

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Confronto di avvolgimenti di tipo coreless e slotless di macchine assiali a
magnete permanente per l'accumulo cinetico

Relatore

Prof. Andrea Tortella

Laureando

Davide Cappellari

1179262

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Introduzione	4
1. Analisi del prototipo	9
2. Analisi coreless	13
2.1. Prova a vuoto	13
2.2. Prova a carico	18
2.3. Analisi parametrica	21
3. Analisi con back iron di statore	28
3.1. M470	29
3.2. M250	36
4. Lamierini speciali	41
4.1. Arnon5	41
4.2. Hiperco50	48
5. Amorphous steel	55
6. Conclusioni	64
7. Bibliografia	66

Introduzione

A partire dagli ultimi decenni, a causa di una serie di problematiche ambientali e economiche, la produzione di energia elettrica si è spostata sempre di più verso le fonti rinnovabili, quali il sole, l'acqua e il vento.

L'avanzamento tecnologico ha permesso di migliorare l'efficienza e diminuire i costi di tali soluzioni, ottenendo una progressiva riduzione dell'utilizzo di combustibili fossili e delle comuni centrali elettriche. L'utilizzo di queste fonti rinnovabili ha portato a indubbi vantaggi ecologici, ma anche a nuove sfide da affrontare per i gestori energetici. Uno dei principali problemi che si sono trovati ad affrontare riguarda l'imprevedibilità delle fonti rinnovabili, che per questo vengono anche definite aleatorie. Non poter fare previsioni sull'energia che potrà essere prodotta complica la regolazione della potenza e quindi della frequenza della rete, che deve essere mantenuta stabile per non creare squilibri e disservizi per i consumatori. Inoltre diventa fondamentale anche l'accumulo energetico, utile appunto a sopperire alla natura aleatoria delle fonti rinnovabili.

Sistemi in grado di compensare le variazioni energetiche hanno assunto, quindi, sempre maggiore importanza, sia mediante l'accumulo dei surplus di produzione, sia mediante la fornitura degli ammanchi nei momenti in cui la produzione è inferiore alla richiesta.

Oltre al mantenimento della stabilità della rete elettrica l'altro grande campo di applicazioni di questi sistemi riguarda l'accumulo energetico: scalandoli opportunamente rispetto a quelli utilizzati per il bilancio della rete, essi possono essere utilizzati anche come degli UPS (Uninterruptible Power Supply). In questo modo è possibile garantire continuità energetica anche a quei dispositivi che possono sopportare una limitata assenza di corrente. Caratteristica del prototipo oggetto di studio è infatti l'immediatezza dei controlli, che garantisce una pronta risposta alle necessità del consumatore. Questo aspetto risulta molto utile dato che le applicazioni per cui viene adottato questo sistema prevedono un utilizzo per brevi intervalli di tempo e fornendo picchi elevati di energia.

Se si devono bilanciare grandi variazioni di potenza in brevi periodi, una soluzione conveniente sono i Flywheel energy storage systems (FESS), i quali hanno un lungo ciclo di vita (attrito meccanico e resistenza dell'aria minime), un basso impatto ambientale, sono insensibili alle variazioni di temperatura e permettono una facile e affidabile determinazione dello stato di carica.

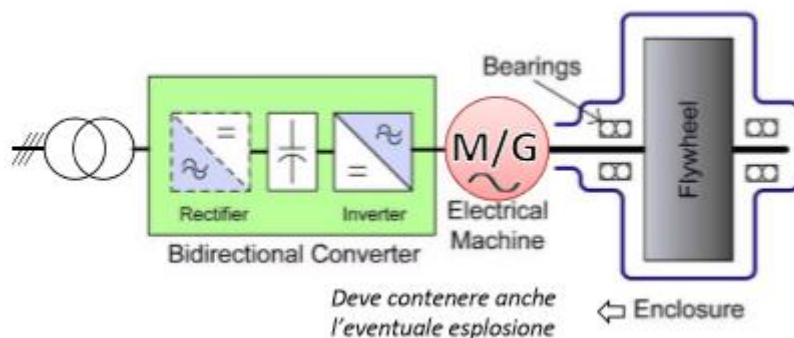


Fig.1 – schema di un FESS

Questi dispositivi sono formati da una massa rotante che accumula energia cinetica in presenza di una coppia accelerante e la rilascia in presenza di una coppia frenante. Le tre principali configurazioni di FESS sono^[1]:

- Integrata: con questa configurazione il motore/generatore (M/G) e il volano sono integrati in uno stesso corpo e la struttura di contenimento è quindi minimizzata (anche se, per fare ciò, lo statore deve avere determinate caratteristiche di tenuta). Viene usata prevalentemente per applicazioni automobilistiche, dove i vincoli di spazio sono più stringenti e l'energia richiesta è inferiore;

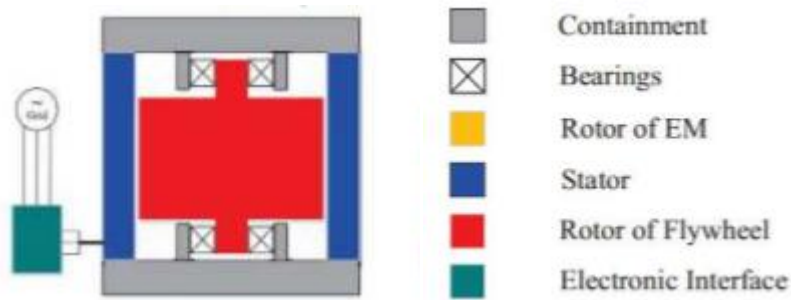


Fig.2 – FESS integrata

- Convenzionale: M/G all'esterno o all'interno dell'involucro, mantenuto a bassa pressione per ridurre le perdite aerodinamiche. Le strutture dell'M/G e del rotore del volano sono separate in modo da ottimizzarne la progettazione. La configurazione con M/G esterno viene utilizzata in quelle applicazioni dove il rotore è sede di alte perdite (calore), cioè quando vengono utilizzate macchine asincrone;

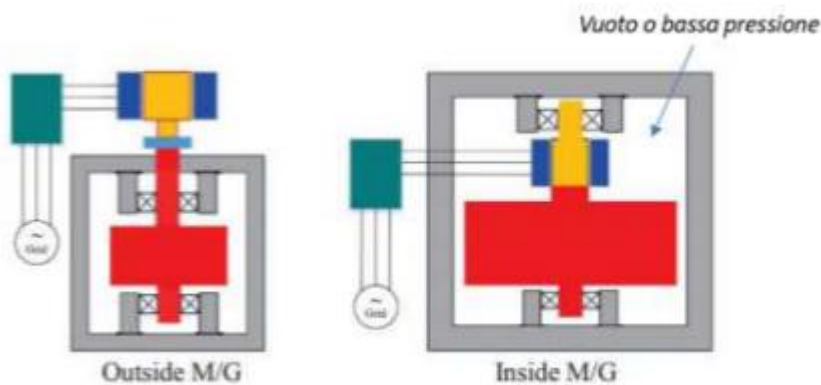


Fig.3 – FESS convenzionale

- Tipo barrel: sono strutture molto compatte, vantaggiose per volani in materiale composito (forme a cilindro cavo, anello, ...). Tuttavia, dal punto di vista dell'accumulo di energia, questa soluzione non presenta un design efficiente per un volano a rotore in acciaio isotropico.

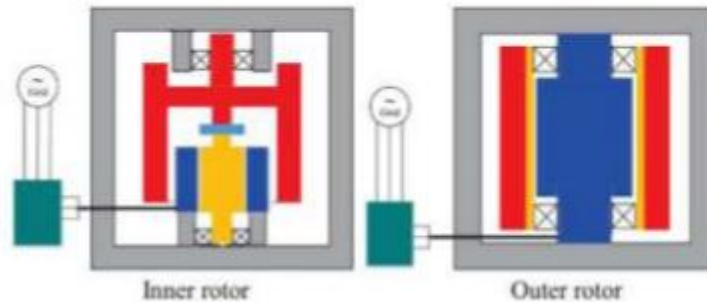


Fig.4 – FESS tipo barrel

Facendo un confronto tra questi sistemi di accumulo e gli altri disponibili sul mercato risultano evidenti gli enormi vantaggi di questi dispositivi, il cui principale problema, però, sono le perdite nei cuscinetti (elevate) e quelle inattive: l'energia accumulata dal volano viene infatti dissipata velocemente all'aumentare del tempo di attesa del sistema, andando a diminuire il rendimento dell'impianto. Per questo motivo è conveniente costruire il volano, che è il componente principale del sistema, utilizzando cuscinetti magnetici, atmosfere a bassa pressione e macchine elettriche ad alta efficienza.

Tabella 1 – Confronto tra sistemi di accumulo dell'energia [2]

	POMPAGGIO IDROELETTRICO	BATTERIE	SUPER CONDENSATORI	FESS
EFFICIENZA %	60	70	90	90
CICLI	1000	100	10000	100000
TEMPO DI CARICA	ore	ore	ore	minuti
DENSITA' DI ACCUMULO	--	media	alta	Più alta
DENSITA' DI POTENZA	--	media	alta	Più alta
VITA DI SERVIZIO	dieci	cinque	dieci	venti
INQUINAMENTO	si	si	no	no

Per poter connettere questi FESS alla rete è necessario l'utilizzo di una macchina elettrica in grado di permettere lo scambio energetico bidirezionale. Le caratteristiche che quest'ultima deve avere sono^[3]:

- Traferro relativamente grande;
- Struttura rotorica robusta;
- Costruzione brushless;
- Basse perdite inattive (o di stand-by).

Negli anni sono state considerate, quindi, tre tipologie di macchine elettriche:

- Macchina asincrona: Indicata solo per alte potenze per la compattezza costruttiva ed il basso costo, ma inadatto all'inserimento del rotore nella camera a vuoto per la difficoltà di rimuovere le perdite;
- Macchina a magneti permanenti (PM): Scelta più diffusa per l'alta efficienza e le basse perdite rotoriche (assenza totale solo per alcune configurazioni). E' possibile ridurre le perdite nel ferro e annullare i fenomeni di 'cogging' utilizzando macchine slot-less (problema fissaggio per sforzi sulle bobine) o coreless (nuclei in aria, uso di magneti ad alta energia);
- Macchina a riluttanza variabile: si distinguono per l'assenza di magneti permanenti, la facilità costruttiva e l'elevata resistenza meccanica. Presentano problemi riguardo il ripple di coppia e il sovradimensionamento dell'inverter.

In queste pagine verrà dapprima considerata una macchina a flusso assiale a magneti permanenti (PMAFM) con statore di tipo coreless (ovvero con avvolgimenti senza nucleo magnetico). I vantaggi ottenuti da questa configurazione rispetto alle macchine con statore ferromagnetico sono^[4]:

- Perdite elettromagnetiche a vuoto e forza attrattiva nulle;
- Induttanza dell'avvolgimento molto bassa, che rende la dinamica del controllo di coppia molto più rapida.

Questo tipo di vantaggi sono particolarmente importanti per l'applicazione per cui è stato pensato il FESS ovvero per sistemi UPS ad integrazione di altri generatori di back-up ad intervento più lento. Inoltre rispetto alle macchine a flusso radiale la PMAFM presenta:

- Ridotte dimensioni verticali e quindi migliore stabilità del volano;
- PM meno suscettibili agli stress radiali.

Per far fronte alla mancanza di un back iron di statore che possa incanalare le linee di flusso, si devono utilizzare dei PM molto potenti (NdFeB), in modo da avere una forza elettromotrice (f.e.m.) indotta adeguata alle applicazioni per cui verrà richiesta la macchina. Gli avvolgimenti scelti sono a singolo strato e le bobine sono di tipo concentrato, favorendo quindi la semplicità costruttiva rispetto alle performance. Sono stati svolti diversi studi riguardo il tipo di avvolgimento ideale per macchine coreless a magneti permanenti, arrivando alla conclusione che la scelta effettuata per questo studio è la migliore per il tipo di macchina scelta.

Il problema principale riscontrato durante la scelta dell'avvolgimento, infatti, è stato quello relativo alla determinazione del coil factor, più difficile da calcolare data l'assenza di cave nella macchina. Nonostante ciò, è stato dimostrato che una PMAFM con elevato numero di poli e avvolgimento concentrato risulta migliore sia della configurazione con avvolgimento sovrapposto^[5] sia di quello distribuito^[6] (tra l'altro anche più difficile da costruire data l'assenza di cave dove alloggiare i

conduttori). Si ha inoltre un beneficio dato dal minor utilizzo di rame nella configurazione con avvolgimento concentrato, dato che le testate sono più corte rispetto agli altri casi considerati. Il collegamento scelto è a stella, in modo da eliminare le componenti di terza armonica dalla concatenata. Data la difficoltà costruttiva e l'elevato costo nel fabbricare una macchina con elevato numero di poli, è stato scelto di studiare un prototipo con 4 poli.

Con un back iron di statore la macchina avrebbe maggiore f.e.m. e minori flussi dispersi, a fronte però di un controllo di coppia meno pronto e di elevate perdite a vuoto; inoltre, si dovrebbe tenere conto delle forze attrattive che i magneti esercitano sullo statore in ferro.

Per studiare le performance della macchina è stato utilizzato un simulatore che potesse rappresentarne fedelmente il comportamento nei diversi istanti di servizio. Il software commerciale utilizzato è Ansys Maxwell che permette la modellazione di circuiti magnetici 2D e 3D.

Dati i problemi riscontrati nelle prestazioni della macchina sono state prese in considerazione varie soluzioni per la realizzazione dello statore, arrivando a considerare diversi tipi (filo Litz) e forme di avvolgimento e l'aggiunta stessa di un back iron di statore.

I risultati ottenuti sono infine stati confrontati e discussi in modo da individuare le migliori caratteristiche che la macchina deve avere per il servizio che le viene richiesto.

1. Analisi del prototipo

La macchina oggetto di questo studio è a flusso assiale a magneti permanenti con statore coreless (PMAFM), il cui servizio è prevalentemente inattivo, dato che deve fornire tutta la potenza su un arco temporale molto breve, per poi restare in attesa di nuove operazioni.

Il prototipo che è stato realizzato ha i seguenti dati:

SPECIFICHE		DIMENSIONI	
		ROTORE	
Energia	1,25 kWh	diametro ext	282 mm
Tempo scarica	17 min	bordo tenuta magneti	6 mm
potenza nominale	4,412 kW	spessore tenuta PM	0 mm
coppie polari	2	raggio ext PM	135 mm
velocità max	18000 rpm	diametro albero	40 mm
	1884,96 rad/s	distanza albero tenuta	25 mm
velocità min	6000 rpm	raggio int PM	51 mm
	628,32 rad/s		50 mm
frequenza max	600 Hz	lunghezza PM	85 mm
frequenza min	200 Hz	altezza PM	10 mm
coppia max	7,02 Nm	angolo PM	63 °
coppia min	2,34 Nm	altezza disco rotorico	10 mm
tensione max	120,00 V	diametro medio	185 mm
tensione min	40,00 V	tau medio	145,30 mm
traferro	2,00 mm	tau min	78,54 mm
			52,36 mm
GRANDEZZE			
STATORE			
bobine serie/fase	1		
bobine parallelo/fase	2		
numero bobine	6		
lunghezza attiva	85 mm		
B max	0,18 T		
Densità max corr.	6,5 A/mm ²		

DIMENSIONAMENTO AVVOLGIMENTO (filo Litz)

conduttori bobina	28 (4 x 7 strati)
corrente max	37,5 A
corrente max bobina	18,75 A
dimensioni	160 x 0,20 mm 2x63
	3,6 x 2,5 mm (+/- 0,20mm)
sezione bobina	252,06 mm ²
rapporto aspetto sez.	1,29
altezza bobina (hc)	14 mm
larghezza bobina (wc)	18,00 mm
spessore supporto bobina	2 mm
altezza totale	16 mm
traferro totale	4,00 mm
angolo bobina	60,00 °
	1,05 rad
lunghezza testata ext	144,51 mm
lunghezza testata int	50,27 mm
perimetro	364,78 mm
Peso	440 g
T°	24 °C
R _{bobina}	35,34 mΩ

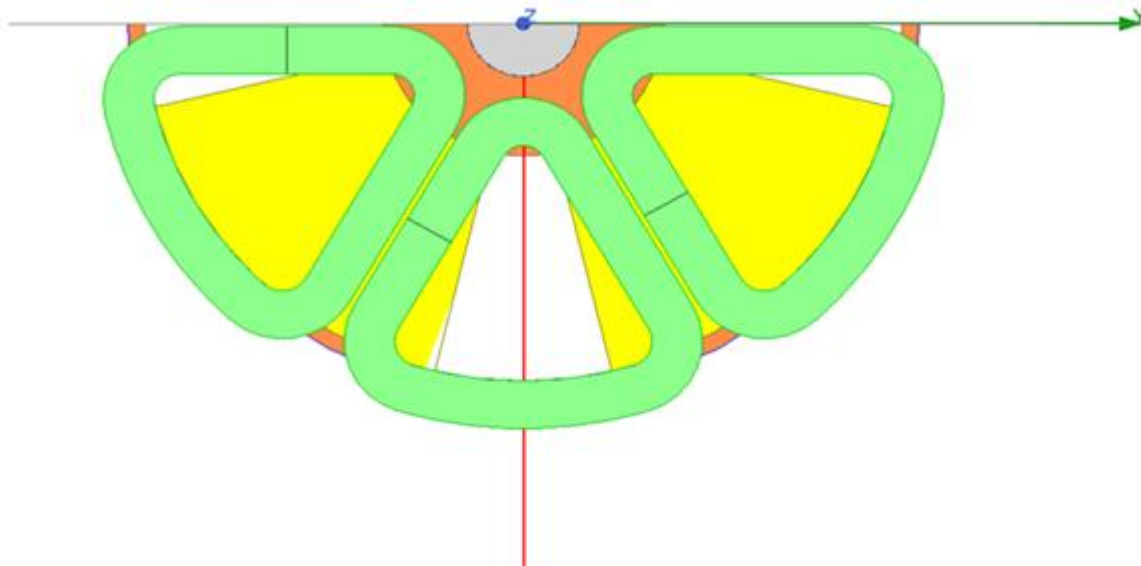


Fig.1.1 – vista dall'alto di mezza macchina (in giallo i magneti)

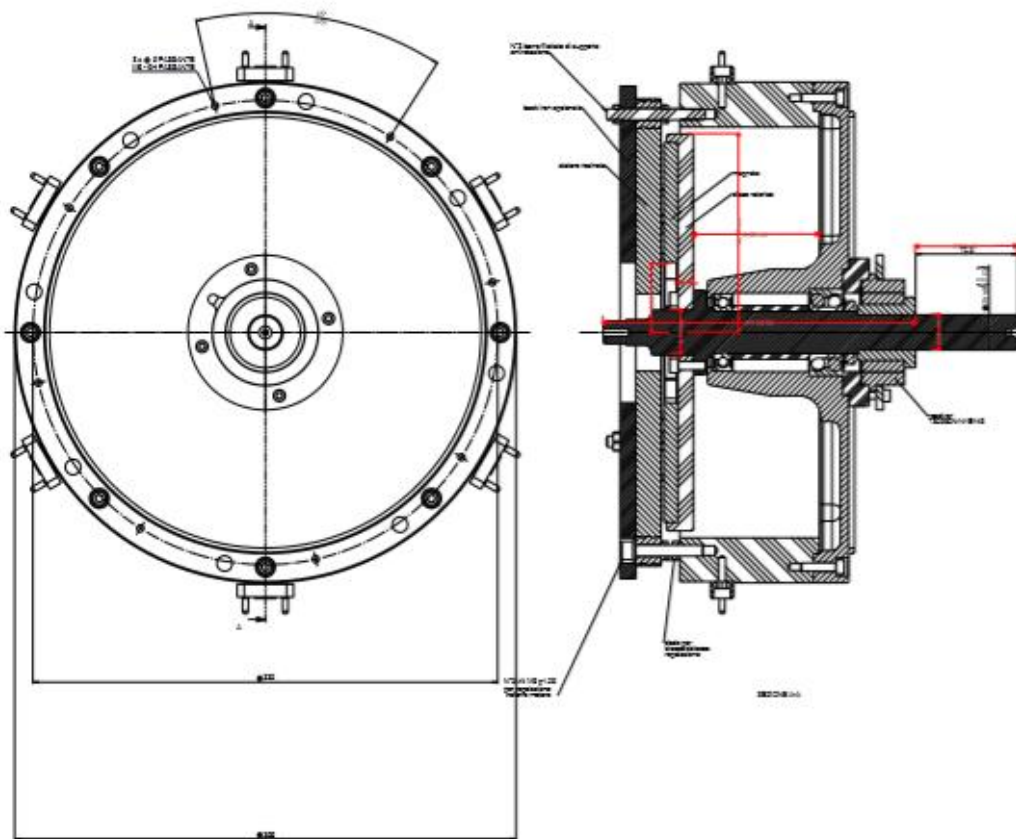


Fig.1.2 – vista frontale e laterale della macchina assemblata

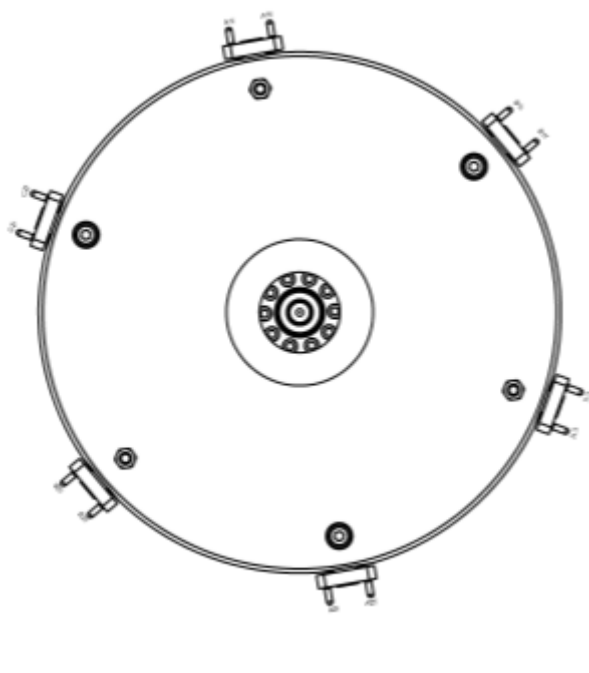


Fig.1.3 – vista statore assemblato con i terminali di connessione per le sei bobine

L'avvolgimento scelto per la macchina è una bobina concentrata in filo Litz ($n_c=6$), che consiste in un numero di fili singoli isolati elettricamente uno dall'altro^[7]. Questo conduttore possiede la caratteristica di avere bassissime perdite nel rame anche a elevate frequenze. L'utilizzo di questo tipo di avvolgimento è necessario a sopperire all'assenza delle cave, che solitamente hanno l'effetto di diminuire le perdite nel rame.

Per poter aumentare la velocità con cui vengono effettuate le varie prove di funzionamento è stato utilizzato il programma Ansys Maxwell, che ha permesso di modificare i parametri della macchina a partire da quelli relativi al prototipo.

Dopo aver verificato che i risultati forniti dal modello siano del tutto simili a quelli ottenuti con il prototipo fisico, è stato possibile avviare il lavoro di analisi vero e proprio: il primo studio è stato quello relativo alle valutazioni delle prestazioni a vuoto della macchina.

2. Analisi coreless

2.1. Prova a vuoto

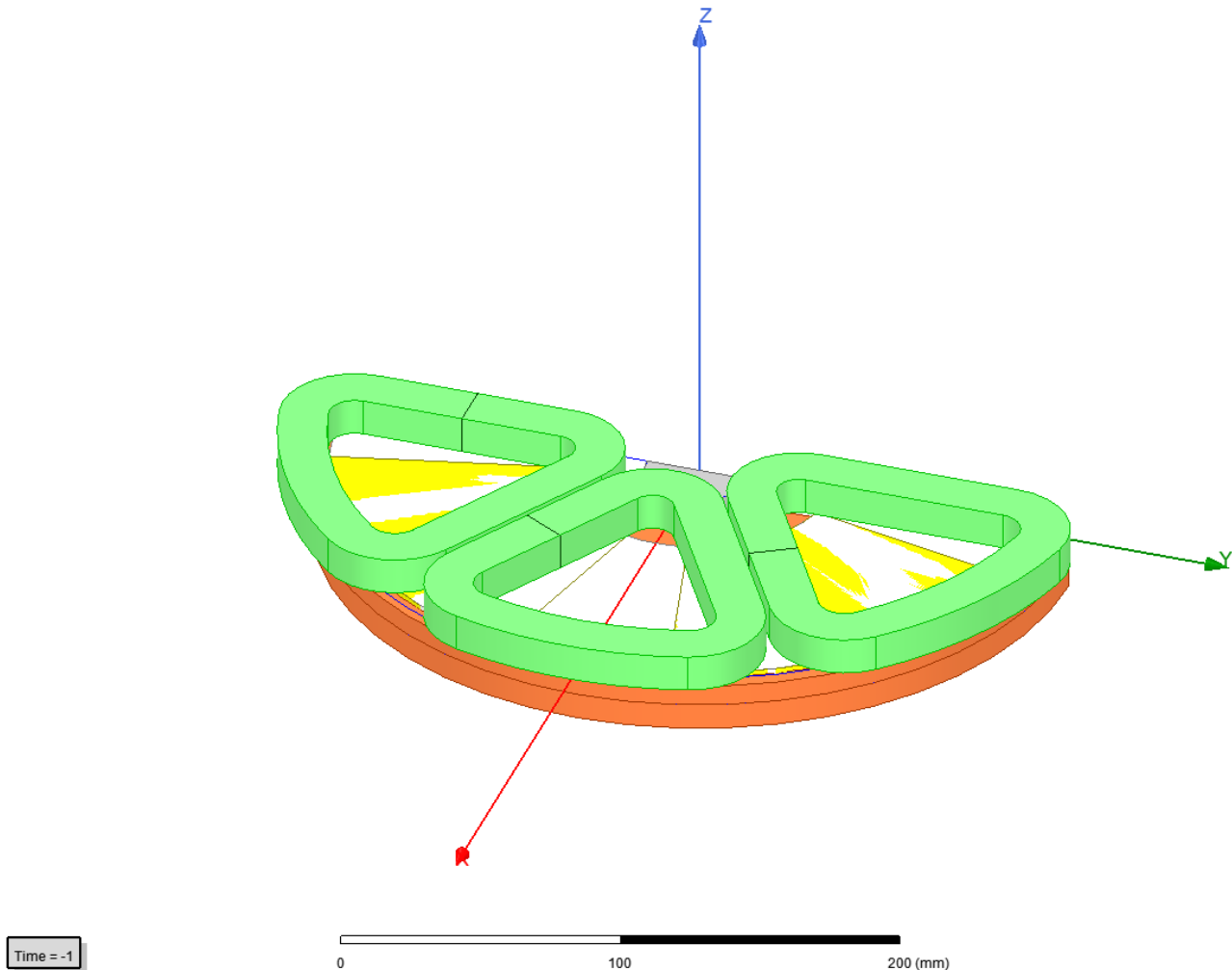


Fig.2.1.1 – modello della macchina creato con Ansys

Focus delle prime analisi compiute sulla macchina sono state le prove a vuoto e i loro risultati. In particolare è stata studiata la forza elettromotrice (f.e.m.) a vuoto, con un'attenzione specifica al suo valore efficace e al suo contenuto armonico. Poiché la macchina deve fornire l'energia immagazzinata in un tempo breve, il suo funzionamento richiede alte velocità e quindi frequenze operative per limitare la coppia a parità di potenza resa. Si ha infatti:

$$P = C \cdot \Omega \quad n = \frac{60f}{p}$$

La frequenza scelta per le simulazioni è di 600 Hz, pari alla massima velocità prevista, cioè $n=18000$ giri/min.

Questa scelta è motivata principalmente dalla verifica del valore massimo di tensione. Nella parte successiva servirà per determinare le perdite a vuoto alla frequenza massima prevista.

Come è possibile vedere nella Fig.2.1.2, la forma d'onda del flusso indotto a vuoto è grossomodo sinusoidale, con valore massimo circa 34 mWb. Tuttavia si riscontra una leggera distorsione che si riflette poi nell'andamento della f.e.m.

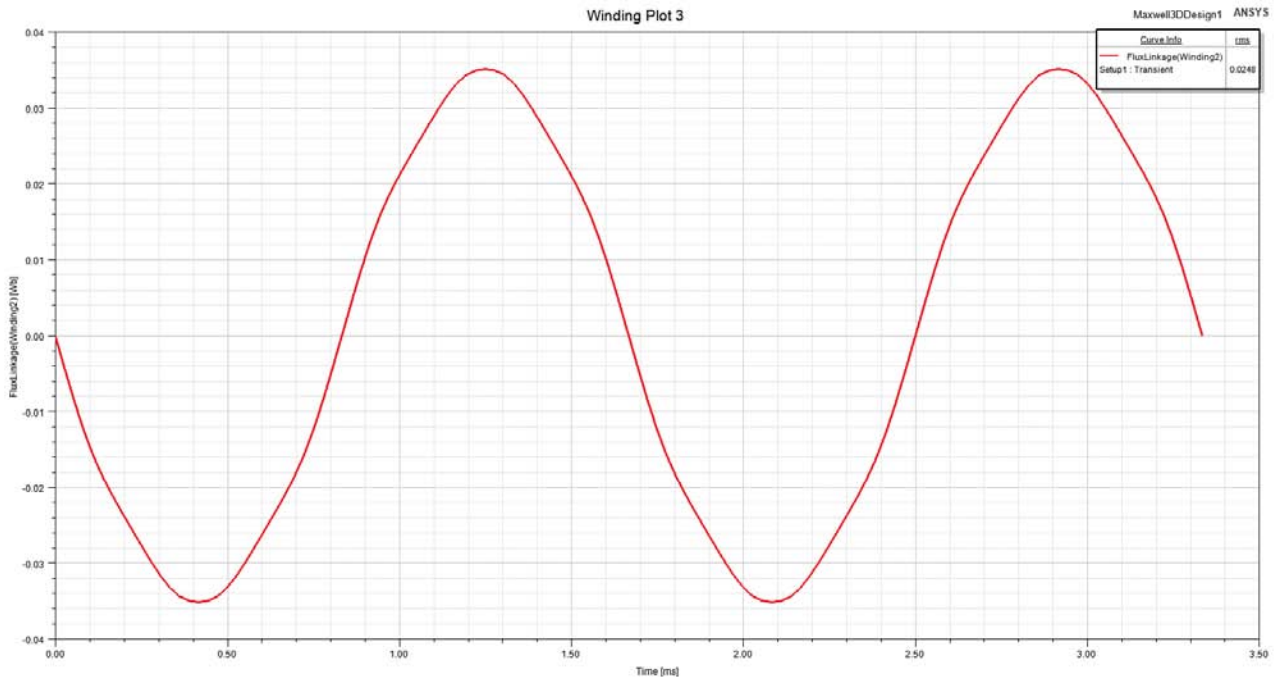


Fig.2.1.2 – flusso indotto a vuoto

La forma d'onda della f.e.m. si presenta fortemente distorta, come dimostrato anche dal contenuto armonico pesantemente influenzato da quinta e settima armonica. Il suo valore efficace è pari a 90,7V.

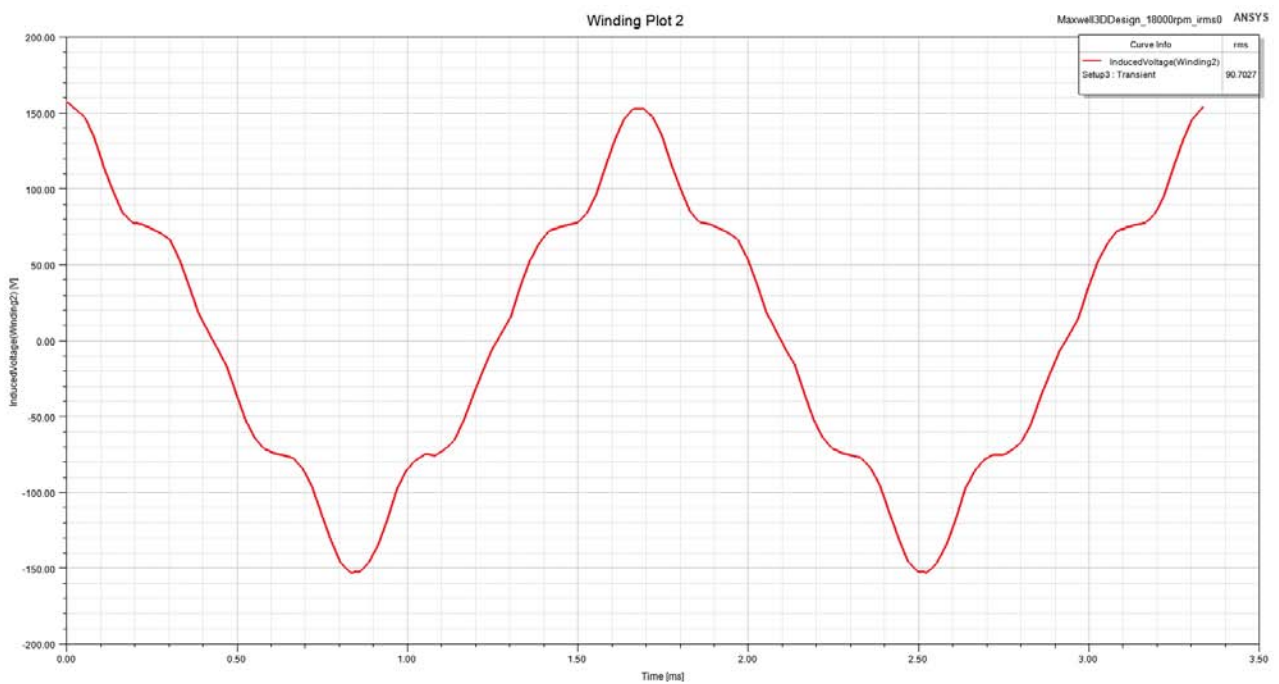


Fig.2.1.3 - f.e.m. a vuoto

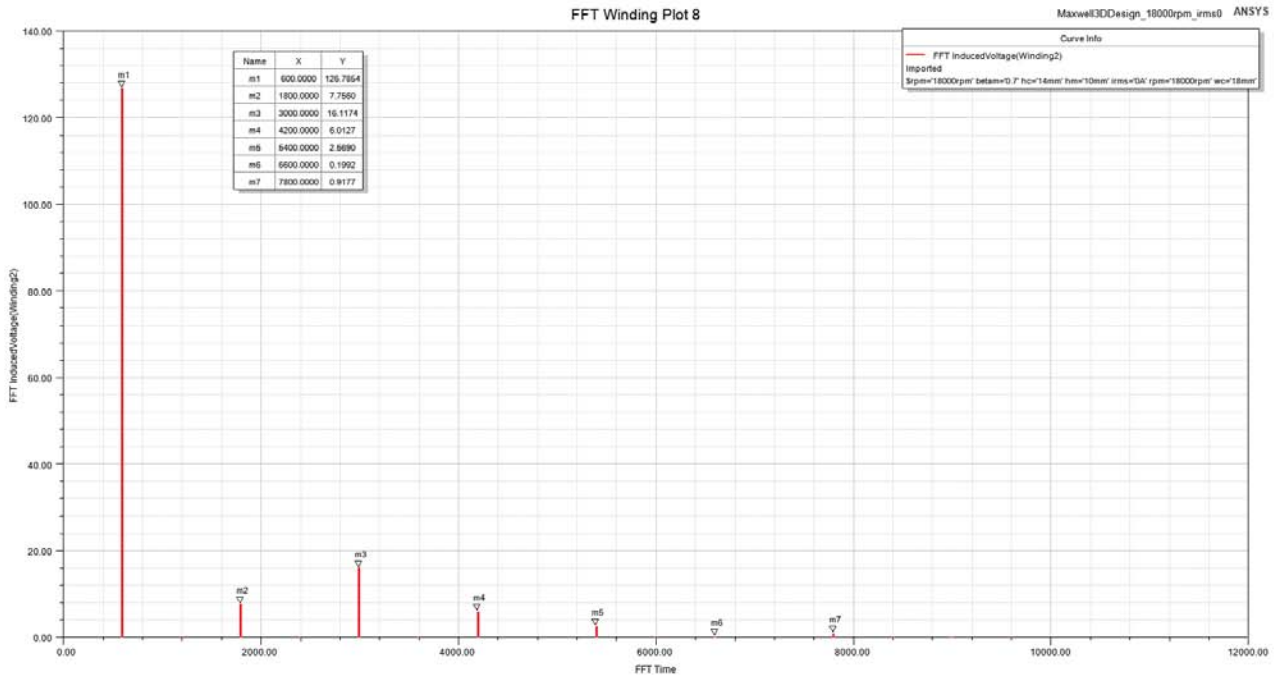


Fig.2.1.4 – contenuto armonico f.e.m. a vuoto

Infatti, nella f.e.m. a vuoto, escludendo la terza armonica non presente nelle concatenate per il collegamento a stella, si ottiene una quinta armonica abbastanza significativa, pari a circa il 9% della fondamentale. Questo risultato è stato sostanzialmente confermato anche dalle misure sul prototipo eseguite a bassa velocità e poi riportate alla velocità simulata con un semplice fattore di scala. Il valore di picco della fondamentale a vuoto è pari a 126,78 V.

Un altro parametro da tenere in considerazione è l'induzione B prodotta dai magneti: dalle Fig.2.1.5, 2.1.6, 2.1.7, ricavate da tre diversi raggi interni alla macchina, si comprende come il contenuto armonico della f.e.m. a vuoto contenga armoniche elevate proprio a causa della forma di questa induzione B, la quale presenta un andamento che si discosta da quello ideale.

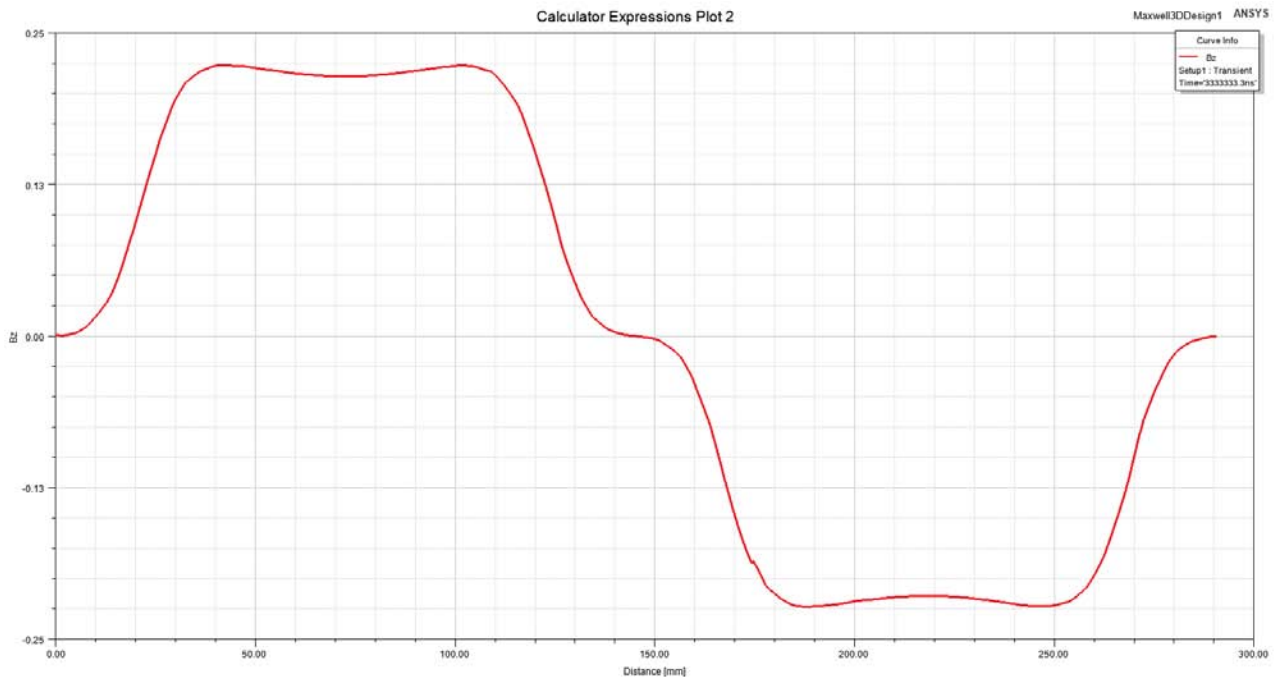


Fig.2.1.5 – induzione B lungo una semicirconferenza interna (raggio R_1)

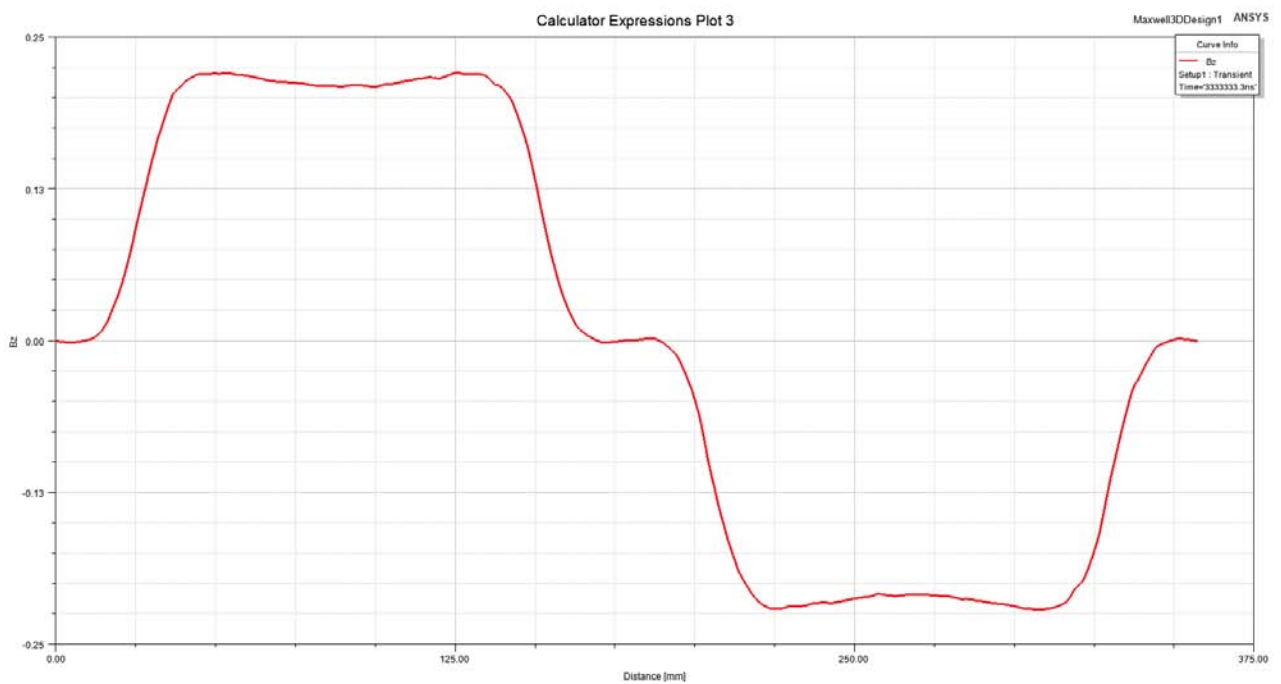


Fig.2.1.6 – induzione B lungo la semicirconferenza media (raggio $R_2 > R_1$)

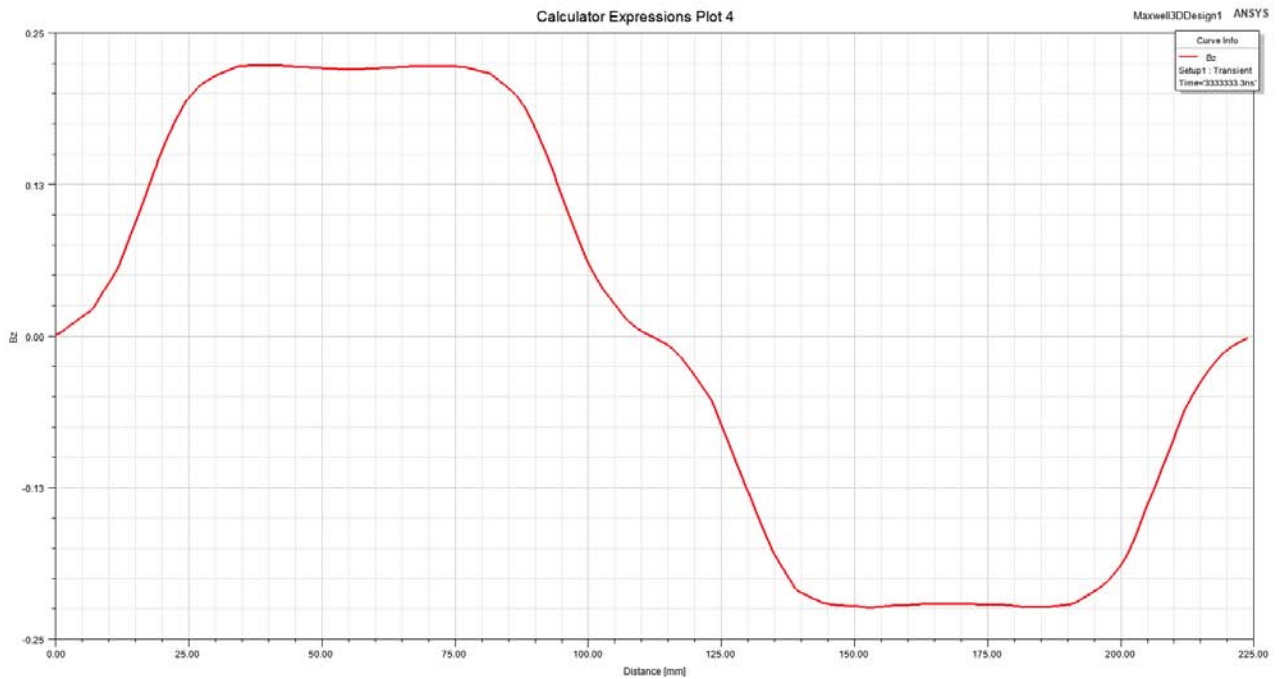


Fig.2.1.7 – induzione B lungo una semicirconferenza interna (raggio $R3 > R2$)

Un altro aspetto da tenere in considerazione durante lo studio della macchina è l'induttanza L: come è possibile vedere dalla Fig.2.1.8, l'induttanza presenta un valore molto basso, caratteristica che favorisce un controllo di coppia molto rapido e preciso.

$$L_{avg} = 63,15 \text{ mH}$$

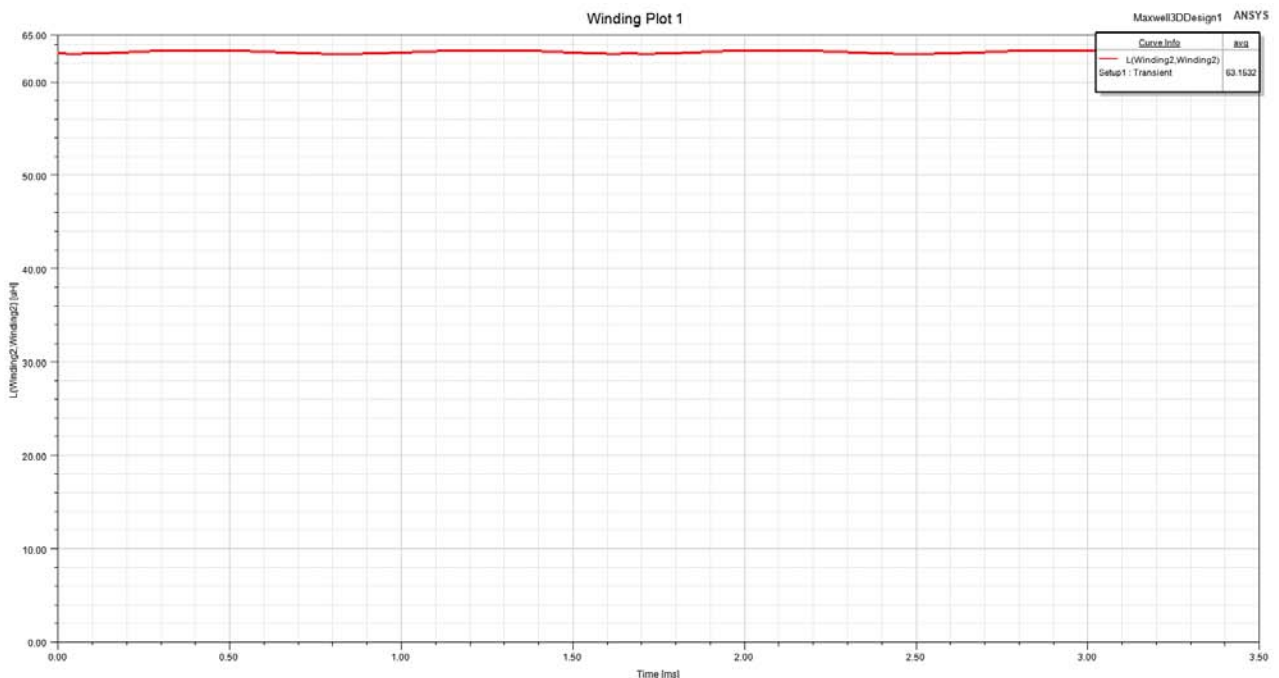


Fig.2.1.8 – andamento dell'induttanza

2.2. Prova a carico

Prima di concentrarsi sulle modifiche da apportare per migliorare il contenuto armonico della f.e.m. è stata studiata la macchina a carico. Si suppone la macchina funzionante da generatore ipotizzando una corrente erogata sinusoidale. Viene assunta una potenza elettromagnetica P_{em} pari a 4,5 kW.

$$P_{em} = 3 \cdot E_{0,1} \cdot I_1 \cdot \cos\gamma = 3 \cdot E_{0,1} \cdot I_q$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3 \cdot E_{0,1} \cdot I_q}{\Omega}$$

Ipotizzando un funzionamento a potenza costante, si ottiene quindi la coppia massima alla velocità minima di funzionamento ($\Omega_m = 6000$ giri/min). Quindi:

$$P_{em} = \text{cost.} = 3 \cdot E_{0,1}(\Omega_m) \cdot I_{qM} = P^* \quad E_{0,1}(\Omega_m) = 40 \text{ V}$$

$$I_{qM} = \frac{P^*}{3 \cdot E_{0,1m}} = 37,5 \text{ A}$$

All'interno dell'avvolgimento ho due percorsi in parallelo, quindi:

$$I_{bobina} = I_{qM}/2 = 18,75 \text{ A}$$

Ottenuto così il valore efficace della corrente si passa ad analizzare gli andamenti della f.e.m. a carico e della coppia.

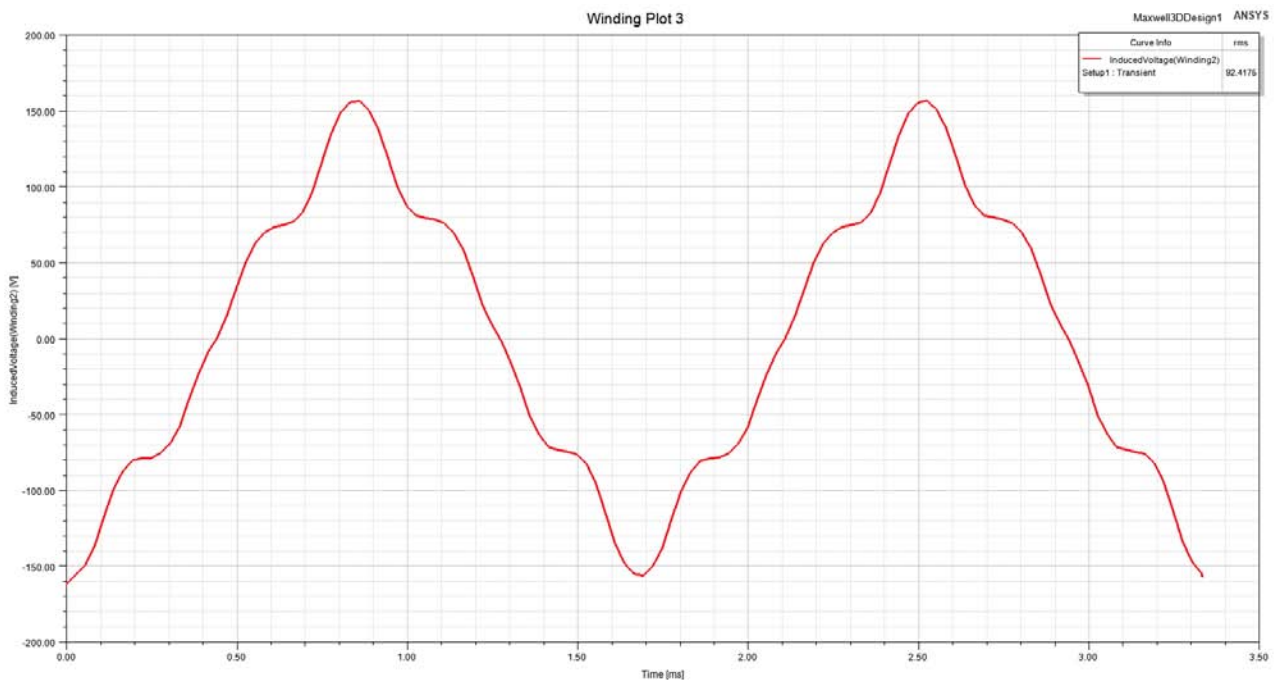


Fig.2.2.1 – f.e.m. a carico

Il valore efficace della f.e.m. a carico risulta pari a 92,42 V.

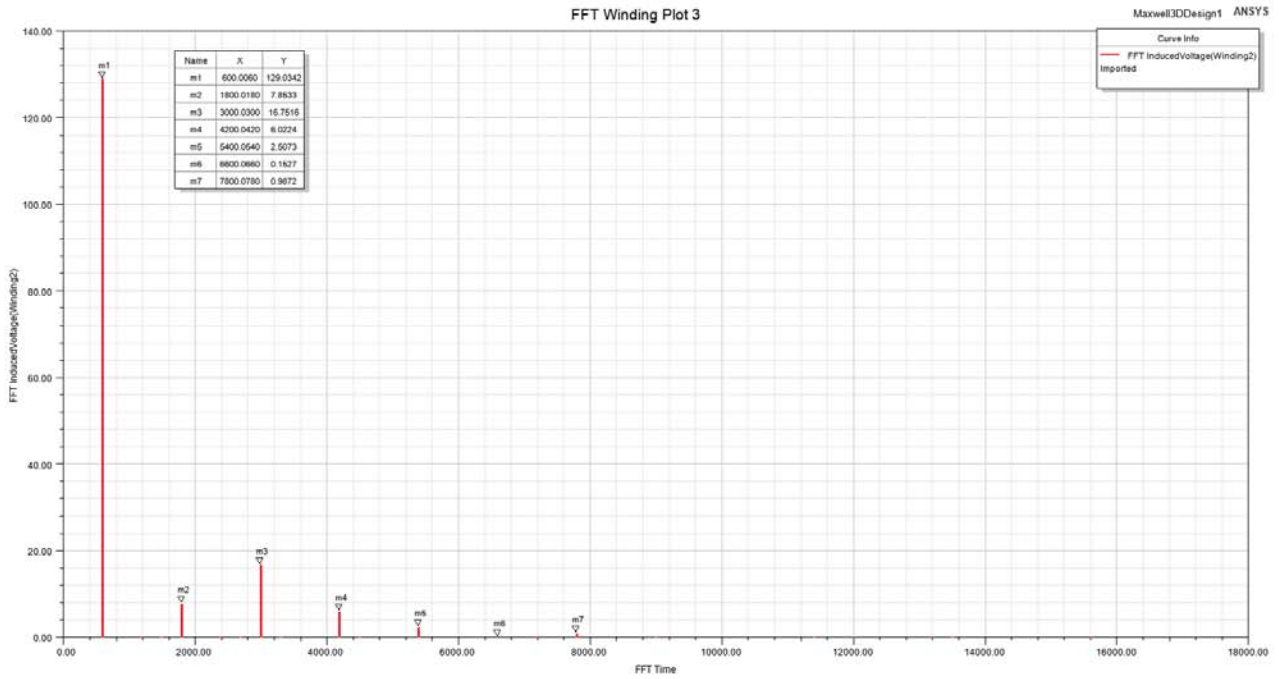


Fig.2.2.2 – contenuto armonico f.e.m. a carico

Nella tabella 2.2.1 vengono riportati i valori di picco delle diverse armoniche della f.e.m. a carico. Dalla loro analisi è possibile notare che i valori ottenuti sono molto simili a quelli studiati a vuoto. Ne consegue che l'effetto della reazione d'indotto sul flusso è praticamente trascurabile.

Tabella 2.2.1 – contenuto armonico f.e.m. a carico

$\hat{E}_{0,1}$	129,03 V
$\hat{E}_{0,3}$	7,85 V
$\hat{E}_{0,5}$	16,75 V
$\hat{E}_{0,7}$	6,02 V
$\hat{E}_{0,9}$	2,51 V
$\hat{E}_{0,11}$	0,15 V
$\hat{E}_{0,13}$	0,98 V

Per quanto riguarda il valore della coppia, invece, essa mostra un andamento periodico caratterizzato dalla presenza di un valore medio, una sesta e una dodicesima armonica, come si può vedere nella Fig.2.2.4. Queste ultime due armoniche sono frutto del prodotto tra la fondamentale di corrente e la quinta e undicesima armonica di tensione.

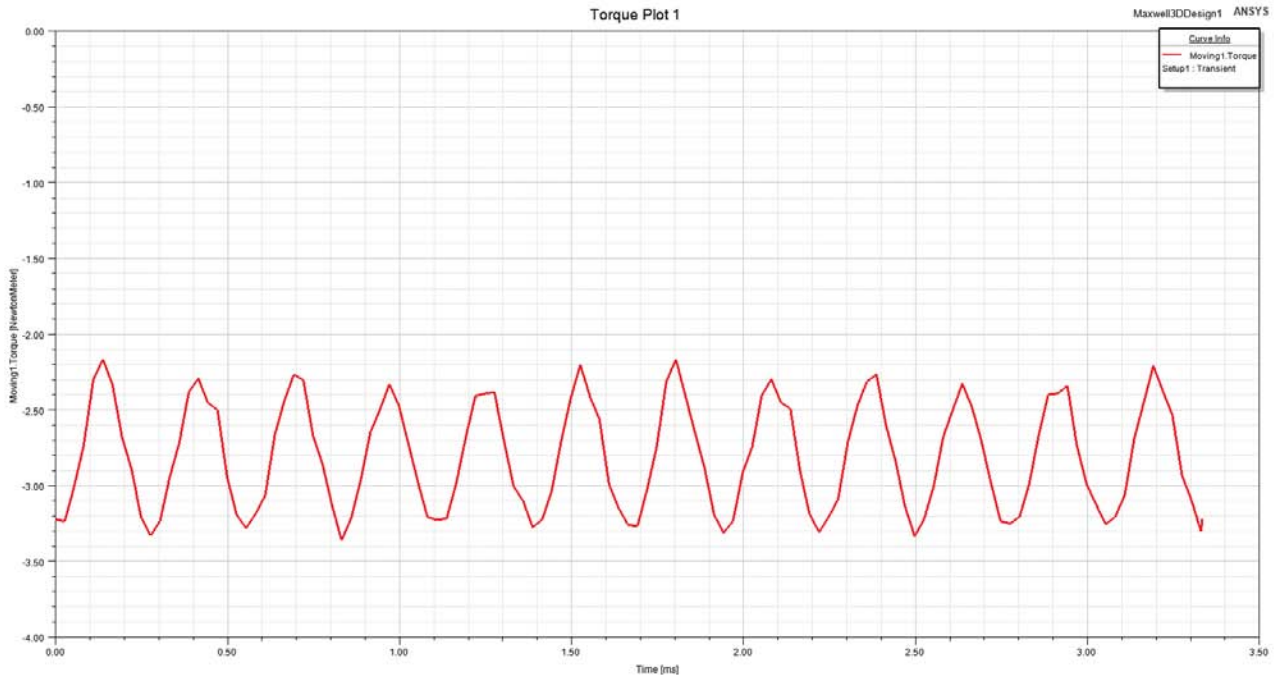


Fig.2.2.3 – coppia elettromagnetica

Per quanto riguarda la coppia elettromagnetica si ha:

Valore medio coppia = -2,49 Nm

Il risultato ottenuto conferma le previsioni perché, se si sostituisce questo valore nelle formule precedentemente scritte, si ricava la potenza P_{em} che era stata ipotizzata per la macchina:

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega = -2,49 \cdot 18000 \cdot \frac{2\pi}{60} = -4,69 \text{ kW}$$

Avendo convenzionato la macchina da generatore, è corretto che la C_{em} e la P_{em} siano negative (coppia frenante e potenza erogata).

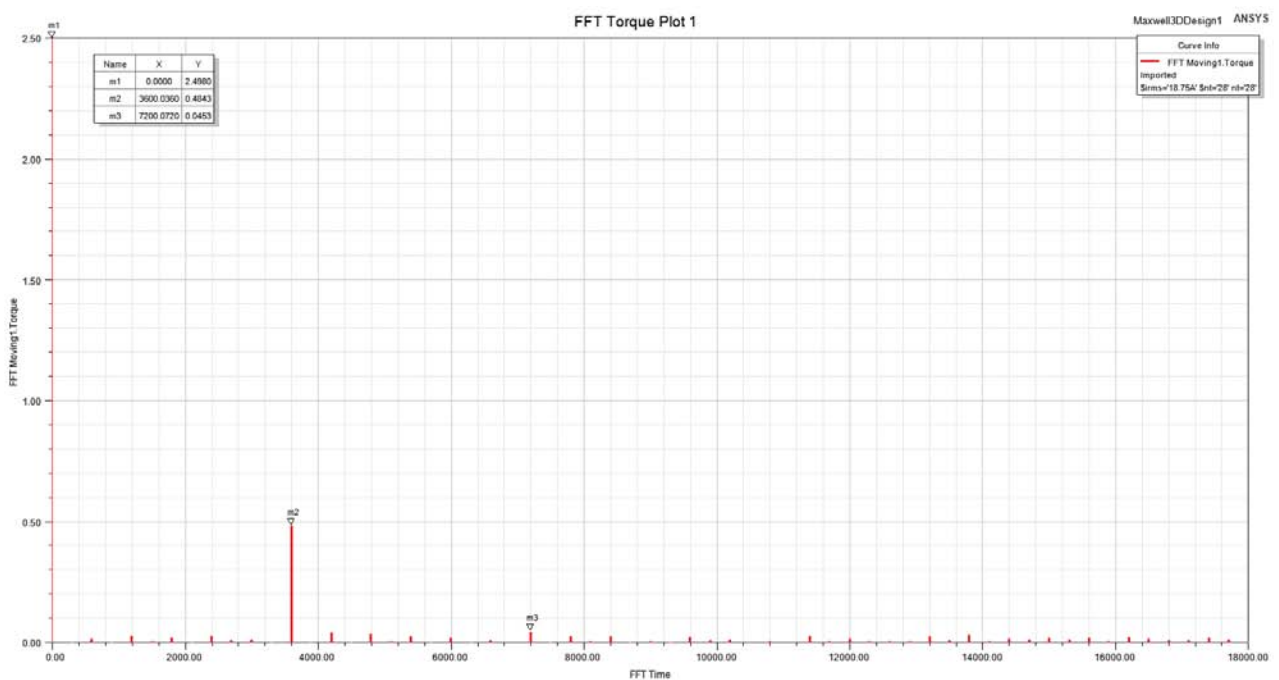


Fig.2.2.4 – contenuto armonico coppia elettromagnetica

Riguardo alle componenti di sesta e dodicesima armonica si ottiene:

$$C_6 = 0,48 \text{ Nm}$$

$$C_{12} = 0,045 \text{ Nm}$$

Viene analizzata, infine, l'induzione B_z lungo un raggio interno della macchina. Come è possibile vedere dalla fig.2.2.5, la curva ha un andamento molto simile a quella ricavata a vuoto, giustificando quanto detto precedentemente riguardo lo scarso effetto della reazione d'indotto.

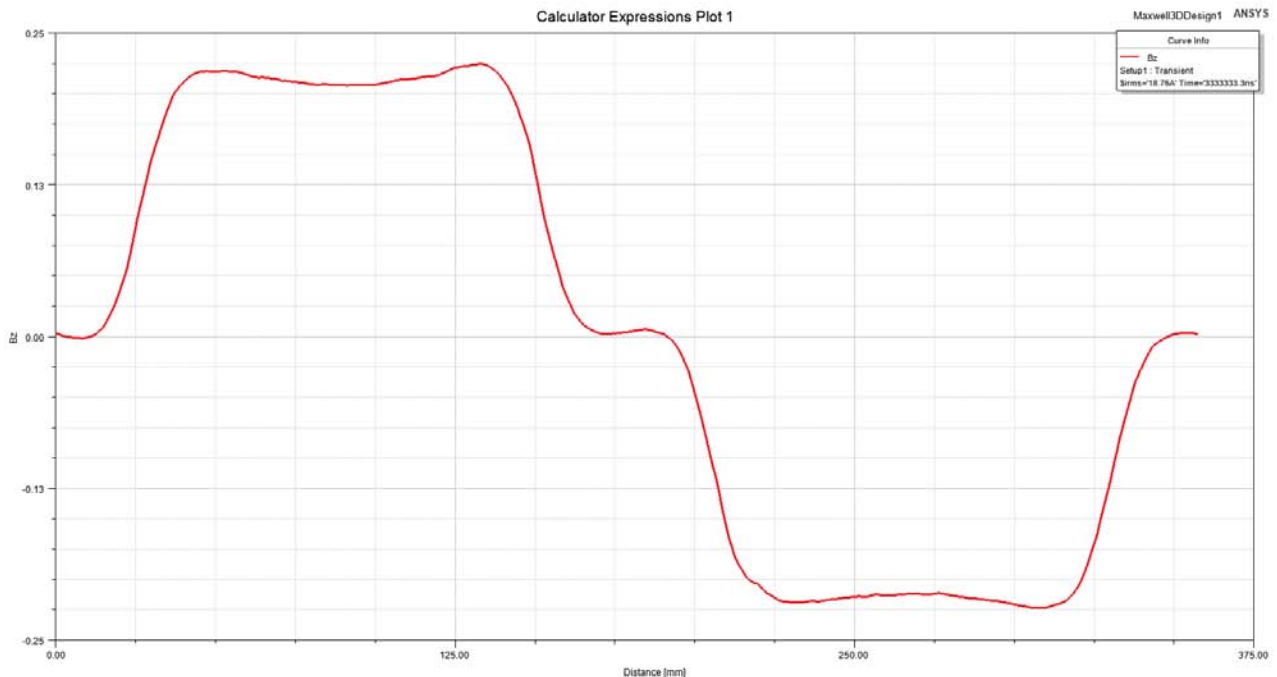


Fig.2.2.5 – induzione B lungo la semicirconferenza media (raggio R2)

2.3. Analisi parametrica

La successiva analisi effettuata sulla macchina è utile per valutare possibili interventi sulla geometria del prototipo per migliorare il contenuto armonico della f.e.m. a vuoto.

Tabella 2.3.1 – contenuto armonico f.e.m. a vuoto

$\hat{E}_{0,1}$	126,8V	0%
$\hat{E}_{0,3}$	7,75V	4,32%
$\hat{E}_{0,5}$	16,12V	8,99%
$\hat{E}_{0,7}$	6,01V	3,35%
$\hat{E}_{0,9}$	2,57V	1,43%
$\hat{E}_{0,11}$	0,19V	0,11%
$\hat{E}_{0,13}$	0,92V	0,51%

La tabella soprastante riporta i valori di picco delle diverse armoniche della f.e.m. a vuoto e il loro rapporto rispetto alla fondamentale (es. $E_{0,3\%} = \frac{7,75}{\sqrt{2} \cdot 126,8} \cdot 100 = 4,32\%$).

La considerevole ampiezza di tali armoniche è da ricercare in tre cause principali:

- L'assenza di un back iron di statore, che permette un miglior confinamento delle linee di flusso;
- La forma delle bobine, che se da un lato permettono una certa semplificazione costruttiva, dall'altro presentano un coefficiente di avvolgimento più scadente;
- La geometria dei magneti.

Per provare a diminuire tale effetto senza andare (ancora) a stravolgere la geometria della macchina, è stata modificata la forma degli avvolgimenti, in modo tale da cercare una configurazione che potesse permettere di ottenere una forma d'onda della f.e.m. a vuoto più simile a una sinusoide. Sono state effettuate le prove riportate nella tabella 2.3.2. Le grandezze rappresentate sono:

Tabella 2.3.2 – parametri geometrici macchina

#	Rcmax	wc	hc	dc	dsc	alfa
1	134	18	14	2	8	30
2	134	18	14	8	14	30
3	134	20	12,6	2	10	30
4	134	19	13	1	12	26
5	134	16	15,8	-3	6	24
6	134	21	12	-7	6	20
7	138	18	14	-3	3	24
8	137	14,5	16	11	14	34

Rcmax = raggio massimo avvolgimento

wc = larghezza bobina

hc = spessore bobina

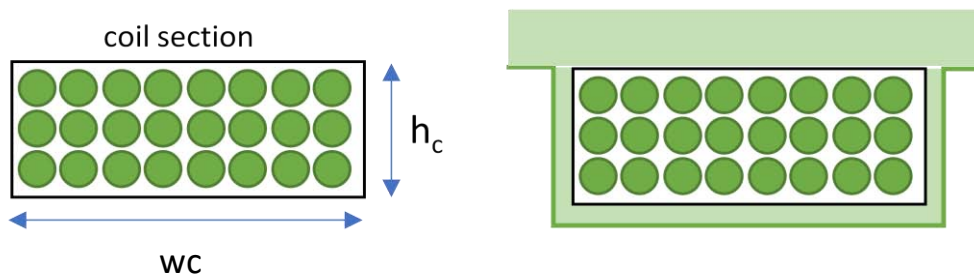


Fig.2.3.1 - bobina

dc = distanza tra i bordi di due bobine adiacenti

dsc = distanza albero testata bobina (indica la distanza tra la testa delle bobine e l'albero della macchina, che si trova in corrispondenza dell'asse z)

alfa = semiangolo bobina

Nella seguente tabella 2.3.3 vengono rappresentate le varie armoniche della f.e.m. (dalla fondamentale alla tredicesima armonica) e il valore efficace totale della forma d'onda. I dati della prima configurazione sono relativi al prototipo.

Tabella 2.3.3 – contenuto armonico e valore efficace (rms) f.e.m. a vuoto

#	$\hat{E}_{0,1}$	$\hat{E}_{0,3}$	$\hat{E}_{0,5}$	$\hat{E}_{0,7}$	$\hat{E}_{0,9}$	$\hat{E}_{0,11}$	$\hat{E}_{0,13}$	$E_{0,rms}$
1	117,91	7,18	15,39	5,78	-2,61	0,099	-1,15	84,36
2	101,58	9,36	6,75	10,95	-0,82	1,11	-0,56	72,71
3	117,46	7,79	14,59	6,74	-2,31	0,32	-0,95	84,03
4	103,91	10,01	6,22	12,30	-0,31	0,69	0,11	74,45
5	106,21	8,77	9,02	11,32	-0,71	1,11	-0,21	76,06
6	98,12	10,89	0,358	12,11	1,48	0,71	0,89	70,34
7	106,65	9,59	8,07	12,34	-0,87	1,35	-0,31	76,44
8	112,54	7,20	14,15	5,15	-2,61	0,069	-1,44	80,47

Al fine di rendere più evidenti le differenze tra le varie configurazioni di avvolgimenti è stato rappresentato anche il contenuto armonico in forma percentuale (Tab.2.3.4): le fondamentali sono tutte rapportate a quella del caso 1 (che infatti ha una percentuale dello 0%) mentre le armoniche superiori (dalla terza alla settima) sono prima calcolate rispetto alla fondamentale del loro avvolgimento (ad es. la terza armonica del caso 2 è pari a $\frac{9,36}{101,58} \cdot 100 = 9,2\%$) e rispetto alle corrispondenti armoniche del caso 1.

Tabella 2.3.4 – contenuto armonico % f.e.m. a vuoto rispetto alla fondamentale del caso 1 e rispetto alle corrispondenti armoniche del caso 1

#	$\hat{E}_{0,1}$	$\hat{E}_{0,3}$	$\hat{E}_{0,5}$	$\hat{E}_{0,7}$	$\hat{E}_{0,3}$	$\hat{E}_{0,5}$	$\hat{E}_{0,7}$
1	0,0%	6,1%	13,1%	4,9%	100,0%	100,0%	100,0%
2	-13,9%	9,2%	6,6%	10,8%	130,4%	43,86%	189,4%
3	-0,4%	6,6%	12,4%	5,7%	108,5%	94,80%	116,6%
4	-11,9%	9,6%	6,0%	11,8%	139,4%	40,41%	212,8%
5	-9,9%	8,3%	8,5%	10,7%	122,1%	58,61%	195,8%
6	-16,8%	11,1%	-0,4%	12,3%	151,7%	2,33%	209,5%
7	-9,6%	9,0%	7,6%	11,6%	133,6%	52,44%	213,5%
8	-4,6%	6,4%	12,6%	4,6%	100,3%	91,94%	89,1%

Nella Fig.2.3.2 viene riportato il grafico con le armoniche, dalla terza alla settima, calcolate rispetto alla prima armonica di ciascuna configurazione di avvolgimento, e con le fondamentali rapportate a quella del prototipo.

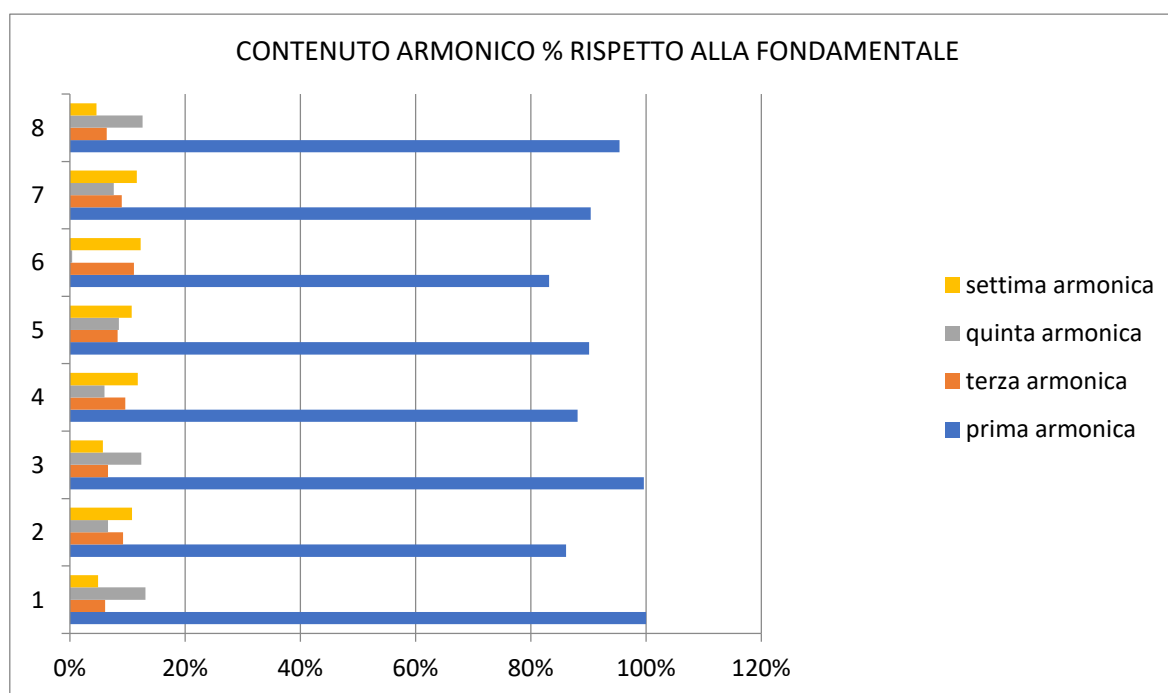


Fig.2.3.2 – contenuto armonico % rispetto alla fondamentale

Questo ulteriore grafico, invece, rappresenta le armoniche tre, cinque e sette tutte rapportate alle corrispondenti armoniche del caso 1.

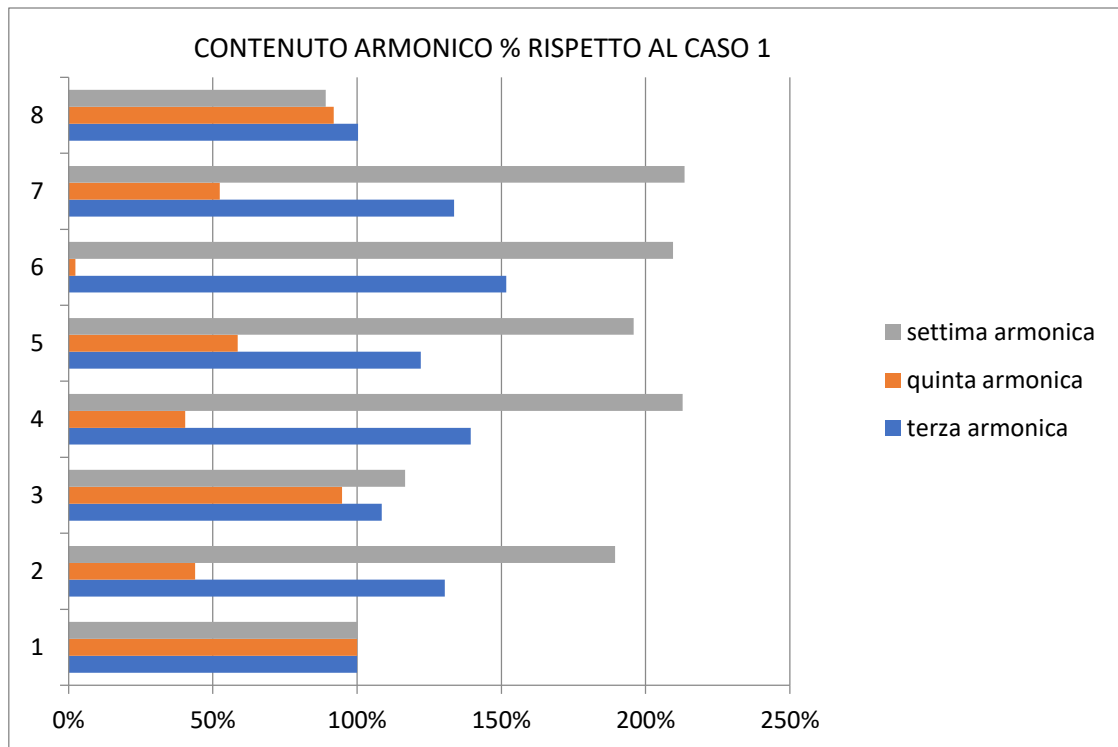


Fig.2.3.3 – contenuto armonico % rispetto al caso 1

A partire dal caso 1 (Fig.2.3.4), le variazioni più significative riguardano i seguenti casi:

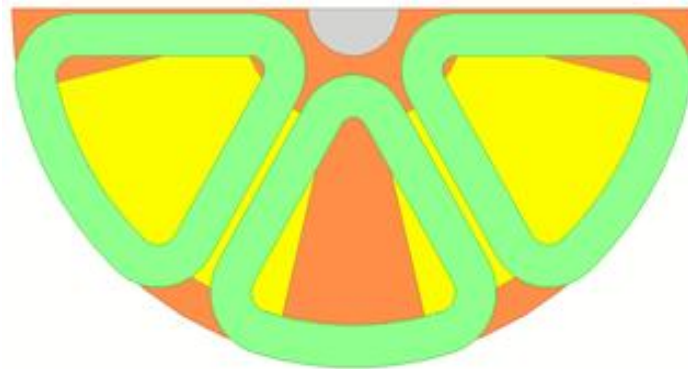


Fig.2.3.4 – caso 1

- Il terzo, che ha presentato una diminuzione di quinta armonica (-0.7%), un leggero incremento di settima (+0.8%) e mantiene un valore di fondamentale molto simile al caso uno (-0.4%);

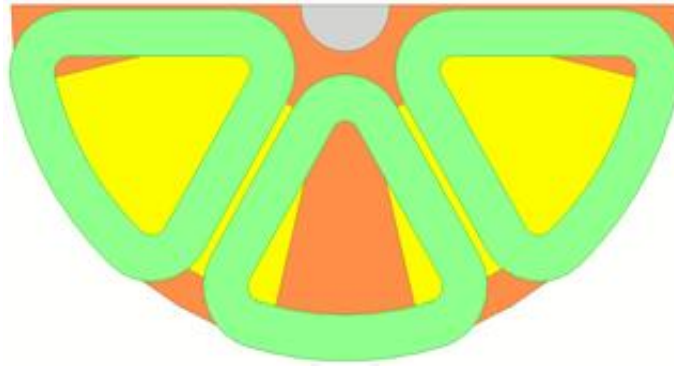


Fig.2.3.5 – caso 3

- Il quarto, che nonostante abbia presentato una decisa diminuzione del valore della fondamentale di tensione (-11.9%) e un incremento di settima armonica rispetto al caso uno (+6.9%), ha registrato una diminuzione di quinta armonica (-7.1%);

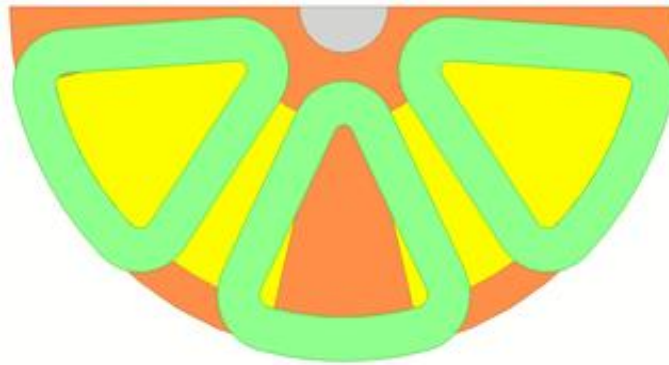


Fig.2.3.6 – caso 4

- Il settimo, che ha un andamento molto simile al quarto caso: diminuzione di quinta armonica (-5.5%), ma aumento di settima (+6.7%) e più significativa riduzione della fondamentale (-9.6%);

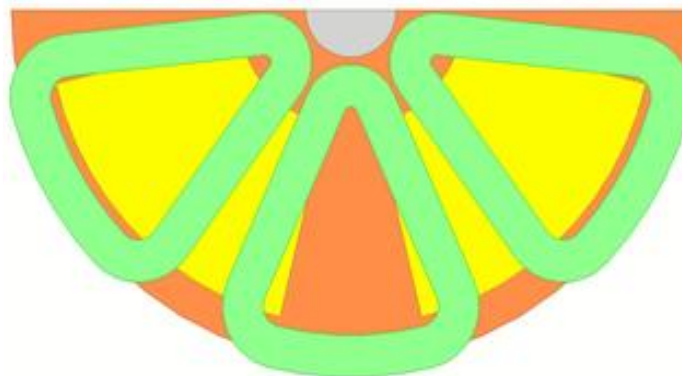


Fig.2.3.7 – caso 8

- l'ottavo, che ha visto una lieve diminuzione di fondamentale (-4.6%), quinta (-0.5%) e settima (-0.3%) armonica.

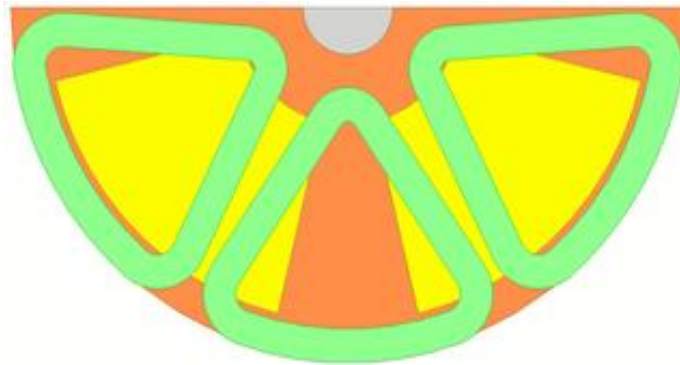


Fig.2.3.8 – caso 9

Nessuna delle modifiche ha portato un beneficio effettivo sulla diminuzione delle armoniche di disturbo più importanti, che sono influenzate in particolar modo dalla forma dell'induzione prodotta dai magneti. Quindi l'avvolgimento non ha subito variazioni. Al fine di migliorare le prestazioni della macchina, sono invece stati apportati accorgimenti di diversa natura.

Dopo aver analizzato il funzionamento a carico e aver compiuto l'analisi parametrica della macchina, vengono studiate possibili modifiche più incisive al fine di migliorarne le prestazioni. La prima notevole modifica compiuta è quella relativa alla geometria della macchina, che ha visto l'inserimento di un back iron di statore, in modo da migliorare il contenuto armonico della f.e.m. a vuoto, aumentandone anche il valore efficace. Inserendo il giogo ferromagnetico, però, sono state introdotte le perdite del ferro statoriche in macchina, prima trascurabili, una forza attrattiva che sollecita i cuscinetti ed è stata incrementata l'induttanza.

Per trovare la migliore combinazione possibile tra materiale utilizzato e dimensioni scelte, sono state testate diverse configurazioni di back iron di statore. Per mantenere la potenza invariata sono possibili due strade: la prima considera una sensibile riduzione della corrente, mentre la seconda consiste nel ridurre il numero di spire a parità di sezione, riducendo così anche la caduta di tensione sull'impedenza interna della macchina. Nel seguito dello studio verrà analizzata questa seconda opzione.

3. Analisi con back iron di statore

Sono stati studiati diversi materiali, con diverse caratteristiche ferromagnetiche, per determinare quale potesse garantire le migliori performance alla macchina nelle condizioni di funzionamento per cui è stata progettata: il prototipo oggetto di studio deve funzionare da UPS, quindi deve garantire picchi di potenza in brevi periodi e deve lavorare in servizio discontinuo, per lo più con funzionamento inattivo. In questa situazione il contenimento di eventuali perdite è fondamentale.

Inizialmente sono stati utilizzati diversi lamierini convenzionali che offrono vantaggi in termini di economicità e fattibilità costruttiva per verificare le loro prestazioni con frequenze di lavoro più elevate.

Dal punto di vista della geometria, sono stati tenuti invariati il raggio esterno (140 mm) e il raggio interno (35mm), mentre l'altezza è stata considerata come variabile di progetto.

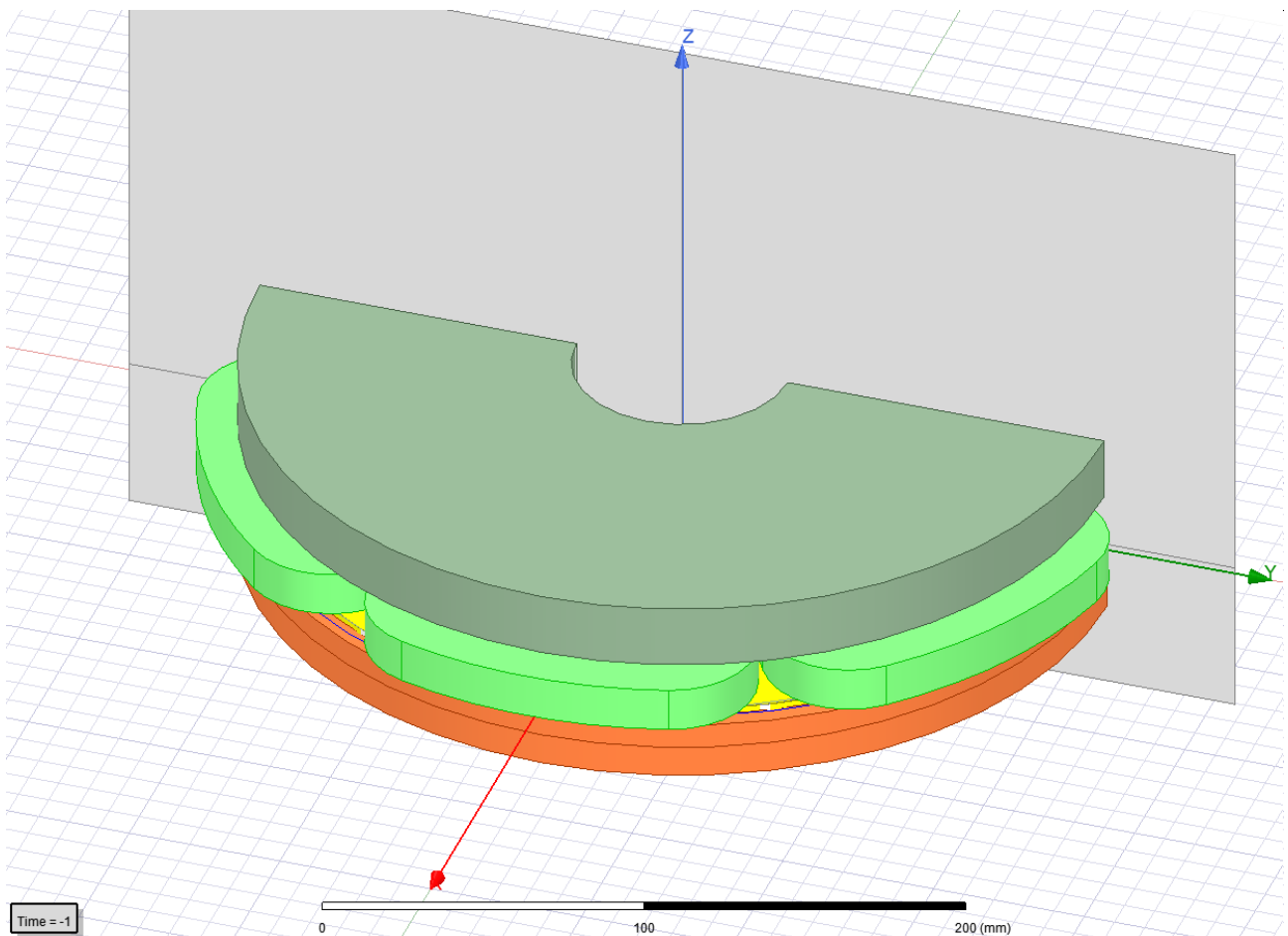


Fig.3.1 – modello macchina con back iron realizzato con Ansys

3.1. M470

Come prima prova per il back iron di statore sono stati scelti dei lamierini M470-50A. Per poter utilizzare tale materiale in Ansys è stato necessario cercare in letteratura la caratteristica b-h^[8] e la caratteristica di perdita specifica del materiale e inserirne i valori all'interno del software.

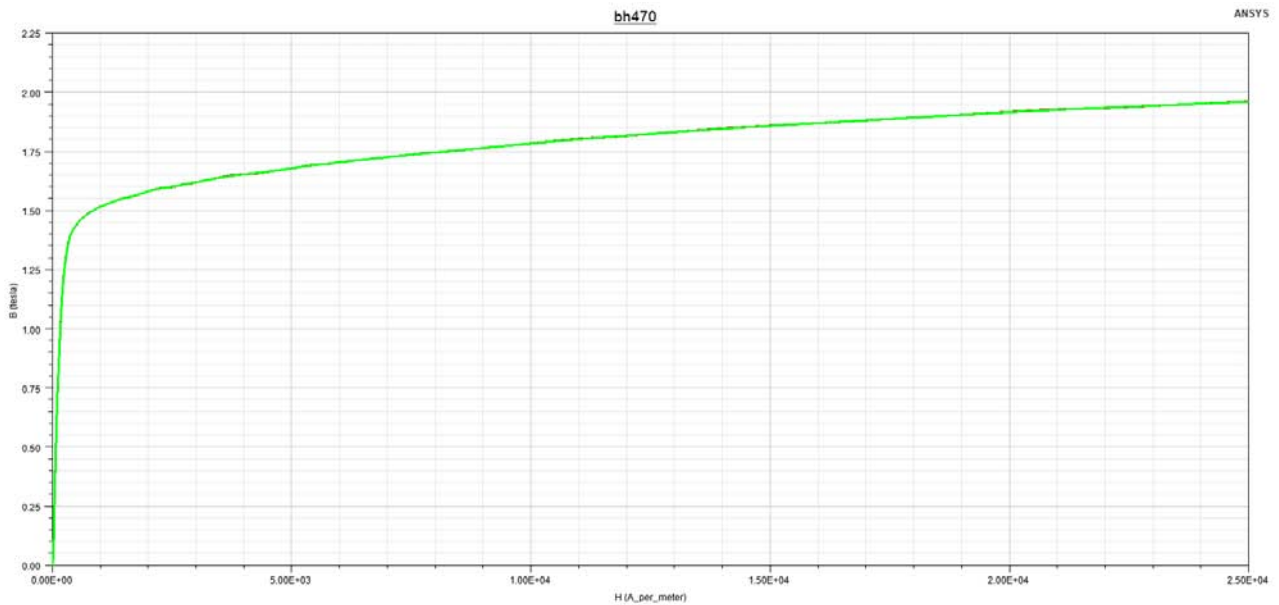


Fig.3.1.1 – caratteristica b-h

Come è possibile vedere dalla caratteristica sopra riportata questo materiale presenta una caratteristica b-h con un ginocchio di saturazione intorno a 2 T.

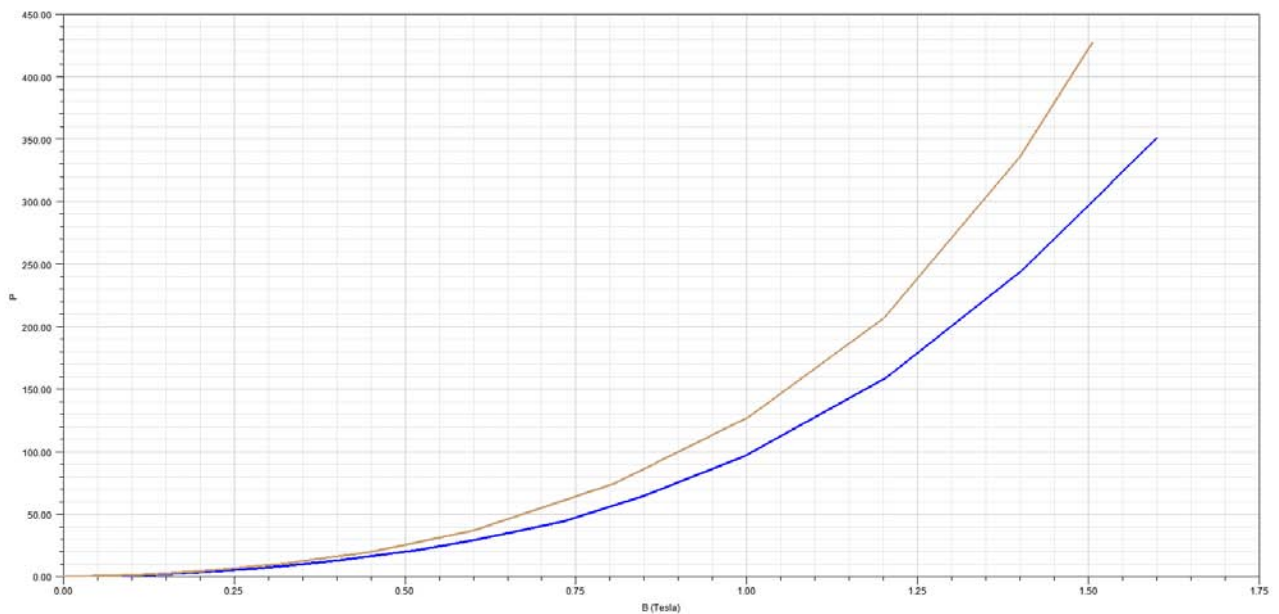


Fig.3.1.2 – caratteristica di perdita specifica con freq =600(blu) e 700(grigio) Hz

Per quanto riguarda le perdite specifiche, invece, le caratteristiche mostrano un aumento più che lineare delle perdite (espresse in W/kg) all'aumentare dell'induzione (T).

L'inserimento di uno statore ferromagnetico ha determinato la perdita di alcuni vantaggi ottenuti dalle caratteristiche coreless della macchina. Tra questi, si è verificato un aumento non trascurabile delle perdite nel ferro. Queste perdite dipendono dal tipo di materiale utilizzato, e richiedono una particolare attenzione, poiché la frequenza di lavoro è sensibilmente superiore a quella industriale. Risultano poi necessarie delle verifiche relative agli eventuali problemi legati al peso del back iron e alla forza con cui esso viene attratto dai magneti.

Le prime prove effettuate con questo materiale sono state realizzate a vuoto e con diversi spessori, in modo da individuare le dimensioni che garantivano le minori perdite (P0) e il migliore contenuto armonico della f.e.m. a vuoto.

Inizialmente sono stati presi in considerazione spessori del traferro da 5mm a 10mm; i risultati ottenuti sono riportati nella tabella 3.1.1:

Tabella 3.1.1 – variazione flusso a vuoto per diversi spessori del back iron

Spessore back iron (mm)	Φ (mWb)
5	42,9
6	45,2
7	47,1
8	48,6
9	49,6
10	50,3

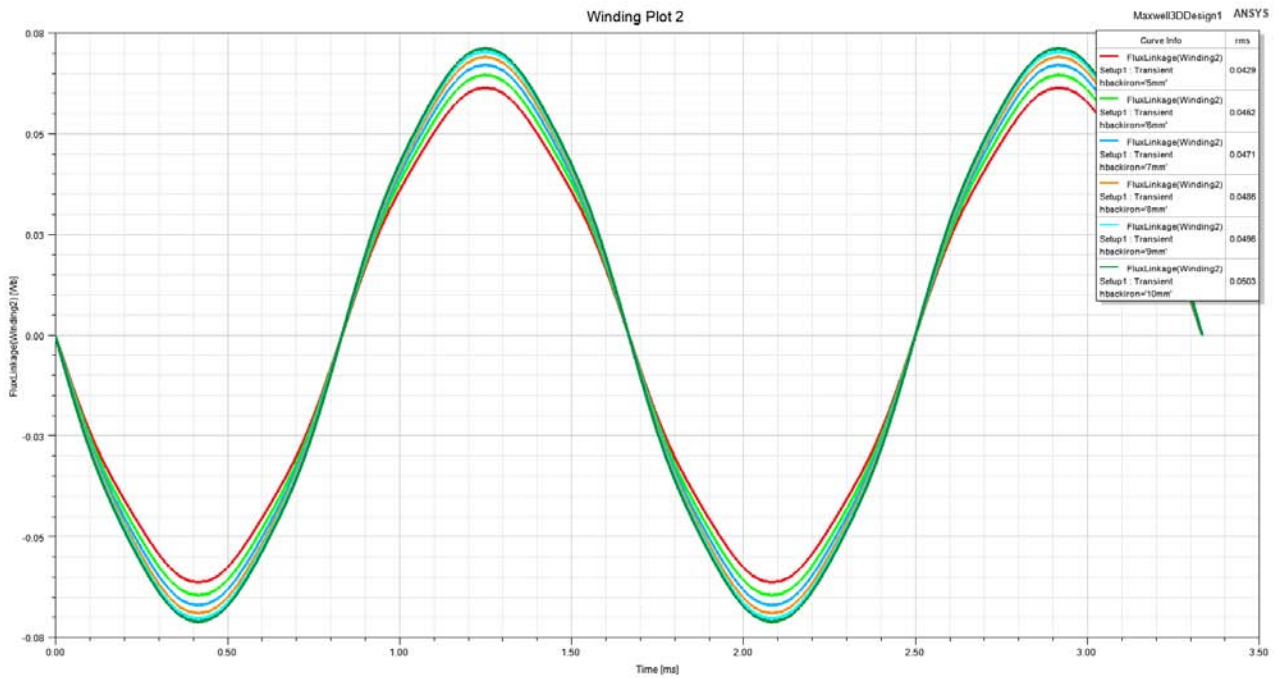


Fig.3.1.3 – flusso a vuoto per diversi spessori del back iron

Con uno spessore del back iron di 10mm il flusso concatenato è più che raddoppiato rispetto al caso coreless, passando da 23,8 mWb a 50,3 mWb.

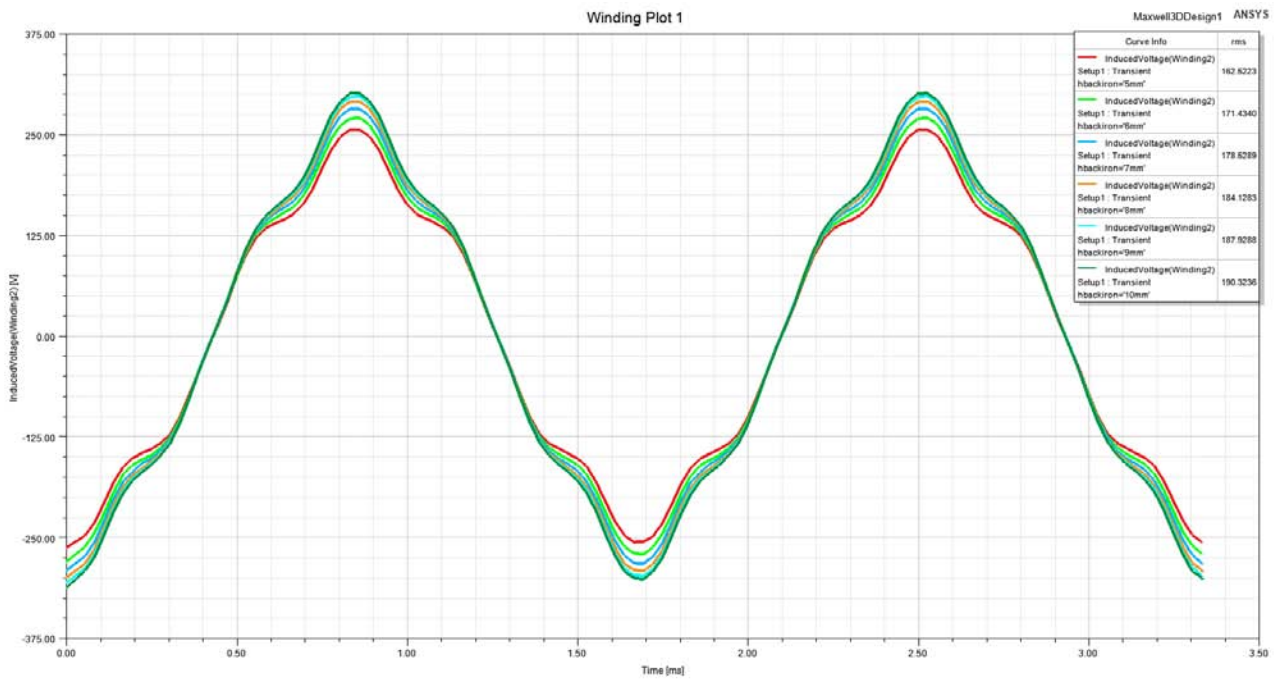


Fig.3.1.4 – f.e.m. a vuoto per diversi spessori del back iron

Tabella 3.1.2 – variazione f.e.m. a vuoto per diversi spessori del back iron

Spessore back iron (mm)	f.e.m. a vuoto (V)
5	162,5
6	171,4
7	178,5
8	184,1
9	187,9
10	190,3
15	191,4
20	191,5

Vengono adesso analizzate le perdite P₀, le quali risultano estremamente alte per questo materiale e con questi spessori, rendendo inutilizzabile la macchina. Per questo motivo è stato deciso di aumentare ancora l'altezza del back iron di statore fino a 20mm, in modo da provare a diminuirle. I risultati sono riportati nella Fig.3.1.5:

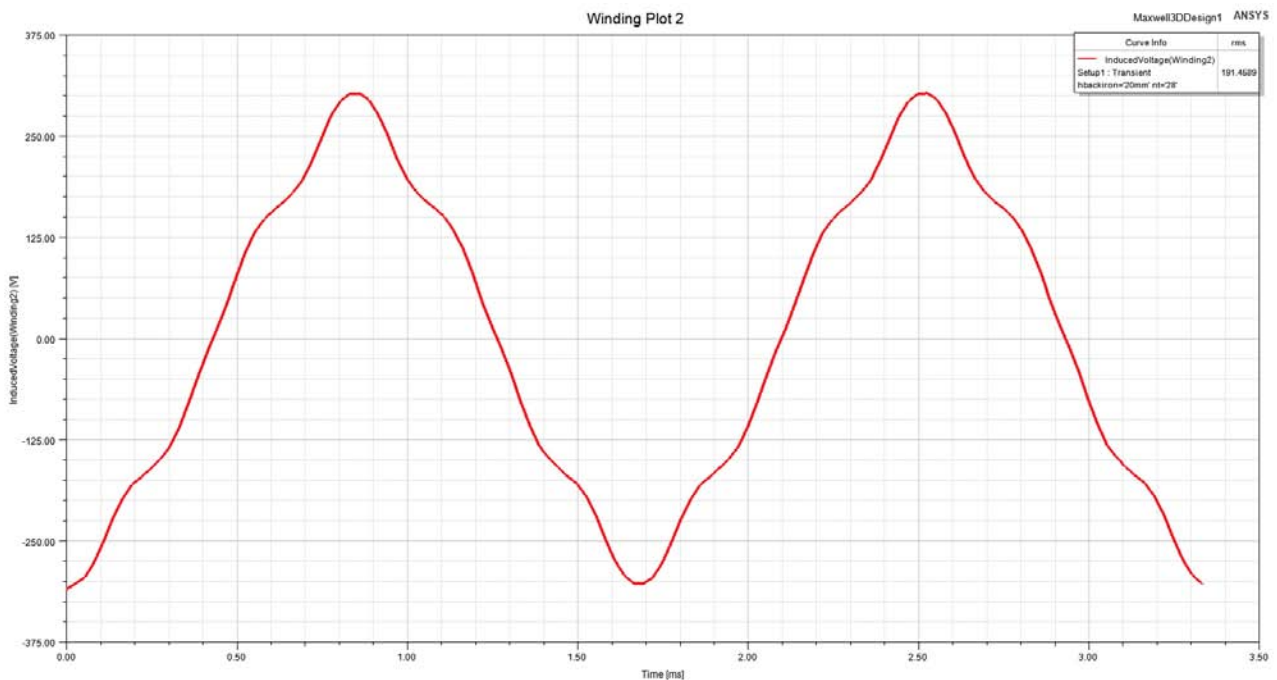


Fig.3.1.5 – f.e.m. a vuoto con spessore 20mm

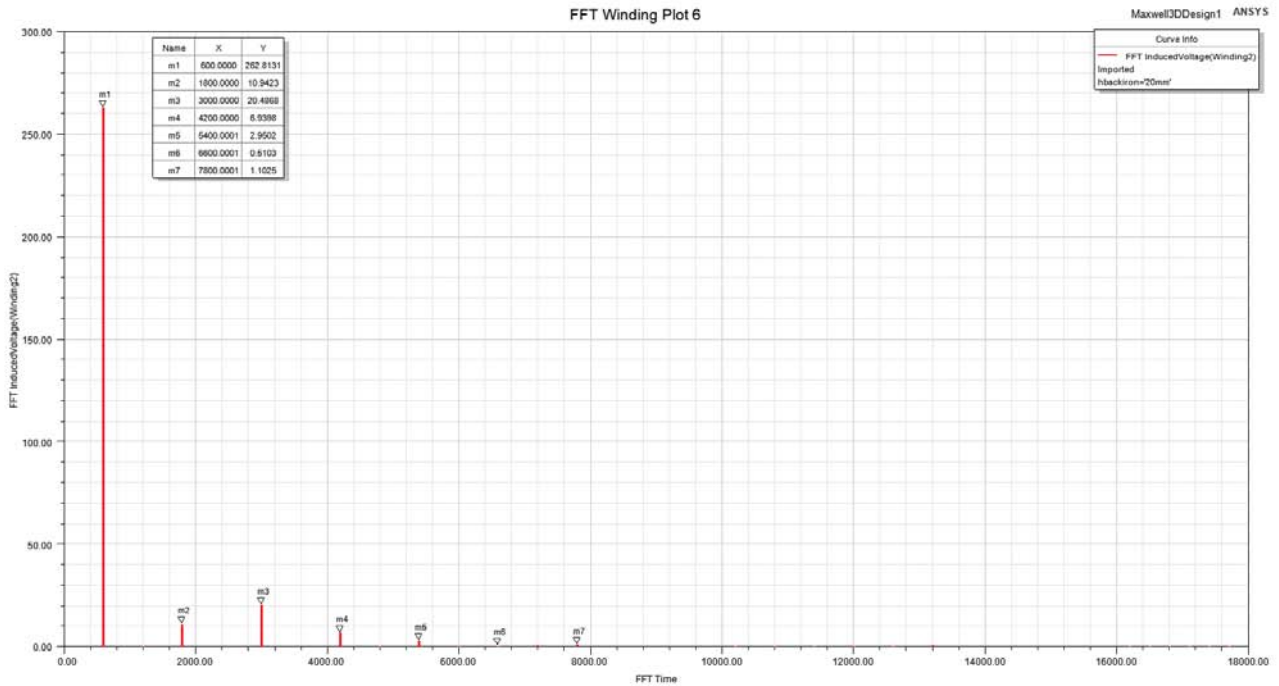


Fig.3.1.6 – contenuto armonico f.e.m. a vuoto con spessore 20mm

Quello che si può notare da queste analisi è che, da un certo spessore del ferro in poi, la f.e.m. a vuoto non è aumentata, registrando una stabilizzazione, che avviene a un valore che è circa il doppio di quello determinato nello studio della macchina coreless. I medesimi comportamenti sono stati realizzati anche dal suo contenuto armonico, che presenta una notevole diminuzione rapportato alla macchina con geometria coreless. Di seguito, nella Fig.3.1.7, vengono confrontati i contenuti armonici percentuali della f.e.m. nel caso coreless e nel caso con spessore 20mm in rapporto alle proprie fondamentali.

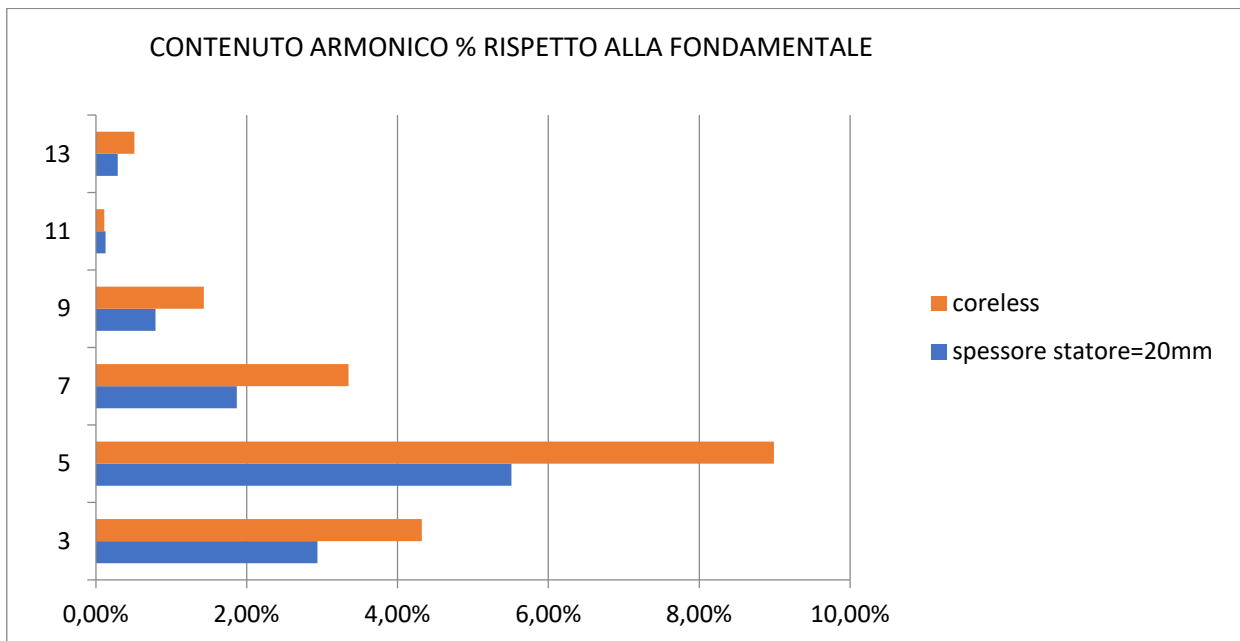


Fig.3.1.7 – contenuto armonico % rispetto alla fondamentale

Per mantenere il valore di f.e.m. a vuoto simile a quello ottenuto con lo statore coreless è stato deciso di dimezzare il numero di spire nt della macchina, passando da $nt=28$ a $nt=14$. I risultati sono riportati nella seguente tabella 3.1.3:

Tabella 3.1.3 – confronto contenuto armonico f.e.m. a vuoto

	spessore =20mm $nt = 28$	spessore =20mm $nt = 14$	coreless
$\hat{E}_{0,1}$	262,8 V	134,6 V	126,8 V
$\hat{E}_{0,3}$	10,94 V	5,11 V	7,76 V
$\hat{E}_{0,5}$	20,48 V	11,23 V	16,12 V
$\hat{E}_{0,7}$	6,94 V	2,67 V	6,01 V
$\hat{E}_{0,9}$	2,95 V	1,55 V	2,57 V
$\hat{E}_{0,11}$	0,51 V	0,066 V	0,20 V
$\hat{E}_{0,13}$	1,10 V	0,57 V	0,92 V

Oltre al nuovo valore della f.e.m. a vuoto viene ricalcolata anche la R_{bobina} al fine di determinare il nuovo valore di perdite ohmiche. Il precedente valore di R_{bobina} era 35,34 m Ω . Con i dovuti cambiamenti nei dati macchina, il nuovo valore di R_{bobina} è pari a 8,84 m Ω (dato che le spire sono dimezzate la R_{bobina} calerà di 1/4), che porta a una $R_{fase}=4,42$ m Ω e quindi a un valore di perdite ohmiche pari a 18,65 W ($3 \cdot 4,42 \cdot 10^{-3} \cdot 37,5^2$).

Vengono adesso analizzate le perdite nel ferro con spessori del back iron che variano da 10mm a 20mm. I risultati ottenuti sono rappresentati nella tabella 3.1.4.

Tabella 3.1.4 – P_0 per diversi spessori del back iron per il materiale M470

SPESSORE (mm)	M470 (W)
10	1686
11	1510
12	1381
13	1276
14	1191
15	1118
16	1053
17	998,9
18	950
19	904,3
20	855,2

Pur avendo ottenuto un dimezzamento raddoppiando lo spessore, il valore ottenuto per 20 mm non risulta adeguato. Per queste ragioni, il materiale scelto per il test è stato scartato. La decisione di non andare oltre tale spessore è stata necessaria per non aumentare eccessivamente il peso e la forza attrattiva dei magneti, che, di qui in poi, risultavano troppo elevati.

Come ultima analisi per l'M470 viene analizzata la forza con spessore 20mm. Il valore medio ottenuto è pari a 1,67 kN, come riportato nella Fig.3.1.8. Date le elevate perdite riscontrate a spessori inferiori a 20mm e l'elevato peso del back iron a altezze superiori non sono state effettuati altri studi riguardo questo parametro.

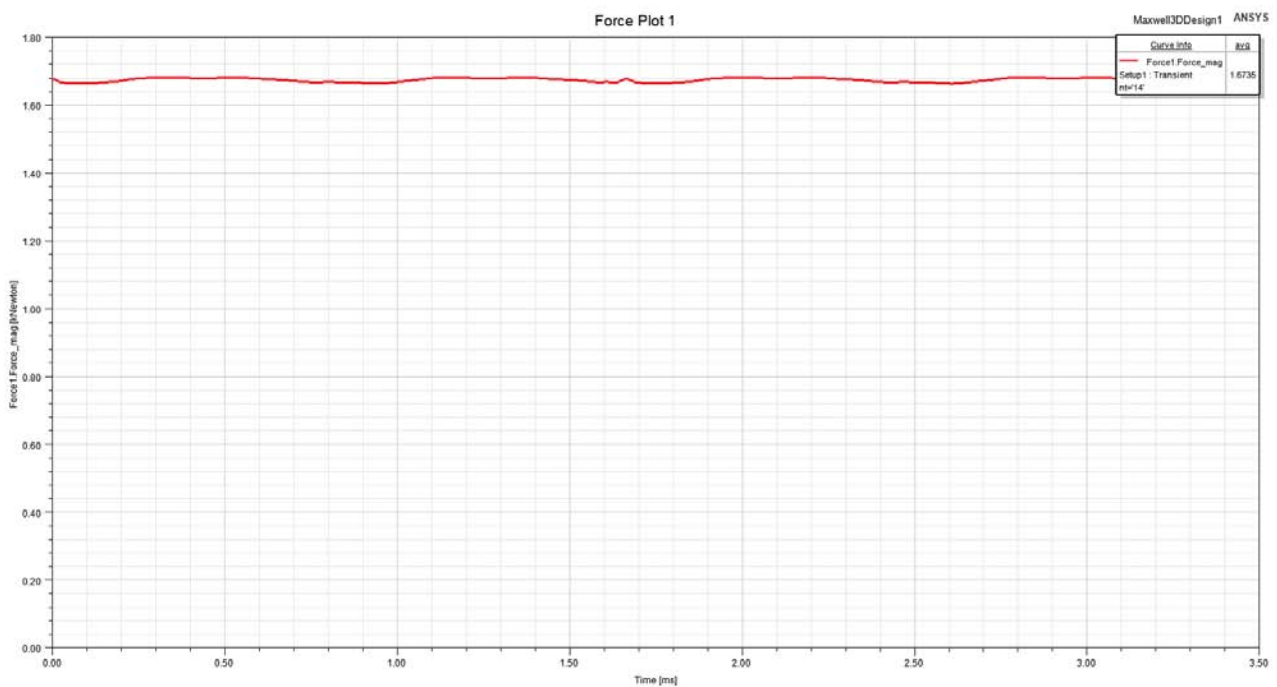


Fig.3.1.8 – valore medio forza con spessore = 20mm

3.2. M250

Volendo continuare a utilizzare lamierini convenzionali per formare il back iron di statore, il secondo materiale utilizzato è l'M250-35A. Esso presenta una caratteristica b-h simile a quella vista per l'M470-50A, mentre la curva di perdite specifiche garantisce delle P0 minori di quelle assunte nel caso precedente.

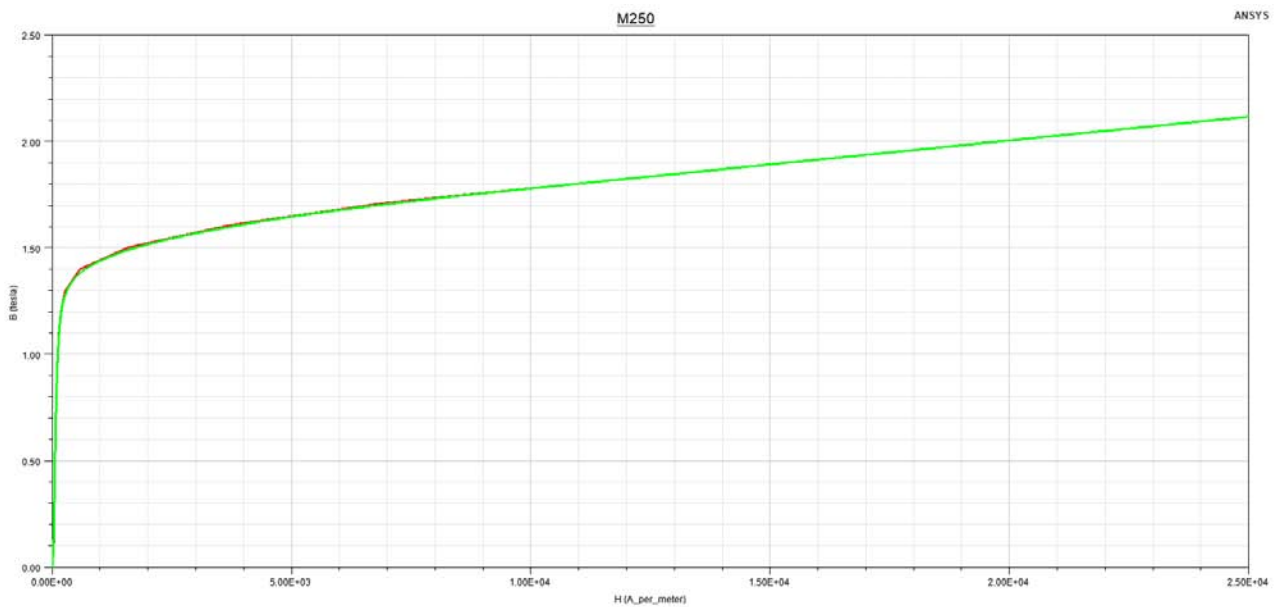


Fig.3.2.1 – caratteristica b-h

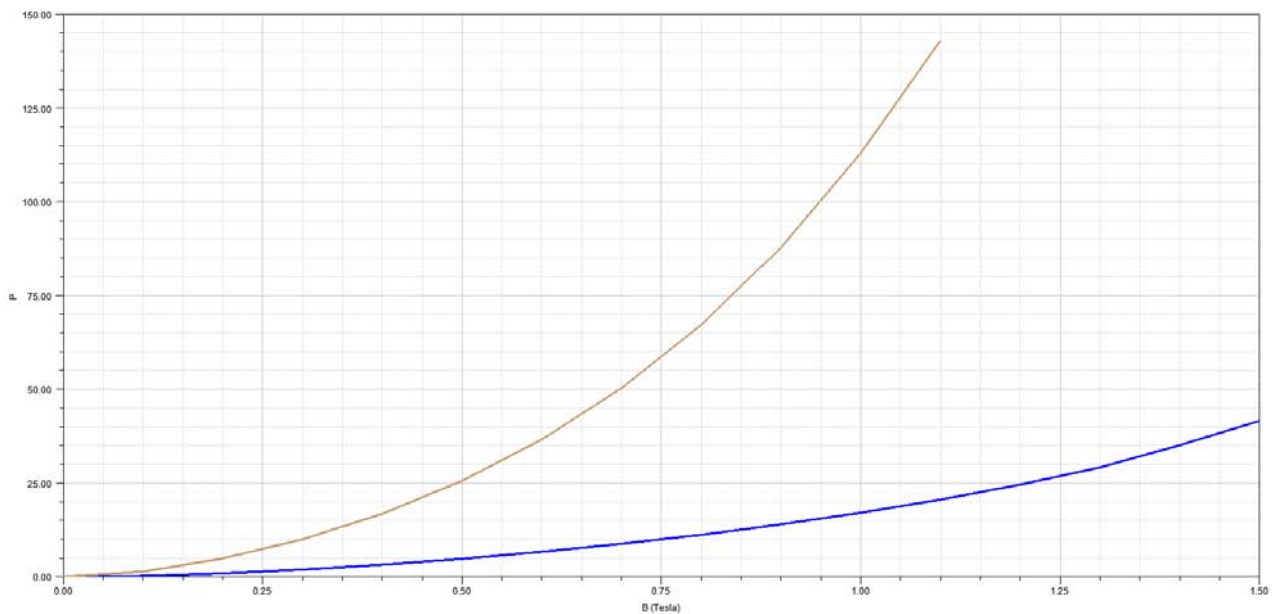


Fig.3.2.2 – caratteristica di perdita specifica con freq = 400(blu) e 1000(grigio) Hz

Anche in questo caso è stato adottato l'approccio utilizzato in precedenza, valutando le perdite nel ferro e il contenuto armonico della f.e.m. a vuoto. Sono state inizialmente valutate le P0 con spessori da 5mm a 10mm del back iron.

Nonostante le P0 siano calate rispetto al caso precedente, non sono ancora abbastanza basse da garantire un rendimento accettabile per la macchina, quindi il back iron viene incrementato ulteriormente, fino a 20mm.

Tabella 3.2.1 –P0 per diversi spessori del back iron materiale M250

SPESSORE (mm)	M250 (W)
5	810
7	779,8
9	696,2
10	466
12	389,2
14	336,4
15	315,6
16	297,8
18	268,8
19	256,9
20	245,9

Come è possibile vedere, con questi spessori le perdite nel ferro subiscono un drastico calo rispetto a quanto visto con M470 (le perdite sono quasi un quarto di prima), ottenendo un dimezzamento passando da 10 a 20 mm di spessore e attestandosi a 245,9 W. Viene analizzato adesso il flusso, f.e.m. a vuoto e il suo contenuto armonico.

Il flusso non modifica sostanzialmente la sua forma d'onda, mentre il suo valore efficace è circa il doppio di quello determinato nel caso coreless, confermando i risultati ottenuti con il materiale M470. Nella Fig.3.2.3, invece, viene riportato l'andamento della f.e.m. a vuoto.

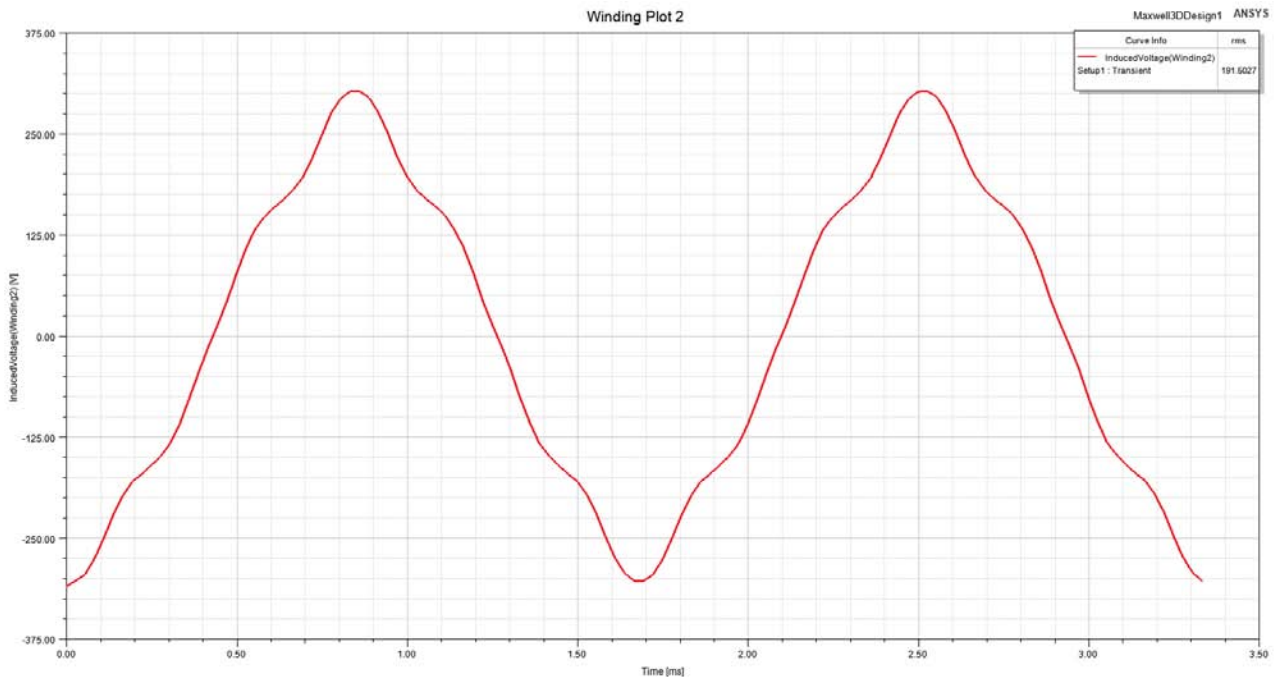


Fig.3.2.3 – f.e.m. a vuoto con spessore 20mm

Il valore efficace della f.e.m. a vuoto con spessore 20mm è pari a 195,3 V.

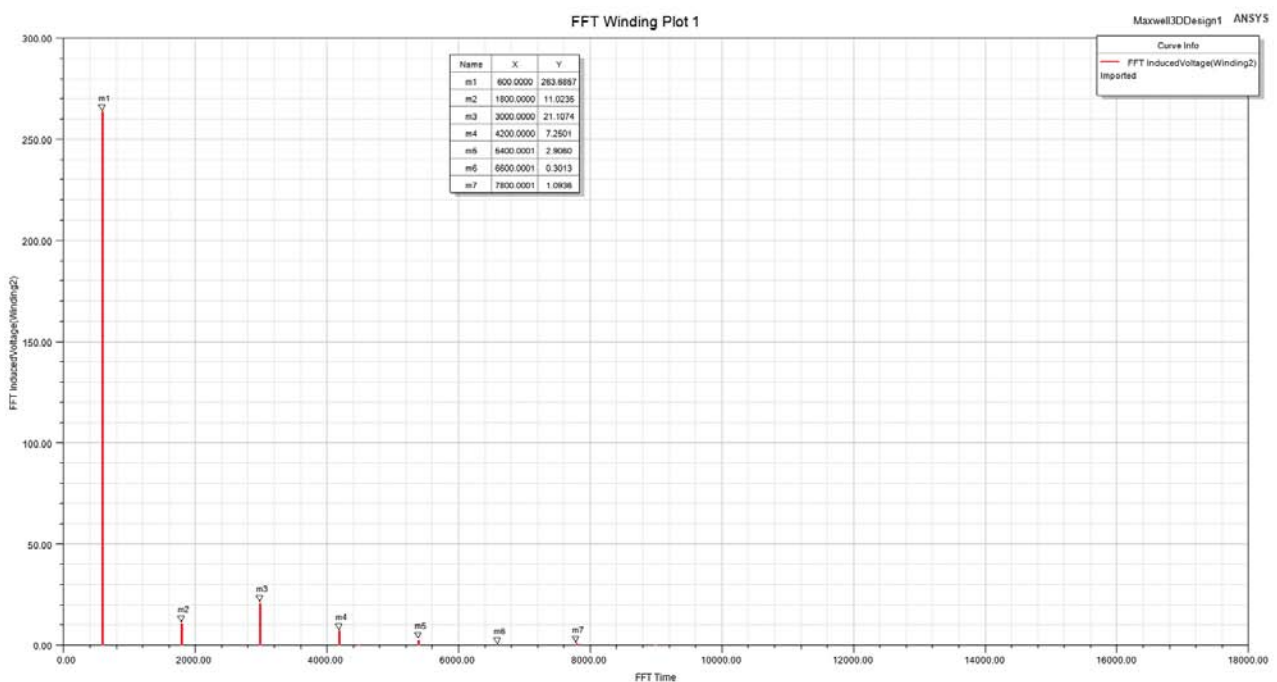


Fig.3.2.4 – contenuto armonico f.e.m. a vuoto

Per quanto riguarda la forma d'onda notiamo un miglioramento rispetto al caso coreless, con un incremento del valore efficace di due volte. Si ha inoltre una netta diminuzione del contenuto armonico, che resta tutto sommato invariato passando da uno spessore di 10mm a 20mm. Rispetto al caso precedente, con materiale M470, l'ampiezza delle armoniche resta pressochè invariata. Di seguito viene riportato il confronto tra questi due materiali (spessore 20mm) e il caso coreless.

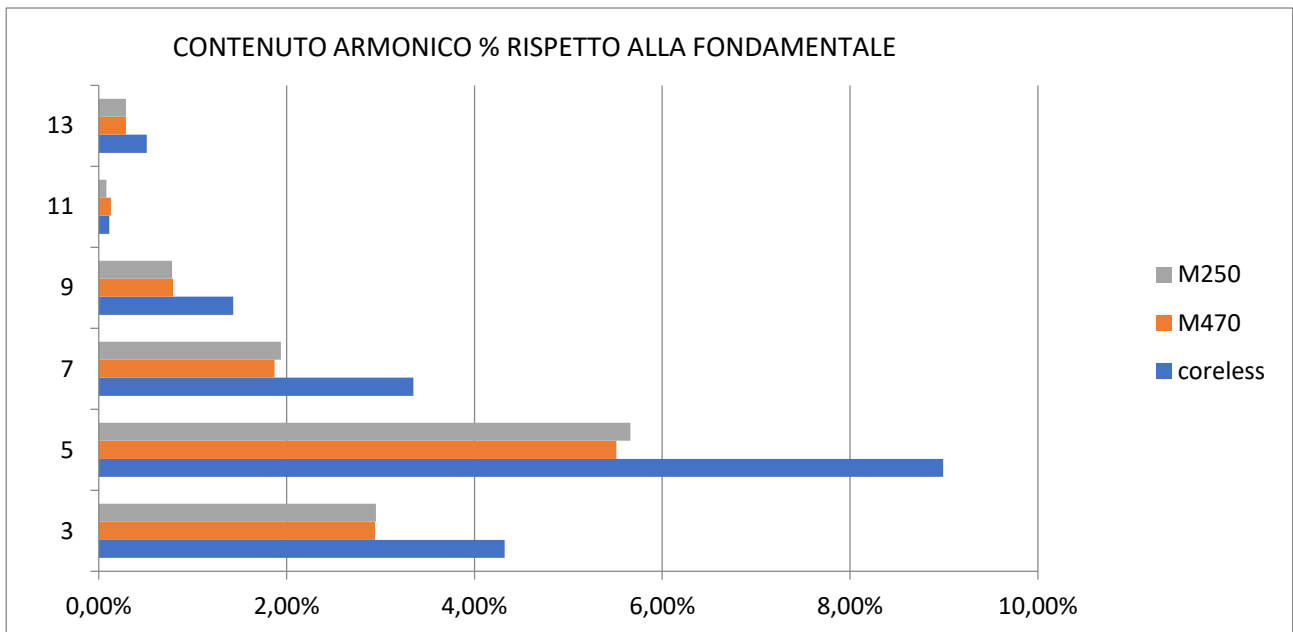


Fig.3.2.5 – contenuto armonico % rispetto alla fondamentale

Come nel caso precedente, si procede alla riduzione del numero di spire per riportarsi allo stesso valore efficace della f.e.m. del coreless.

Adesso, quindi, viene studiata la macchina con $nt=14$: il valore efficace della f.e.m. risulta pari a 95,76 V. L'ampiezza delle armoniche è riportata in tab.3.2.2.

Tabella 3.2.2 – confronto contenuto armonico f.e.m. a vuoto per diversi tipi di statore

	coreless	M250 ($nt=14$)
$\hat{E}_{0,1}$	126,8 V	134,7 V
$\hat{E}_{0,3}$	7,76 V	5,13 V
$\hat{E}_{0,5}$	16,12 V	11,23 V
$\hat{E}_{0,7}$	6,01V	2,67 V
$\hat{E}_{0,9}$	2,57V	1,5 V
$\hat{E}_{0,11}$	0,2V	0,059 V
$\hat{E}_{0,13}$	0,92 V	0,55 V

Un altro aspetto che bisogna tenere in considerazione è il valore dell'induttanza L: ha un effetto diretto sulla dinamica di controllo della macchina, che si presenta più pronta e efficace con bassi valori di L. Di contro, però, un elevato valore di induttanza aiuterebbe a rendere il contenuto armonico della f.e.m. più basso. I risultati sono i seguenti: mantenendo $nt=28$ il suo valore circa raddoppia rispetto al caso coreless, mentre dimezzando il numero di spire assume un valore pari circa a metà di quello del caso coreless (spessore = 20mm).

Tabella 3.2.3 – confronto induttanza per diversi tipi di statore

	coreless	M250 (nt=14)
L_{avg} (mH)	63,15	28,55

Viene adesso analizzata la forza esercitata dai magneti con spessore 20mm, dato che con altezze del back iron inferiori le P0 sono troppo elevate. Come è possibile vedere dalla Fig.3.2.7, il valore della forza attrattiva si presenta simile a quello determinato per M470, pari a circa 1,66 kN.

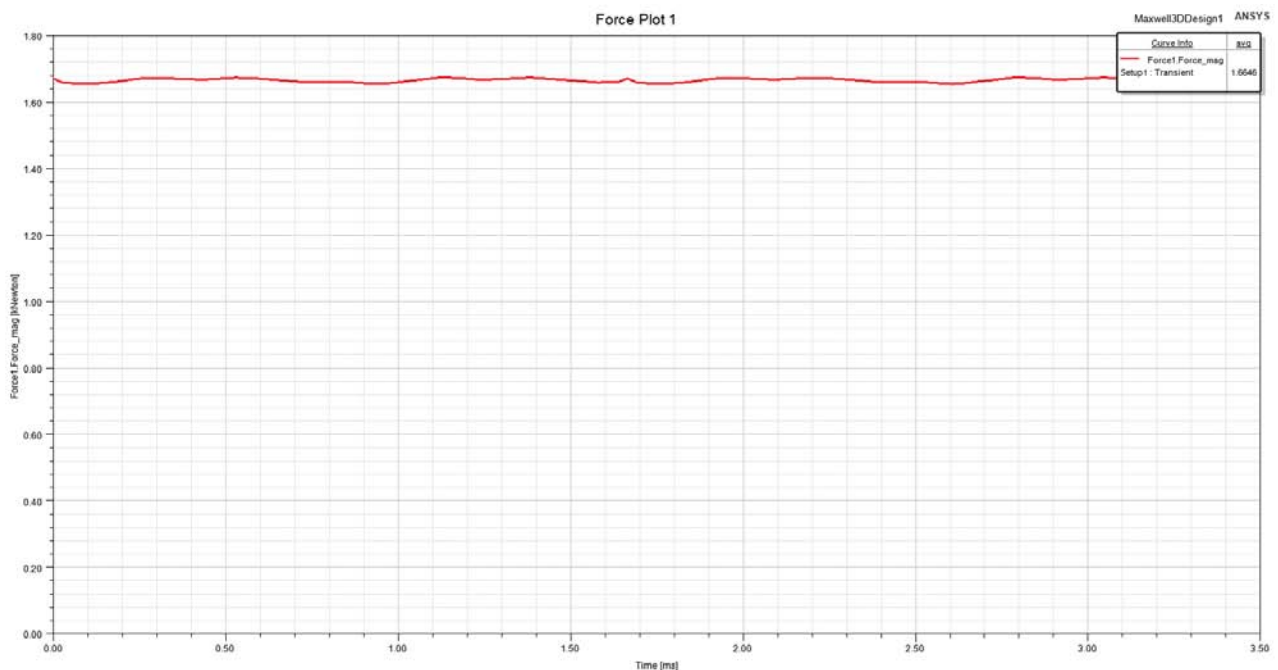


Fig.3.2.6 – forza attrattiva media

In sintesi l'utilizzo del back iron ferromagnetico ha portato i seguenti risultati rispetto allo statore coreless:

- Miglioramento del contenuto armonico della f.e.m. a vuoto (circa 3% nella quinta armonica e 2% nella settima);
- Riduzione del numero di spire a parità di sezione con conseguente riduzione dell'induttanza e della resistenza;
- Presenza di consistenti perdite nel ferro: il materiale M470 presenta perdite troppo elevate per poter essere preso in considerazione, mentre risultati più accettabili sono stati riscontrati con M250, che con spessori intorno ai 20mm ha delle P0 dell'ordine dei 200-300 W;
- Valore elevato della massa e della forza di attrazione dello statore: sia con M470 che con M250 si ottengono valori simili di tali grandezze, con una massa che si aggira sugli 11 kg e una forza di attrazione di circa 1,67 kN.

Per questi ultimi due aspetti si è ritenuto di valutare dei materiali avanzati in grado di ottenere dei benefici più consistenti, a scapito di costi maggiorati.

4. Lamierini speciali

Finora sono stati analizzati lamierini commerciali (M470, M250) come possibili back iron di statore. Un'altra possibilità, non ancora esplorata, di ridurre le perdite nel ferro, è quella di utilizzare componenti con uno spessore decisamente inferiore a quelli visti finora (che variavano da 0,35mm a 0,5mm). In questo modo si lascia una sezione minore alle correnti parassite per circolare, riducendone il computo totale e diminuendo, di conseguenza, le P0.

4.1. Arnon5

Si tratta di un acciaio al silicio dello spessore di 0,127mm, che registra ottimi rendimenti per frequenze superiori ai 400 Hz, dato che riduce le correnti parassite e quindi le perdite nel ferro.

Di seguito sono riportate le caratteristiche b-h e di perdita specifica del materiale (Figg.4.1.1-4.1.2). Si può notare subito che:

- il ginocchio di saturazione della curva b-h si trova a valori di induzione simili rispetto ai lamierini commerciali;
- la curva di perdite specifiche segnala una crescita inferiore rispetto a quelle ricavate per i lamierini commerciali.

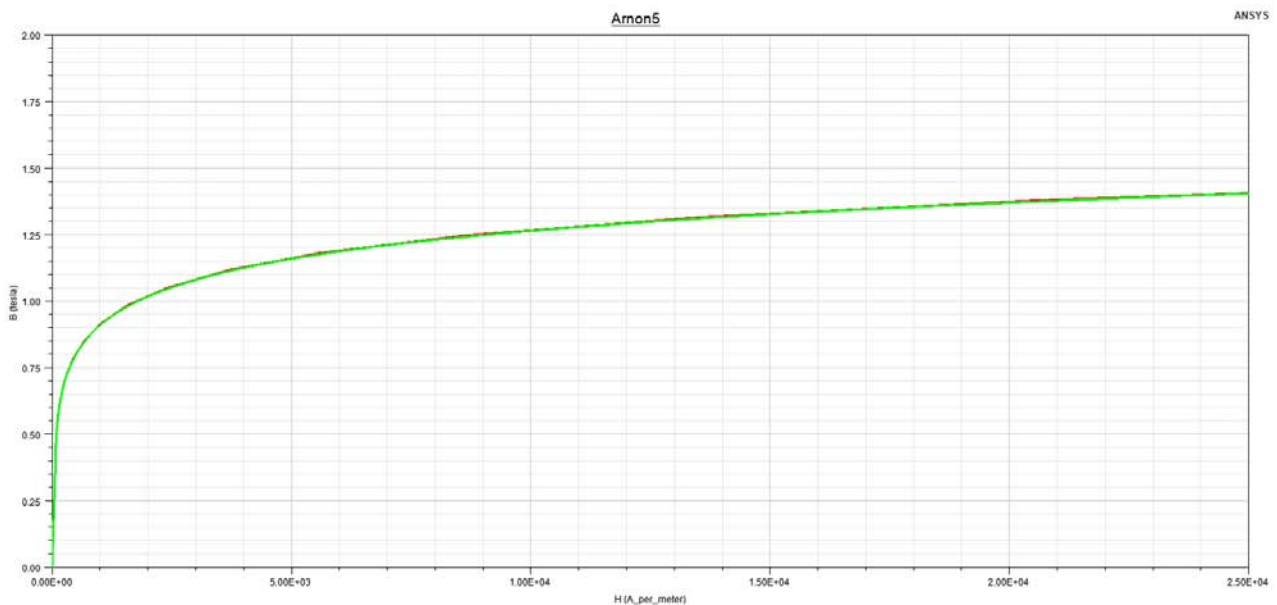


Fig.4.1.1 – caratteristica b-h^[9]

Vengono di seguito rappresentate, nella tabella 4.1.1, le caratteristiche magnetiche a confronto dei due lamierini speciali che verranno studiati in questo capitolo.

Tabella 4.1.1 - confronto caratteristiche b-h di diversi materiali

	B _{sat}	B (H=1000A/m)	B (H=5000A/m)	B(H=10000A/m)
Arnon5	~2T	~0,9 T	~1,16 T	~1,27 T
Hiperco50	~2,5T	~2 T	~2,18 T	~2,22 T

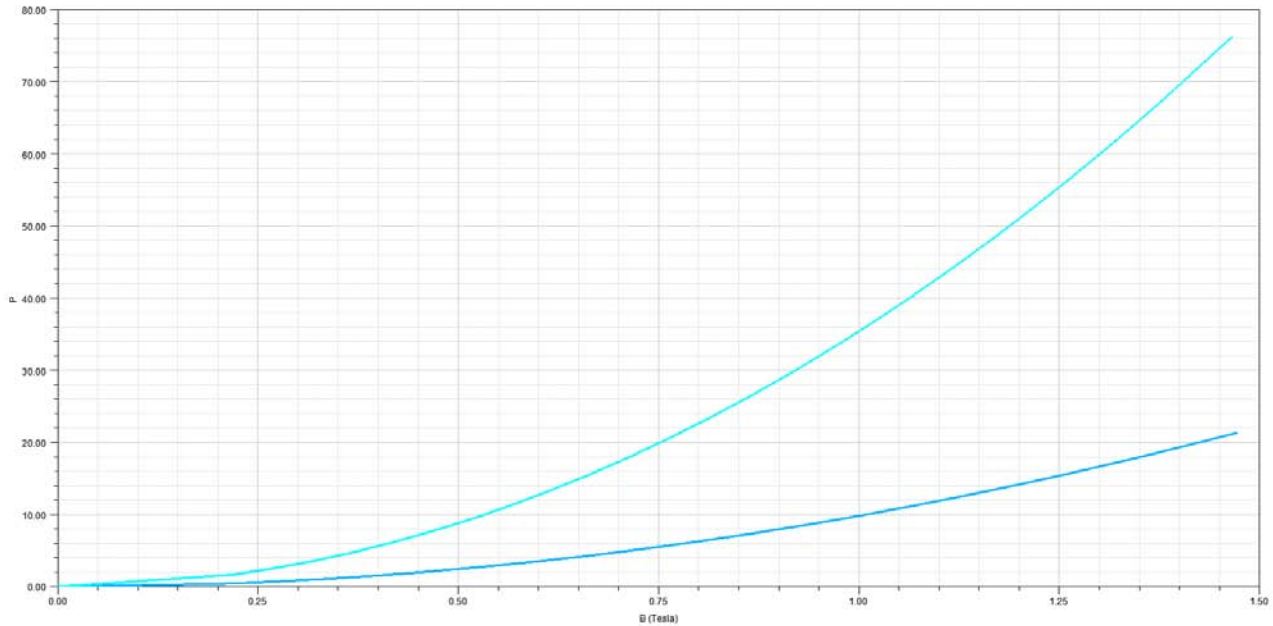


Fig.4.1.2 – caratteristica di perdita specifica con freq = 400(blu) e 1000(azzurro) Hz^[10]

Nella seguente tabella 4.1.2 vengono paragonate le perdite specifiche di Arnon5 e Hiperco50, che si presentano simili e in generale più basse di quelle determinate per i lamierini convenzionali.

Tabella 4.1.2 – confronto tra perdite specifiche di diversi materiali^[11]

	Freq = 400 Hz B = 1T	Freq = 800 Hz B=1T	Freq = 1 kHz B=1T
Arnon5	~10 W/kg	-	~35 W/kg
Hiperco50	~11 W/kg	~28 W/kg	-

In questo modo si otterrà un materiale con perdite nel ferro inferiori a quelle verificatesi in seguito all'utilizzo di lamierini commerciali e che saturerà a valori di induzione simili rispetto a M250 e M470. Le caratteristiche studiate sono state ricavate dai data sheet commerciali. L'altezza scelta per iniziare a studiare Arnon5 è 20mm.

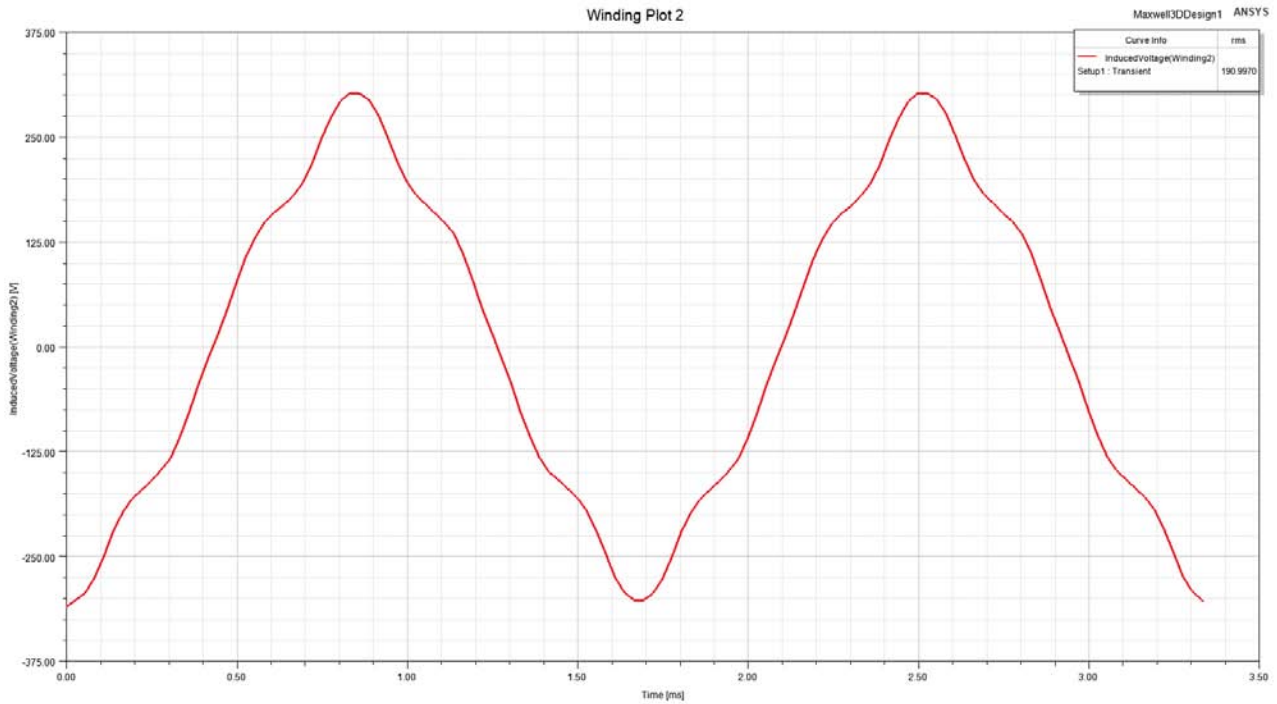


Fig.4.1.3 – f.e.m. a vuoto con spessore 20mm

Nella caratteristica della f.e.m. a vuoto è possibile notare un valore efficace in linea con quelli determinati finora (leggermente più alto) e una forma dell'onda simile a quelle viste precedentemente, il che fa pensare a un contenuto armonico del tutto simile ai casi già visti.

Come ipotizzato, anche il contenuto armonico è in linea con quanto visto finora, con la forma d'onda che presenta valori di quinta e settima armonica in linea con i precedenti. Come prima, quindi, vengono dimezzate il numero di spire nt per garantire un valore di f.e.m. in linea con quello ricavato nel caso coreless. I risultati sono esposti nella tabella 4.1.3.

Tabella 4.1.3 – contenuto armonico f.e.m. a vuoto

	ARNON5 (nt=14)
$\hat{E}_{0,1}$	134,4 V
$\hat{E}_{0,3}$	5,09 V
$\hat{E}_{0,5}$	11,24 V
$\hat{E}_{0,7}$	2,67 V
$\hat{E}_{0,9}$	1,49 V
$\hat{E}_{0,11}$	0,059 V
$\hat{E}_{0,13}$	0,55 V

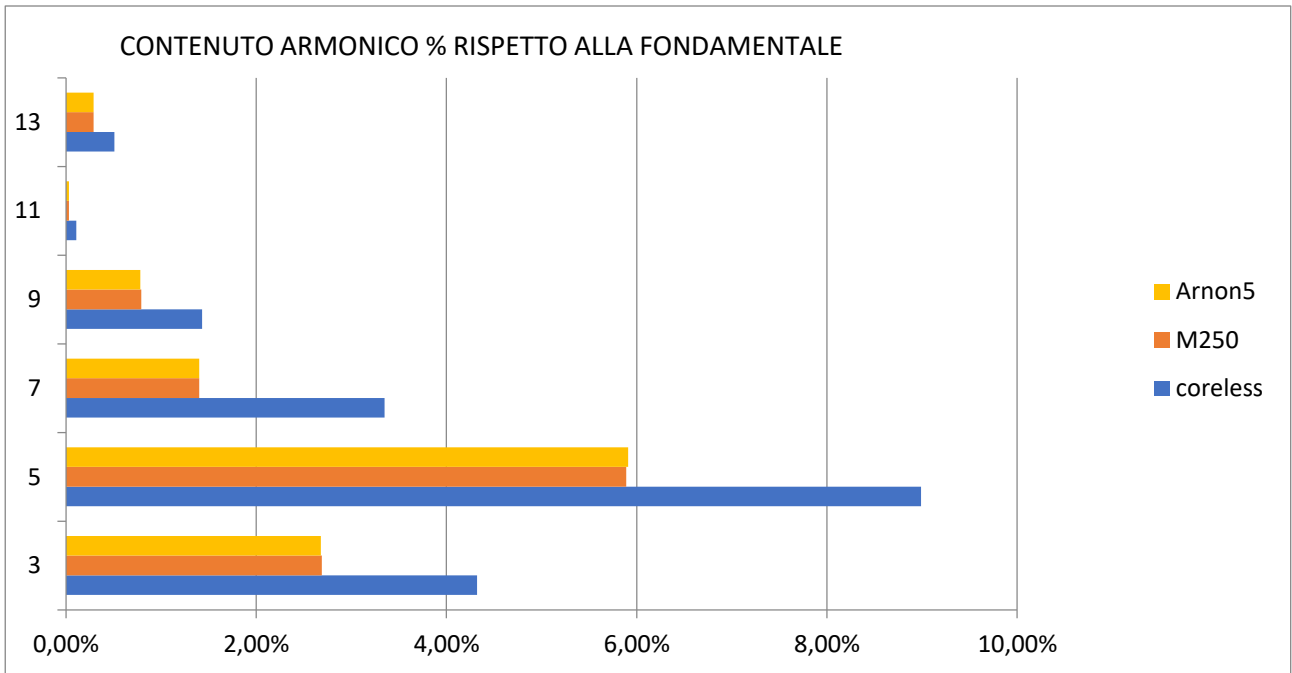


Fig.4.1.4 – contenuto armonico % rispetto alla fondamentale

Vengono valutate adesso le perdite a vuoto con tre diversi spessori: 10mm, 15mm e 20mm.

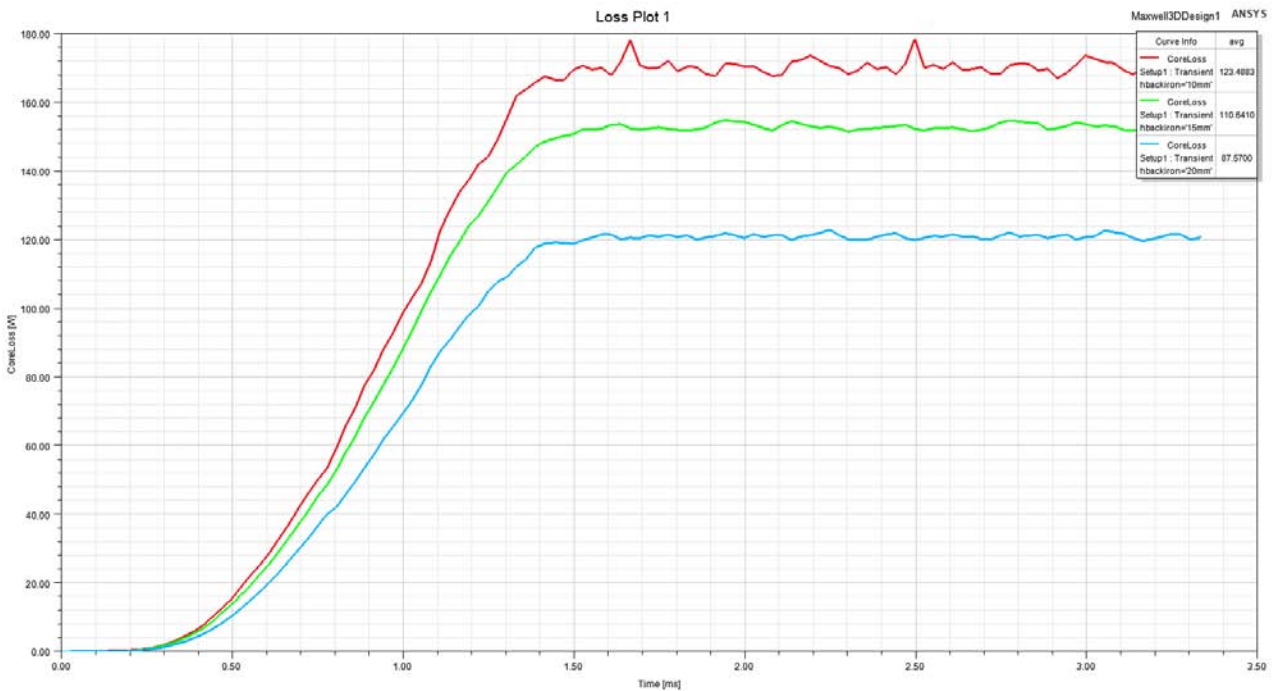


Fig.4.1.5 – P0 per diversi spessori del back iron

Come è possibile notare dalla Fig.4.1.5, le perdite nel ferro, già molto basse con spessore 10mm, decrescono ancora all’aumentare dello spessore, attestandosi come le più basse rilevate finora.

Viene di seguito analizzata l’induttanza L dell’avvolgimento per i soliti tre spessori: come è possibile notare, l’incremento di L è molto più marcato nel passaggio tra 10mm e 15mm che in

quello tra 15mm e 20mm. Nonostante ciò, i valori sono molto simili e si attestano in linea con quelli rilevati per gli altri materiali precedentemente studiati con $nt=14$.

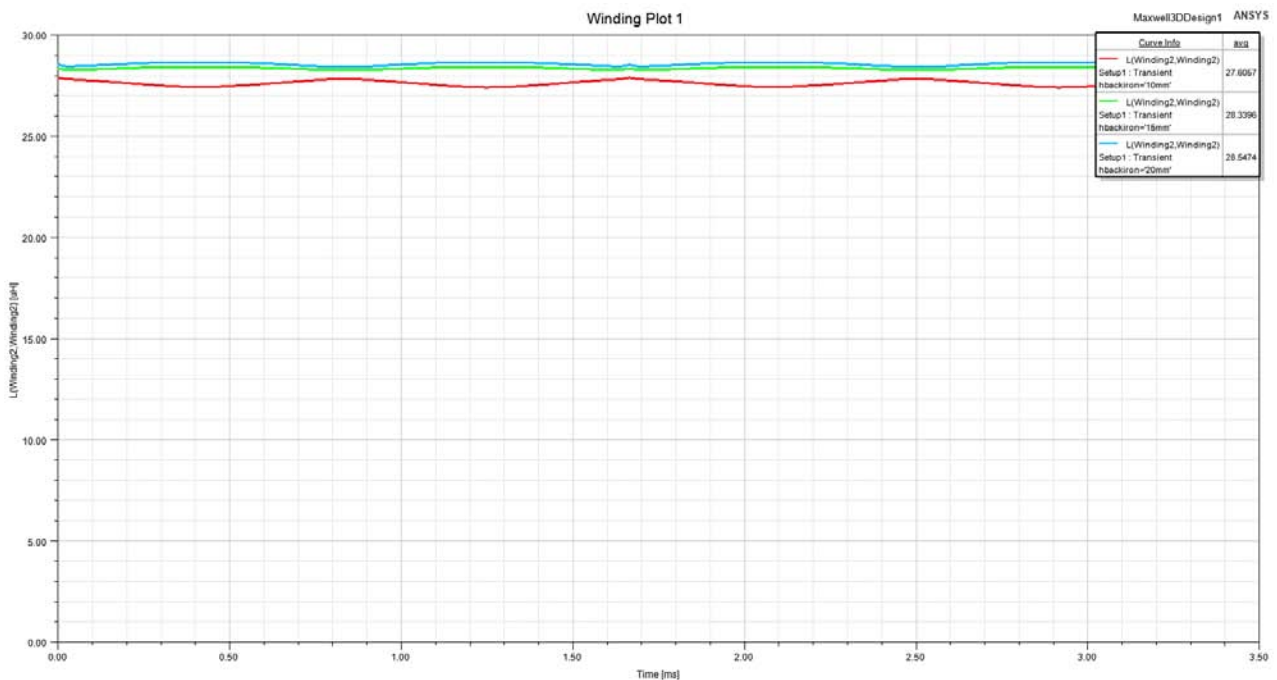


Fig.4.1.6 – induttanza per diversi spessori del back iron

Vengono ora analizzate le forze attrattive del magnete in corrispondenza di diversi valori di back iron di statore (10mm, 15mm e 20mm) in modo da individuare quanto esse siano incrementate all'aumentare dello spessore di Arnon5.

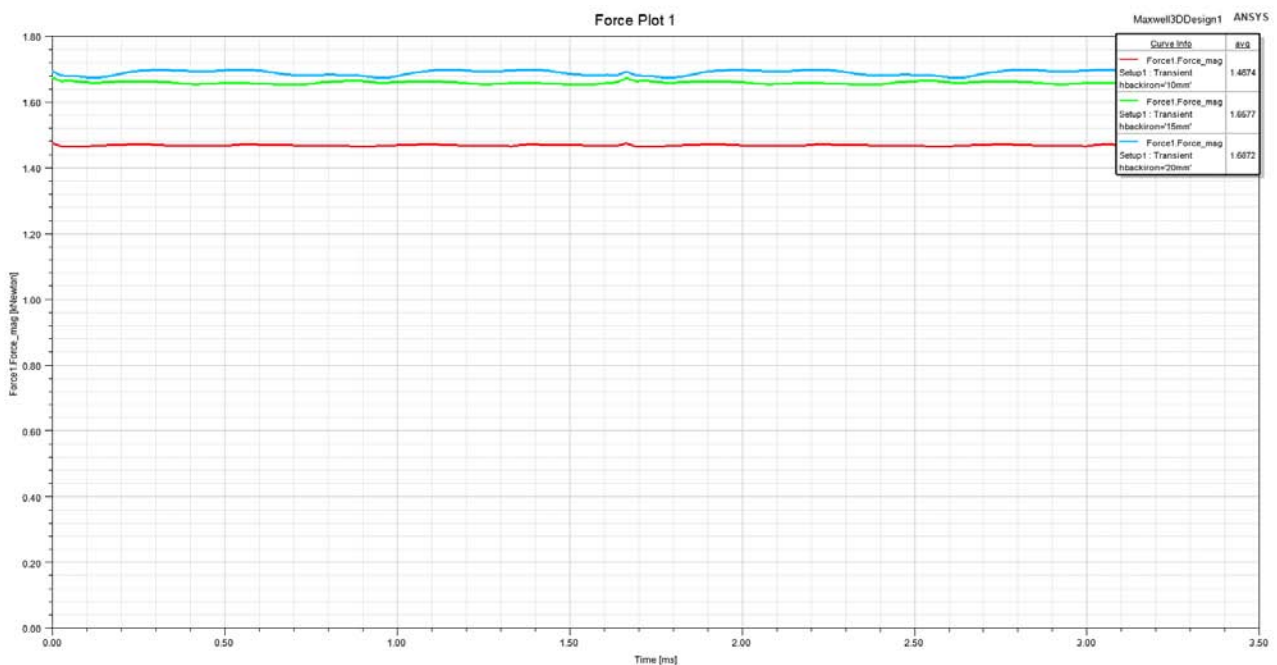


Fig.4.1.7 – forze attrattive magnete per diversi spessori del back iron

Come nel caso dell'induttanza, anche l'incremento della forza attrattiva dei magneti diventa minore all'aumentare dello spessore.

Tabella 4.1.4 – variazione L , $\hat{E}_{0,1}$, F e P_0 al variare dello spessore

Spessore (mm)	L (mH)	$\hat{E}_{0,1}$ (V)	F (kN)	P_0 (W)
10	27,51	126,0	1,46	123,5
15	28,34	133,4	1,66 (+13,7%)	110,6 (-10,4%)
20	28,55	134,4	1,69 (+15,7%)	87,6 (-31,5%)

Dalla tabella 4.1.4 è possibile notare come, all'aumentare dello spessore, induttanza, fondamentale di tensione e forza non crescano linearmente. Queste tre grandezze si assestano a uno specifico valore, e la loro variazione tra 15mm e 20mm è molto contenuta. Le perdite nel ferro, invece, continuano a calare in maniera considerevole anche nell'intervallo di spessori tra 15mm e 20mm, giustificando quindi la scelta di tale altezza (20mm) per il giogo ferromagnetico.

Per provare a migliorare il contenuto armonico della f.e.m., anche con questo materiale sono state effettuate delle prove con diverse forme delle bobine: le analisi effettuate, compiute utilizzando gli avvolgimenti già visti nel capitolo 2, non hanno portato, però, a migliorie di sorta.

Come ultima parte dell'analisi di Arnon5, si passa a studiare la macchina a carico, con $n_t=14$. Il valore efficace della corrente è lo stesso scelto per il caso coreless, ovvero 18,75A.

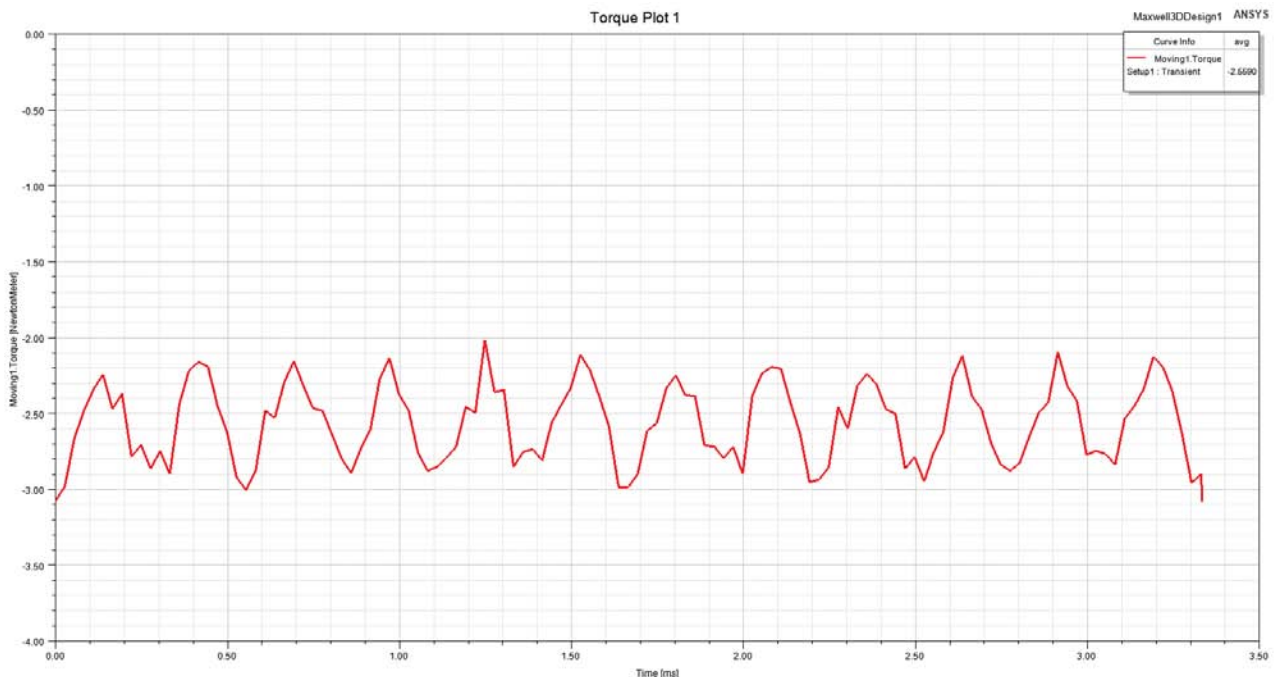


Fig.4.1.8 – coppia elettromagnetica

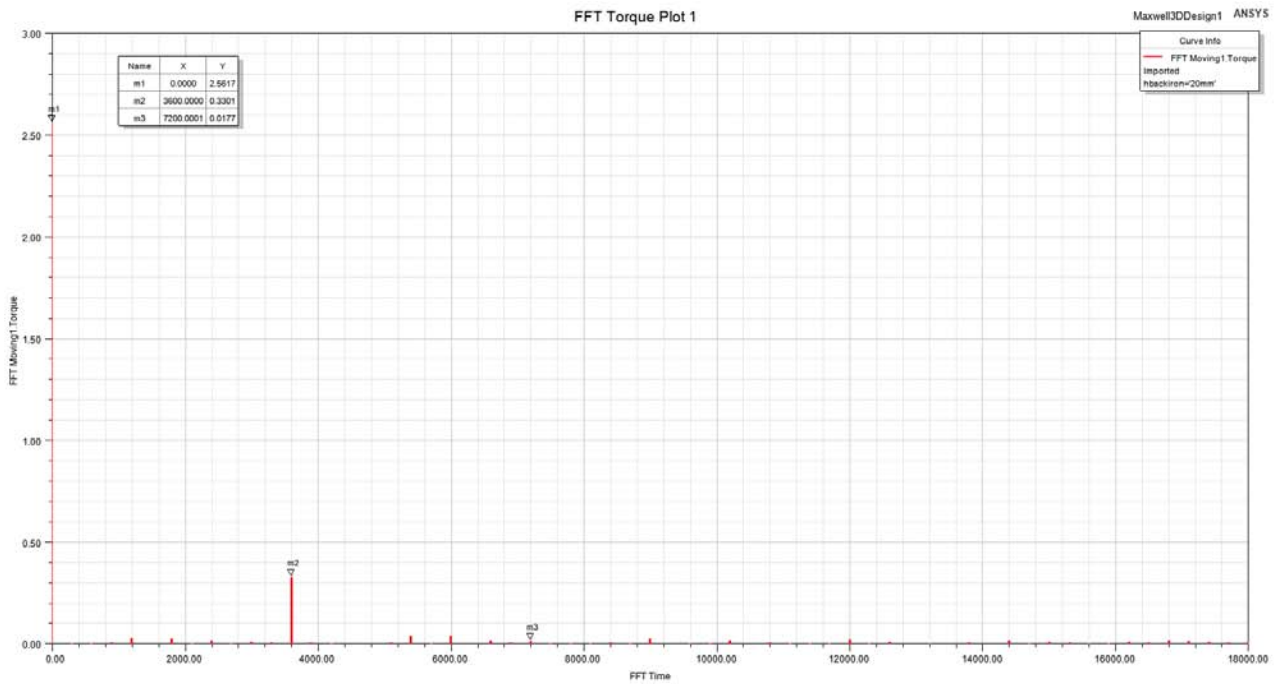


Fig.4.1.9 – contenuto armonico coppia elettromagnetica

$$C_1 = 2,56 \text{ Nm}$$

$$C_6 = 0,33 \text{ Nm}$$

$$C_{12} = 0,018 \text{ Nm}$$

Come è possibile notare nella fig.4.1.9, il valore di coppia presenta nuovamente un valore medio, una sesta e una dodicesima armonica, frutto del prodotto tra la fondamentale di tensione e la quinta e undicesima armonica di corrente.

4.2. Hiperco50

Si tratta di una lega ferro cobalto vanadio che possiede caratteristiche uniche di resistenza allo snervamento e basse perdite nel ferro. A causa della sua composizione il prezzo di questo materiale è decisamente superiore a quello di Arnon5. Lo spessore dei lamierini è di 0,15mm.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche b-h e di perdita specifica del materiale, che sono del tutto simili a quelle viste per il materiale Arnon5.

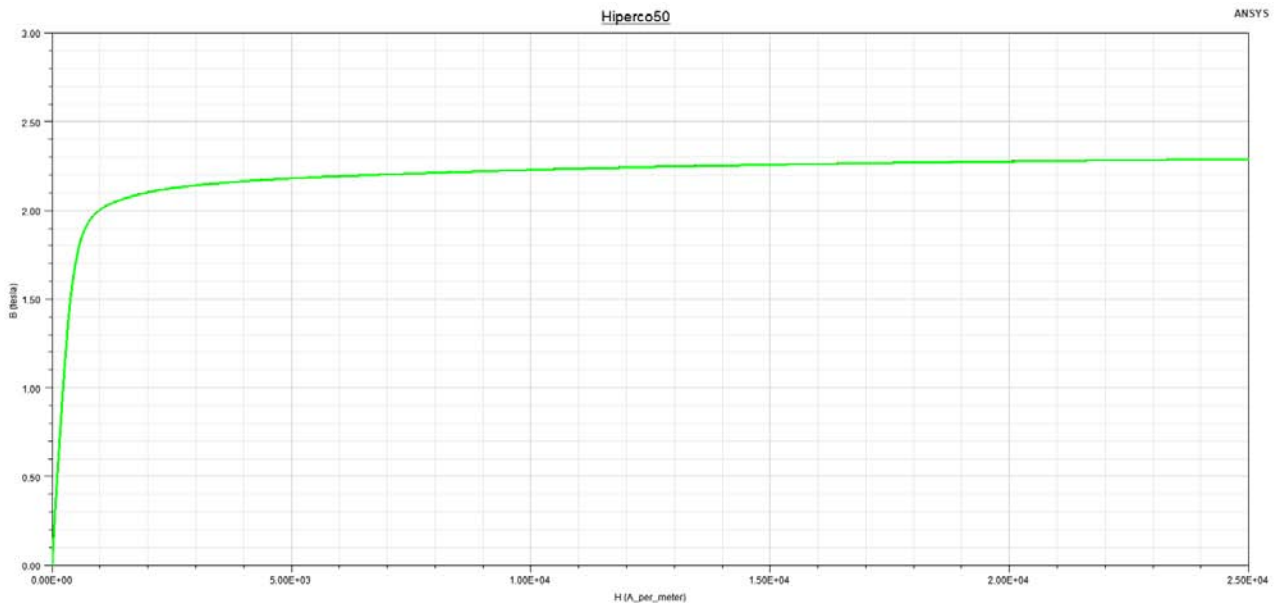


Fig.4.2.1 – caratteristica b-h^[12]

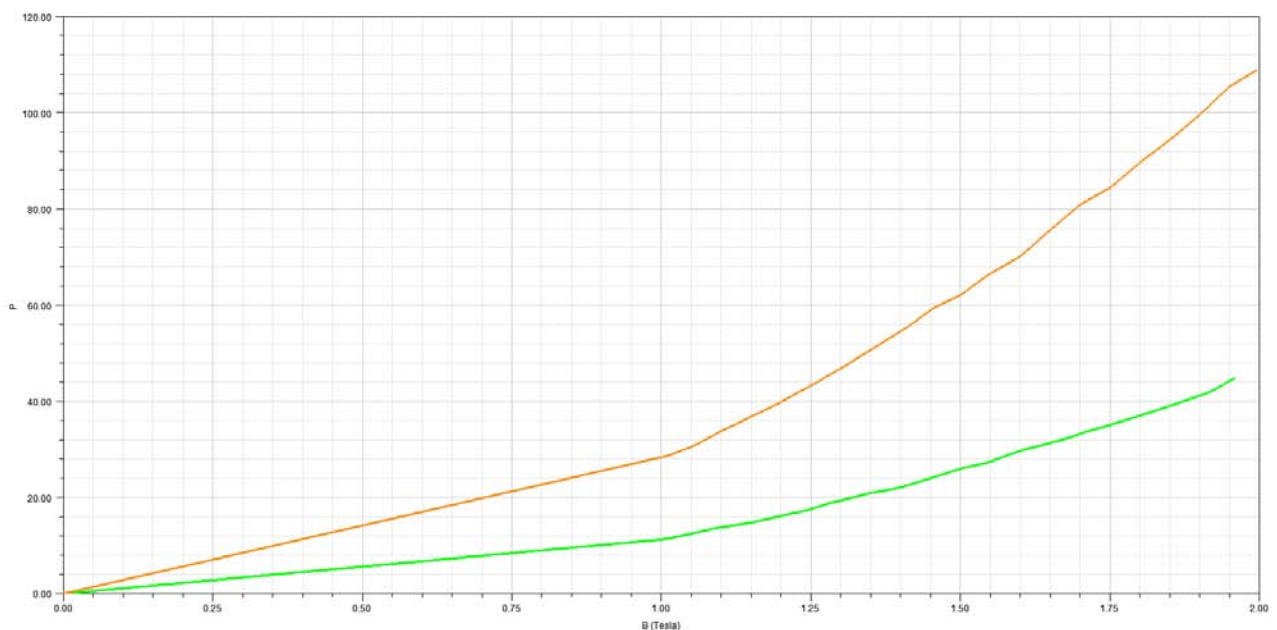


Fig.4.2.2 – caratteristica di perdita specifica con freq = 400(verde) e 800(arancione) Hz

Vengono valutate la f.e.m. a vuoto e il suo contenuto armonico.

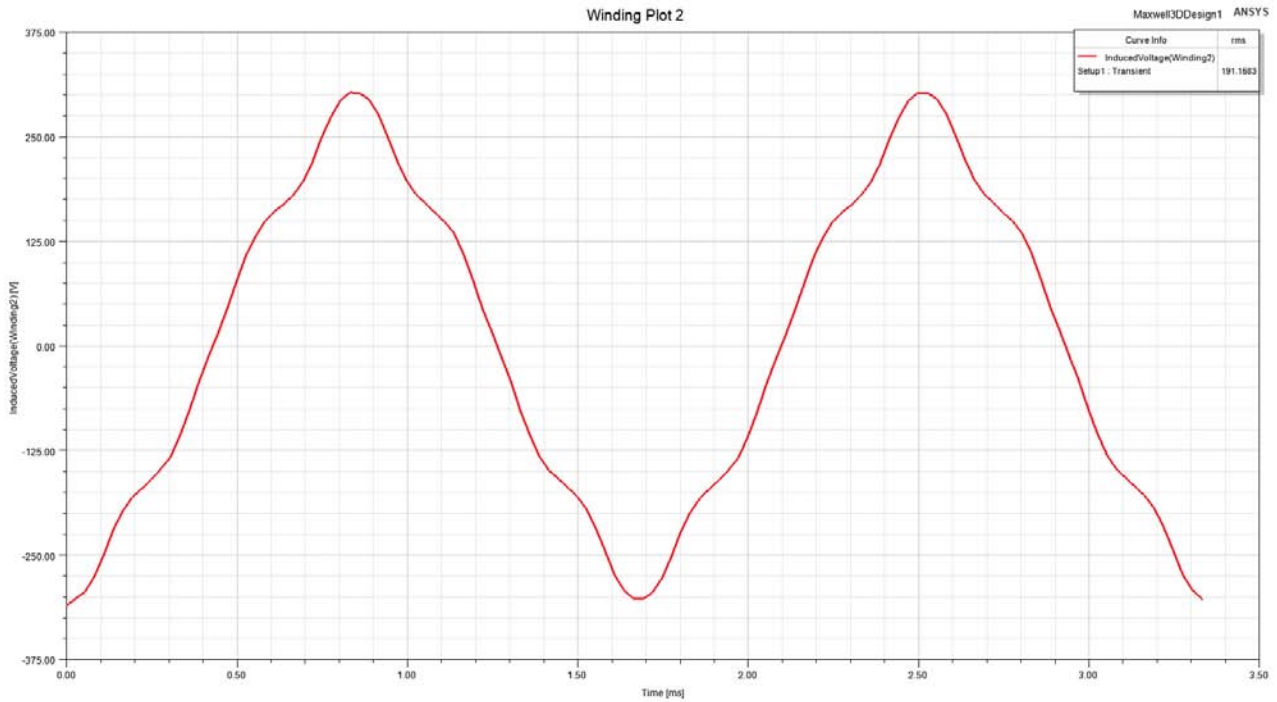


Fig.4.2.3 – f.e.m. a vuoto con spessore 20mm

Anche in questo materiale, come nei precedenti, il valore efficace della f.e.m. a vuoto si registra attorno ai 190V, mentre il contenuto armonico è pressoché uguale a quelli visti finora. Quindi, come nei casi precedenti, si procede a dimezzare il numero di spire nt per avere una f.e.m. a vuoto pari a quella ottenuta con il caso coreless. Con $nt=14$ il nuovo valore efficace della f.e.m. a vuoto risulta essere intorno ai 95 V, in linea con quanto visto per gli altri materiali.

Tabella 4.2.1 – contenuto armonico f.e.m. a vuoto

	HIPERCO50 ($nt=14$)
$\hat{E}_{0,1}$	134,6 V
$\hat{E}_{0,3}$	5,11 V
$\hat{E}_{0,5}$	11,23 V
$\hat{E}_{0,7}$	2,68 V
$\hat{E}_{0,9}$	1,55 V
$\hat{E}_{0,11}$	0,067 V
$\hat{E}_{0,13}$	0,57 V

Di seguito vengono riportate, nella tab.4.2.2, tutte le configurazioni di statore studiate per la macchina e il loro contenuto armonico:

Tabella 4.2.2 – contenuto armonico f.e.m. a vuoto % rispetto alla fondamentale per diversi tipi di statore

	coreless	M250 (nt=14)	ARNON5 (nt=14)	HIPERCO50 (nt=14)
$\hat{E}_{0,1}$	100%	100%	100%	100%
$\hat{E}_{0,3}$	4,32%	2,69%	2,68%	2,68%
$\hat{E}_{0,5}$	8,99%	5,89%	5,91%	5,90%
$\hat{E}_{0,7}$	3,35%	1,40%	1,40%	1,41%
$\hat{E}_{0,9}$	1,43%	0,79%	0,78%	0,81%
$\hat{E}_{0,11}$	0,11%	0,030%	0,031%	0,035%
$\hat{E}_{0,13}$	0,51%	0,29%	0,29%	0,30%

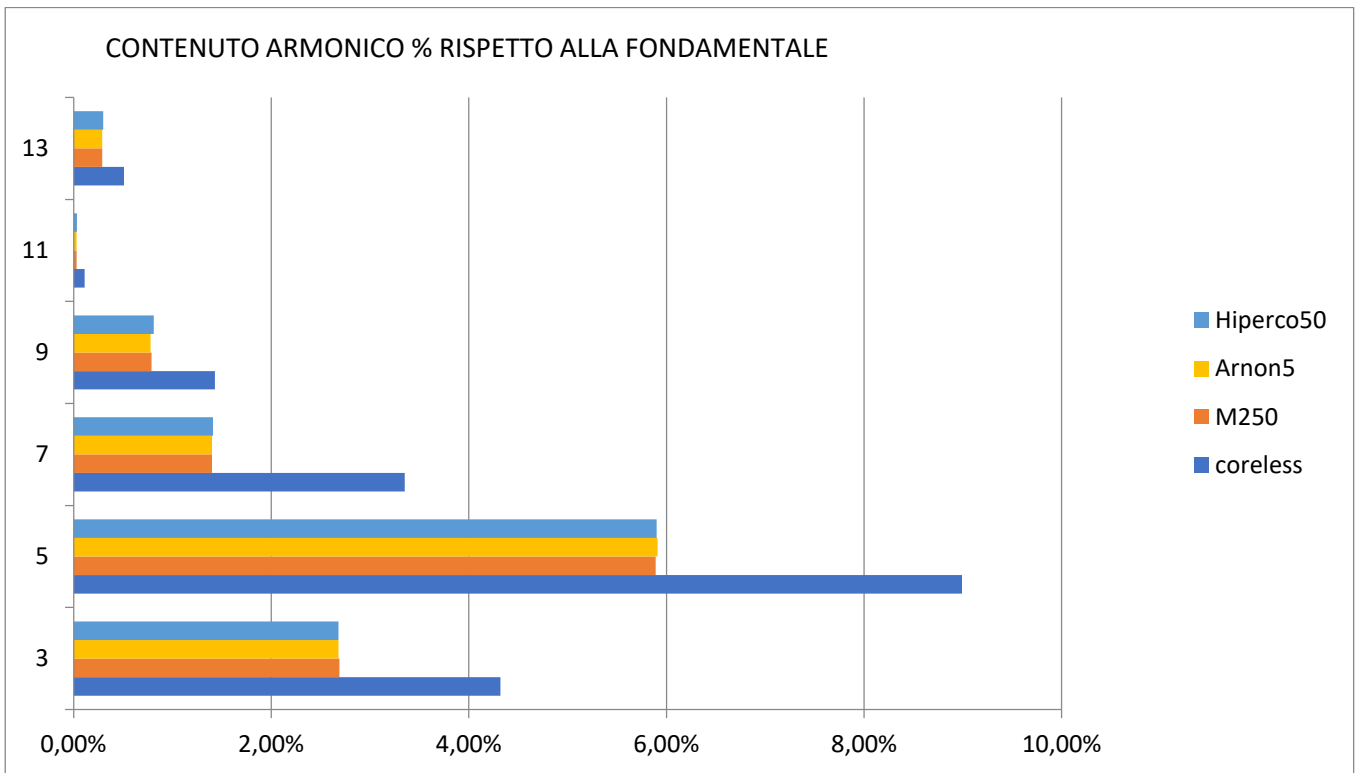


Fig.4.2.4 – contenuto armonico % rispetto alla fondamentale

Come è possibile notare dalla Fig.4.2.4, per quanto riguarda il contenuto armonico % rispetto alla fondamentale, si possono fare le seguenti considerazioni:

- Le armoniche di tensione calcolate con M250, Arnon5 e Hiperco50 sono molto simili per tutte le armoniche analizzate (terza, quinta, settima, nona, undicesima e tredicesima);
- il contenuto armonico con qualsiasi materiale risulta decisamente inferiore di quello nel caso coreless.

Di seguito vengono rilevate le P0 con tre diversi spessori: 10mm, 15mm e 20mm.

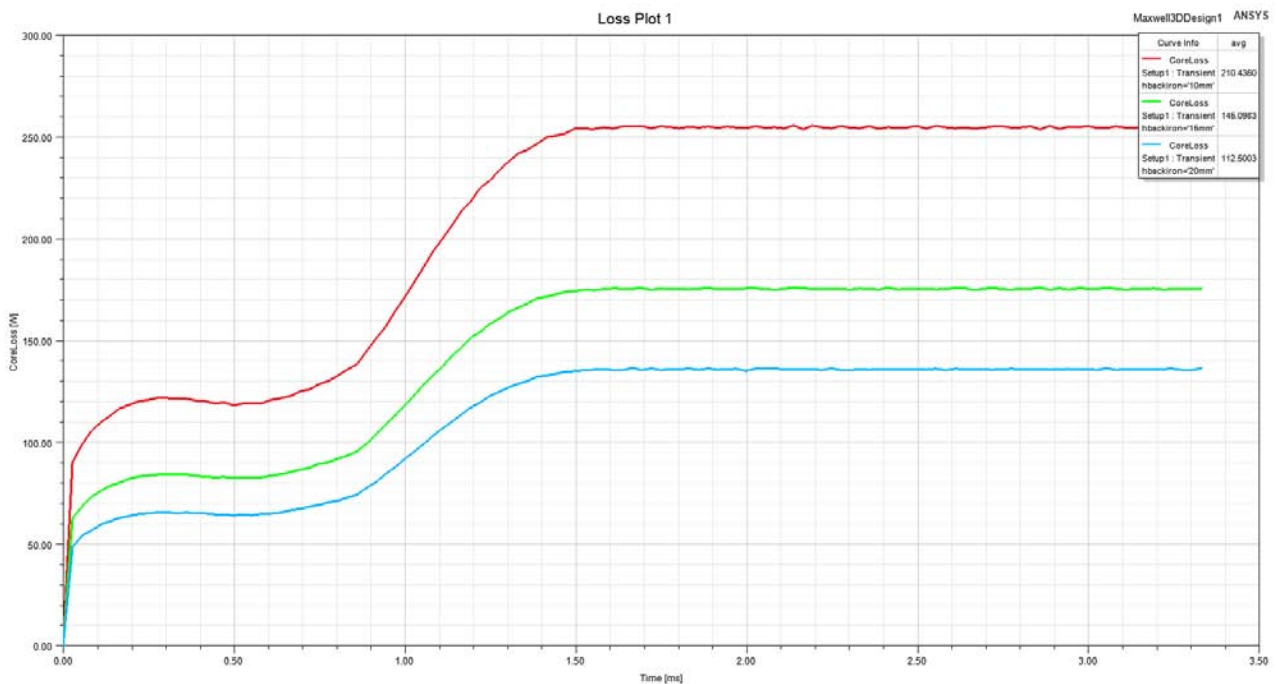


Fig.4.2.5 – P0 per diversi spessori del back iron

Anche con questo materiale le P0 sono molto basse, e il motivo è da ricercare nuovamente nello spessore dei lamierini ferromagnetici. Con spessore 20mm P0 vale 112,5 W.

Dopo aver analizzato le P0, si passa a verificare l'induttanza: vengono studiati tre spessori, 10mm, 15mm e 20mm. Si nota che la variazione di induttanza è costante al variare dello spessore del back iron e i valori ottenuti sono pressochè simili a quelli ricavati per Arnon5.

Anche le forze attrattive dei magneti vengono analizzate con i soliti tre spessori già analizzati in precedenza. Si può notare, dalla Fig.4.2.6, come le forze attrattive restino pressochè invariate al variare del back iron.

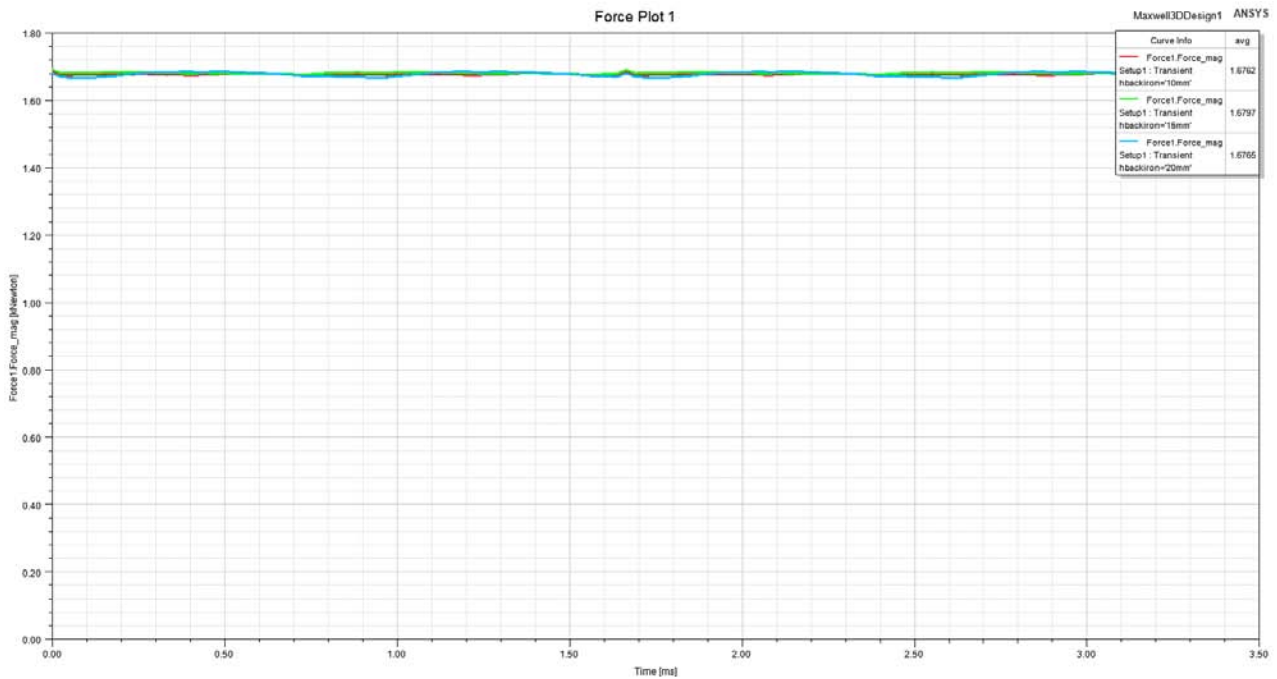


Fig.4.2.6 – forze attrattive magneti per diversi spessori del back iron

Di seguito viene riportata la tabella 4.2.3, comprendente i valori di induttanza, fondamentale di f.e.m. a vuoto, forza attrattiva e P0 di Hiperco50. Confrontando la tabella 4.2.3 con la 4.1.4 si possono fare le seguenti considerazioni:

Tabella 4.2.3 - variazione L , $\hat{E}_{0,1}$, F e P_0 al variare dello spessore

Spessore (mm)	L (mH)	$\hat{E}_{0,1}$ (V)	F (kN)	P_0 (W)
10	28,32	134,4	1,676	210,4
15	28,44	134,5	1,68 (+0,24%)	145,1 (-31,04%)
20	28,56	134,6	1,676 (0%)	112,5 (-46,53%)

I due materiali si presentano molto simili sotto quasi tutti i punti di vista, infatti presentano circa la stessa induttanza L e le stesse perdite a vuoto P_0 . Anche per quanto riguarda la f.e.m. a vuoto i valori sono circa gli stessi, con un valore di picco della fondamentale intorno ai 134 V.

La maggiore differenza si riscontra nelle forze attrattive dei magneti: si può notare, infatti, che queste restano costanti per quanto riguarda Hiperco50 al variare dello spessore (1,67 kN) mentre aumentano con Arnon5 da 1,47 kN con spessore 10mm fino a 1,68 kN con 20mm.

Una ulteriore differenza si ha nella diminuzione percentuale delle perdite a vuoto P_0 , le quali calano maggiormente all'aumentare dello spessore con Hiperco50. Si deve ricordare, comunque, che in valore assoluto il materiale che tra i due presenta le P_0 inferiori è Arnon5.

Sono state effettuate, anche con questo materiale, delle prove con diversi tipi di avvolgimento, al fine di provare a migliorare il contenuto armonico della f.e.m.: come nei casi precedenti, però, non sono state riscontrate migliorie di sorta.

Come ultima analisi per questo materiale viene eseguita la prova a carico, con $nt=14$. La corrente è la stessa dei casi precedenti, ovvero 18,75 A.

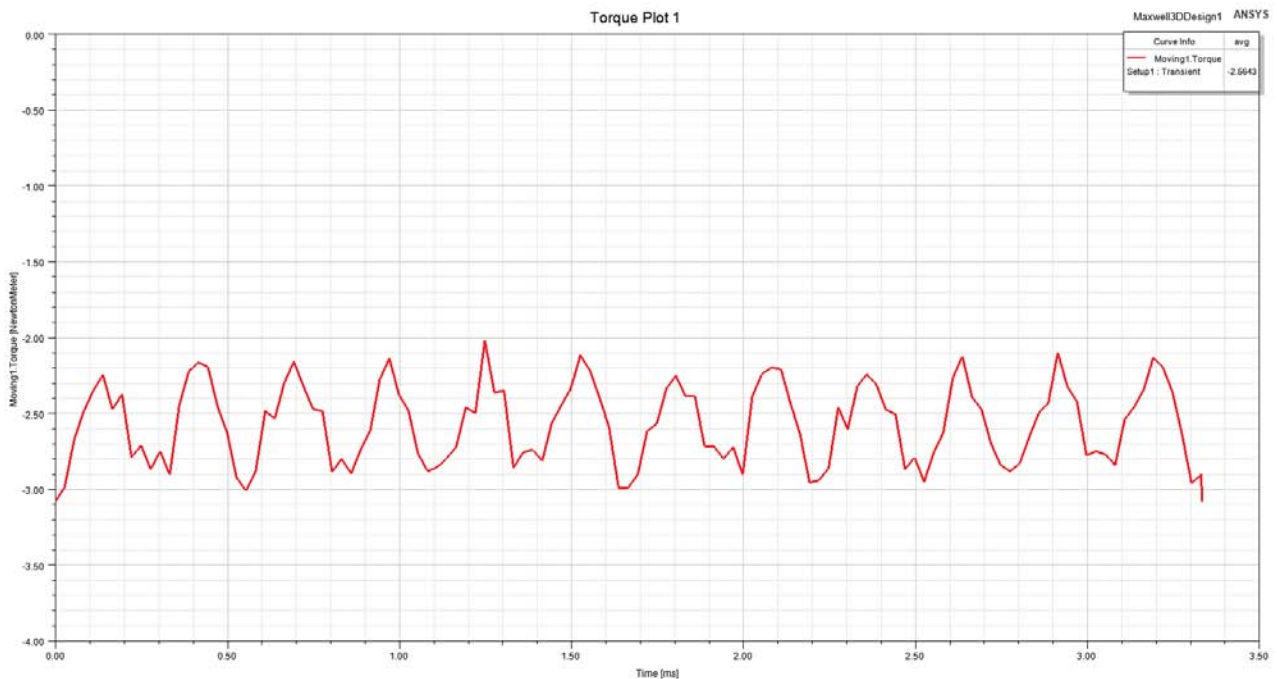


Fig.4.2.7 – coppia elettromagnetica

L'andamento della coppia con questo materiale segue quello di Arnon5, presentando quindi lo stesso contenuto armonico e un valore di fondamentale del tutto simile al precedente.

$$C_1 = 2,56 \text{ Nm}$$

$$C_6 = 0,33 \text{ Nm}$$

$$C_{12} = 0,018 \text{ Nm}$$

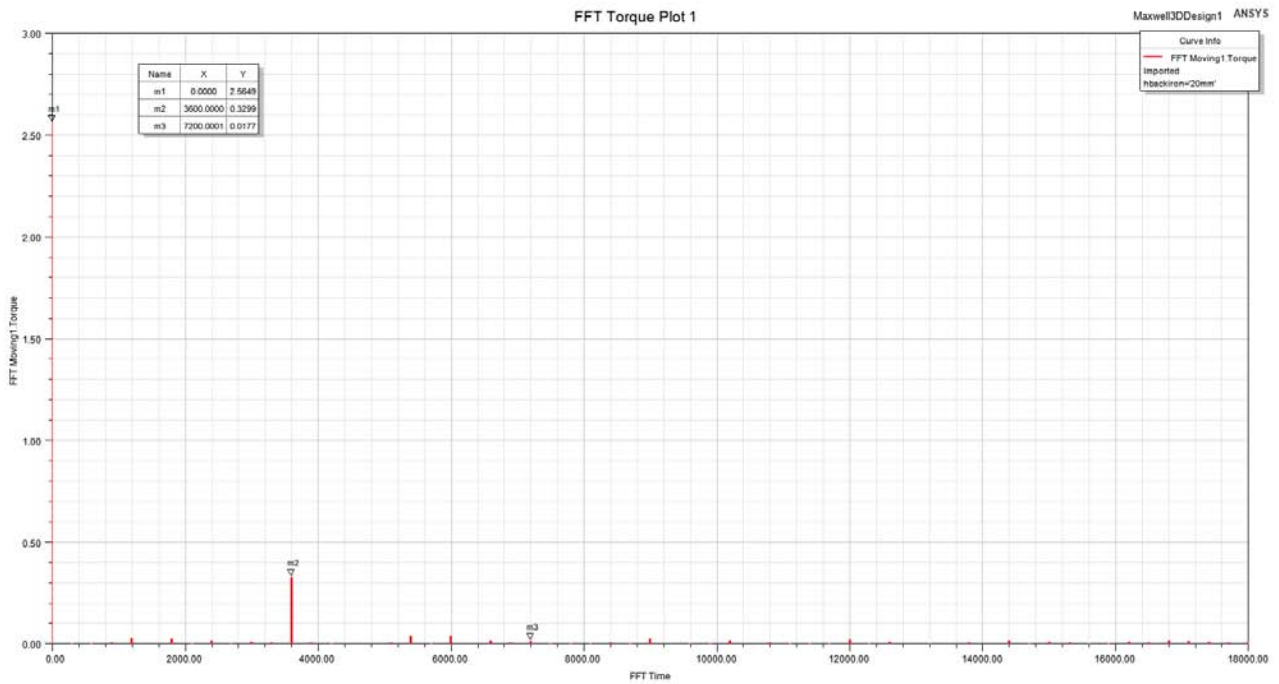


Fig.4.2.8 – contenuto armonico coppia elettromagnetica

Finora sono stati analizzati lamierini commerciali (M470, M250) e speciali (Arnon5, Hiperco50) come possibili back iron di statore. Viene adesso analizzato un materiale molto diverso per caratteristiche dai precedenti, ovvero un amorphous steel, il quale possiede bassissime P_0 anche a elevate frequenze.

5. Amorphous steel

Dopo aver analizzato diversi tipi di lamierini è stato sperimentato, come successivo back iron di statore, un materiale amorfo (AMM). Andando a studiare le caratteristiche b-h di tali amorphous steel si può notare come le perdite nel ferro siano inferiori di un ordine di grandezza rispetto a quelle di un normale lamierino in ferro silicio. Ciò è particolarmente vantaggioso a frequenze operative elevate. Si deve però aggiungere che tali materiali saturano a valori di induzione inferiori rispetto ai lamierini convenzionali e speciali (compresi quelli già studiati), quindi è da verificare che questa loro caratteristica non influenzi negativamente l'utilizzo della macchina.

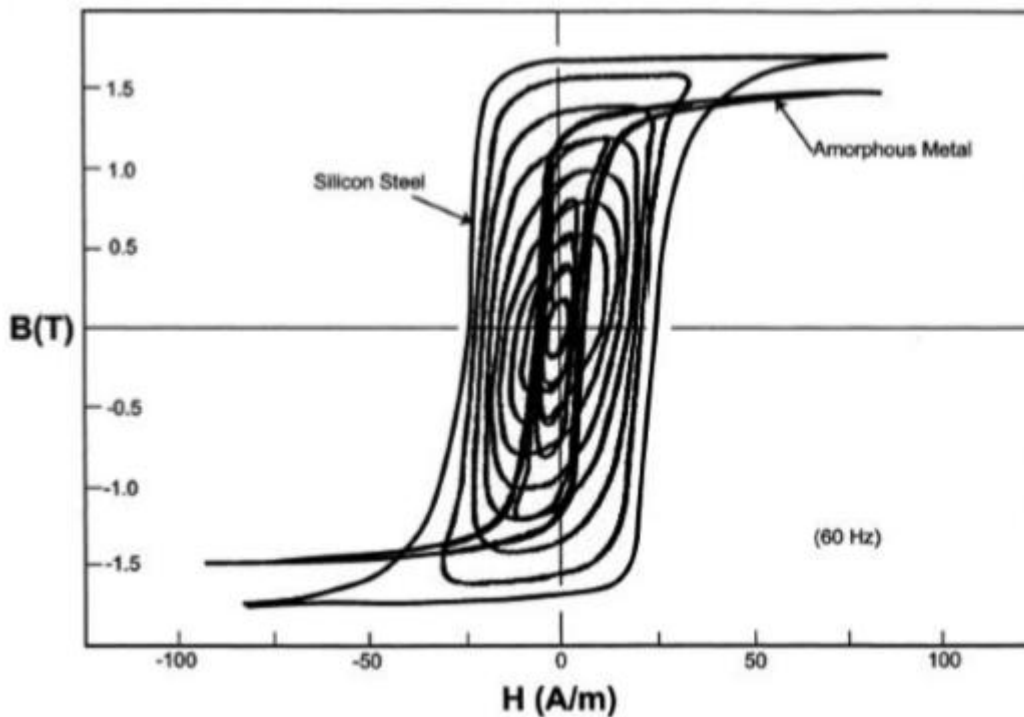


Fig.5.1 – confronto caratteristica b-h di un amorphous steel e di un lamierino ferro silicio^[13]

Tali materiali amorfi hanno la particolarità di avere una struttura cristallina non orientata, sono dei materiali isotropi, quindi nel momento in cui vengono laminati si deve indirizzare il flusso in modo da fargli seguire il percorso che massimizza le performance della macchina. Questo fattore, unito alla loro estrema durezza e ai limiti di trattamento prima e dopo il taglio, implica una maggiore difficoltà realizzativa e quindi costi più elevati. Andando quindi ad elencare le principali caratteristiche di questi materiali si può dire che essi hanno^[14]:

- Basse perdite nel ferro;
- Alta densità di flusso di saturazione;
- Alta temperatura operativa.

Per comprendere meglio il diverso comportamento del materiale amorfo rispetto ai lamierini commerciali di seguito, nella tabella 5.1, vengono riportati i valori di induzione di saturazione e di induzione B a specifici valori del campo magnetico H.

Tabella 5.1 – confronto caratteristiche b-h di diversi materiali

	B _{sat}	B (H=500A/m)	B (H=1000A/m)	B(H=2000A/m)
M470	~2 T	1,44 T	1,52 T	1,57 T
M250	~2 T	1,37 T	1,45 T	1,53 T
AMORPHOUS STEEL	1,56 T	0,94 T	1,25 T	1,86 T

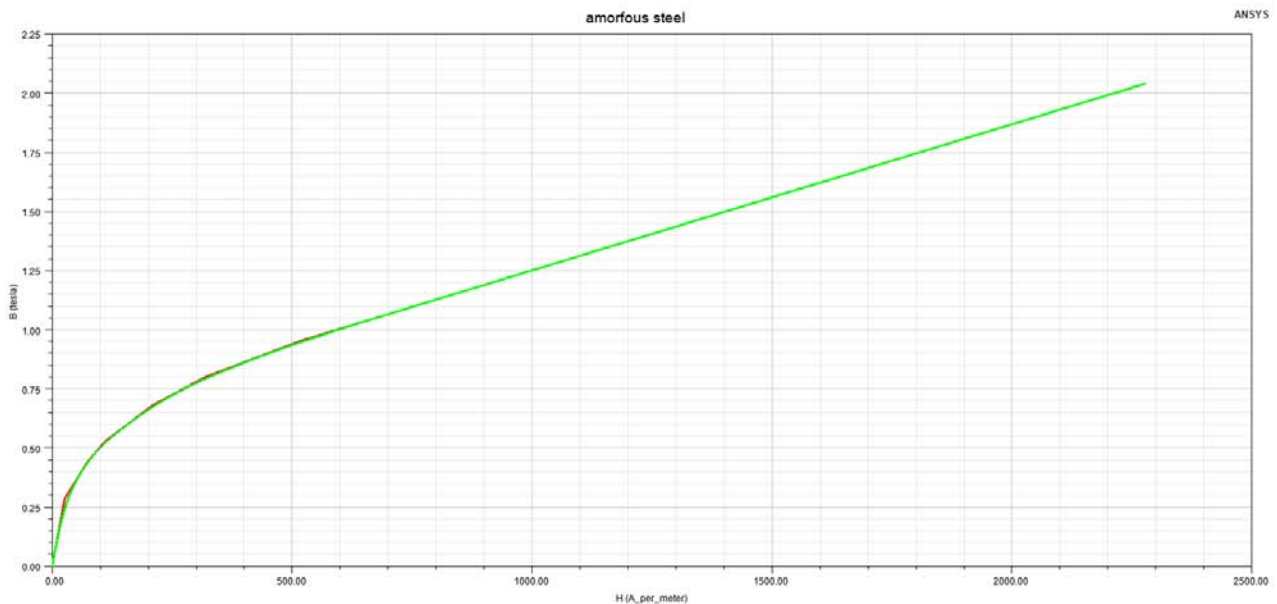


Fig.5.2 – caratteristica b-h amorphous steel

Come precedentemente discusso, si nota che il ginocchio di saturazione della caratteristica b-h del materiale amorfo si trova a un valore di induzione inferiore rispetto ai materiali precedentemente studiati. E' quindi presumibile pensare che lo spessore del back iron dovrà essere controllato con attenzione per evitare fenomeni di saturazione. Per questo motivo si parte a analizzare il materiale non più da uno spessore di 5mm, ma direttamente da 10mm.

Di seguito, nella tabella 5.2, vengono riportati i valori di perdita specifica di M470, M250 e Amorphous steel per diverse frequenze e induzioni, in modo da poterli confrontare.

Tabella 5.2 – confronto tra perdite specifiche di diversi materiali

	Freq = 50 Hz B = 1T	Freq = 400 Hz B = 1T	Freq = 1kHz B=0,5T
M470	1,87 W/kg	40,6 W/kg	-
M250	0,98 W/kg	17,1 W/kg	18,8 W/kg
AMORPHOUS STEEL	0,05 W/kg	1,55 W/kg	5 W/kg

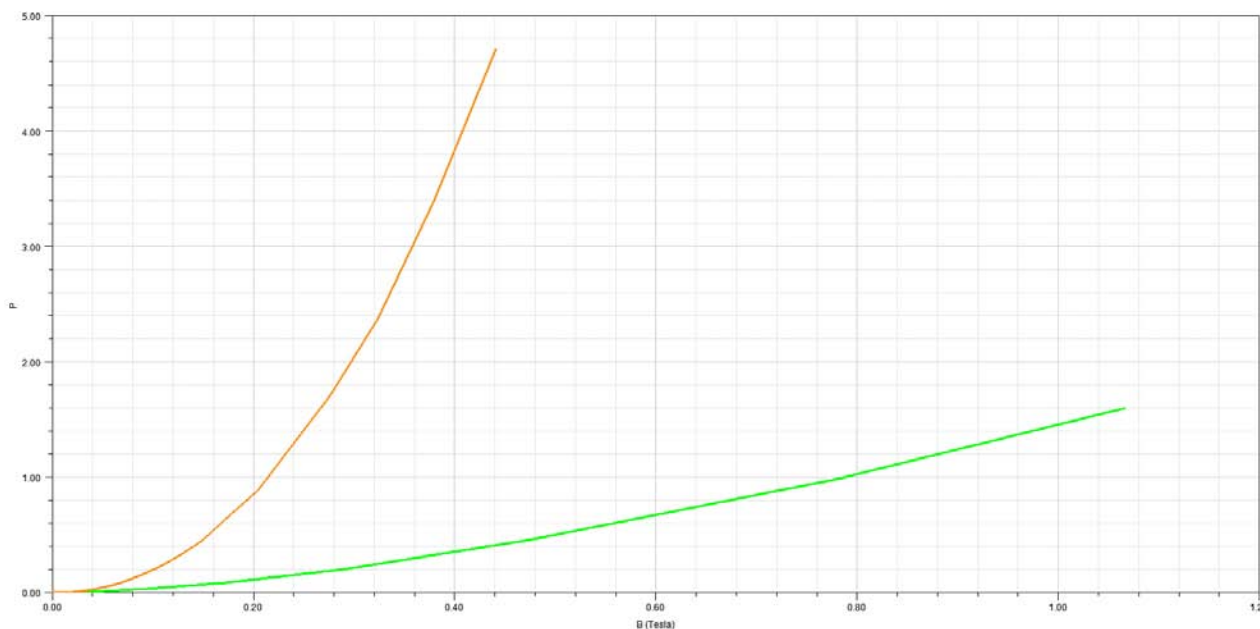


Fig.5.3 – caratterisitca di perdita specifica con freq = 400(verde) e 1000(arancione) Hz

Si può notare, nella Fig.5.3, come nella curva di perdite specifiche dell'amorphous steel si abbiano valori inferiori di potenza specifica per un determinato valore di induzione rispetto ai materiali studiati in precedenza.

Come nei casi precedenti vengono studiati f.e.m., contenuto armonico e perdite nel ferro a vuoto.

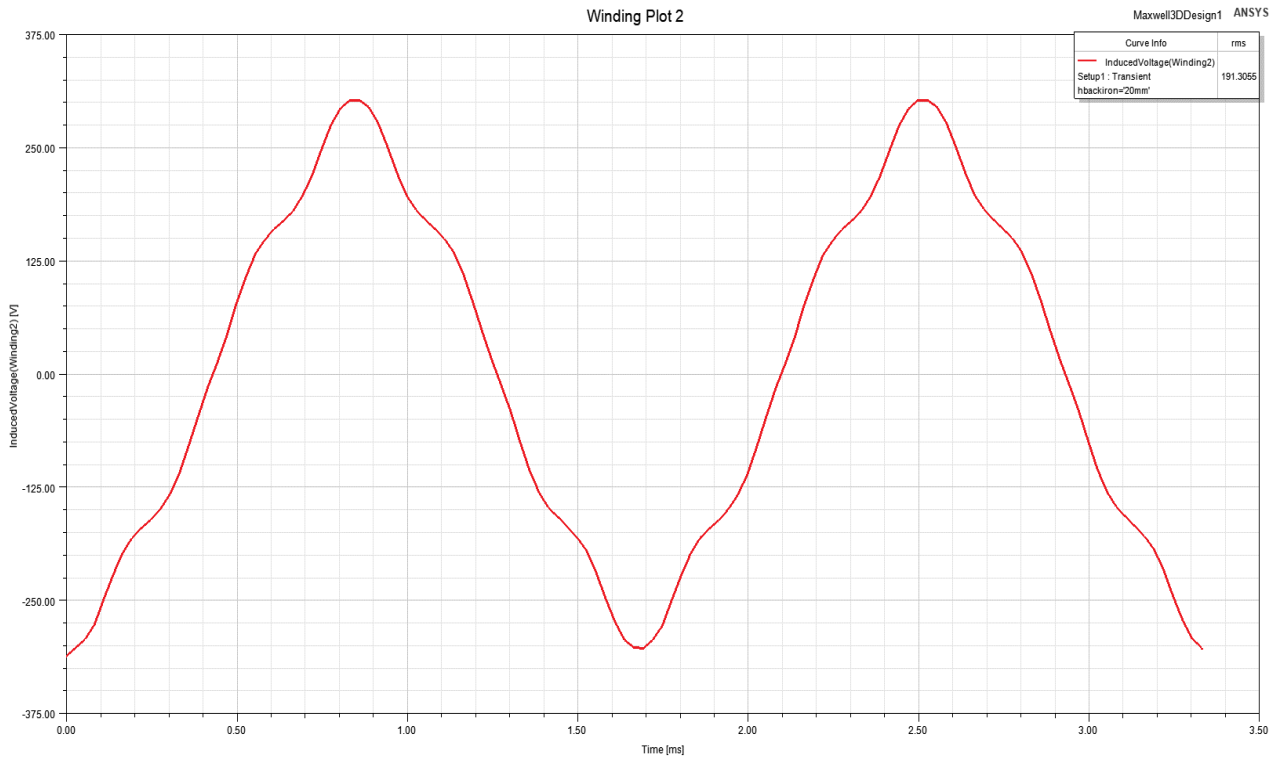


Fig.5.4 – f.e.m. a vuoto con spessore 20mm

Il valore efficace della f.e.m. risulta essere pari a 191,3V; anche in questo caso, volendo ottenere una f.e.m. pari a quella del caso coreless, si opera una riduzione del numero di spire nt (da 28 a 14). Il valore efficace della f.e.m. a vuoto con $nt=14$ è pari a 93,96 V, mentre il suo contenuto armonico è riportato nella tab.5.3.

Tabella 5.3 – f.e.m. a vuoto con spessore 20mm

	AMORPHOUS STEEL ($nt=14$)
$\hat{E}_{0,1}$	131,3 V
$\hat{E}_{0,3}$	5,43 V
$\hat{E}_{0,5}$	10,43 V
$\hat{E}_{0,7}$	3,48 V
$\hat{E}_{0,9}$	1,40 V
$\hat{E}_{0,11}$	0,15 V
$\hat{E}_{0,13}$	0,68 V

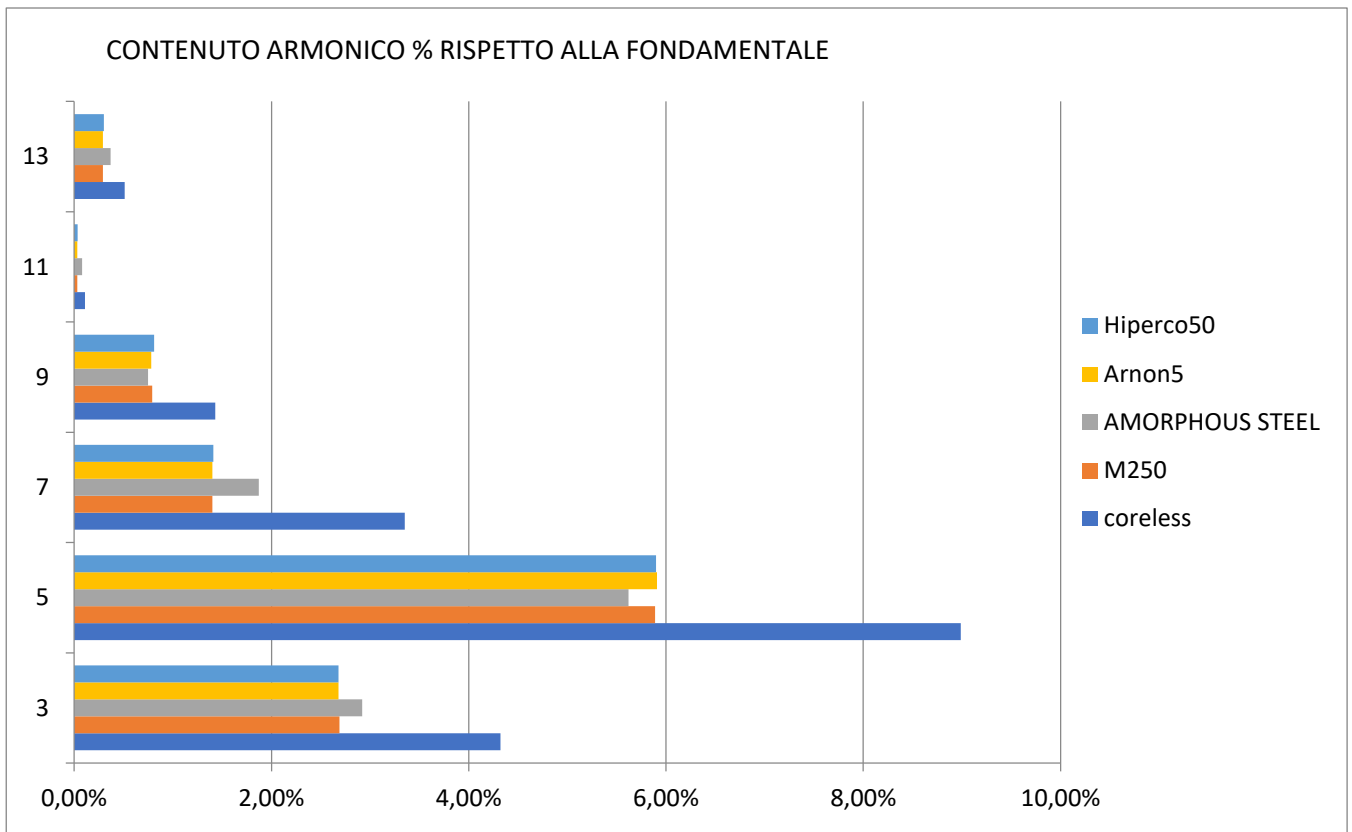


Fig.5.5 – contenuto armonico % rispetto alla fondamentale

Come è possibile notare dalla Fig.5.5, per quanto riguarda il contenuto armonico % rispetto alla fondamentale, si possono fare le seguenti considerazioni:

- per quanto riguarda la terza armonica, i valori di M250, Arnon5 e Hiperco50 sono molto simili, mentre sono un po' più elevati i valori dell'amorphous steel;
- di contro, la quinta armonica presenta un minimo con il materiale amorfo, mentre è un po' più elevata con gli altri tre materiali;
- la settima armonica presenta un minimo con i materiali M250, Arnon5 e Hiperco50;
- il contenuto armonico con qualsiasi materiale risulta inferiore di quello nel caso coreless.

Tabella 5.4 – confronto P0 tra diversi tipi di statore al variare dello spessore

SPESSORE (mm)	M470 (W)	M250 (W)	AMORPHOUS STEEL (W)
10	1686	466	86,01
11	1510	423,6	79,19
12	1381	389,2	73,10
13	1276	360,2	68,37
14	1191	336,4	64,06
15	1118	315,6	60,38
16	1053	297,8	57,06
17	998,9	282,4	54,13
18	950	268,8	51,51
19	904,3	256,9	49,12
20	855,2	245,9	46,99

Visti gli ottimi risultati in termine di perdite nel ferro ottenuti con questo materiale è stato deciso di studiarlo con spessore 10mm. In queste condizioni la f.e.m. a vuoto è pari a 133,6 V e la forza attrattiva dei magneti nei confronti del back iron è pari a 1,66 kN.

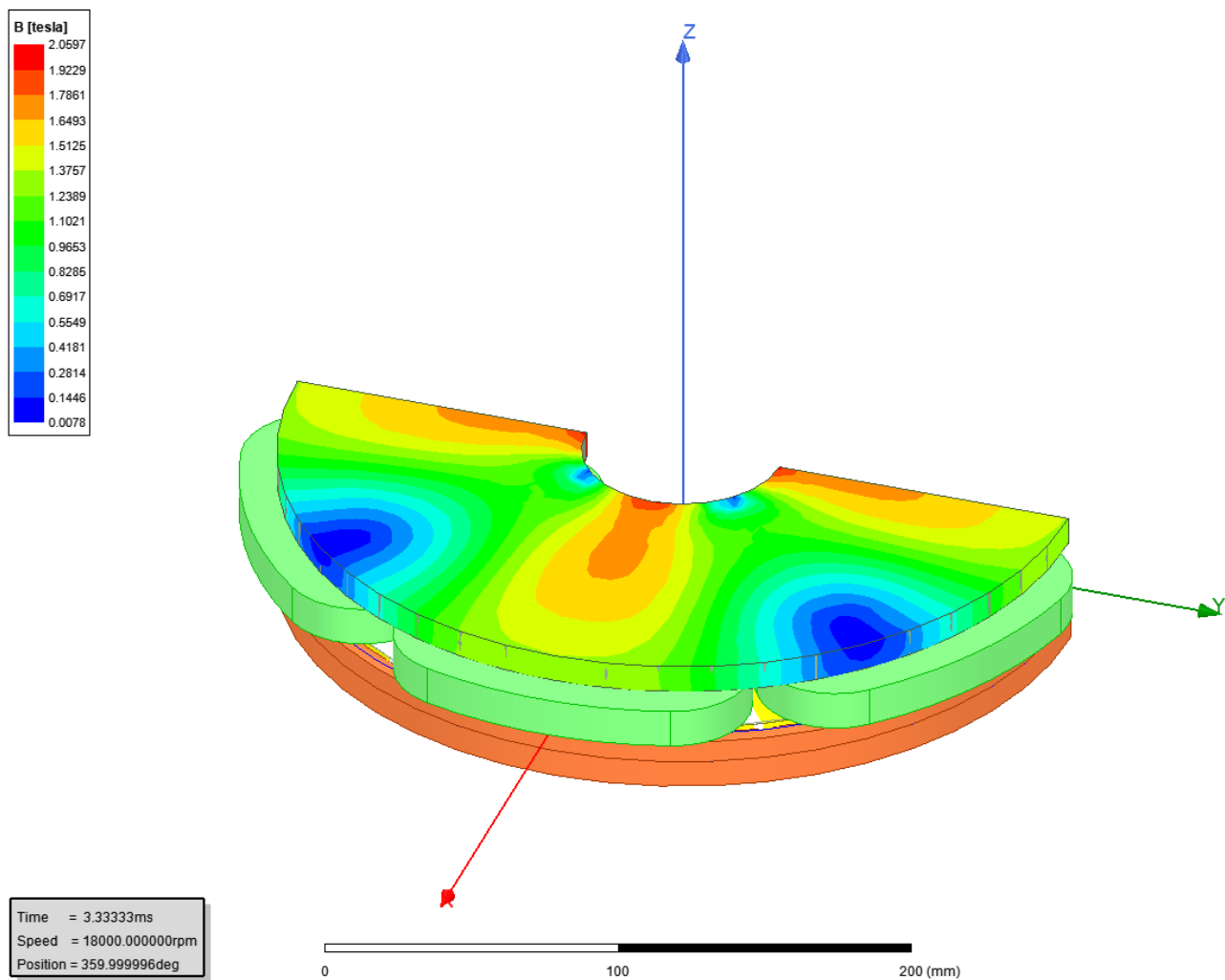


Fig.5.6 – induzione nel back iron con spessore 10mm

Come si vede dalla Fig.5.6, la mappa dell'induzione mostra valori assolutamente accettabili, nonostante il materiale presenti un valore più basso di B_{sat} rispetto ai lamierini.

Utilizzando questo materiale, le prestazioni ottenute hanno registrato ottimi risultati in merito alle perdite nel ferro. Le perdite, anche se confrontate con gli altri materiali utilizzati come back iron, sono state molto basse. Si deve specificare che le caratteristiche b-h e le perdite specifiche di tale materiale sono ricavate da risultati sperimentali [11], e non da dei data sheet di lamierini commerciali come nel caso di M470 e M250. Da non trascurare anche la maggiore fragilità meccanica che può creare qualche problema di assemblaggio.

Come ultima prova a vuoto viene analizzato il valore di induttanza dell'avvolgimento: vengono studiati i casi con $nt=28$ (pari a quelle nel caso coreless) e con $nt=14$.

Tabella 5.5 – confronto induttanza per diversi tipi di statore

	Coreless	AMORPHOUS STEEL (nt=28)	AMORPHOUS STEEL (nt=14)
L_{avg} (mH)	63,15	117,71	27,87

Come è possibile notare, anche in questo caso, come nei precedenti, l'induttanza media assume un valore pari circa al doppio del caso coreless con $nt=28$ e circa metà del caso coreless quando le spire vengono dimezzate.

Vengono adesso analizzate le prestazioni a carico della macchina, utilizzando come in precedenza un valore efficace di corrente pari a 18,75 A e $nt=14$. Lo spessore è pari a 20mm.

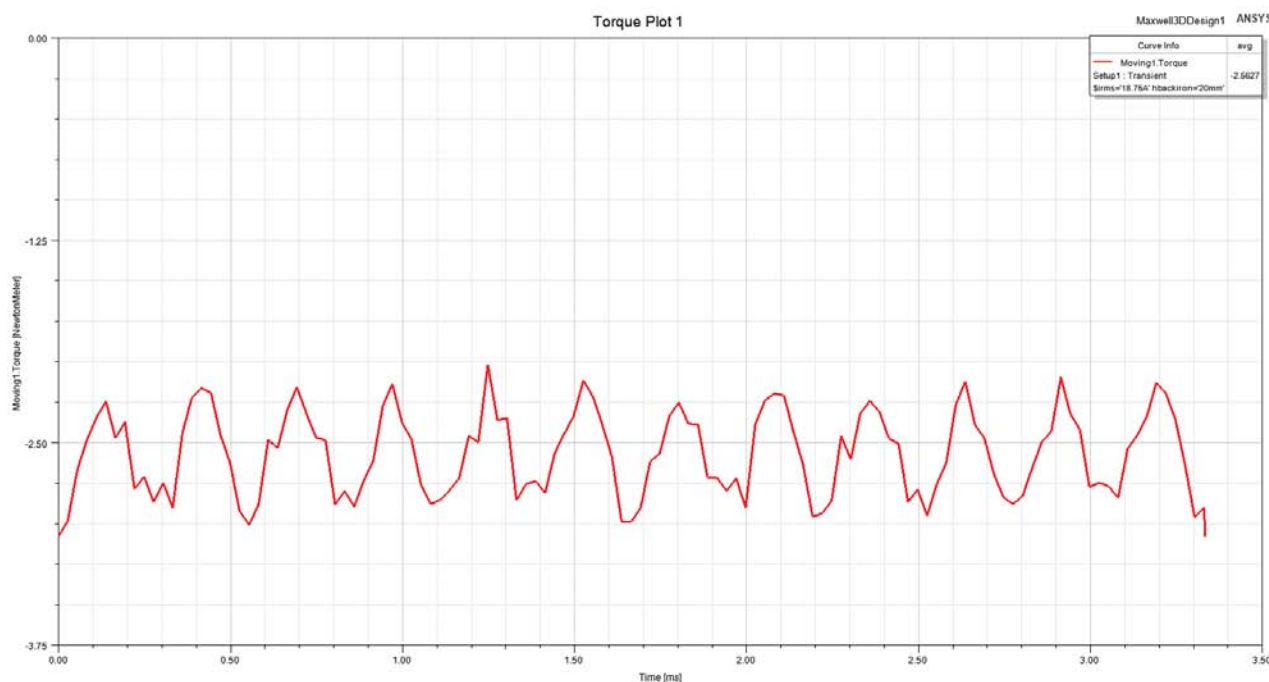


Fig.5.7 – coppia elettromagnetica

Il valore della coppia è in linea con quelli rilevati in precedenza, e si attesta attorno ai -2,56 Nm, con un andamento periodico in cui si possono riscontrare un valore medio, una sesta e una dodicesima armonica.

$$C_1 = 2,56 \text{ Nm}$$

$$C_6 = 0,33 \text{ Nm}$$

$$C_{12} = 0,0177 \text{ Nm}$$

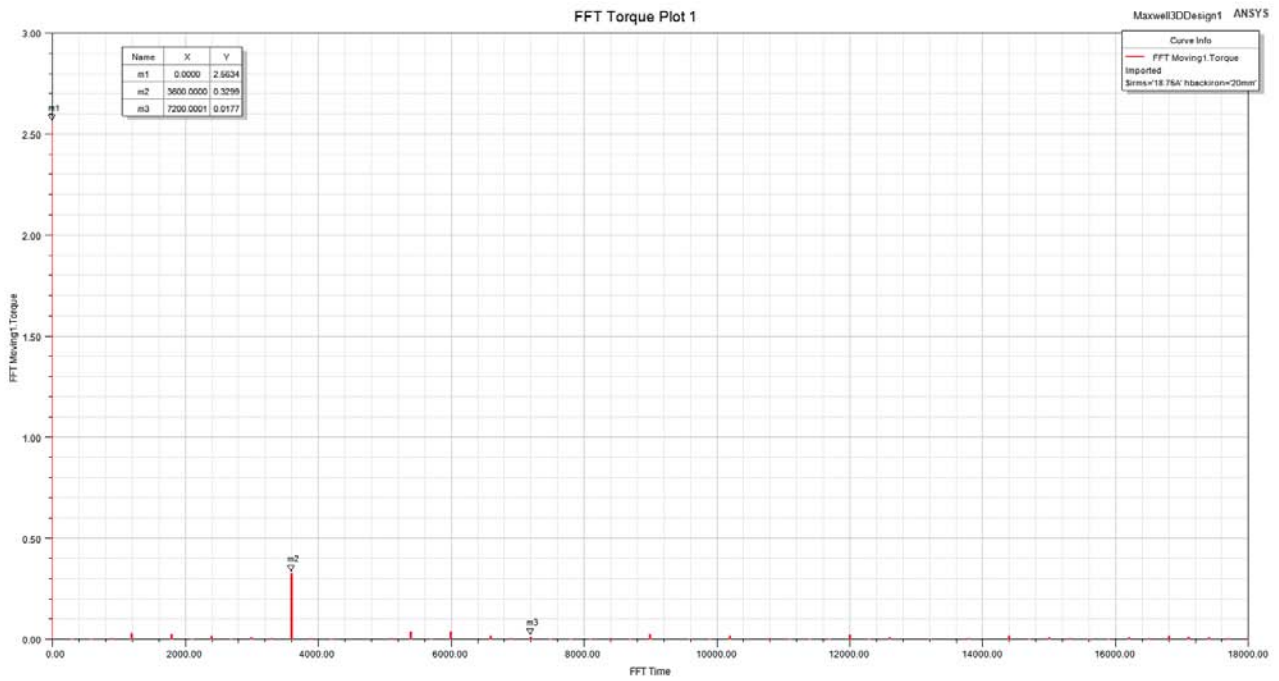


Fig.5.8 – contenuto armonico coppia

Anche i valori di fondamentale di tensione e forza attrattiva sono in linea con quelli analizzati in precedenza, con il valore efficace della f.e.m. pari a 134,7 V e il valore medio della forza pari a 1,69kN.

6. Conclusioni

Dopo aver analizzato diverse configurazioni dello statore della macchina i risultati più incoraggianti dal punto di vista delle prestazioni sono stati ottenuti con un back iron di statore. Nonostante il prototipo iniziale, grazie all'assenza del giogo ferromagnetico, avesse degli indubbi vantaggi (assenza di P_0 , basso valore di L , forze attrattive nulle) è penalizzato dal basso sfruttamento dell'avvolgimento e dal contenuto armonico non ottimale della f.e.m.

Date le elevate frequenze per cui è previsto il funzionamento di questo prototipo, le scelte più convenienti per diminuire le elevate perdite nel ferro sono state quelle di utilizzare lamierini più sottili del normale (0,127mm, 0,15mm) e di utilizzare un materiale amorfo, che grazie alle sue caratteristiche uniche permette di ottenere bassi valori di P_0 . Le proprietà magnetiche degli amorphous steel sono state ricavate da prove di laboratorio, con caratteristiche ideali che massimizzano le qualità di tali materiali, senza tenere conto delle eventuali lavorazioni a cui devono essere sottoposti nella realtà e dell'apprezzabile aumento di costo. Per questo motivo i materiali più indicati per creare il back iron di statore della macchina a flusso assiale a magneti permanenti sono stati l'Aronon5 e l'Hiperco50.

Le prove effettuate con questi due materiali hanno evidenziato il comportamento molto simile nelle condizioni di funzionamento richieste, con valori di perdite e contenuto armonico pressoché identici. L'unica differenza sostanziale tra i due è stata riscontrata nel diverso comportamento riguardo le forze attrattive dei magneti: se, all'aumentare dello spessore, la forza attrattiva agente su Arnon5 aumentava proporzionalmente, con Hiperco50 non si verificava tale comportamento; con tale materiale, infatti, le forze di attrazione restano più o meno costanti per tutti i diversi valori di spessore studiati.

Si deve però sottolineare che, nonostante gli evidenti miglioramenti che questi materiali hanno portato ai vari parametri della macchina, il contenuto armonico della f.e.m. è migliorato rispetto allo statore coreless, senza tuttavia ottenere l'attenuazione sperata. Anche agendo sulla forma delle bobine, mantenendo la stessa distribuzione, non è stato riscontrato un miglioramento apprezzabile. Tra le possibili soluzioni, vi è il ricorso ad un avvolgimento distribuito, sfruttando anche il posizionamento delle spire su una zona più ampia, non essendoci cave. In alternativa, si può considerare la modifica della geometria dei magneti. Tenendo conto dei miglioramenti riscontrati con il back iron ferromagnetico si potrebbe contestualmente optare per l'uso di materiali meno pregiati, a terre rare o in ferrite.

7. Bibliografia

- [1] Pei Yulong, Andrea Cavagnino, Silvio Vaschetto, Chai Feng, Alberto Tenconi “ Flywheel Energy Storage Systems for Power Systems Application”, 2017, IEEE
- [2] Yu yali, Wang yuanxi, Sun feng “ the Latest Development of the Motor/Generator for the Flywheel Energy Storage System”, 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, August 19-22, 2011, Jilin, China
- [3] Grzegorz Dzechciaruk, Lech Grzesiak, Andrea Vezzini, Hardi Hoimoja “Analysis of a flywheel storage system for ultra-fast charging station of electric vehicles with regard to electric machine design and operational speed range”, Przegląd Elektrotechniczny
- [4] Mauro Andriollo, Andrea Tortella “Preliminary Design of an Axial Flux Machine with Coreless Stator for Flywheel Applications” , 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)
- [5] Maarten J. Kamper, Rong-Jie Wang, Francois G. Rossouw “ Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings”, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 44, no. 5, September/october 2008
- [6] Bing Xia, Jian-Xin Shen, Patrick Chi-Kwong Luk, and Weizhong Fei “Comparative Study of Air-Cored Axial-Flux Permanent-Magnet Machines With Different Stator Winding Configurations”, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 62, no. 2, february 2015
- [7] Federico Deiana, Alessandro Serpi, Ignazio Marongiu, Gianluca Gatto “ Efficiency Assessment of Permanent Magnet Synchronous Machines for High-Speed Flywheel Energy Storage Systems”
- [8] Lamag lamierini magnetic
- [9] Arnold Magnetic Technologies
- [10] M. Tietz, F. Herget, G. von Pfingsten, S. Steentjes, K. Telger and K. Hameyer “Effects and advantages of high-strength non grain oriented (NGO) electrical steel for traction drives”, 2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)
- [11] Karel Hruska, Jan Laksar, Jan Sobra “The Determination of Iron Core Loss Characteristics of Special Electrical Steel Types”, Published in 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)
- [12] Carpenter Technology
- [13] Nesimi Ertugrul, Ryusuke Hasegawa, Wen L. Soong, John Gayler, Stephen Kloeden, and Solmaz Kahourzadeh “A Novel Tapered Rotating Electrical Machine Topology Utilizing Cut Amorphous Magnetic Material”, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 51, no. 7, july 2015
- [14] Amorphous AMBC Series Block Core, Hitachi Metals