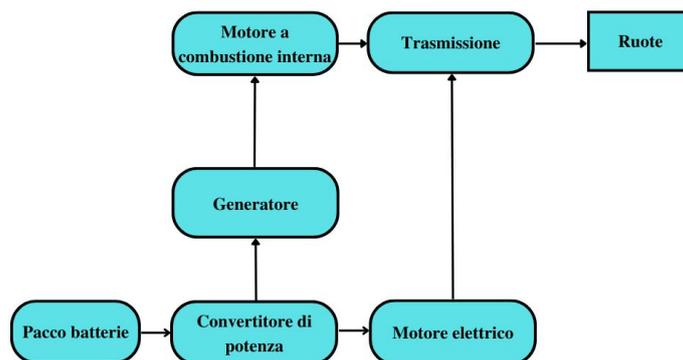


Fig.1.2.3: Schema ibrido serie-parallelo

Inoltre, il veicolo elettrico ibrido può essere classificato in base alla potenza ed alla funzione del motore elettrico. [9]

Tab.1.2.1: Grado di ibridazione

	Ibridazione minima	Ibridazione leggera	Ibridazione piena
Potenza [kW]	2,5	10-20	30-50
Livello di tensione [V]	12	100-200	200-300
Risparmio energetico [%]	5-10	20-30	30-50
Aumento di costo [%]	3	20-30	30-40

1.3 Obiettivo della tesi e analisi della letteratura

Lo scopo di questa tesi consiste nel migliorare l'efficienza delle prestazioni di un motore sincrono a magneti permanenti già studiato in lavori precedenti, utilizzando una doppia configurazione per gli avvolgimenti dello statore. Con l'aiuto del software Motor-CAD, si confrontano le prestazioni del motore originale con le prestazioni del motore con la nuova configurazione, in particolar modo analizzando le perdite e quindi l'efficienza dei due motori. Viene studiato il funzionamento dei motori su un ciclo di lavoro, acquisito da un sistema elettronico basato su Arduino, montato su una Fiat Panda, sulla quale è stato installato il sistema di propulsione elettrico. Si simulano i miglioramenti delle prestazioni inserendo un sistema di raffreddamento ed infine è stato costruito modello del motore a magneti permanenti tramite Matlab-Simulink, con il quale si simula il comportamento del motore elettrico a due velocità.

Nel capitolo 2 si espone una panoramica dei motori elettrici, in particolare sul motore sincrono a magneti permanenti, introducendo il suo modello elettrico e le equazioni che descrivono il sistema. Nel capitolo 3 viene introdotta la geometria del motore originale, con particolare attenzione agli avvolgimenti di statore ed ai parametri del circuito elettrico. Nel capitolo 4 viene analizzata la nuova configurazione degli avvolgimenti, confrontando i parametri elettrici e le prestazioni tra le due configurazioni. Nel capitolo 5 si studiano le perdite, l'efficienza del motore originale e le prestazioni del motore con la nuova configurazione, per poi passare al capitolo 6, in cui vengono analizzate le prestazioni ed i miglioramenti ottenuti inserendo un sistema di raffreddamento. Infine nel capitolo 7, viene costruito un modello del motore a magneti permanenti su Simulink, per studiare le variazioni delle grandezze elettriche dovute alla variazione del collegamento serie-parallelo degli avvolgimenti dello statore.

Per descrivere la tecnologia della propulsione a due velocità, bisogna partire da due requisiti fondamentali di un motore elettrico: durante le fasi di partenza, è necessaria una coppia elevata per consentire ai veicoli elettrici di accelerare rapidamente ed inoltre è richiesta la capacità di guidare ad alta velocità. L'utilizzo di una trasmissione a più rapporti è il metodo tradizionale per soddisfare entrambe le esigenze. Tuttavia, questo approccio riduce l'efficienza del veicolo e aumenta le dimensioni, il peso e il costo del sistema di propulsione. Il sistema di propulsione elettrica a due velocità permette di collegare in serie gli avvolgimenti dello statore durante le fasi di avvio in modo da incrementare la coppia erogata e di collegare gli avvolgimenti in parallelo a velocità più elevate. [10]

Nel caso più semplice, la curva coppia-velocità riportata in blu nella Fig.1.3.1 ha due regioni: coppia costante e potenza costante. Nelle fasi di partenza è necessaria un'elevata coppia, ma la capacità di sovraccarico dell'inverter è molto limitata principalmente a causa della natura dei semiconduttori, di conseguenza è necessario una taglia più grande dell'inverter, che si traduce in un aumento dei costi dell'intero sistema di propulsione. [11]

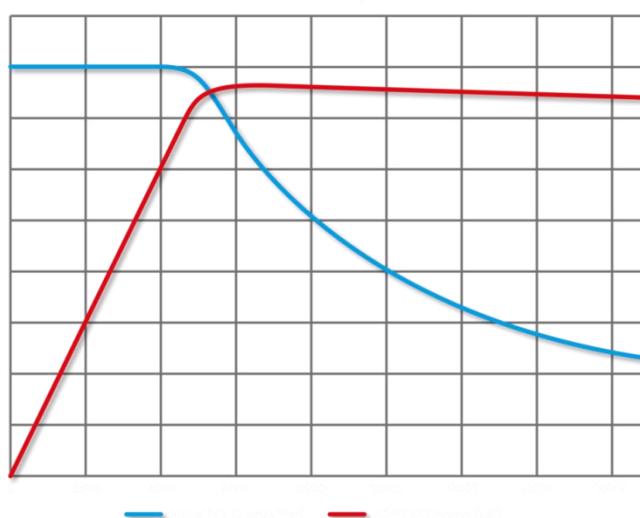


Fig.1.3.1: Curva coppia-velocità (blu) e curva potenza-velocità (rosso) per un motore elettrico [12]

Durante la fase di avvio la coppia richiesta è elevata, mentre la velocità di rotazione è bassa. Invece, a velocità elevate, la corrente e la tensione sono limitate dai valori nominali. Quindi la taglia dell'inverter è determinata dalla corrente prodotta nelle fasi di partenza e dalla tensione nel normale funzionamento del motore.

Collegando gli avvolgimenti dello statore in serie è possibile ottenere un'elevata coppia di spunto senza sovraccaricare l'inverter, mentre durante il normale funzionamento viene utilizzato il collegamento in parallelo.

Precedenti lavori dimostrano come sia possibile utilizzare la trasmissione elettrica a due velocità per limitare la taglia dell'inverter e contemporaneamente produrre un'elevata coppia in partenza, fino a raggiungere un incremento dell'accelerazione del 22,8%. [13]

La trasmissione elettrica a due velocità potrebbe trovare applicazione in scooter elettrici, al posto di un riduttore con rapporto fisso, che riduce inevitabilmente il range di velocità oppure al posto di un Variomatic, il quale riduce l'efficienza del sistema di trasmissione. [14]

Capitolo 2

Motore sincrono a magneti permanenti

Le auto elettriche hanno iniziato a competere con i veicoli a combustione interna grazie ai significativi progressi dell'elettronica di potenza, delle macchine elettriche e delle batterie agli ioni di litio. Inoltre, a causa dei problemi ambientali negli ultimi decenni sono stati concentrati maggiori sforzi e studi sullo sviluppo di veicoli elettrici al fine di aumentarne la velocità e l'autonomia. Quando si progetta un motore elettrico si deve tener conto di alcune considerazioni come: la richiesta di potenze e coppie elevate, un'ampia gamma di velocità a potenza costante, un'elevata coppia di spunto, alto livello di affidabilità e robustezza e un costo accettabile. Inoltre sono richieste alte efficienze per tutto l'intervallo di velocità e coppia ed una buona regolazione della tensione su un'ampio campo di velocità. [15]

In Fig.2.1 è riportata una classificazione dei motori elettrici, partendo da una prima divisione tra motori AC e DC.

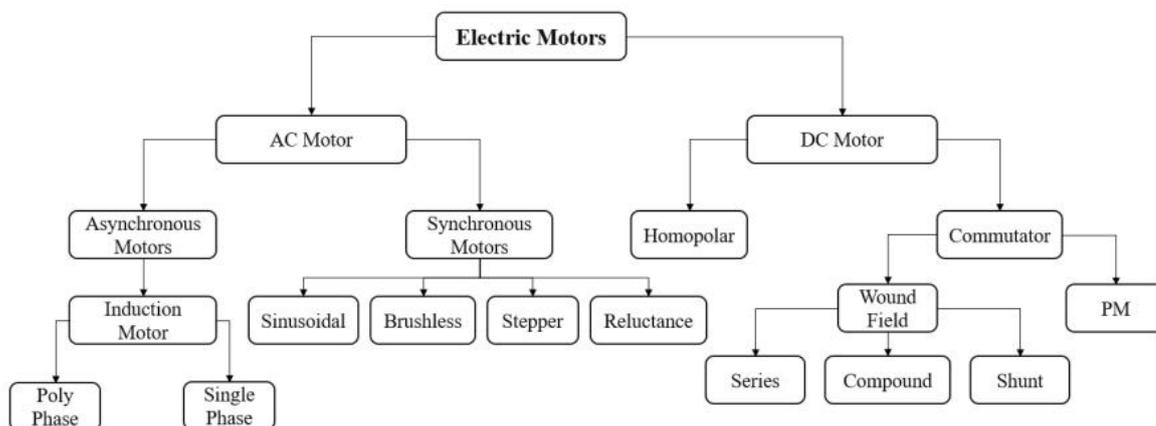


Fig.2.1: Classificazione motori elettrici [16]

Come riportato nella Tab.2.1, il motore sincro a magneti permanenti è il motore più utilizzato nei veicoli elettrici, data la sua elevata efficienza, densità di potenza e potenza specifica.

Tab.2.1: Motori elettrici utilizzati nei veicoli commerciali [16]

EV model	Year	Motor Type	Motor Power [kW]	Max. Speed [rpm]	Max. Torque [Nm]
Tesla	2013	IM	225	14,800	430
Prius	2004	PM	50	6000	400
Prius	2010	PM	60	13,500	207
Prius	2017	PM	53	17,000	163
Leaf	2012	PM	80	10,390	280
Leaf	2017	PM	80	10,390	280
Lexus	2008	PM	110	10,230	300
Camry	2013	PM	70	14,000	270
BMW i3	2016	PM	125	11,400	250
Sonata	2011	PM	30	6000	205

2.1 Tipologia di motori

I veicoli moderni utilizzano comunemente sia motori a magneti permanenti sia motori a induzione grazie alla loro elevata efficienza operativa. I motori a corrente continua erano preferiti nei primi veicoli elettrici, mentre il loro uso attuale è abbastanza ridotto. Oggi giorno la ricerca volge verso il motore a riluttanza commutata, per migliorarne il funzionamento e minimizzarne i costi. [15]

2.1.1 Motori in corrente continua

I motori DC hanno lo statore costituito da magneti permanenti ed il rotore è composto avvolgimenti percorsi da corrente. Il loro funzionamento si basa sulla legge di Lorentz: gli avvolgimenti del rotore, immersi in un campo magnetico e percorsi da corrente, sono soggetti ad una forza che fa girare il rotore. Hanno bisogno di spazzole e commutatori per invertire il verso della corrente negli avvolgimenti del rotore, per questo sono soggetti a problemi di affidabilità e richiedono una continua manutenzione. [17]

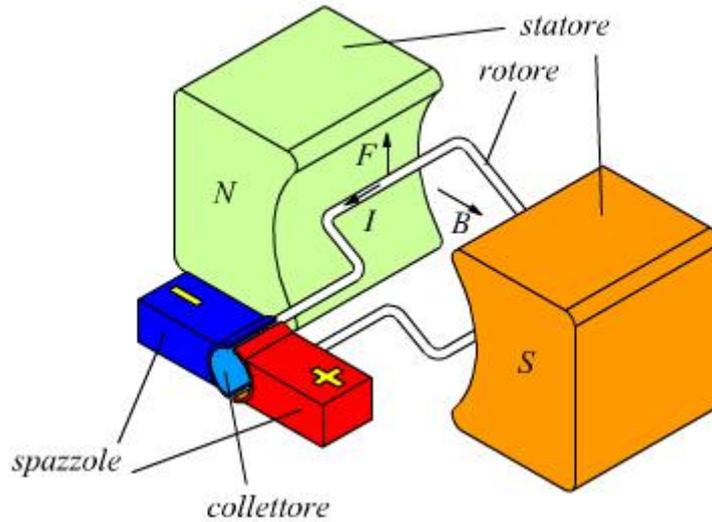


Fig.2.1.1.1: Motore DC [18]

2.1.2. Motore asincrono

I motori asincroni, detti anche motori ad induzione, sono abbastanza utilizzati nei veicoli elettrici grazie a diversi vantaggi, come il basso costo, l'affidabilità, l'assenza di manutenzione e alta efficienza nella regione a potenza costante. Di contro, hanno bassa efficienza a basse velocità ed una bassa densità di coppia.

Il motore asincrono è formato da uno statore, su cui sono presenti più espansioni polari, sfasate tra di loro. Su di esse sono presenti gli avvolgimenti di statore, percorsi da corrente alternata, la quale genera un campo magnetico rotante (*campo di statore*) alla stessa frequenza della corrente di alimentazione. Gli avvolgimenti del rotore, ruotando a velocità inferiore al campo di statore, sono soggetti a correnti indotte (legge di Faraday), le quali a loro volta generano un campo magnetico che si oppone alle variazioni di flusso (legge di Lenz). L'interazione tra il campo di statore e il campo magnetico rotorico fa sì che nasca una coppia sul rotore. Il campo di statore ruota alla velocità di sincronismo, legata alla frequenza di alimentazione e al numero di poli:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.1.2.1)$$

Mentre la velocità del rotore è determinata dallo scorrimento, dipendente dal carico sul rotore:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.1.2.2)$$

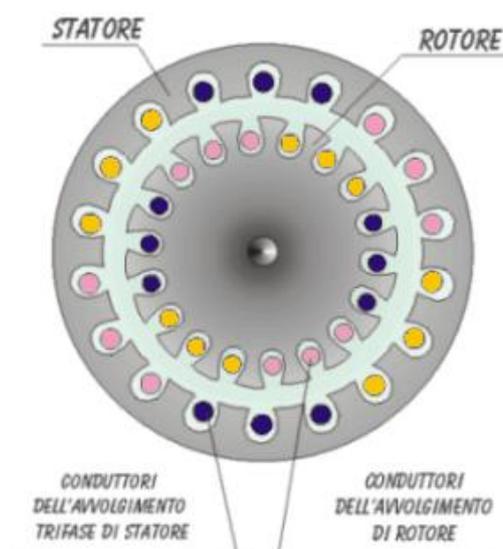


Fig.2.1.2.1: Motore asincrono [19]

2.1.3. Motore sincrono a magneti permanenti

I motori a magneti permanenti sono molto utilizzati nei veicoli elettrici grazie alla loro elevata efficienza, alta densità di coppia e affidabilità. Il costo di questi motori è molto elevato a causa del costo dei materiali con cui sono realizzati i magneti permanenti. [20]

Sullo statore sono presenti degli avvolgimenti polifase, sfasati tra loro, mentre sul rotore sono montati i magneti permanenti. Il campo magnetico rotante generato dagli avvolgimenti di statore trascina in modo sincrono il campo magnetico rotante dei magneti permanenti. I magneti possono essere montati sulla superficie del rotore (*motore sincrono a magneti superficiali*) o internamente ad esso (*motore sincrono a magneti interni*).

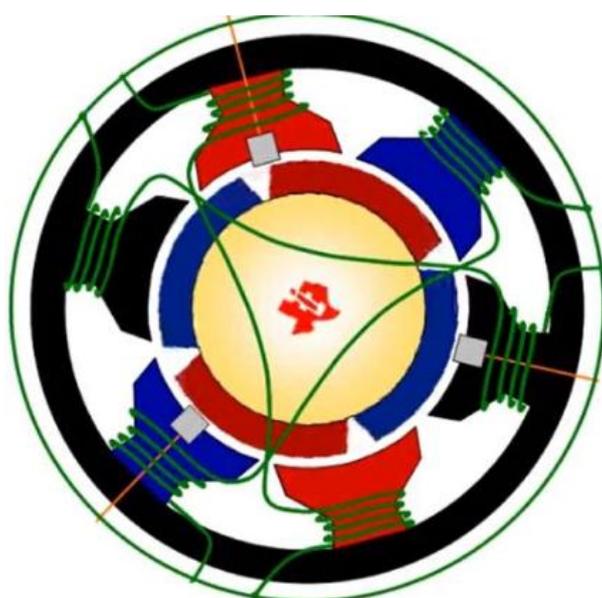


Fig.2.1.3.1: Motore sincrono a magneti permanenti [21]

2.1.4. Motore a riluttanza magnetica

Il motore sfrutta l'induzione tra poli magnetici del rotore, che non sono né avvolgimenti né magneti permanenti. Possono essere di due tipi:

- I *motori a riluttanza commutata*, in cui lo statore è costituito da più poli elettromagnetici salienti ed il rotore è costituito da materiale ferromagnetico con delle propaggini che agiscono come poli magnetici salienti per la riluttanza magnetica. Alimentando opportunamente gli avvolgimenti dello statore si genera una coppia che fa ruotare il rotore fino alla posizione di minima riluttanza.

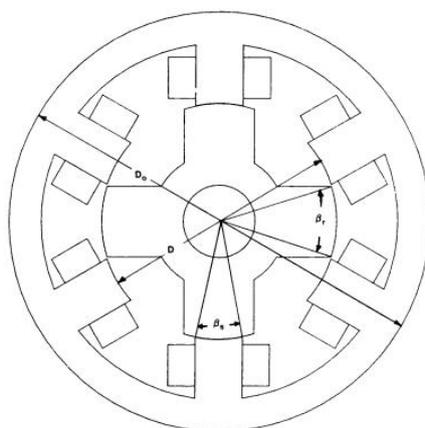


Fig.2.1.4.1: Motore a riluttanza commutata [22]

- I *motori a riluttanza sincrona* sono composti da un rotore di forma circolare con dei “vuoti” predisposti per introdurre percorsi preferenziali per il flusso magnetico, lungo l’asse diretto di minima riluttanza. Il rotore ruota a velocità sincrona con il campo magnetico degli avvolgimenti di statore cercando la posizione di minima riluttanza.

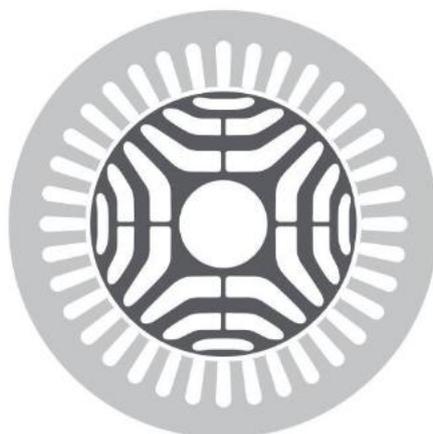


Fig.2.1.4.2: Motore a riluttanza sincrona [23]

2.2. Richiami di elettromagnetismo

Un motore elettrico è in grado di convertire l'energia elettrica in ingresso in energia meccanica, tipicamente per produrre il moto rotatorio di un albero. La trasformazione è possibile grazie alle leggi dell'elettromagnetismo, descritto da quattro equazioni differenziali alle derivate parziali, formulate da Maxwell nel 1865. L'espressione delle equazioni di Maxwell nel vuoto ed in forma locale è la seguente:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (2.2.3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.2.4)$$

Dalla legge di Ampere-Maxwell, una corrente alternata produce una densità di flusso magnetico, all'interno di un materiale la relazione è la seguente:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.2.5)$$

In cui μ è il prodotto tra la permeabilità magnetica nel vuoto μ_0^1 e la permeabilità relativa μ_r^2 .

La legge di Faraday afferma che la forza elettromotrice in un circuito chiuso è uguale all'opposto della variazione nel tempo del flusso magnetico concatenato al circuito.

$$e = -\frac{d\phi_c}{dt} = -\frac{d(N\phi)}{dt} \quad (2.2.6)$$

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad (2.2.7)$$

A è la superficie attraversata dalla densità del flusso magnetico.

¹ $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m

² Per materiali ferromagnetici $\mu_r = 10^4 \div 10^5$

La forza di Lorentz agente su una particella elettrica di carica q con velocità \vec{v} , immersa in un campo magnetico \vec{B} è pari:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (2.2.8)$$

Per un conduttore:

$$\vec{F}_L = I\vec{l} \wedge \vec{B} \quad (2.2.9)$$

E considerando la legge di Faraday:

$$e = \int_l (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (2.2.10)$$

2.3. Principi di funzionamento

Il motore a magneti permanenti funziona sulla base di concetti molto semplici: i magneti sono attratti dal ferro, poli opposti si attraggono, poli uguali si respingono e una corrente che scorre in una bobina di filo genera un elettromagnete.

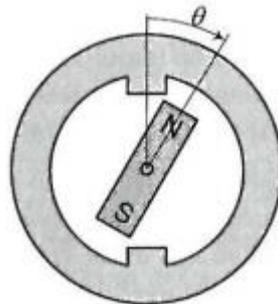


Fig.2.3.1: Magnete libero di ruotare all'interno di un anello di ferro con due poli [24]

Considerando la Fig.2.3.1, se il magnete ruota sentirà una forza che cerca di allinearlo con i poli dello statore, nelle posizioni di riposo $\vartheta = 0$ e $\vartheta = 180^\circ$. Queste posizioni di riposo sono anche stabili, poichè qualsiasi disturbo produce una coppia che tende a riportare il magnete nella posizione di allineamento con i due poli. Questa coppia è chiamata *coppia di riluttanza* o *coppia di cogging*, che nella maggior parte delle applicazioni è indesiderata.

Invece, immaginando di inserire delle bobine intorno ai poli dello statore e applicando una corrente alle bobine, i poli diventano elettromagneti. Così le estremità del magnete e i rispetti poli elettromagneti opposti generano un altro tipo di coppia, chiamata *coppia di allineamento* o *coppia reciproca*, ed è quella sfruttata dai motori a magneti permanenti. Di solito, vengono utilizzate più coppie polari per far ruotare il magnete

continuamente, chiamati *avvolgimenti*. Il magnete così può ruotare continuamente energizzando correttamente le bobine con un processo chiamato *commutazione*.

Nei motori elettrici di solito si definiscono due misure di posizione e velocità. La posizione e velocità meccanica si riferiscono all'albero motore, un giro completo corrisponde a $360^\circ M$ o $2\pi \text{ radM}$.

La posizione elettrica invece è definita come il movimento del rotore di $360^\circ E$ o $2\pi \text{ radE}$ per cui il rotore ritorna nella stessa orientazione magnetica.

La relazione tra posizione elettrica e magnetica si basa sul numero dei magneti permanenti ed è la seguente:

$$\vartheta_e = \frac{N_m}{2} \vartheta_m \quad (2.3.1)$$

Differenziando rispetto al tempo si ottiene:

$$\omega_e = \frac{N_m}{2} \omega_m \quad (2.3.2)$$

$$f_e = \frac{N_m}{2} f_m \quad (2.3.3)$$

2.4 Modello del circuito elettrico del motore PM sincrono

Per simulare il comportamento fisico del motore si sfruttano le trasformazioni di Clarke e Park, le quali permettono di scrivere le equazioni del circuito elettrico secondo due assi: l'asse diretto e l'asse in quadratura. Il primo è definito secondo la direzione di minima riluttanza, quindi parallelo all'asse delle coppie polari, mentre il secondo è perpendicolare all'asse diretto, come mostrato nella figura seguente.

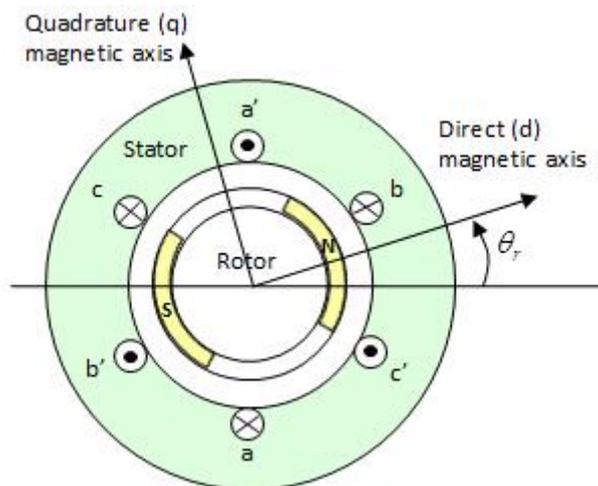


Fig.2.4.1: Vista radiale del motore PM sincrono [25]

Il motore a magneti permanenti è comandato da tre correnti alternate di pari ampiezza e sfasate tra loro di 120° E.

$$i_a = I \sin(\vartheta_e) \quad (2.4.1)$$

$$i_b = I \sin\left(\vartheta_e + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.4.2)$$

$$i_c = I \sin\left(\vartheta_e - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (2.4.3)$$

La trasformata di Clarke converte le componenti **abc** di un sistema trifase nel dominio del tempo in componenti **$\alpha\beta 0$** di un dominio stazionario. Sotto vengono riportati i due sistemi di riferimento e la matrice della trasformazione di Clarke, ricordando che per un sistema bilanciato la somma delle correnti è uguale a zero e quindi:

$$i_0 = \sqrt{\frac{1}{3}}(i_a + i_b + i_c) = 0 \quad (2.4.4)$$

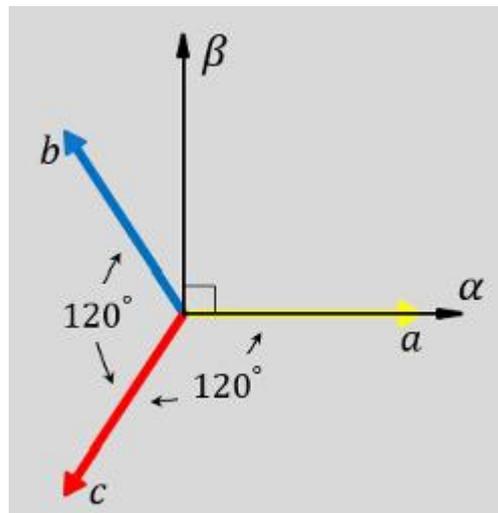


Fig.2.4.2: Piano abc (assi magnetici degli avvolgimenti di statore) e piano ab. [25]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.4.5)$$

In seguito si applica la trasformata di Park, che converte le componenti del sistema $\alpha\beta$ nel sistema di riferimento rotante dq , rappresentato nella figura sotto.

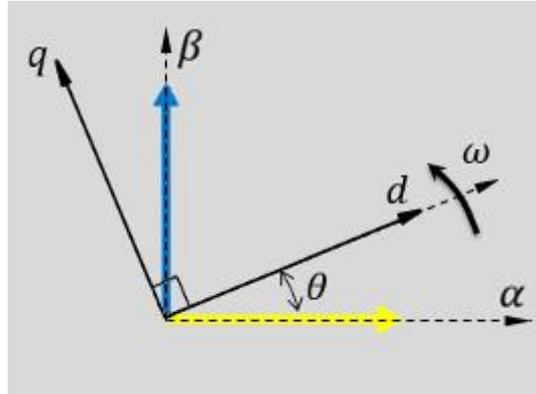


Fig.2.4.3: Sistema di riferimento $\alpha\beta$ e dq . [25]

ϑ è l'angolo compreso tra l'asse d e l'asse α ed è definito come $\vartheta = \omega t$, in cui ω è la velocità angolare del rotore espressa in rad/s. La trasformata di Park quindi è descritta dalla matrice di rotazione:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.4.6)$$

E quindi dopo aver applicato le due trasformate, si possono scrivere le seguenti equazioni secondo i due assi ortogonali d e q :

$$v_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - N\omega i_q L_q \quad (2.4.7)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + N\omega (i_d L_d + \psi_m) \quad (2.4.8)$$

In cui:

- R_s è la resistenza di fase;
- L_d e L_q sono rispettivamente l'induttanza di statore secondo l'asse d e secondo l'asse q . Di solito $L_d = L_q$;
- N è il numero di coppie polari;
- ψ_m è il flusso concatenato dei magneti permanenti.

Il prodotto scalare fra fasore tensione e fasore corrente indica la potenza in ingresso nel motore:

$$W = 3 \bar{v} \times \bar{i} = 3 (v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.4.9)$$

Sostituendo v_d e v_q nell'equazione si ottiene poi l'espressione della coppia prodotta:

$$T = 3N[\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2.4.10)$$

Poichè $L_d = L_q$ l'espressione della coppia si semplifica e quindi l'unica componente della corrente che produce coppia è i_q , di conseguenza la logica di controllo opera tenendo $i_d = 0$.

Sostituendo nell'equazione della potenza v_d e v_q si ottiene:

$$W = 3(R_s i_d^2 + R_s i_q^2 + L_s \dot{i}_d i_d + L_s \dot{i}_q i_q + N \omega i_q) \quad (2.4.11)$$

E isolando i termini:

$$P_{in} = P_{Joule} + \frac{dE_L}{dt} + T \cdot \omega \quad (2.4.12)$$

Che rispettivamente sono:

- Potenza elettrica in ingresso;
- Derivata dell'energia negli avvolgimenti;
- Potenza erogata all'albero.

A questi vanno aggiunte le perdite nel ferro e le perdite nei magneti permanenti e di conseguenza l'efficienza del motore a magneti permanenti è così definita:

$$\eta = \frac{T \cdot \omega}{P_{in}} \quad (2.4.13)$$

2.5 Definizione delle costanti del motore

In un motore a magneti permanenti la coppia prodotta e la forza contro-elettromotrice indotta sono legate rispettivamente alla corrente circolante negli avvolgimenti ed alla velocità di rotazione del rotore.

Dalla legge di Faraday, la variazione nel tempo del flusso del campo magnetico attraverso una superficie chiusa delimitata da un circuito elettrico produce in quest'ultimo una forza contro-elettromotrice indotta pari alla variazione nel tempo del flusso. Analiticamente:

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\vartheta_e}{dt} \frac{d\lambda}{d\vartheta_e} = \omega_e \frac{d\lambda}{d\vartheta_e} = \frac{N_m}{2} \omega_m \frac{d\lambda}{d\vartheta_e} = \frac{N_m}{2} \omega_m \frac{2N\phi_g}{\pi} \quad (2.5.1)$$

Poichè:

$$\phi_g = B_g A_g = B_g R_{rot} \vartheta_p L_{st} = \frac{2\pi}{N} B_g R_{rot} L_{st} \quad (2.5.2)$$

L'espressione della forza contro-elettromotrice diventa:

$$e = 2NB_g L_{st} R_{rot} \omega_m = K_e \cdot \omega_m \quad (2.5.3)$$

Il fattore $2N$ è dovuto ai due slot, ognuno avente N conduttori; B_g è la densità del flusso magnetico nel traferro; L_{st} e R_{rot} sono la lunghezza assiale del motore ed il raggio del rotore ed infine ω_m è la velocità angolare del motore espressa in $radM/s$. Di solito i costruttori usano il valore RMS linea-linea della forza contro-elettromotrice, di conseguenza la sua unità di misura è V_{RMS}/rad . Dall'equilibrio di potenza, considerando il rendimento unitario, l'espressione della coppia è la seguente:

$$T = \frac{e \cdot i}{\omega_m} \quad (2.5.4)$$

$$T = 2NB_g L_{st} R_{rot} i = K_t \cdot i \quad (2.5.5)$$

K_t è espressa in Nm/A_{RMS} .

Un utile indicatore di prestazione è la costante di motore, la quale esprime l'efficienza di coppia e descrive quanto efficientemente un motore genera coppia in funzione delle perdite I^2R .

La costante di motore è indipendente sia dalla corrente, sia dal numero di giri degli avvolgimenti e quindi fornisce una buona indicazione delle prestazioni del motore.

$$K_m = \frac{T}{\sqrt{I^2 R}} = \frac{K_t}{\sqrt{R}} \quad (2.5.6)$$

Capitolo 3

Geometria del motore originale

In questo capitolo viene introdotta la geometria del motore sincrono a magneti permanenti, facendo particolare attenzione alla definizione degli avvolgimenti di statore, poichè sono quei componenti che poi verranno modificati introducendo la nuova configurazione. Tramite Motor-CAD vengono ricavati i parametri del motore, come le costanti, la resistenza di fase e le induttanze degli avvolgimenti secondo l'asse diretto e l'asse in quadratura.

Come punto di partenza, si ricava la geometria del motore sincrono a magneti permanenti da lavori svolti precedentemente [26], conoscendo le specifiche del costruttore, riportate nelle tabelle seguenti. Tramite un processo di reverse engineering e applicando criteri per la progettazione dei motori elettrici, è stato costruito il modello sul software Motor-CAD.

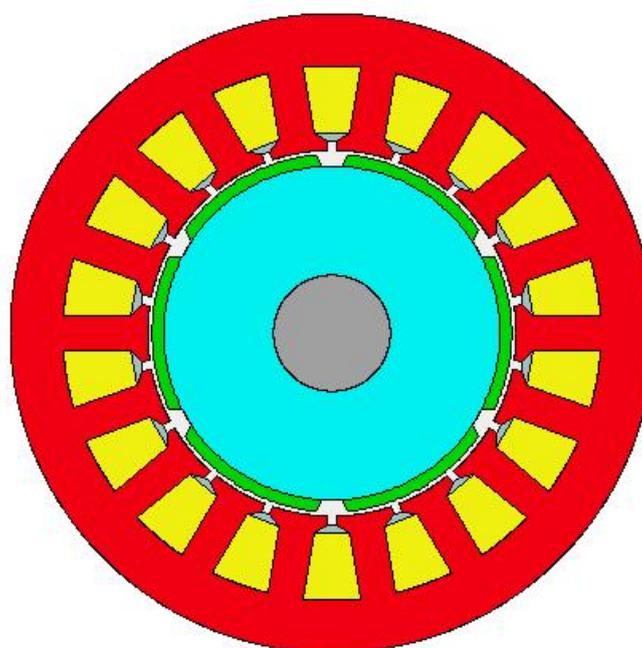
Tab.3.1: Specifiche tecniche [26]

Dati	Valore	Unità
Numero di poli	6	/
n_{nom}	9000	rpm
P_{nom}	43	kW
C_{nom}	45	Nm
K_e	0.2	$\frac{V_{RMS}}{rad/s}$
$BEMF_{nom}$	180	V_{RMS}
K_t	0.3	$\frac{Nm}{A_{RMS}}$
I_{nom}	150	A_{RMS}

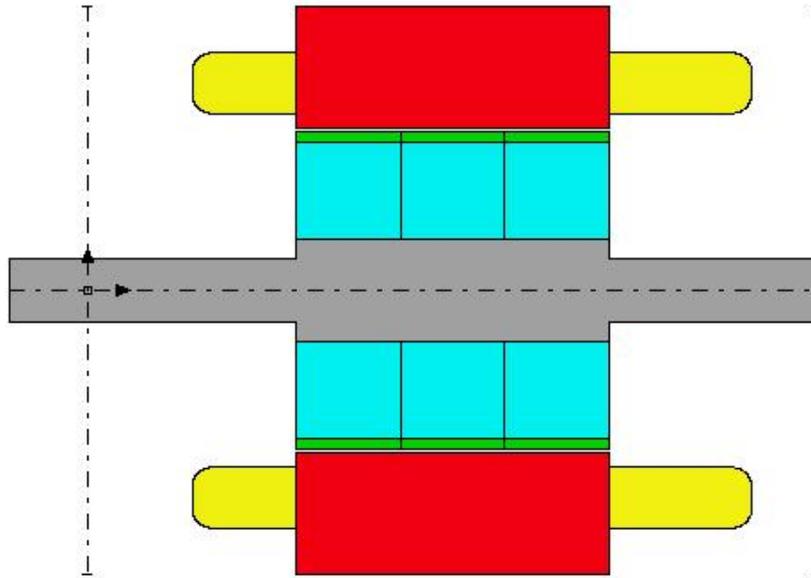
Tab.3.2: Specifiche geometriche [26]

Dati	Valore	Unità
ϕ_{ext}	248	mm
ϕ_{albero}	30	mm
L_{motore}	280	mm

Nelle immagini seguenti sono rappresentate la geometria radiale e assiale del motore sincrono a magneti permanenti, in cui si possono osservare in particolare il numero di slot $N_s = 18$ ed il numero dei magneti $N_m = 6$. Non vengono riportati gli altri dati geometrici inseriti, per non appesantire la lettura.



(a) Sezione radiale



(b) Sezione assiale

Fig.3.1: Vista radiale (a) e assiale (b) del motore a magneti permanenti.

Dalle Fig.3.1(b) si può notare che i magneti sono disposti su tre file. Per ridurre la coppia di cogging³, ogni fila dei magneti è sfalsata di un certo angolo α , determinato dalle relazioni seguenti [26]:

$$\alpha_{skew_E} = \frac{N_m}{N_s} * 180 = 60^\circ E \quad (3.1)$$

$$\alpha_{skew_M} = \alpha_{skew_E} * \frac{2}{N_m} = 20^\circ M \quad (3.2)$$

$$\alpha_{skew} = \frac{\alpha_{skew_M}}{N_{file}} = 6.67^\circ \quad (3.3)$$

3.1 Avvolgimenti di statore

Il lavoro di tesi si concentra sul collegamento tra gli avvolgimenti di statore, per cui è necessario analizzare la loro distribuzione all'interno di ogni slot. Di seguito si riportano i parametri inseriti, in cui si può notare principalmente il numero di giri per ogni bobina $N = 2$ e la connessione in serie degli avvolgimenti (Percorsi paralleli=1).

³ La coppia di cogging descrive l'interazione tra i magneti del rotore e i denti dello statore, ed è considerata dannosa per i motori sincroni a magneti permanenti.

Tab.3.1.1: Descrizione avvolgimenti

Dati	Valore	Unità
Numero di fasi	3	/
Numero di giri	2	/
Percorsi paralleli	1	/
Conduttori/giro	30	/
Conduttori/slot	120	/
ϕ_{cavo}	0.885 - 0.800	mm

I risultati ottenuti dalla simulazione elettromagnetica su Motor-CAD sono:

Tab.3.1.2: Parametri motore originale

Dati	Valore	Unità
K_t	0.317	$\frac{Nm}{A_{RMS}}$
K_e	0.181	$\frac{V_{RMS}}{rad/s}$
R_s	0.008851	Ω
L_d	0.09114	mH
L_q	0.09239	mH

Capitolo 4

Nuova configurazione del motore elettrico

In questo capitolo si studia la nuova configurazione del motore a magneti permanenti, con doppio avvolgimento per aumentare l'efficienza totale del sistema. Vengono riportate le differenze con il motore originale ed infine vengono confrontati i parametri del circuito elettrico tra le due configurazioni, serie e parallelo.

Introducendo la tecnologia del sistema di propulsione a due velocità, si deve sapere che i veicoli elettrici richiedono elevata coppia durante le fasi di partenza ed elevata velocità in percorsi autostradali. Il metodo comune è l'uso di un cambio di velocità, ma questo ovviamente aumenta la dimensione del veicolo, il suo peso, il costo ed infine causa inevitabilmente una riduzione dell'efficienza complessiva.

Il sistema di propulsione elettrica a due velocità funziona durante la fase di partenza collegando gli avvolgimenti di statore in serie, mentre ad alte velocità si collegano gli avvolgimenti in parallelo tramite dei relè. Il sistema a doppio avvolgimento presenta i seguenti vantaggi [10]:

- Elevata coppia durante la fase di partenza, di conseguenza elevata accelerazione.
- La connessione in parallelo permette operazioni ad alte velocità
- Anche se il motore opera in condizioni di sovraccarico, l'inverter è mantenuto all'interno del suo range di potenza, quindi è possibile utilizzare un inverter più piccolo, più economico e più affidabile.
- Il cambio di velocità non è più necessario, riducendo così i costi, la dimensione, il peso ed aumenta l'efficienza totale.

La Fig.4.1 mostra la curva caratteristica coppia/velocità per un motore elettrico convenzionale, mentre nella Fig.4.2 si riporta la curva caratteristica per il motore a doppio avvolgimento. A bassi numeri di giri la coppia è più elevata grazie al collegamento in serie, mentre ad un determinato numero di giri avviene la commutazione degli avvolgimenti in parallelo per il restante campo operativo.

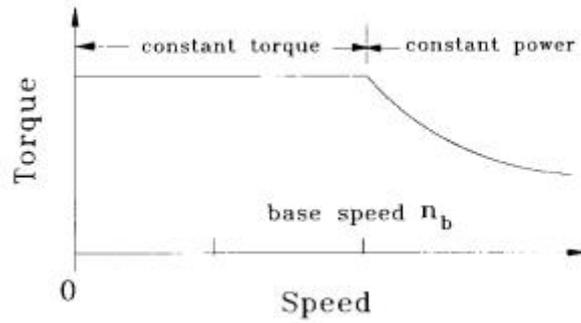


Fig.4.1: Curva caratteristica convenzionale [10]

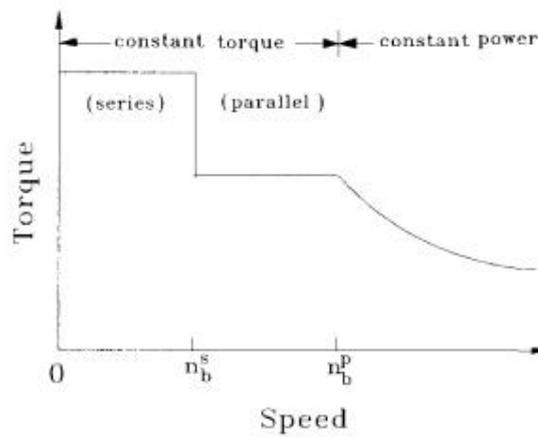


Fig.4.2: Curva caratteristica del motore con doppio avvolgimento [10]

4.1 Differenze con motore originale

L'obiettivo della modifica al motore originale è ottenere le stesse costanti K_t e K_e con una configurazione in parallelo. Poichè la connessione in parallelo dimezza le costanti, come descritto nell'equazione 2.5.3 e nell'equazione 2.5.5 è sufficiente raddoppiare i numeri di giri degli avvolgimenti statorici.

Come si nota dalle tabelle sottostanti, un numero di giri delle bobine doppio comporta ovviamente un numero di conduttori per slot anch'esso doppio.

I valori di K_t e K_e sono identici, mentre il parametro importante che cambia è la resistenza di fase, che risulta pari alla metà della resistenza del motore originale.

Tab.4.1.1: Descrizione avvolgimenti

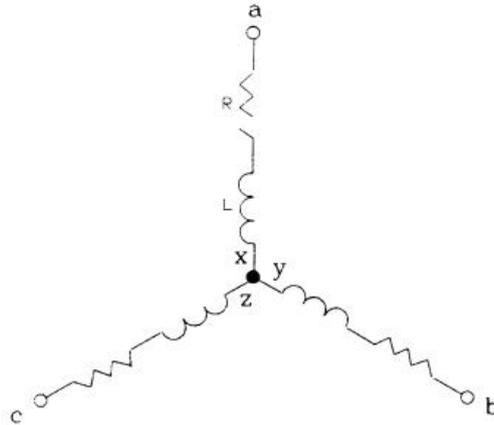
Dati	Valore	Unità
Numero di fasi	3	/
Numero di giri	4	/
Percorsi paralleli	2	/
Conduttori/giro	30	/
Conduttori/slot	240	/
ϕ_{cavo}	0.885 - 0.800	mm

Tab.4.1.2: Parametri nuova configurazione

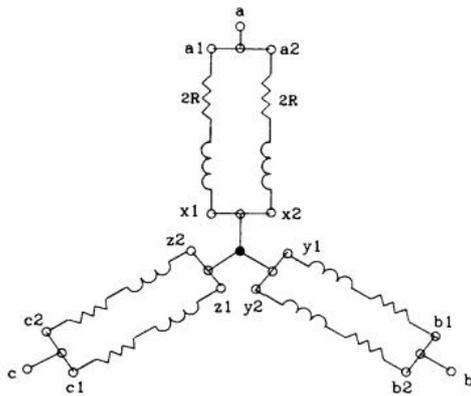
Dati	Valore	Unità
K_t	0.317	$\frac{Nm}{A_{RMS}}$
K_e	0.181	$\frac{V_{RMS}}{rad/s}$
R_s	0.004426	Ω
L_d	0.09081	mH
L_q	0.09197	mH

4.2 Confronto tra le due configurazioni

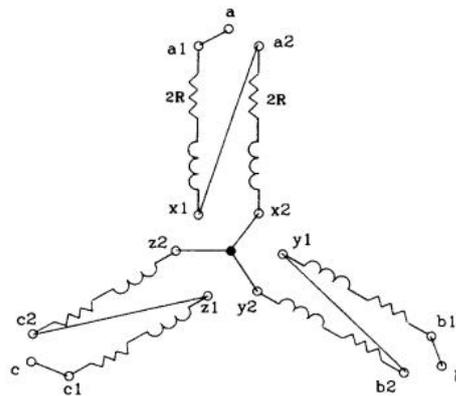
In questo paragrafo si analizzano le configurazioni serie e parallelo degli avvolgimenti, in modo da capire le variazioni dei parametri del circuito elettrico che serviranno dopo nella costruzione del modello MATLAB. La Fig.4.2.1 mostra i collegamenti degli avvolgimenti statorici. I valori di resistenza per ogni percorso sono indicati con $2R$, in base al collegamento serie o parallelo il valore della resistenza di fase cambierà di conseguenza.



(a) Collegamento a stella degli avvolgimenti delle tre fasi



(b) Avvolgimenti in parallelo



(c) Avvolgimenti in serie

Fig.4.2.1: Collegamento degli avvolgimenti di fase [10]

4.2.1 Parametri del circuito elettrico e costanti

Come già si può notare dalla Fig.4.2.1 (b)-(c), la resistenza di fase per il collegamento in serie è pari a 4 volte la resistenza di fase per gli avvolgimenti in parallelo, teoria verificata ovviamente anche dalle simulazioni su Motor-CAD. Lo stesso vale per le induttanze, mentre il flusso concatenato dei magneti permanenti della configurazione serie è il doppio di quello per la configurazione parallelo. Infine, la costante di coppia e la costante di forza contro elettromotrice sono entrambi di valore doppio nella configurazione serie rispetto alle costanti della configurazione parallelo.

Nelle tabelle seguenti sono riportati i parametri che descrivono il modello elettrico del motore sincrono a magneti permanenti, prima per la configurazione in parallelo, poi quella in serie.

Tab.4.2.1.1: Parametri per la configurazione parallelo

Dati	Valore	Unità
R_s	0.004426	Ω
L_d	0.09157	mH
L_q	0.09281	mH
ψ_m	50.08	mVs
K_t	0.317	$\frac{Nm}{A_{RMS}}$
K_e	0.181	$\frac{V_{RMS}}{rad/s}$

Tab.4.2.1.2: Parametri per la configurazione serie

Dati	Valore	Unità
R_s	0.0177	Ω
L_d	0.359	mH
L_q	0.3637	mH
ψ_m	98.9	mVs
K_t	0.621	$\frac{Nm}{A_{RMS}}$
K_e	0.363	$\frac{V_{RMS}}{rad/s}$

4.2.2 Mappe di efficienza

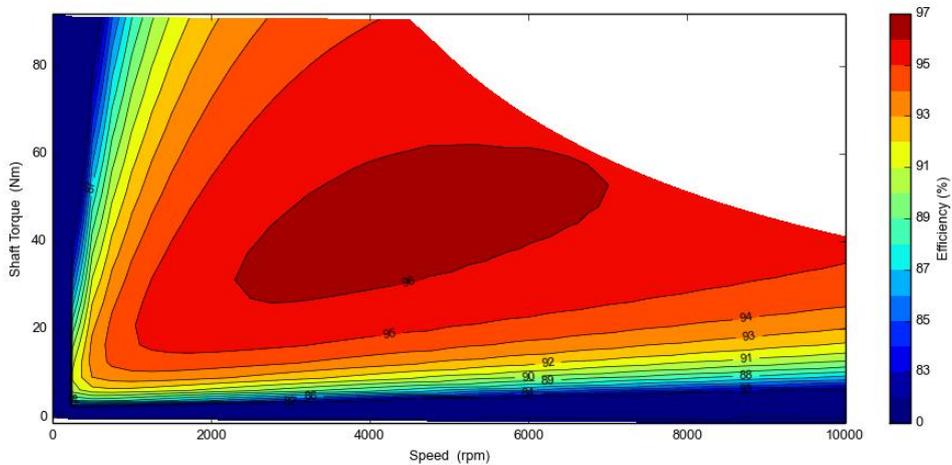
In questo paragrafo viene spiegata la sostanziale uguaglianza tra l'efficienza tra le due configurazioni del motore modificato. Come verrà spiegato successivamente in modo più dettagliato, le perdite all'interno di un motore sincrono a magneti permanenti sono composte da tre termini: perdite nel rame, perdite nel ferro e perdite nei magneti permanenti. Usando il doppio avvolgimento, le perdite sono identiche per le due

configurazioni, in particolar modo si concentra l'attenzione sulle perdite nel rame che sono governate dall'effetto Joule:

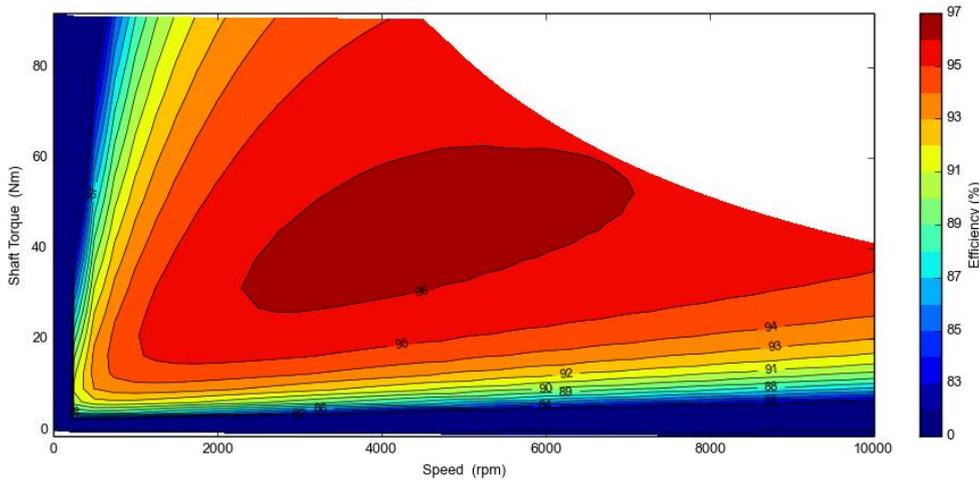
$$P_J = R I^2 \quad [W] \quad (4.2.2.1)$$

A parità di coppia prodotta all'albero, nella configurazione in parallelo è necessaria una corrente di fase di valore doppio rispetto alla configurazione in serie e quindi la potenza dissipata per effetto Joule è la medesima.⁴

Teoria confermata dalle mappe di efficienza riportate di seguito, sia per la configurazione in parallelo che per la configurazione serie. Nelle tabelle successive vengono riportati le aree delle mappe per cui l'efficienza superi un dato valore.



(a) Mappa di efficienza del collegamento in parallelo



(b) Mappa di efficienza del collegamento in serie

Fig.4.2.2.1 : Mappe di efficienza per il motore a doppio avvolgimento

⁴ Si ricorda che $K_t^s = 2K_t^p$ e che $R_s^s = 4R_s^p$

Tab.4.2.2.1: Valori di efficienza

	Parallelo	Serie
Efficienza sopra 97%	0	0
Efficienza sopra 96%	14,42	14,87
Efficienza sopra 95%	48,36	48,36
Efficienza sopra 94%	61,59	61,59
Efficienza sopra 93%	69,22	69,22
Efficienza sopra 92%	73,35	73,36
Efficienza sopra 91%	77,03	77,03
Efficienza sopra 90%	79,95	79,95
Efficienza sopra 89%	82,14	82,14
Efficienza sopra 88%	83,81	83,89
Efficienza sopra 87%	85,28	85,28
Efficienza sopra 86%	86,51	86,51

Capitolo 5

Confronto tra motore originale e nuova configurazione

In questo capitolo vengono analizzate e messe a confronto l'efficienza del motore originale e l'efficienza del motore con il doppio avvolgimento. Nel primo paragrafo vengono introdotte le perdite all'interno di un motore sincrono a magneti permanenti. A seguire poi vengono riportate le mappe di efficienza, l'efficienza e l'andamento termico durante un ciclo di lavoro definito.

5.1 Potenza dissipata ed efficienza del motore a magneti permanenti

Le perdite all'interno di un motore elettrico sono dovute a tre contributi: le perdite nel rame, perdite nel ferro e le perdite nei magneti. Quest'ultime sono molto minori rispetto alle prime due e quindi possono essere trascurate. Le perdite nel ferro si dividono in perdite per isteresi e perdite per correnti parassite e si creano quando un materiale ferromagnetico è soggetto di un'eccitazione variabile nel tempo [24]. Le perdite per isteresi sono descritte dalla seguente equazione:

$$P_i = k_i f B^n \quad (5.1.1)$$

In cui k_i è una costante che dipende dal materiale e dalle dimensioni, f è la frequenza dell'eccitazione, B è l'ampiezza della densità di flusso magnetico all'interno del materiale e n è un esponente dovuto al tipo di materiale, di solito compreso tra 1.5 e 2.5.

Invece, le perdite dovute alle correnti parassite sono descritte dalla relazione seguente:

$$P_{cp} = k_{cp} h^2 f^2 B^2 \quad (5.1.2)$$

Dove h è lo spessore del materiale e k_e è una costante dipendente dal materiale. Infine, le perdite nel rame sono dovute all'effetto Joule:

$$P_J = R I^2 \quad (5.1.3)$$

Su questo termine incide il numero di giri degli avvolgimenti di statore.

A parità di coppia prodotta, nella configurazione in parallelo del motore modificato con $N = 4$, la potenza dissipata per effetto Joule è metà rispetto a quella dissipata nel motore originale con $N = 2$.

Dalle figure sottostanti, ricavate da Motor-CAD, si capisce il motivo per cui la resistenza di fase della configurazione in parallelo è pari alla metà della resistenza del motore originale. Nella Fig.5.1.1 gli avvolgimenti sono divisi in due percorsi, evidenziando la connessione in parallelo. Supponendo di dividere gli avvolgimenti della Fig.5.1.2 in due segmenti, come nella Fig.5.1.1, la resistenza di ogni segmento è pari alla metà di ogni percorso parallelo della Fig.5.1.1, perchè il numero di giri degli avvolgimenti è la metà⁵. Indicando questa resistenza con R , la resistenza per il percorso parallelo sarà $2R$, di conseguenza la resistenza di fase per la nuova configurazione degli avvolgimenti sarà uguale a R perchè collegati in parallelo, mentre la resistenza di fase per il motore originale è uguale a $2R$ perchè i due segmenti sono collegati in serie.

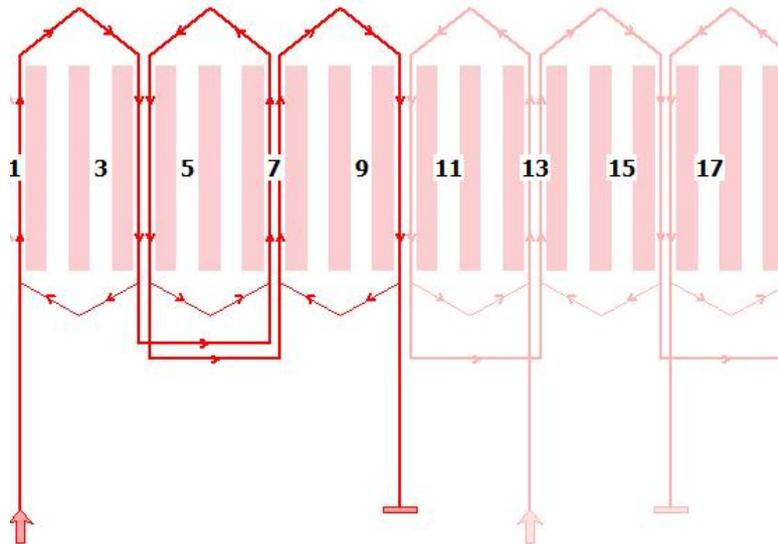


Fig.5.1.1: Schema lineare degli avvolgimenti per la nuova configurazione

⁵ Si ricorda la formula per calcolare la resistenza di un avvolgimento $R = \frac{\rho l}{S}$. La lunghezza degli avvolgimenti è direttamente proporzionale al numero dei giri degli avvolgimenti.

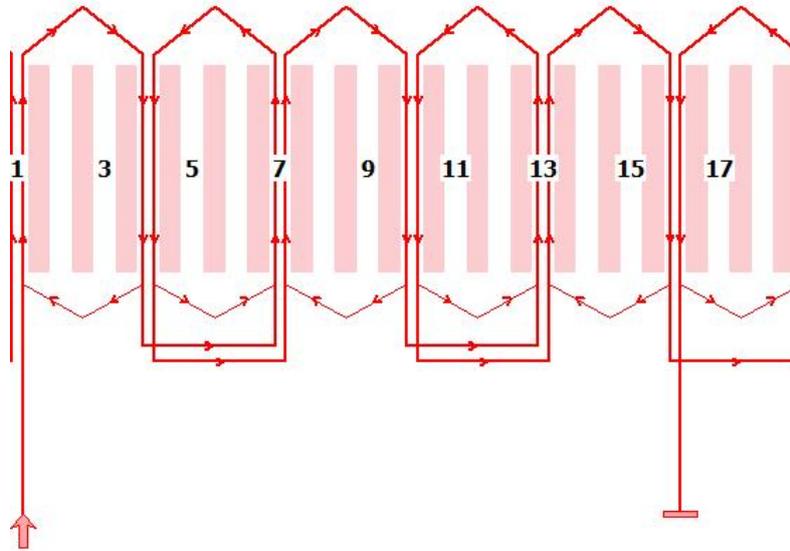


Fig.5.1.2: Schema lineare degli avvolgimenti per il motore originale

Poichè l'efficienza è definita nel modo seguente:

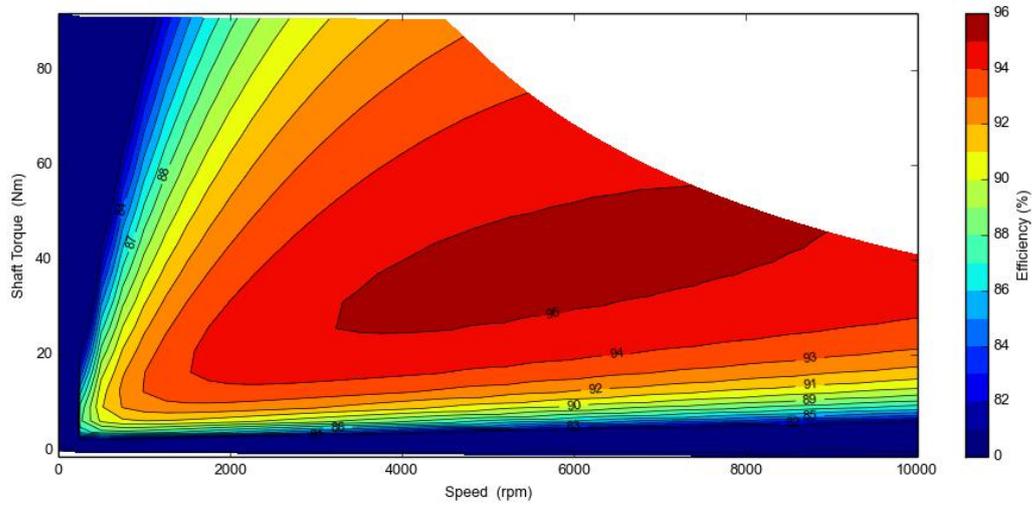
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_i + P_{cp} + P_J + P_{mec}} \quad (5.1.4)$$

In cui sono presenti anche le perdite meccaniche dovute all'attrito tra i componenti. In questa trattazione vengono trascurate poichè non sono oggetto di studio.

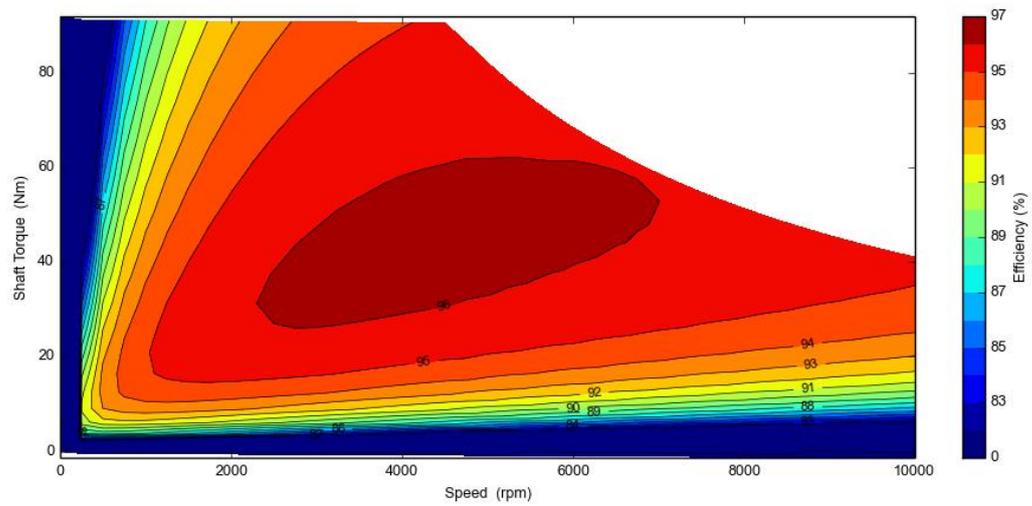
In conclusione, con la configurazione in parallelo e doppio numero di giri si ha un miglioramento dell'efficienza del motore sincrono a magneti permanenti.

5.2 Efficienza motore originale e nuova configurazione

Come riportato dalle figure e dalle tabelle seguenti, con il motore a doppio avvolgimento si riesce ad ottenere un aumento dell'efficienza in tutte le aree operative. In particolare si riesce a raggiungere anche un'efficienza maggiore del 96% in alcune zone di lavoro, impossibile con il motore originale.



(a) Mappa di efficienza del motore originale



(b) Mappa di efficienza del motore a doppio avvolgimento

Fig.5.2.1: Confronto tra le mappe di efficienza

Tab.5.2.1: Valori di efficienza

	Motore originale	Motore con doppio avvolgimento
Efficienza sopra 97%	0	0
Efficienza sopra 96%	0	14,42
Efficienza sopra 95%	13,79	48,36
Efficienza sopra 94%	39,44	61,59
Efficienza sopra 93%	52,22	69,22
Efficienza sopra 92%	61,32	73,35
Efficienza sopra 91%	66,91	77,03
Efficienza sopra 90%	71,64	79,95
Efficienza sopra 89%	74,52	82,14
Efficienza sopra 88%	77,31	83,81
Efficienza sopra 87%	79,62	85,28
Efficienza sopra 86%	81,41	86,51

5.3 Efficienza in un ciclo di lavoro

A questo punto si analizza il comportamento dei due motori durante un ciclo di lavoro. Tramite un sistema di acquisizione elettronica dei dati, montato su un prototipo elettrico di Fiat Panda, viene registrato un ciclo di lavoro che comprende percorsi in città, in autostrada e in collina [26]. I dati necessari per le successive simulazioni e analisi tramite Motor-CAD sono:

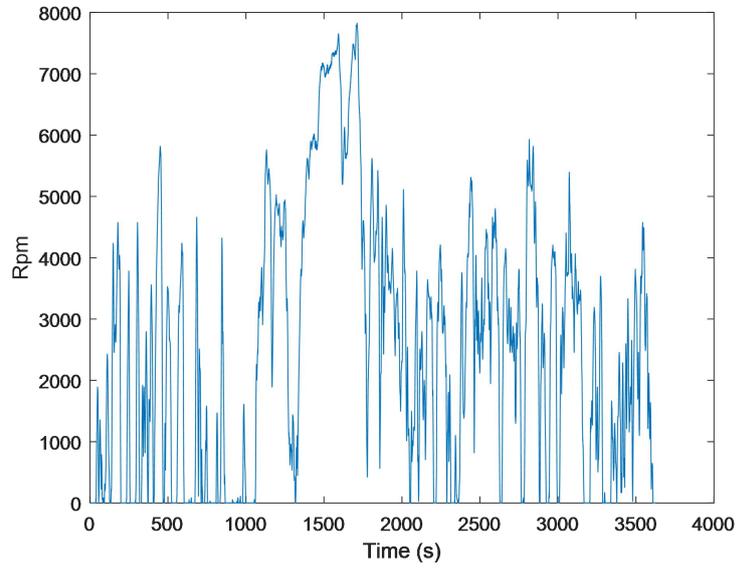
- Velocità di rotazione del motore a magneti permanenti
- Corrente degli avvolgimenti di statore
- Temperatura del motore.

5.3.1 Definizione del ciclo di lavoro

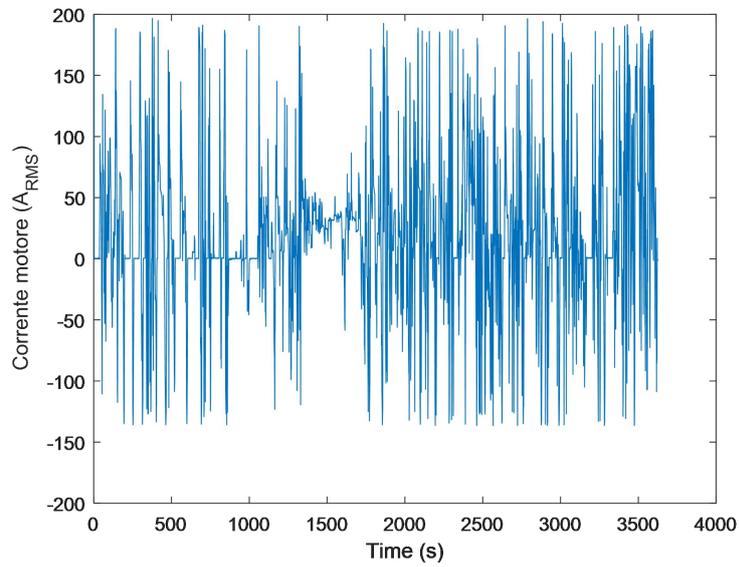
Il percorso acquisito usato per le analisi possiede le seguenti caratteristiche:

- Distanza percorsa ≈ 34 km
- Velocità media ≈ 36 km/h
- Tempo trascorso ≈ 60 min

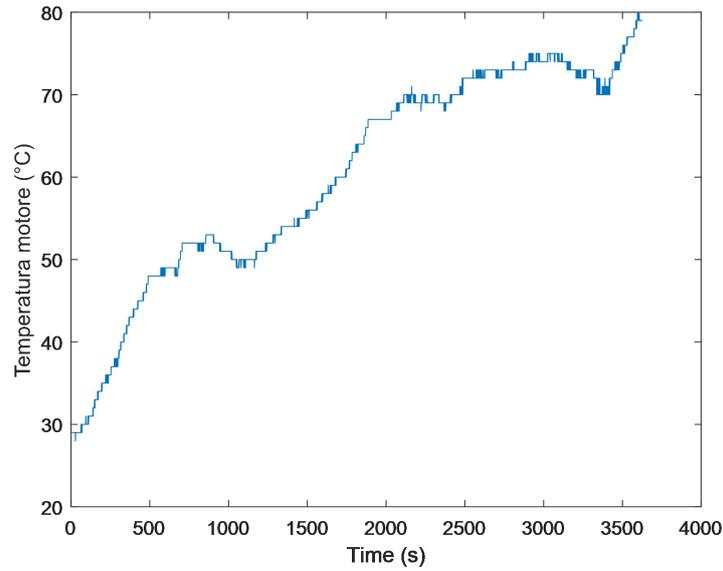
Nei grafici seguenti sono riportati i dati acquisiti durante il ciclo di lavoro.



(a) Velocità di rotazione del motore



(b) Corrente degli avvolgimenti di statore



(c) Temperatura del motore

Fig.5.3.1.1: Dati acquisiti [26]

5.3.2 Simulazioni del ciclo di lavoro

Tramite Motor-CAD, vengono effettuate le simulazioni del ciclo di lavoro, considerando anche il comportamento termico del motore a magneti permanenti. Di seguito si riporta la potenza erogata ottenuta dalla simulazione effettuata.

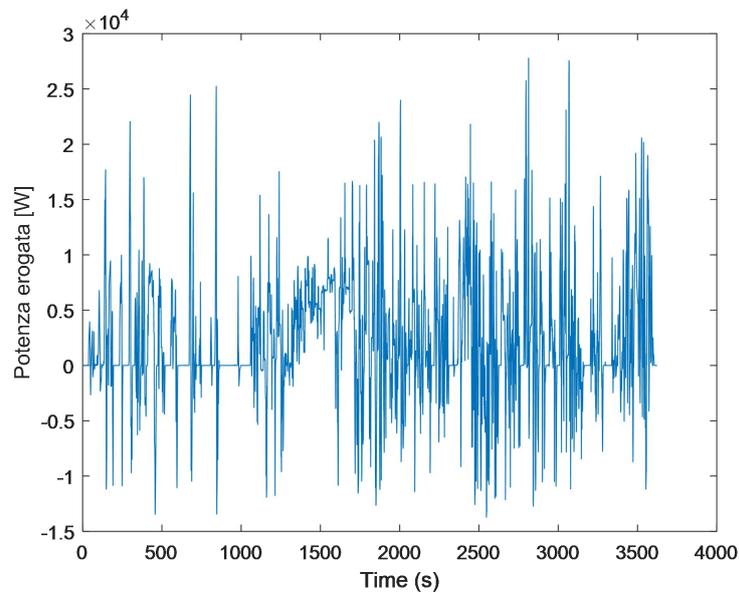


Fig.5.3.2.1: Potenza erogata ottenuta da Motor-CAD

Il software permette di ottenere diversi risultati, come l'efficienza media e le perdite. Di seguito vengono messi a confronto i risultati ottenuti per il motore originale e per il motore con doppio avvolgimento. Come si può notare si ha un miglioramento dell'efficienza, infatti si passa da un'efficienza media del 92% del motore originale a quella del motore con doppio avvolgimento di 93,13%. Il miglioramento appunto è nelle minori perdite nel rame, che nel caso della nuova configurazione sono la metà, mentre le altre perdite ovviamente sono le stesse.

Nella Fig.5.3.2.2 è riportato l'andamento della temperatura dello statore, sia per il motore originale, sia per il motore con doppio avvolgimento. Come da aspettative, la temperatura del motore con doppio avvolgimento è leggermente inferiore alla temperatura del motore originale, grazie alla miglior efficienza dovuta alla nuova configurazione.

Tab.5.3.2.1: Analisi efficienza da Motor-CAD

	Motore originale	Motore con doppio avvolgimento
Efficienza media [%]	91,99	93,13
Energia elettrica in input [Wh]	3190,19	3153,74
Energia di motore all'albero [Wh]	2936,12	2936,12
Perdite totali [Wh]	324,46	275,78
Perdite nel rame [Wh]	102,23	53,55
Perdite nel ferro [Wh]	218,85	218,85
Perdite nei magneti [Wh]	3,38	3,38
Funzionamento da motore [%]	77,26	77,10
Funzionamento da generatore [%]	21,91	22,08

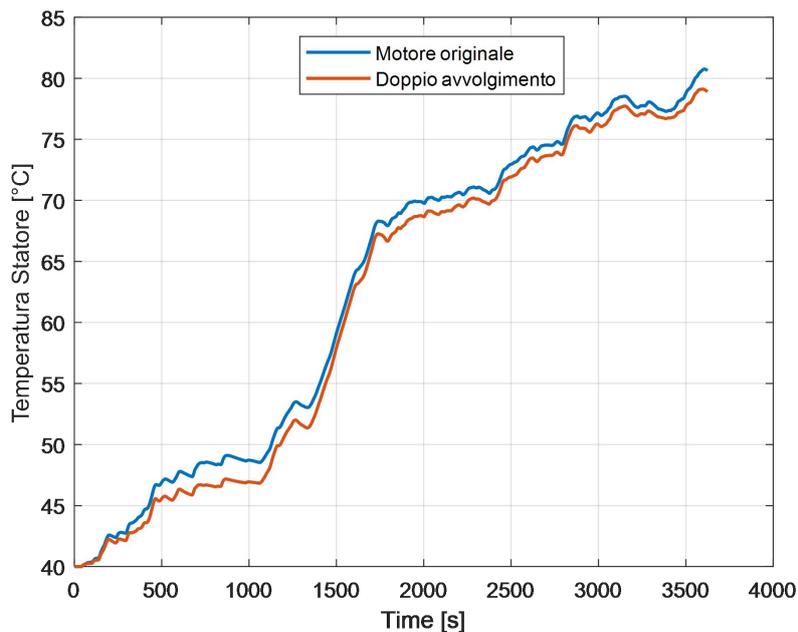


Fig.5.3.2.2: Temperature dei due motori

Capitolo 6

Sistema di raffreddamento

In questa sezione viene studiato il comportamento termico del motore sincrono a magneti permanenti, con l'introduzione di un sistema di raffreddamento. Viene ricavata l'efficienza del motore durante un ciclo di lavoro ed infine vengono ricavate le temperature durante un transitorio termico e l'involuppo termico del motore elettrico.

Partendo dalla Fig.5.3.2.2 si evince che il motore non raggiunge un equilibrio termico durante il ciclo di lavoro rilevato. Situazione per cui è necessario studiare un sistema di raffreddamento che permetta di tenere la temperatura dell'intero motore sotto controllo.

Poichè la distanza percorsa nel ciclo acquisito è di circa 34 km e l'autonomia del motore è circa 140 km, una simulazione che comprende 4 cicli di lavoro consecutivi può rilevare in maniera completa il comportamento termico del motore elettrico. Nella figura seguente viene raffigurato l'andamento delle temperature dello statore, degli avvolgimenti di statore e dei magneti permanenti, i quali raggiungono temperature superiori ai 110°C.

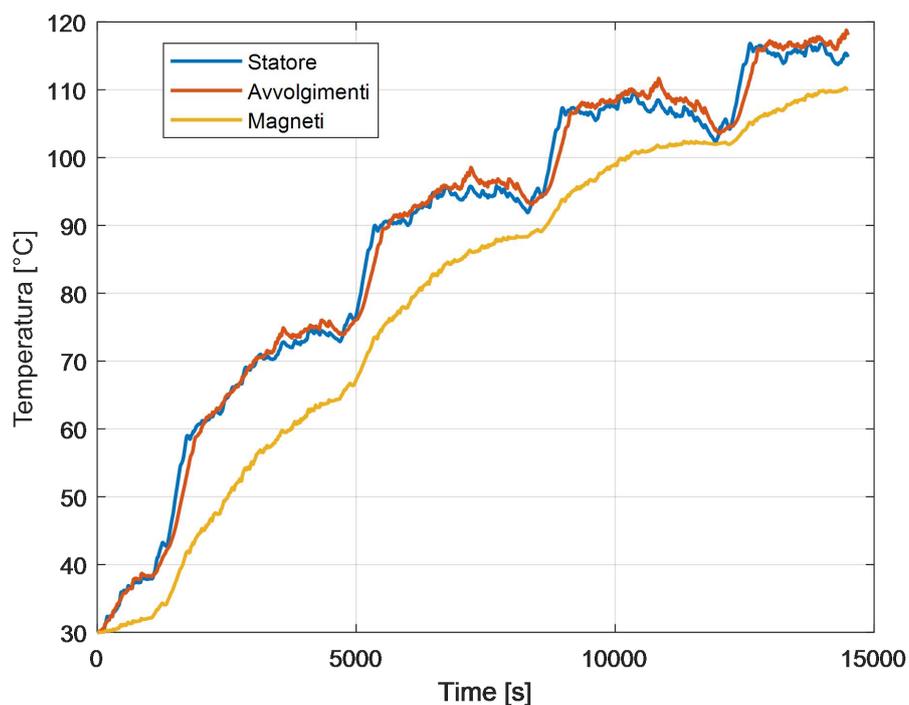


Fig.6.1: Temperature dei componenti in quattro cicli di lavoro consecutivi

Inoltre, poiché le perdite per effetto Joule aumentano all'aumentare della temperatura, si può pensare che un sistema di raffreddamento adeguato migliori l'efficienza del motore a magneti permanenti. [27]

Per fili di rame o alluminio, la resistività può essere approssimata dalla seguente relazione lineare con la temperatura:

$$\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (6.1)$$

In cui:

T è la temperatura.

T_0 è la temperatura ambiente, di solito pari a 20°C.

α è il coefficiente di resistività termica.

Tab.6.1: Caratteristiche per il rame [24]

Dati	Valore	Unità
$\rho(T_0)$	$1.72 \cdot 10^{-8}$	Ωm
α	$4 \cdot 10^{-3}$	/
T_0	20	°C

Tramite due simulazioni eseguite nella sezione Lab di Motor-CAD, in cui si può simulare il ciclo di lavoro rilevato mantenendo fisse le temperature degli avvolgimenti e dei magneti per tutta la durata del ciclo, viene calcolata l'efficienza del motore sincrono a magneti permanenti a due diverse temperature. Nel primo caso si suppone che la temperatura degli avvolgimenti di statore e quella dei magneti permanenti siano costanti e pari a 40°C, mentre nella seconda le due temperature sono impostate a 80°C. Si può notare come una temperatura minore dei componenti del motore permetta di raggiungere un'efficienza media migliore e le perdite nel rame contribuiscono maggiormente all'aumento di efficienza.

Tab.6.2: Efficienza del motore a diverse temperature

	Temperature a 40°C	Temperature a 80°C
Efficienza media [%]	93,21	92,93
Energia elettrica in input [Wh]	3047,12	3056,07
Energia di motore all'albero [Wh]	2836,83	2836,3
Perdite totali [Wh]	269,71	281,67
Perdite nel rame [Wh]	47,96	59,25
Perdite nel ferro [Wh]	218,44	219,01
Perdite nei magneti [Wh]	3,31	3,41
Funzionamento da motore [%]	76,19	76,19
Funzionamento da generatore [%]	21,99	22,99

Per questi motivi, un sistema di raffreddamento potrebbe essere utile a migliorare l'efficienza del motore sincrono a magneti permanenti. Esistono diverse soluzioni per raffreddare un motore elettrico:

- Ventilazione forzata
- Camicia di raffreddamento assiale o circonferenziale
- Raffreddamento diretto del rotore
- Raffreddamento diretto dei conduttori
- Raffreddamento a spray sulle estremità degli avvolgimenti

6.1 Geometria del sistema di raffreddamento

In questo paragrafo viene introdotta la geometria della camicia di raffreddamento inserita nel motore sincrono a magneti permanenti [26]. La camicia di raffreddamento è composta da due parti: il guscio interno è a contatto con lo statore ed è fatto di lega di alluminio, mentre sulla superficie esterna, sempre fatta di lega di alluminio, sono ricavati i canali, le cui dimensioni sono riportate nella tabella seguente e nella Fig.6.1.1.

Tab.6.1.1: Dimensioni canali di raffreddamento

Dati	Valore	Unità
Laminazione	6	mm
Altezza	4	mm
Larghezza	33	mm
Spaziatura	25	mm

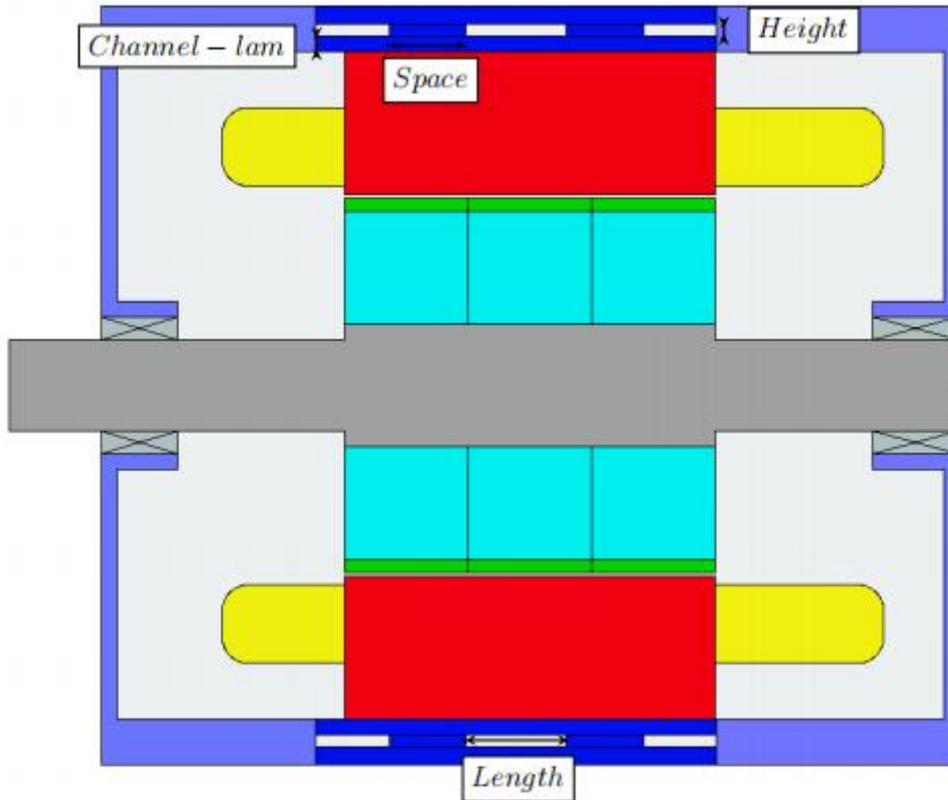


Fig.6.1.1: Sezione assiale del sistema di raffreddamento [26]

Il fluido di raffreddamento scelto è una miscela di glicole etilenico (50%) e acqua (50%). Infine, con una portata di volume di 15 l/min , il fluido presenta le seguenti caratteristiche:

Tab.6.1.2: Proprietà del fluido di raffreddamento

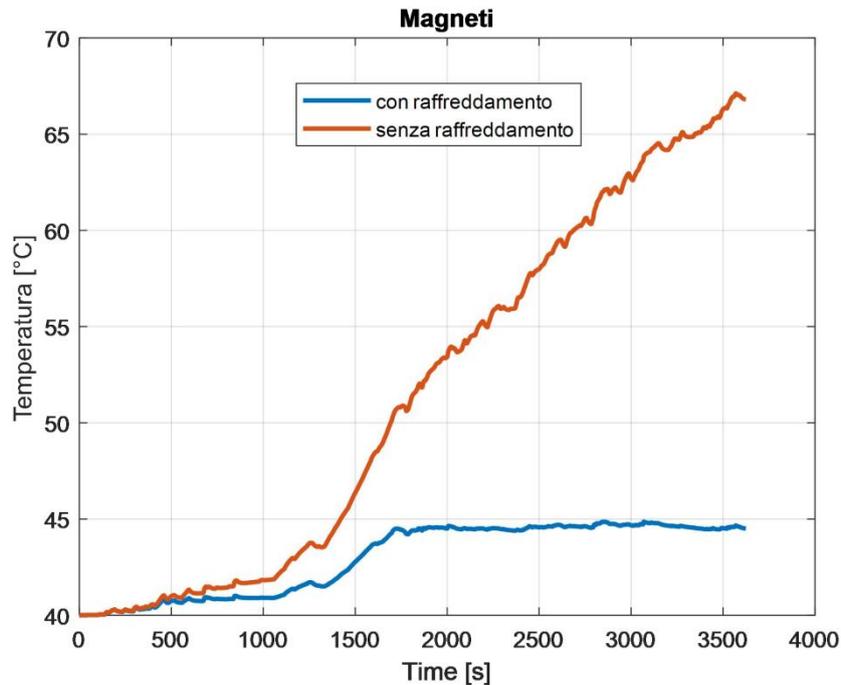
Dati	Valore	Unità
Area trasversale canale	132	mm^2
Lunghezza canale	1987	mm
Re	6018	/
Pr	20.2	/
h	3962	$\frac{W}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

6.2 Simulazione del ciclo di lavoro

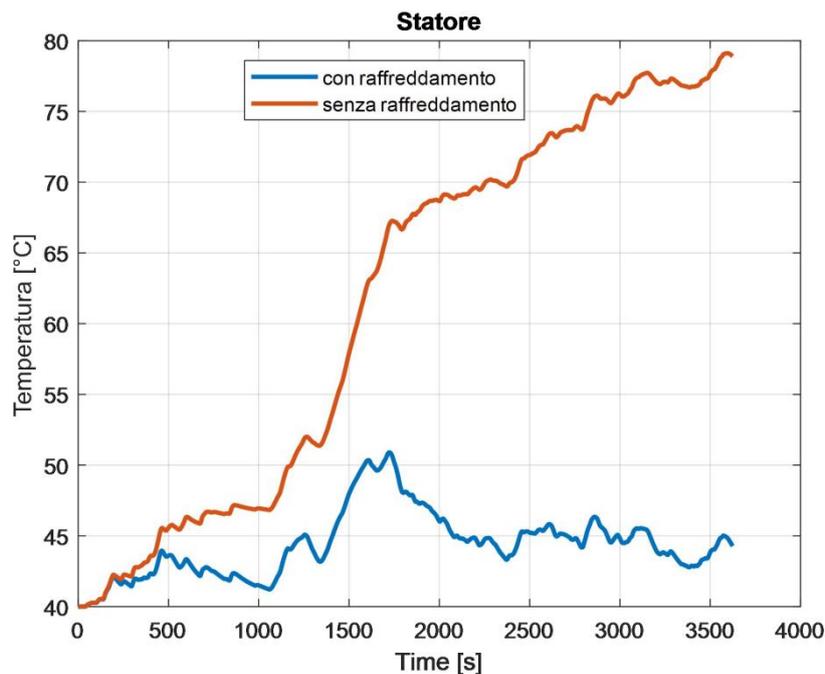
In questa sezione si analizza il comportamento termico del motore a magneti permanenti durante un ciclo di lavoro, evidenziando la differenza di comportamento tra un motore non raffreddato e un motore con il sistema di raffreddamento descritto precedentemente. Di seguito si riportano tre figure, nelle quali sono riportati gli

andamenti della temperatura per tre componenti principali: avvolgimenti, statore e magneti permanenti. Si può notare come il sistema di raffreddamento riesca a sottrarre il calore generato dal motore, raggiungendo così un equilibrio termico con temperature ben al di sotto dei limiti dei componenti interessati.

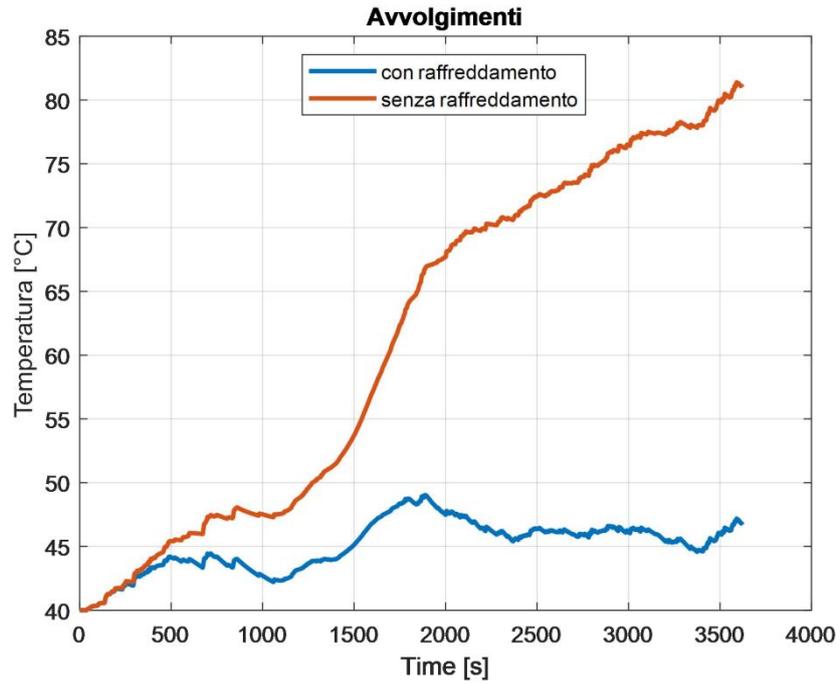
Nella Fig.6.2.2 invece sono riportati gli andamenti delle temperature per quattro cicli di lavoro consecutivi. Da queste figure è ancora più evidente l'equilibrio termico raggiunto dal motore a magneti permanenti con sistema di raffreddamento integrato.



(a) Confronto temperatura dei magneti permanenti

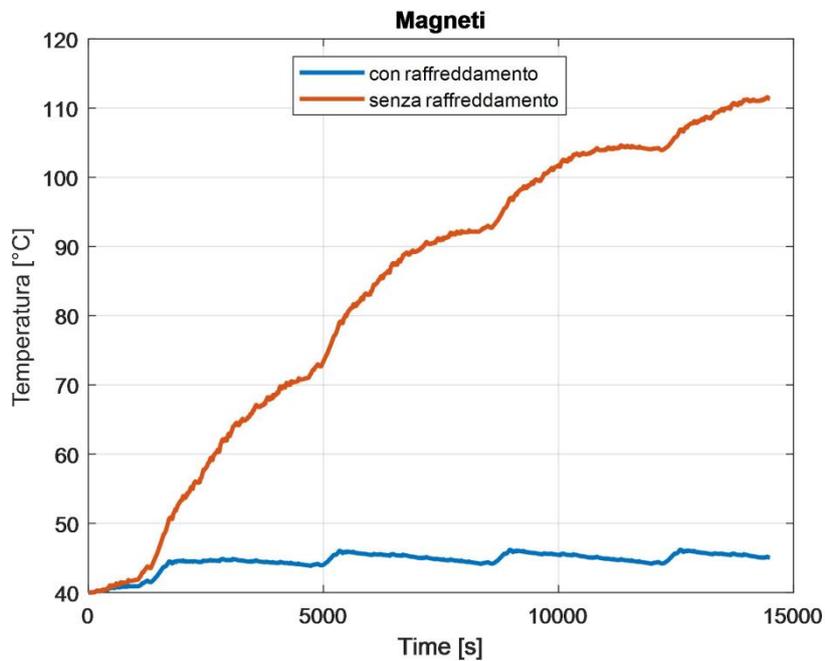


(b) Confronto temperatura dello statore

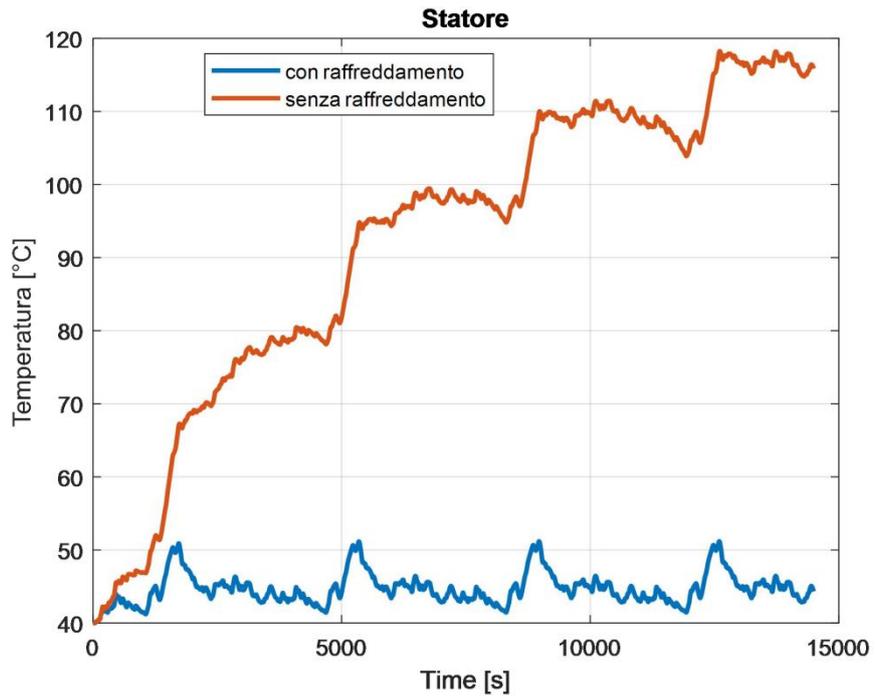


(c) Confronto temperature degli avvolgimenti statorici

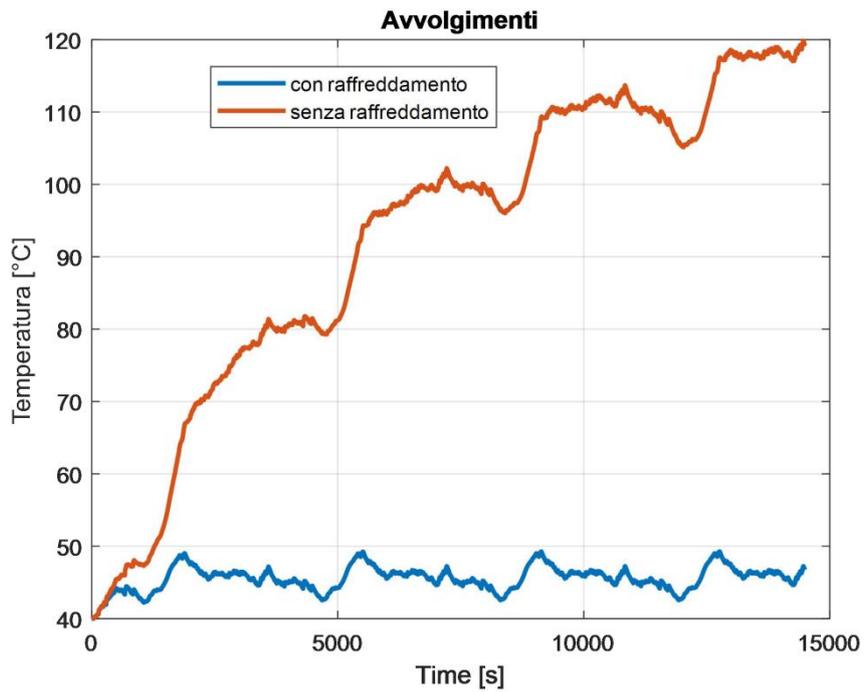
Fig.6.2.1: Andamento temperature con o senza sistema di raffreddamento per un ciclo di lavoro



(a) Confronto temperature dei magneti permanenti



(b) Confronto temperature dello statore



(c) Confronto temperature degli avvolgimenti statorici

Fig.6.2.2: Andamento temperature con o senza sistema di raffreddamento per quattro cicli di lavoro

6.3 Efficienza con sistema di raffreddamento

Come riportato nella Tab.6.2, le perdite all'interno del motore a magneti permanenti aumentano all'aumentare della temperatura dei componenti, per questo si può pensare che con il sistema di raffreddamento, il motore riesca a raggiungere un'efficienza maggiore. Per analizzare questo miglioramento, tramite la sezione Thermal di Motor-CAD, si sono studiati quattro cicli di lavoro consecutivi per evidenziare in modo più marcato l'aumento di efficienza. Nella Tab.6.3.1 sono riportati i risultati ottenuti per un motore senza sistema di raffreddamento e i risultati per il motore con il sistema di raffreddamento descritto. Si può notare un aumento di efficienza di 0.4%, dovuto alle minor perdite. Il contributo più significativo è dovuto alle perdite del rame, con una diminuzione del 22% circa.

Tab.6.3.1: Efficienza del motore con e senza circuito di raffreddamento

	Motore senza sistema di raffreddamento	Motore con sistema di raffreddamento
Efficienza media [%]	92,89	93,23
Energia elettrica in input [Wh]	12644,87	12601,20
Energia di motore all'albero [Wh]	11744,49	11744,49
Perdite totali [Wh]	1143,04	1085,36
Perdite nel rame [Wh]	251,87	197,30
Perdite nel ferro [Wh]	877,30	874,89
Perdite nei magneti [Wh]	13,87	13,17
Funzionamento da motore [%]	77,11	77,10
Funzionamento da generatore [%]	22,06	22,08

6.4 Transitorio termico ed inviluppo termico

Per confrontare le prestazioni del motore elettrico con sistema di raffreddamento integrato rispetto al motore senza sistema di raffreddamento si analizza il transitorio termico per il motore a magneti permanenti alle condizioni nominali di coppia e velocità di rotazione. Nella Fig.6.4.1 si riporta a scopo indicativo l'andamento delle temperature degli avvolgimenti, dello statore e dei magneti permanenti impostando una velocità di rotazione del motore $n = 9000 \text{ rpm}$ e una coppia $T = 45 \text{ Nm}$. Le temperature superano i 650°C , situazione fisicamente impossibile per i componenti del motore elettrico. Mentre nella Fig.6.4.2 è raffigurato il transitorio termico per il motore con sistema di raffreddamento integrato. Il sistema riesce a raggiungere un equilibrio termico a temperature inferiori dei limiti dei componenti analizzati.

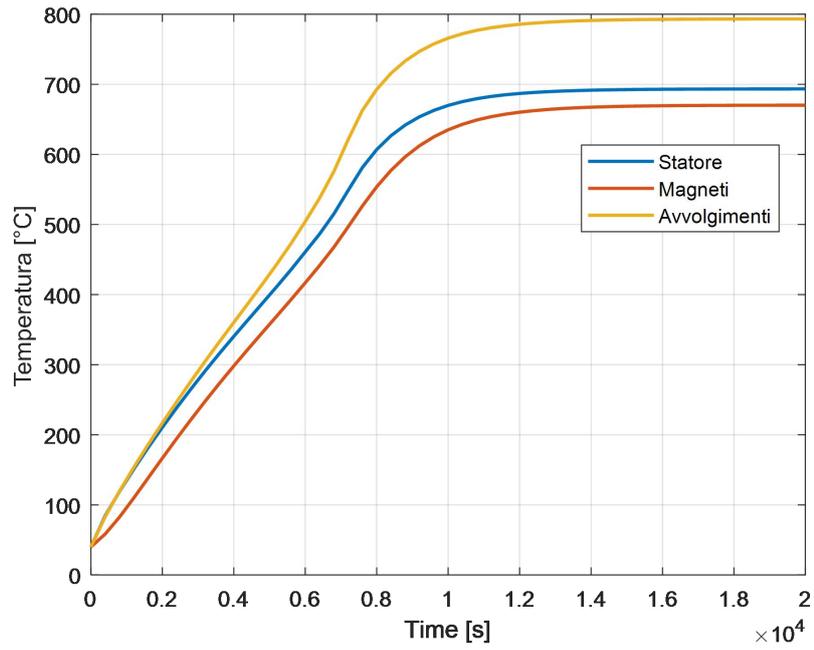


Fig.6.4.1: Transitorio termico alle condizioni nominali per il motore senza sistema di raffreddamento

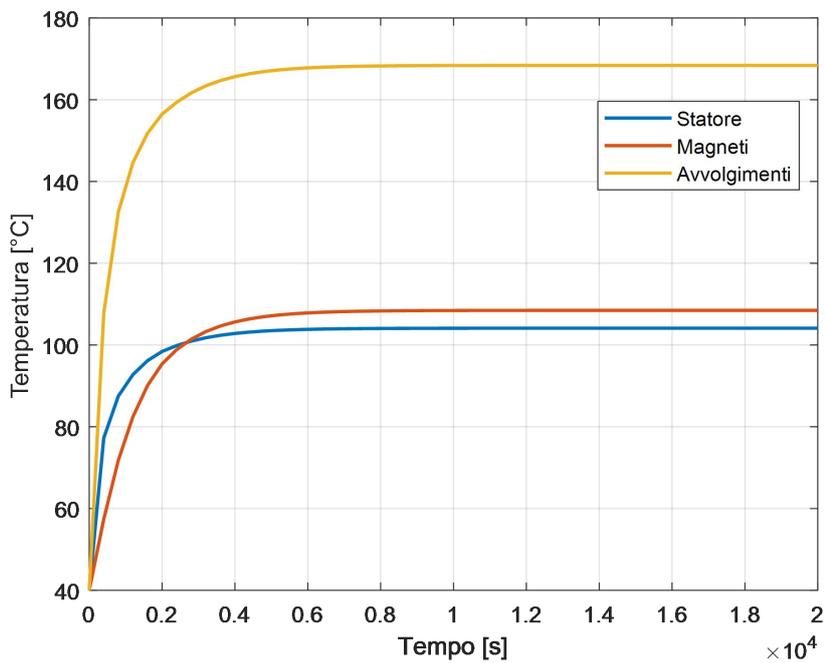


Fig.6.4.2: Transitorio termico alle condizioni nominali per il motore con sistema di raffreddamento

Infine si studia un involuppo termico del motore a magneti permanenti, ossia la coppia che il motore può produrre continuamente al variare della velocità di rotazione dell'albero senza superare le temperature ammissibili dei componenti. I componenti da tenere in considerazione sono gli avvolgimenti di statore ed i magneti permanenti, i primi, per evitare dispersioni di corrente o cortocircuiti tra le fasi, sono impregnati con speciali resine ed in base al tipo di resina utilizzata è stabilita una classe di isolamento; i magneti permanenti invece oltre una certa temperatura perdono le loro proprietà magnetiche.

Tab.6.4.1: Classe di isolamento degli avvolgimenti di statore [27]

Classe di isolamento	Temperatura ammissibile [°C]
Classe E	120
Classe B	130
Classe F	155
Classe H	180
Classe C	220

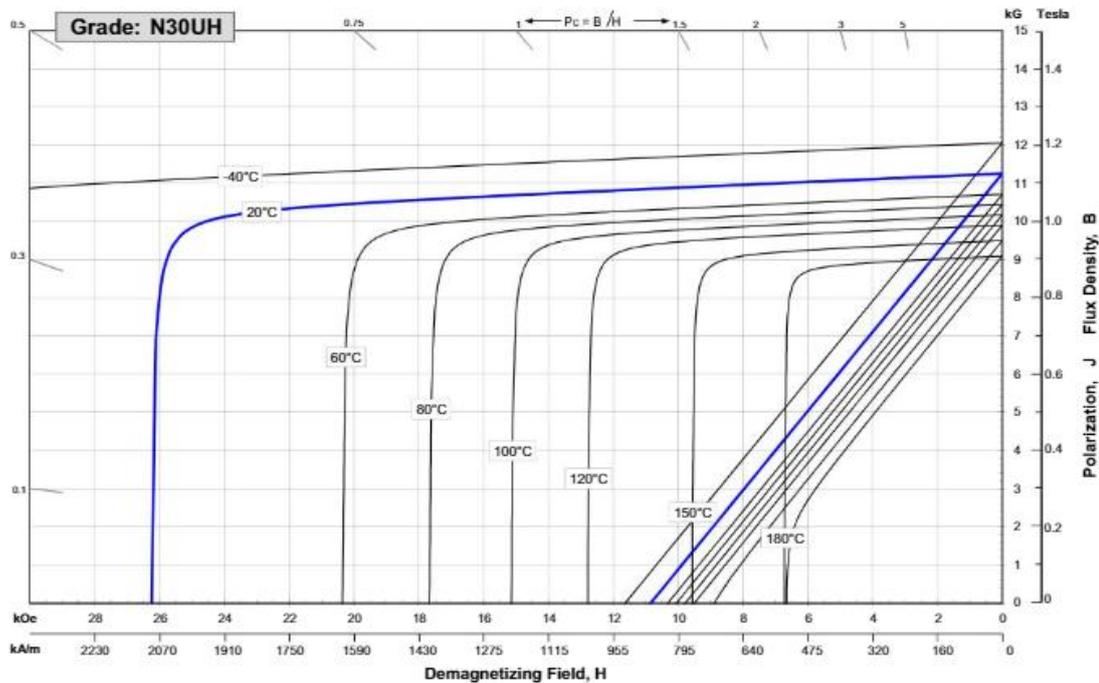


Fig.6.4.3: Curve di smagnetizzazione N30UH [28]

Dalle indicazioni della tabella e della figura sopra riportate vengono impostate per le simulazioni le temperature per gli avvolgimenti di statore e per i magneti permanenti, rispettivamente a 180°C e 150°C. Per gli avvolgimenti si sceglie la classe H su indicazione del transitorio termico, mentre i magneti permanenti cominciano a sviluppare fenomeni di smagnetizzazione dalla curva dei 150 °C. La curva di inviluppo è rappresentata nel grafico dalla linea blu, mentre la linea rossa indica la curva caratteristica del motore alla corrente nominale $I = 150 A_{RMS}$. Poichè la curva motore si trova sotto dell'inviluppo termico, il motore non raggiunge in nessun momento i limiti termici imposti e quindi si può dire che è in una condizione di sicurezza per tutto il campo operativo.

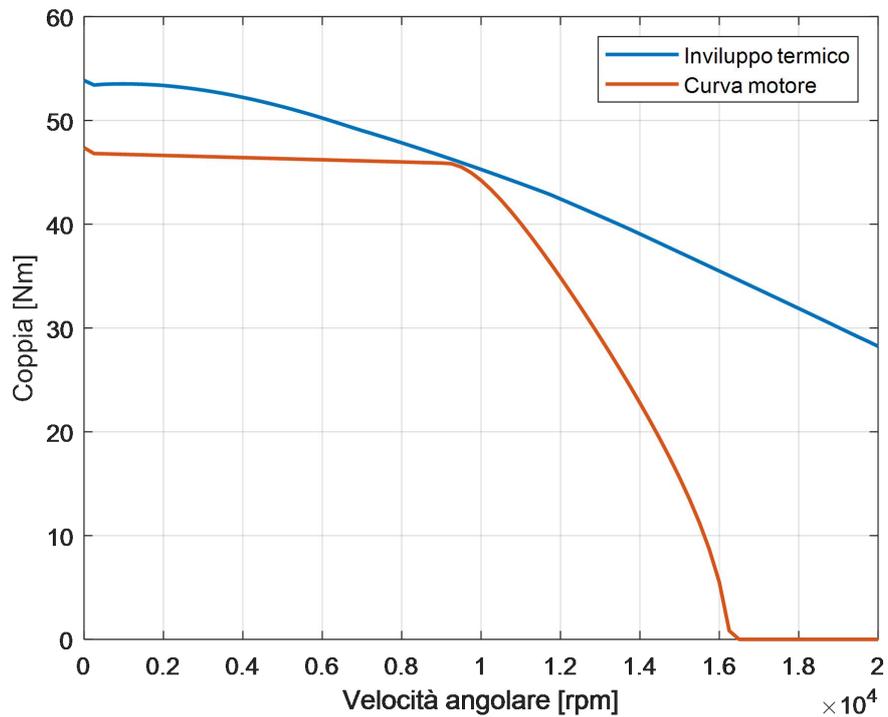


Fig.6.4.4: Curva di inviluppo e curva caratteristica per il motore con sistema di raffreddamento

Capitolo 7

Modello MATLAB Simulink

In questo capitolo viene costruito un modello simulink per il motore a magneti permanenti con doppio avvolgimento tramite il software MATLAB. Il punto di partenza per la costruzione del modello è il modello elettrico del motore sincrono a magneti permanenti analizzato nel paragrafo 2.4, al quale vengono aggiunte delle ipotesi per semplificare il modello. Le ipotesi introdotte nel modello sono le seguenti:

- Di solito in un motore a magneti permanenti $L_d = L_q$.
- Poichè $L_d = L_q$, i_d non contribuisce alla produzione di coppia, per cui la logica di controllo opera tenendo $i_d = 0$.

Con queste due ipotesi il modello si semplifica nel seguente modo:

$$v_d = -N\omega i_q L_q \quad (7.1)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + N\omega \psi_m \quad (7.2)$$

Nella Fig.7.1 è rappresentato il modello simulink del motore a magneti permanenti semplificato. Gli input del modello sono la corrente i_q e la velocità di rotazione dell'albero ω .

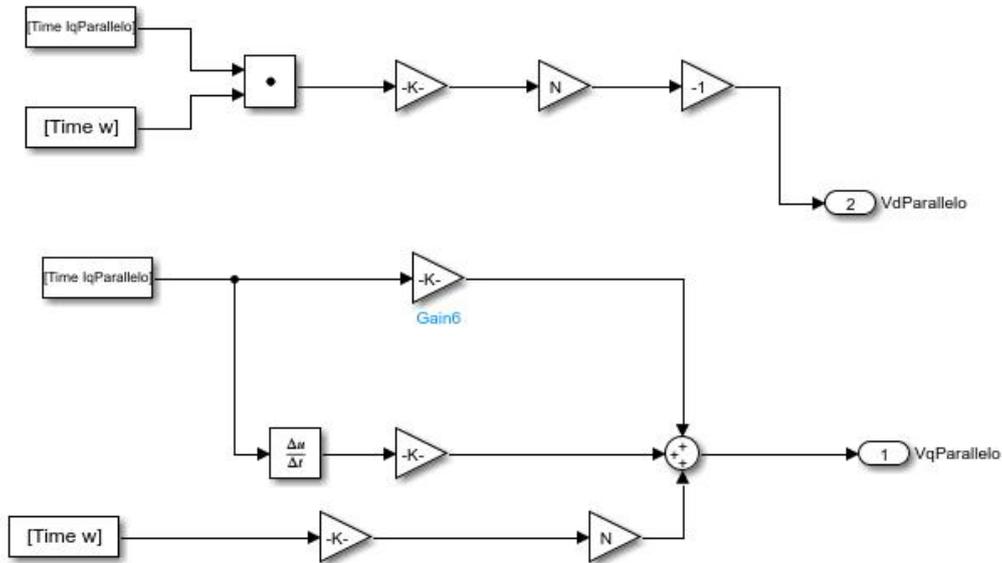


Fig.7.1: Modello simulink del motore a magneti permanenti

7.1 Parametri per il modello Simulink

Per costruire il modello matematico del motore a magneti permanenti occorre ricavare tramite la sezione E-magnetic di Motor-CAD i parametri del sistema. Come indicato dalle equazioni (7.1) e (7.2), i parametri necessari sono il numero di coppie polari N , le induttanze secondo l'asse in quadratura L_q , la resistenza di fase R_s e il flusso concatenato dei magneti permanenti ψ_m .

Il numero di coppie polari è ovviamente pari a 3, mentre dalle Tab.4.2.1.1 e Tab.4.2.1.2 si ricavano i valori delle resistenze di fase, delle induttanze e del flusso concatenato per la configurazione sia in parallelo, che in serie. Per semplicità questi parametri vengono assunti costanti per tutta la durata del ciclo, in particolare dalla figura seguente si può notare come la variazione del flusso concatenato sia trascurabile. Per questo, su Matlab viene impostato un valore medio del flusso concatenato.

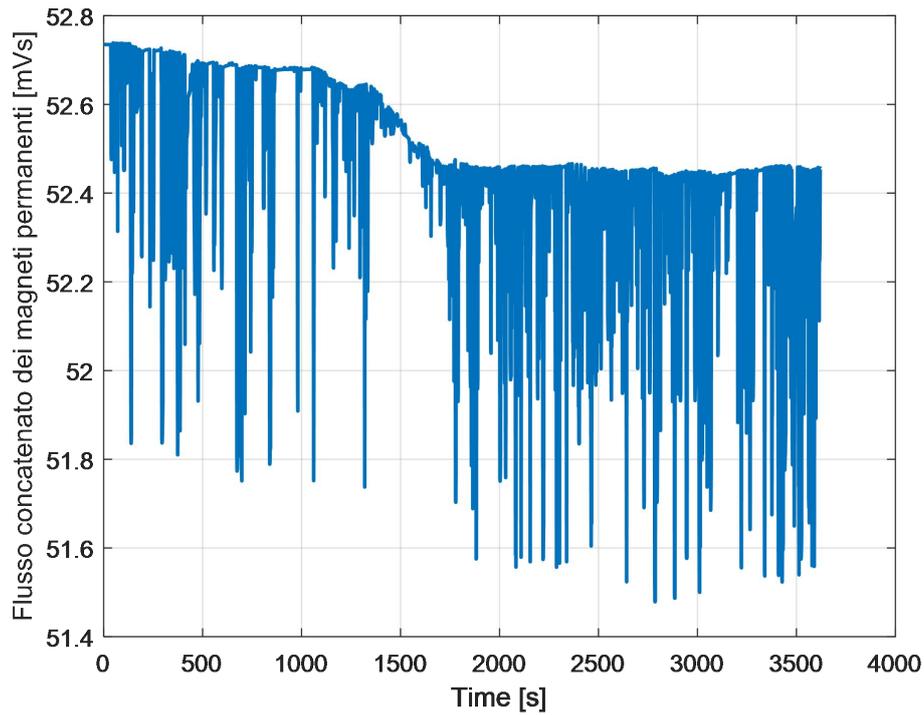
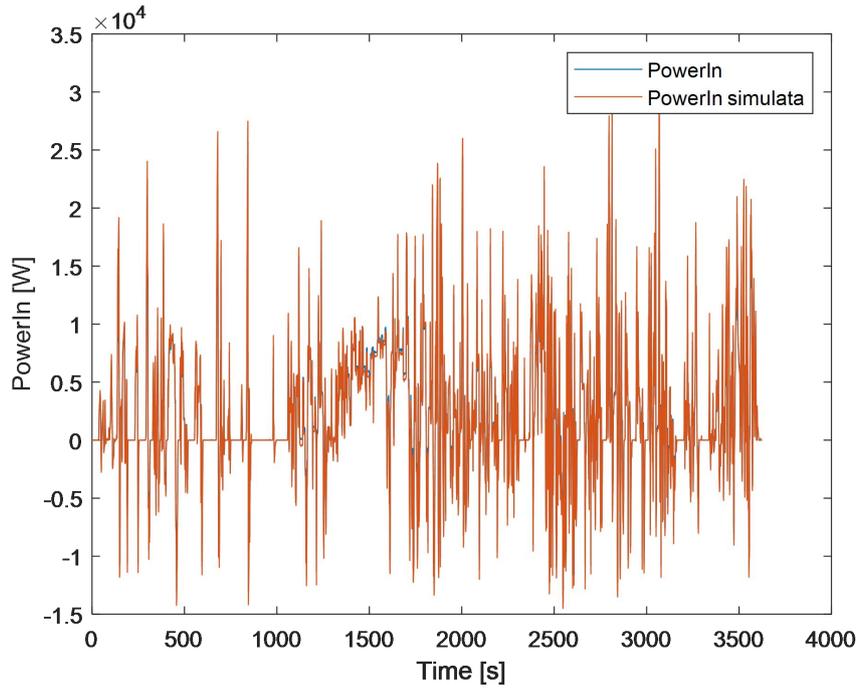


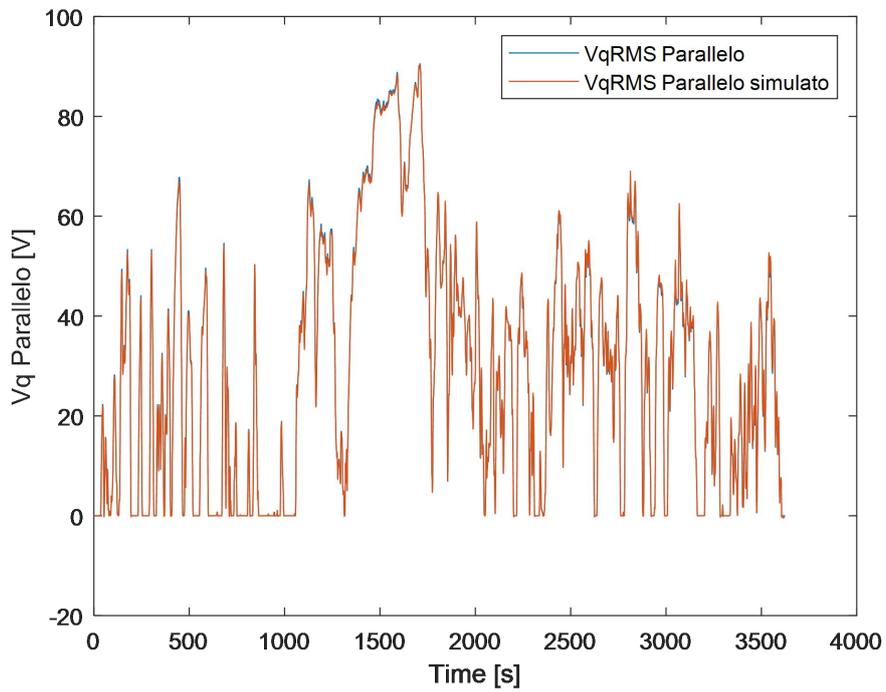
Fig.7.1.1: Flusso concatenato dei magneti permanenti durante un ciclo di lavoro

7.2 Validazione modello

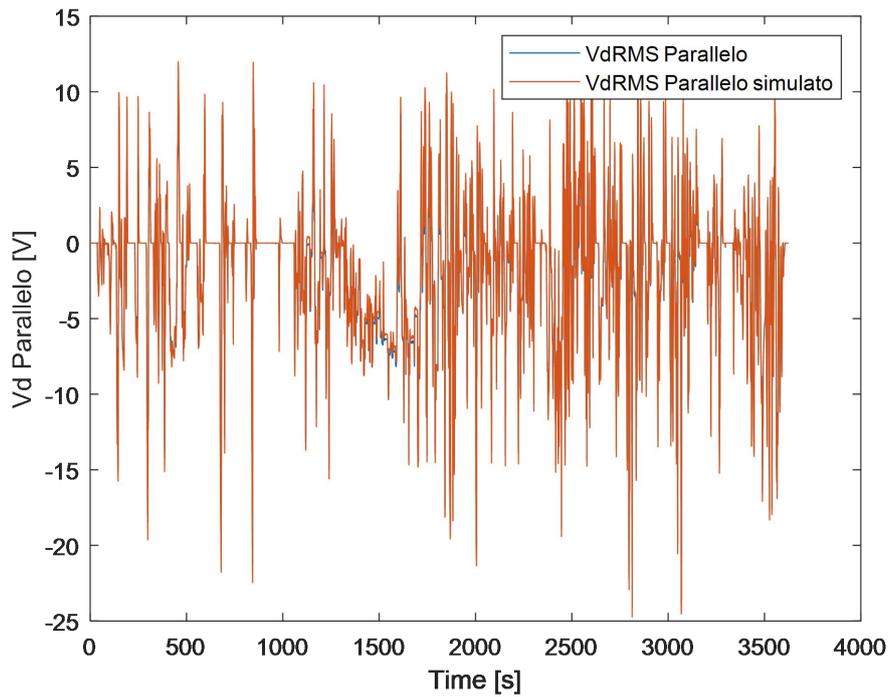
I risultati ottenuti da Matlab sono molto precisi e riproducono fedelmente i risultati delle simulazioni eseguite su Motor-CAD, in particolare nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti di v_d , v_q e della potenza elettromagnetica in ingresso. Per non appesantire la trattazione si riportano solamente le grandezze della configurazione in parallelo. Come si può notare i risultati importati da Motor-CAD e quelli ottenuti da Simulink sono pressochè sovrapposti, a dimostrazione della bontà del modello costruito.



(a) Potenza in ingresso da Motor-CAD & Potenza simulata



(b) v_q importato da Motor-CAD & v_q simulato



(c) v_q importato da Motor-CAD & v_q simulato

Fig.7.2.1: Validazione modello Simulink

Per completezza, di seguito si costruisce una tabella nella quale vengono confrontati alcuni valori di picco delle grandezze usate per la validazione del modello, in modo da evidenziare ancora meglio la bontà del modello del motore sincrono a magneti permanenti.

Tab.7.2.1: Confronto dei risultati del modello

Tempo [s]	Potenza in ingresso da Motor-CAD [kW]	Potenza in ingresso simulata [kW]	v_q Motor-CAD [V]	v_q simulato [V]	v_d Motor-CAD [V]	v_d simulato [V]
299	22,5	22,9	45,6	45,7	-18,5	-18,5
680	24,9	25,4	51,8	51,8	-20,6	-20,8
843	25,7	26,3	50,1	50,3	-21,2	-21,5
1421	6,8	6,7	57,0	56,5	-5,7	-5,6
1548	12,6	12,6	85,0	84,6	-10,4	-10,3
2005	24,5	25,2	56,0	56,7	-20,5	-20,7
2446	22,4	23,0	59,3	60,2	-18,9	-19,0
2813	28,5	29,5	67,6	69,0	-24,1	-24,3
3068	28,2	29,4	58,5	60,0	-23,8	-24,2

7.3 Calcolo analitico dei parametri del modello

Seguendo un approccio più laborioso, si potrebbero calcolare analiticamente i parametri del modello anche per eludere l'uso di Motor-CAD. In questo paragrafo quindi verranno calcolati i valori della resistenza di fase R_s , dell'induttanza L_q e del flusso magnetico concatenato.

Partendo dall'equazione (7.2) si può notare che il termine $N\omega\psi_m$ corrisponde alla forza contro-elettromotrice e quindi che $N\psi_m = K_e$. Il valore di K_e è dato dal costruttore e quindi l'uso di Motor-CAD per ricavare il valore del flusso concatenato dei magneti permanenti non è più necessario. L'unica accortezza deriva dal fatto che il valore del costruttore è riferito alla forza contro-elettromotrice linea-linea, mentre il modello simulink, per come è stato costruito, utilizza il valore di fase. Di seguito è riportata la relazione tra i due valori e la nuova equazione di v_q :

$$K_e^{fase} = \frac{K_e^{linea-linea}}{\sqrt{3}} \quad (7.3.1)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + K_e^{fase} \cdot \omega \quad (7.3.2)$$

Per il calcolo della resistenza di fase si devono effettuare diverse considerazioni. Innanzitutto la resistenza di fase è calcolata dalla formula seguente:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (7.3.3)$$

In cui ρ è la resistività elettrica del rame descritta anche nell'equazione (6.1), l è la lunghezza degli avvolgimenti ed infine S è la sezione degli avvolgimenti.

Il cavo scelto ha un diametro di $0,8 \text{ mm}$, per cui l'area di un filo è pari a $0,5 \text{ mm}^2$. Poichè in ogni giro degli avvolgimenti sono presenti 30 conduttori, si può approssimare l'area totale della sezione degli avvolgimenti come descritto di seguito:

$$S = 30 \times A_{filo} = 15 \text{ mm}^2 \quad (7.3.4)$$

Per calcolare la lunghezza, bisogna considerare il percorso degli avvolgimenti di ogni fase, come raffigurato in Fig.5.1.2. La lunghezza degli avvolgimenti si divide nel percorso all'interno di ogni slot e nel percorso delle testate. Gli slot hanno lunghezza assiale definita dalla lunghezza dello statore, 120 mm . Mentre il passo delle bobine è calcolato partendo dalla geometria dei denti dello statore.

Secondo una sezione radiale del motore (Fig.3.1(a)), i denti avranno un raggio medio r_m rispetto al centro del motore. Secondo semplici considerazioni geometriche dello statore:

$$r_m = 79,5 \text{ mm} \quad (7.3.5)$$

Poichè le bobine di ogni fase sono 6, possiamo considerare gli slot attraversati dagli avvolgimenti di ogni fase come posizionati nei vertici di un esagono regolare inscritto in una circonferenza di raggio r_m e di conseguenza il passo tra gli slot è proprio pari a r_m .

Le testate, invece, sono assunte come delle semicirconferenze in direzione assiale con diametro pari al passo tra gli slot.

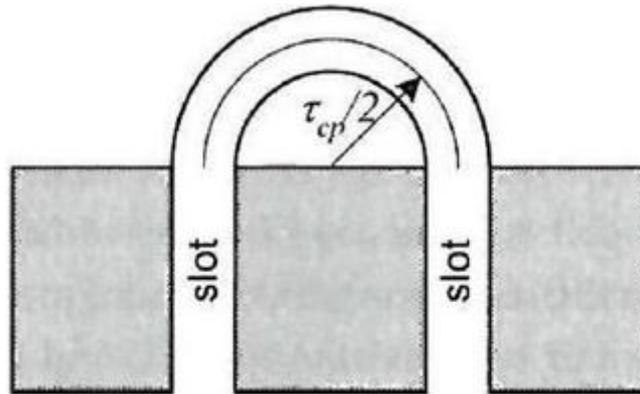


Fig.7.3.1: Approssimazione delle testate degli avvolgimenti di statore [24]

Il percorso dell'avvolgimento in ogni giro quindi è pari:

$$p = 2L_{st} + \pi r_m = 2 \cdot 120 + \pi \cdot 79,5 = 490 \text{ mm} \quad (7.3.6)$$

Poichè le bobine sono 6 ed ognuna compie 4 giri, la lunghezza di ogni fase può essere approssimata nel modo seguente:

$$l = 4 \cdot 6 \cdot p = 11,76 \text{ m} \quad (7.3.7)$$

Dalla formula (7.3.3), la resistenza di fase per una temperatura degli avvolgimenti di 60°C risulta essere pari a $0,0156 \Omega$, con una differenza rispetto al valore esatto del 6%. Quest'ultimo valore, ottenuto da Motor-CAD, è pari a $0,0166 \Omega$.

Infine, per calcolare L_d e L_q esistono diversi procedimenti [29]-[30], ma in questo documento, seguendo un calcolo analitico, vengono usate le seguenti formule [25]:

$$L_d = L_s - M_s + \frac{3}{2}L_m L_d \quad (7.3.8)$$

$$L_q = L_s - M_s - \frac{3}{2}L_m L_q \quad (7.3.9)$$

In cui:

- L_s è il valore dell'auto-induttanza di fase
- M_s è il valore della mutua induttanza tra le fasi
- L_m è la fluttuazione dell'induttanza dello statore. Questo valore è la quantità di oscillazione dell'auto-induttanza e della mutua induttanza al variare dell'angolo del rotore.

Per ipotesi, $L_d = L_q$ implica $L_m = 0$. E quindi i valori che servono per ricavare i valori delle induttanze sono L_s e M_s . Il calcolo dell'auto-induttanza degli avvolgimenti di statore è molto laborioso e complesso, ancor di più quello della mutua induttanza. Tuttavia, si è giunti ad un risultato per il valore di L_s , la quale può essere scomposta in tre termini: induttanza nel traferro, induttanza di dispersione negli slot ed induttanza delle testate.[24]

$$L_s = L_{gap} + L_{slot} + L_e \quad (7.3.10)$$

La componente di induttanza nel traferro è dovuta al flusso che attraversa il traferro, che deve essere trovato utilizzando un modello di circuito magnetico. Un esempio di circuito magnetico è riportato di seguito.

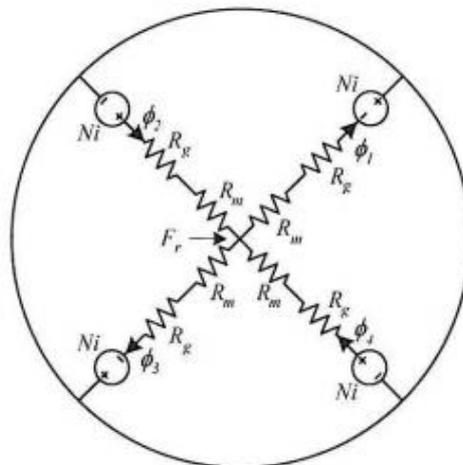


Fig.7.3.2: Circuito magnetico per il calcolo dell'induttanza nel traferro [24]

Per non appesantire la trattazione, di seguito viene riportata la formula utilizzata per calcolare l'induttanza del traferro:

$$L_{gap} = \frac{2\pi\mu_0 L_{st} R_{ro}}{g + \frac{l_m}{\mu_r C_\phi}} N^2 \quad (7.3.11)$$

In cui i termini in ordine sono: la permeabilità magnetica relativa nel vuoto, la lunghezza dello statore, il raggio del rotore, il numero di giri degli avvolgimenti, il traferro, lo spessore dei magneti, la permeabilità magnetica relativa dei magneti ed il fattore di concentrazione del flusso, il quale è il rapporto tra l'area trasversale al flusso dei magneti e l'area del traferro e supposto idealmente pari a 1.

L'induttanza di dispersione negli slot deriva dal flusso magnetico che attraversa uno slot generato dai conduttori percorsi da corrente, come nella figura seguente.

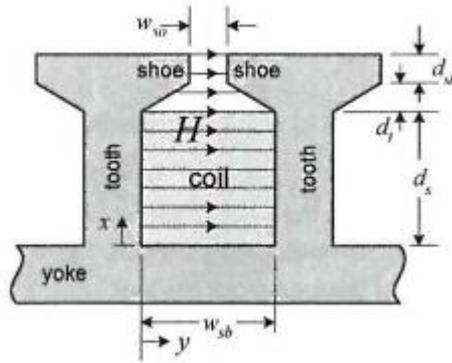


Fig.7.3.3: Flusso disperso negli slot [24]

$$L_{slot} = N_m (2N)^2 \left[\frac{\mu_0 d_s L_{st}}{3w_{sb}} + \frac{\mu_0 d_t L_{st}}{(w_{so} + w_{sb})/2} + \frac{\mu_0 d_{sh} L_{st}}{w_{so}} \right] \quad (7.3.12)$$

Infine, l'induttanza delle testate è creata dal campo magnetico che circonda una bobina dopo che ha lasciato uno slot e prima che entri in un altro slot. Si assume una distribuzione del campo magnetico come per un cilindro infinitamente lungo percorso da corrente. Secondo la geometria descritta nella Fig.7.3.1, la formula per l'induttanza delle testate è così descritta:

$$L_e = \frac{N_m \mu_0 r_m N^2}{2} \ln \left(\frac{r_m \sqrt{\pi}}{\sqrt{2A_s}} \right) \quad (7.3.13)$$

In cui A_s è l'area totale della bobina in uno slot.

Procedendo secondo i calcoli:

$$L_s = (0,169 + 0,087 + 0,011) \text{ mH} = 0,267 \text{ mH} \quad (7.3.14)$$

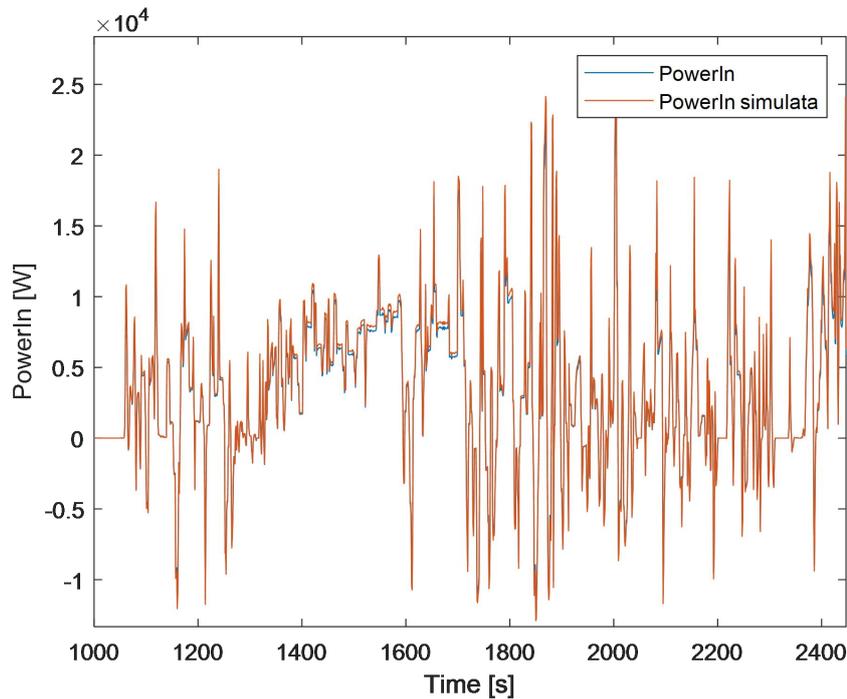
Motor-CAD, invece, restituisce un valore per l'autoinduttanza pari a $0,322 \text{ mH}$ e quindi i calcoli analitici variano di un 17% rispetto al valore esatto.

Il calcolo della mutua induttanza è ancora più complesso, per questo motivo viene riportato direttamente il risultato ottenuto da Motor-CAD, il quale è:

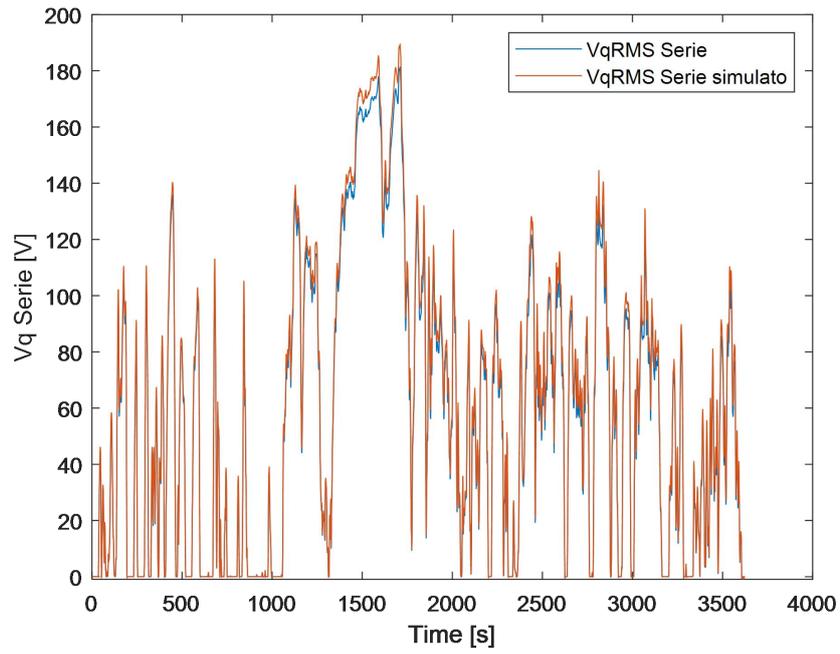
$$M_s = -0,056 \text{ mH} \quad (7.3.15)$$

Il valore di L_q secondo l'equazione (7.3.9) è pari a $0,323 \text{ mH}$.

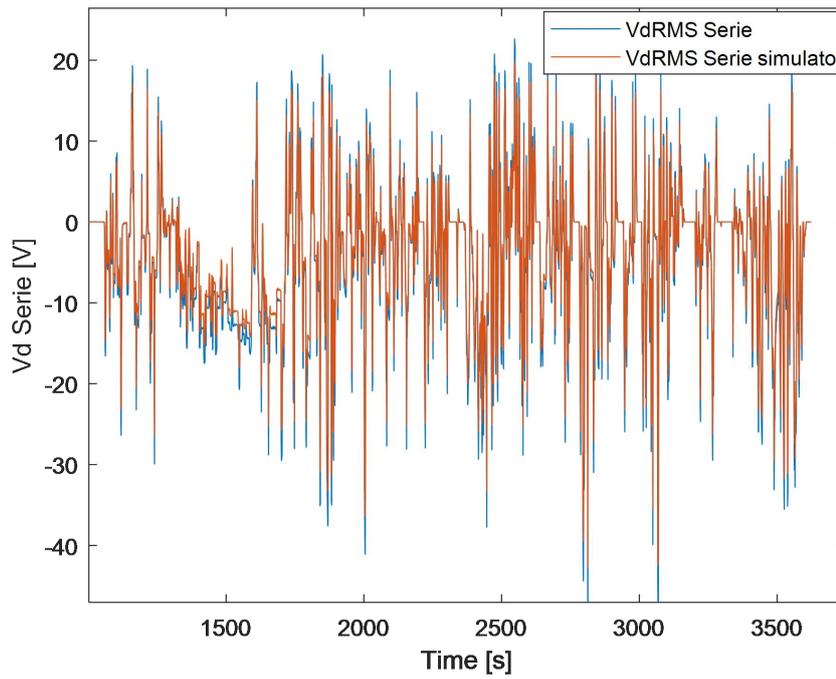
I risultati ottenuti tramite Simulink sono comunque molto precisi, come mostrato nella figura di seguito, in cui vengono riportate e confrontate gli andamenti delle grandezze simulate da Motor-CAD e da MATLAB.



(a) Confronto potenza in ingresso



(b) Confronto v_q configurazione serie



(c) Confronto v_d configurazione serie

Fig.7.3.4: Confronto grandezze simulate

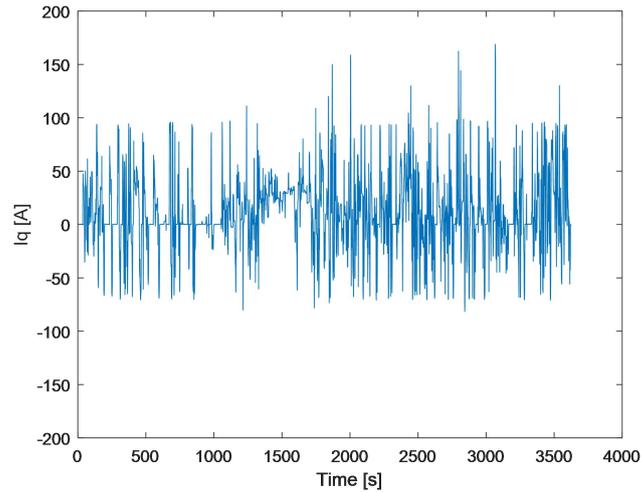
7.4 Risultati del doppio avvolgimento

Come già spiegato in precedenza, uno degli obiettivi del doppio avvolgimento è quello di ridurre la taglia dell'inverter a monte del motore a magneti permanenti, limitando le sovracorrenti durante le fasi di accelerazione e limitando le tensioni nelle applicazioni ad elevate velocità.

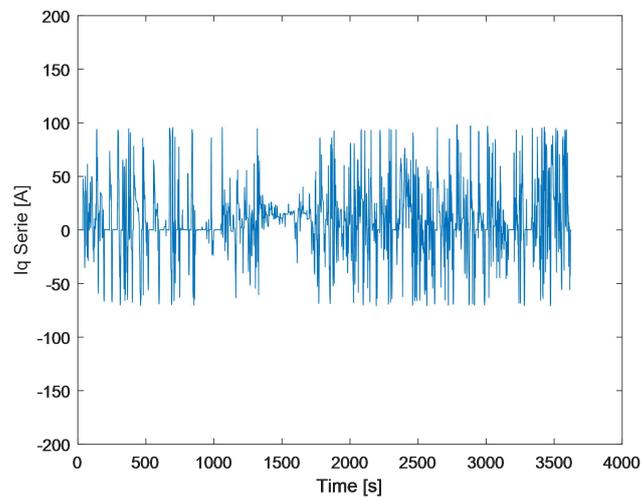
Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti di v_q e i_q , confrontandoli con le grandezze per entrambi le configurazioni. Come si può osservare, si ottiene una riduzione dei picchi di entrambe le grandezze, in particolare a basse velocità il vantaggio si ottiene rispetto alla configurazione in parallelo, poiché la corrente necessaria con il motore a doppio avvolgimento è minore, mentre ad elevate velocità il motore a doppio avvolgimento permette di avere una tensione minore dovuta alla minor forza-contro-elettromotrice rispetto alla configurazione serie.

Come velocità di commutazione si sceglie 4500 *rpm*, in modo da sfruttare al massimo per tutta la regione di coppia costante la configurazione in serie.

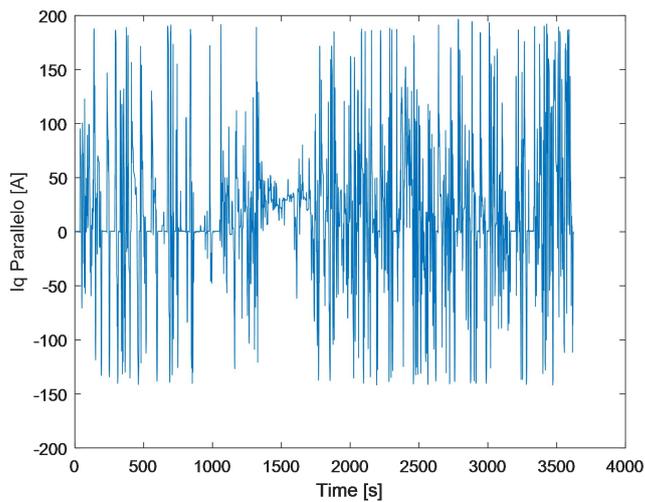
In uscita dall'inverter si ha una corrente minore nel motore a doppio avvolgimento, riducendo così le perdite per effetto Joule e aumentando l'affidabilità dell'inverter stesso.



(a) Valore RMS della corrente nel motore a doppio avvolgimento

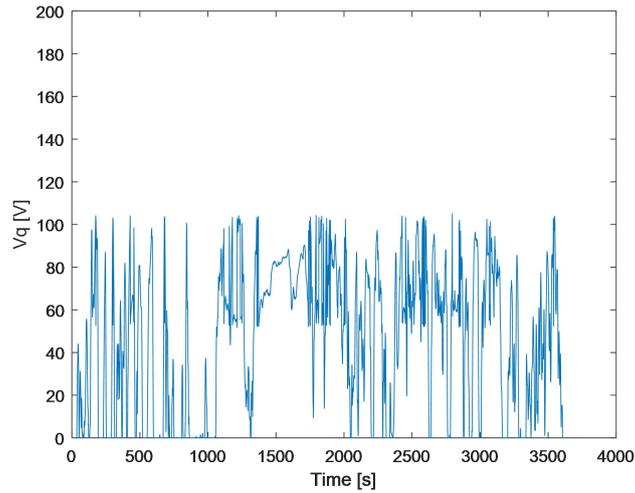


(b) Valore RMS della corrente per il motore in configurazione serie

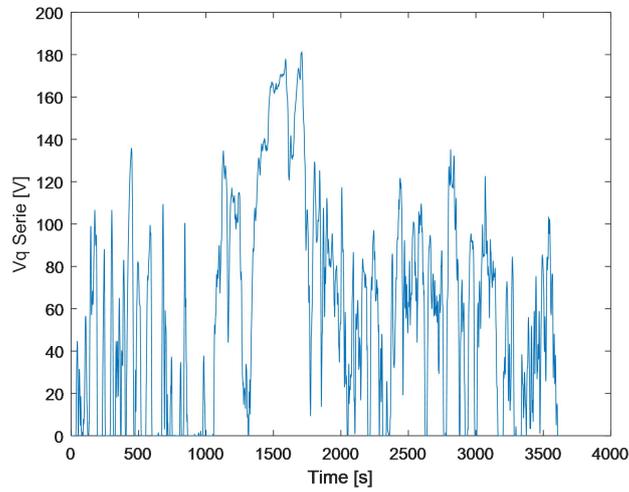


(c) Valore RMS della corrente per il motore in configurazione parallelo

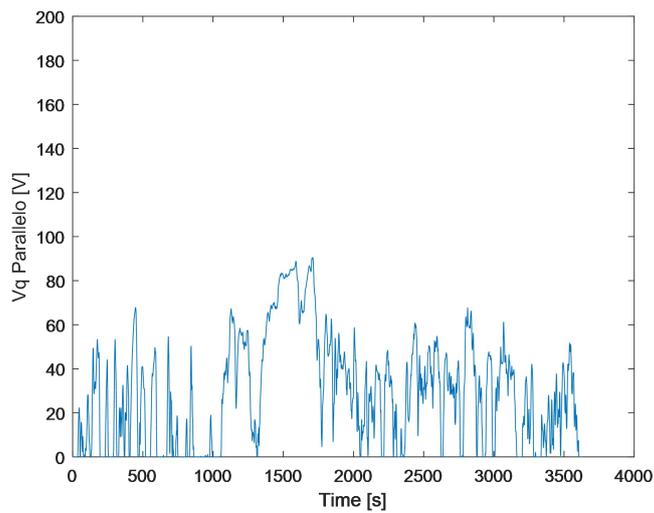
Fig.7.4.1: Confronto delle correnti nel motore a doppio avvolgimento



(a) Valore RMS della tensione per il motore a doppio avvolgimento lungo l'asse q



(b) Valore RMS della tensione per la configurazione serie lungo l'asse q



(c) Valore RMS della tensione per la configurazione parallelo lungo l'asse q

Fig.7.4.2: Confronto delle tensioni nel motore a doppio avvolgimento

Capitolo 8

Conclusioni

Questa tesi mira ad analizzare una delle soluzioni per incrementare l'efficienza dell'intero sistema di propulsione elettrico. La soluzione adottata consiste nel doppio avvolgimento dei conduttori dello statore, che permette tramite dei relè di collegare gli avvolgimenti di statore in serie durante le fasi di partenza e di cambiare il collegamento in parallelo per le alte velocità. Il lavoro viene integrato su un motore già studiato in lavori precedenti e quindi si esegue un confronto delle prestazioni della nuova soluzione, sia relativo alle caratteristiche elettromagnetiche, sia per la prestazione durante un ciclo di lavoro, acquisito tramite un sistema elettronico basato su Arduino montato su una Fiat Panda. I dati acquisiti vengono utilizzati per effettuare simulazioni elettromagnetiche e termiche tramite il software agli elementi finiti Motor-CAD, dal quale si ottengono mappe di efficienza, prestazioni e comportamento termico del motore a magneti permanenti. Tramite simulazioni termiche, si analizza l'integrazione di un sistema di raffreddamento, con l'obiettivo di tenere sotto controllo la temperatura dei componenti del motore elettrico e con lo scopo di ottenere un ulteriore incremento di efficienza. Vengono studiati risultati sia dei cicli di lavoro, sia di transitori termici ed involuppi termici, in cui si analizzano le temperature ammissibili magneti permanenti e degli avvolgimenti di statore. Infine tramite un semplice modello MATLAB, con l'aiuto dell'ambiente di modellazione Simulink, si studiano le variazioni rispetto al motore originale delle grandezze elettriche, tensione e corrente, che si ottengono con la soluzione del doppio avvolgimento.

Future ricerche potrebbe interessare il progetto dell'inverter e analizzare come la soluzione del doppio avvolgimento impatti sulla taglia dello stesso e sull'efficienza del dispositivo. In secondo luogo, si potrebbe implementare un controllo sulla portata del fluido refrigerante in modo da regolarne il flusso in base alle condizioni operative del motore elettrico ed ottenere così un miglioramento di prestazioni o consumi. Oppure studiare anche un sistema di ventilazione forzata da integrare per il raffreddamento del motore.

Bibliografia delle immagini e tabelle

- [3] Faraday, Michael (1822). *On Some New Electro-Magnetical Motion, and on the Theory of Magnetism*. Quarterly Journal of Science, Literature and the Arts. Royal Institution of Great Britain. XII: 74–96 (§IX). Retrieved 12 February 2013
- [12] Bmw. (2022, June 28). *La Tecnica Diventa Semplice: La coppia Nelle auto*. BMW. Retrieved August 30, 2022.
- [16] Cao, Z., Mahmoudi, A., Kahourzade, S., & Soong, W. L. (2021). *An overview of electric motors for Electric Vehicles*. 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC).
- [18] Funzionamento a Vuoto. *Dinamo e Macchina a corrente continua*. Retrieved August 30, 2022.
- [19] Zeno Martini (admin) 189. (n.d.). *Motore Asincrono: Come funziona*. ElectroYou. Retrieved August 30, 2022.
- [21] Angi, N. (2019, September 19). *Motori delle Auto Elettriche: Differenze, pro e contro di varie soluzioni*. SicurAUTO.it. Retrieved August 31, 2022.
- [22] Krishnan, R., Arumugan, R., & Lindsay, J. F. (1988). *Design procedure for switched-reluctance motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 24(3), 456–461.
- [23] *Motori Sincroni a riluttanza: Economici, ecologici, a Prova di Futuro*. Motori sincroni a riluttanza | KOSTAL Drives. (n.d.). Retrieved August 31, 2022.
- [24] Hanselman, D. C. (2006). *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Magna Physics Publishing.
- [25] BLDC. *Permanent magnet synchronous motor with sinusoidal flux distribution* MATLAB - MathWorks Italia. (n.d.). Retrieved August 31, 2022.
- [26] Venuti, S. (2021). *Thermo magnetic Fem modeling of a Pms motor using experimental data*. (thesis)
- [27] Ndr Srl. (2018, September 19). *Surriscaldamento Motore Elettrico? Vediamo Le Classi di Isolamento!* Ndr Srl. Retrieved September 4, 2022.

- [28] Arnold Magnetic Technologies. *Sintered neodymium-iron-boron magnets*. Retrieved September 4, 2022, from <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N30UH-151021.pdf>

Bibliografia degli articoli

- [1] Vicki Duscha, Alexandra Denishchenkova & Jakob Wachsmuth (2019), *Achievability of the Paris Agreement targets in the EU: demand-side reduction potentials in a carbon budget perspective*. *Climate Policy*, 19:2, 161-174.
- [2] *Global electric vehicle sales up 109% in 2021, with half in Mainland China*. Canalys Newsroom. Retrieved August 29, 2022.
- [4] Chan, C. C. (1993). *An overview of electric vehicle technology*. *Proceedings of the IEEE*, 81(9), 1202–1213.
- [5] Maggetto, G. (2000). *Electric and electric hybrid vehicle technology: A survey*. IEE Seminar on Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles.
- [6] Bellur, D. M., & Kazimierczuk, M. K. (2007). *DC-DC converters for electric vehicle applications*. 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo.
- [7] Haizhong Ye, Yang, Y., & Emadi, A. (2012). *Traction inverters in Hybrid Electric Vehicles*. 2012 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC).
- [8] Prajapati, Karan C., Ravi Patel, and Rachit Sagar. *Hybrid Vehicle: A Study on Technology*.
- [9] Barcaro, M., Bianchi, N., & Magnussen, F. (2008). *PM Motors for hybrid electric vehicles*. 2008 43rd International Universities Power Engineering Conference.
- [10] Hong Huang, & Liuchen Chang. (1999). *Electrical two-speed propulsion by motor winding switching and its control strategies for Electric Vehicles*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48(2), 607–618.
- [11] Liuchen Chang. (1993). *Recent developments of electric vehicles and their propulsion systems*. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 8(12), 3–6.
- [13] Hong Huang, & Liuchen Chang. *Tests of electrical-two-speed propulsion by induction motor winding switching for Electric Vehicles*. 1997 IEEE 47th Vehicular Technology Conference. *Technology in Motion*.
- [14] Tsai, M. C., Chou, M. C., & Chu, C. L. *Control of a variable-winding brushless motor with the application in Electric Scooters*. IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485).

- [15] Alamoudi, Y. A., Ferrah, A., Panduranga, R., Althobaiti, A., & Mulolani, F. (2019). *State-of-the art electrical machines for modern electric vehicles*. 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET).
- [17] Parag Jose, C., & Meikandasivam, S. (2016). *A review on the trends and developments in Hybrid Electric Vehicles*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 211–229.
- [20] Richman, R. H., & McNaughton, W. P. (1997). *Permanent-magnet materials: Research Directions and opportunities*. Journal of Electronic Materials, 26(5), 415–422.
- [24] Hanselman, D. C. (2006). *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Magna Physics Publishing.
- [26] Venuti, S. (2021). *Thermo magnetic Fem modeling of a Pms motor using experimental data*. (thesis)
- [27] Hussain, S., Ghorbanian, V., Benabou, A., Clenet, S., & Lowther, D. A. (2016). *A study of the effects of temperature on magnetic and copper losses in Electrical Machines*. 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- [29] Ahn, H., Park, H., Kim, C., & Lee, H. (2020). *A review of state-of-the-art techniques for PMSM parameter identification*. Journal of Electrical Engineering & Technology, 15(3), 1177–1187.
- [30] Kazerooni, M., & Kar, N. C. (2011). *Methods for determining the parameters and characteristics of PMSM*. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC).