POLITECNICO DI TORINO

SEDE DI TORINO

DIPARTIMENTO ENERGIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria elettrica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Trasformatori di distribuzione con nucleo avvolto

Relatore:
Prof. Michele Pastorelli

Candidato:
Faà Luca

Anno accademico 2016/2017

Tesi svolta in collaborazione con l'azienda "Elettromeccanica Piossasco"

SOMMARIO

1. BREVE DESCRIZIONE DELL'AZIENDA 3
2. INTRODUZIONE 4
3. ASPETTO NORMATIVO 5
   3.1. Che importanza ha promuovere l'efficienza energetica dei trasformatori? 5
   3.2. Vediamo più nel dettaglio cosa dice la norma 6
   3.3. Situazione precedente alla normativa ECODESIGN 10
   3.4. Confronto tra CEI EN 50464 (precedente) e CEI EN 50588 (attuale) 11
4. EFFETTI DELLA NUOVA NORMATIVA SULLE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE 13
   4.1. Adeguamento al 1° step (1° luglio 2015) 13
   4.2. In previsione del 2° step (1° luglio 2021) 16
   4.3. Perché il nucleo avvolto? 18
5. PROCESSO PRODUTTIVO CON TECNOLOGIA ATTUALE 27
   5.1. Nucleo impilato e bobine a sezione ovale 27
6. PROCESSO PRODUTTIVO CON NUOVA TECNOLOGIA 34
   6.1. Nucleo avvolto e bobine a sezione rettangolare 34
7. SCELTE PROGETTUALI 54
   7.1. Scelta della taglia 54
   7.2. Scelta delle tensioni e dei collegamenti 54
   7.3. Scelta della tensione di corto circuito 55
   7.4. Scelta della classe di efficienza energetica 56
   7.5. Dimensionamento degli avvolgimenti 56
   7.6. Dimensionamento del nucleo 57
8. PROVE DI COLLAUDO 59
   8.1. Misura del rapporto di trasformazione e verifica del gruppo di collegamento 60
   8.2. Misura resistenza avvolgimenti 60
   8.3. Prova a vuoto 61
   8.4. Prova in corto circuito 62

8.5. Prova di isolamento con tensione applicata 63
8.6. Prova di isolamento con tensione indotta..... 65
8.7. Risultati collaudo 66
9. CONFRONTO TRA LE DUE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE 67
10. CONCLUSIONI 70
APPENDICE A - CALCOLO TENSIONE DI CORTO CIRCUITO 72
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 82

1. BREVE DESCRIZIONE DELL'AZIENDA

L'azienda "*Elettromeccanica Piossasco S.r.l.*" è stata fondata nel 1962 e ha sede nell'omonimo comune di Piossasco (TO). Si occupa della progettazione, costruzione, vendita e manutenzione di trasformatori di distribuzione in olio e, tramite la società partecipata "EL.PI. Cast-Resin", di trasformatori di distribuzione in resina e a secco.

La gamma delle macchine prodotte comprende:

- dai 50 kVA fino a 6000 kVA per i trasformatori in olio
- dai 50 kVA fino a 3150 kVA per i trasformatori in resina
- dai 20 kVA fino a 1600 kVA per i trasformatori a secco

con tensioni che possono arrivare fino a 33 kV, in classe di isolamento 36 kV.

Le richieste dei committenti hanno fatto sì che, oggi giorno, la produzione sia orientata sui trasformatori in resina, per una percentuale del quasi 70%.

L'azienda opera sul mercato italiano e, dai primi anni '80, sui mercati esteri, i quali rappresentano oggi la principale area di mercato.

2. INTRODUZIONE

Il fenomeno del riscaldamento globale è ormai in corso. Studi di scenario prevedono per i prossimi anni effetti catastrofici come lo scioglimento dei ghiacciai, l'innalzamento del livello dei mari, l'incremento delle ondate di calore e periodi di intensa siccità alternati ad alluvioni, tempeste ed uragani.
Tutto questo porterà a conseguenze che impatteranno su milioni di persone ed esseri viventi in generale, danneggiando la produzione alimentare e distruggendo habitat ed ecosistemi.
La comunità scientifica, a parere pressoché unanime, è d'accordo nell'indicare come principale colpevole di questo cambiamento climatico in atto, l'emissione di gas ad effetto serra derivante da attività umane.
In particolare l'attenzione ricade sull'anidride carbonica: pur non essendo tra i gas serra con maggiore GWP[1], essa è tuttavia molto più abbondante nell'atmosfera rispetto agli altri gas ed è per questo considerato tra i maggiori responsabili dell'effetto serra.
Tra i metodi per ridurre le emissioni di CO_2 vi sono:

- promuovere le fonti energetiche rinnovabili
- promuovere l'efficienza energetica.

Proprio quest'ultimo metodo sembra essere la strada più rapida ed economica per raggiungere l'obiettivo di riduzione delle emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera.

In questa sede ci occuperemo di <u>come viene promossa l'efficienza energetica nel mercato dei trasformatori elettrici</u>, con riferimento al mercato europeo, e di valutare nuove tecnologie costruttive che permettano di realizzare e immettere sul mercato macchine conformi alle nuove normative. Cercheremo di dare un taglio pratico all'argomento e di vederlo dal punto di vista delle aziende produttrici.

In particolare, in collaborazione con l'azienda "*Elettromeccanica Piossasco S.r.l.*", ci occuperemo di valutare una nuova soluzione produttiva che permetta all'azienda di adattare la produzione di trasformatori in vista dell'evoluzione delle normative vigenti, rimanendo competitiva sul mercato.
Andremo a realizzare un prototipo e lo confronteremo con un trasformatore di pari potenza costruito con l'attuale tecnologia; analizzeremo le differenze in termini di processo produttivo e di caratteristiche elettriche e valuteremo la validità di tale tecnologia costruttiva.

[1] GWP è l'acronimo inglese di Global Warming Potential: esprime il contributo all'effetto serra di un gas serra relativamente all'effetto della CO_2, il cui potenziale di riferimento è pari a 1.

3. ASPETTO NORMATIVO

La risposta delle politiche internazionali ai problemi ambientali si è fatta un po' attendere ed è evidente che, considerando la situazione attuale e gli scenari previsti per il prossimo futuro, finora si sia fatto ancora poco.

La Comunità Europea nel 2005, facendo seguito alle indicazioni del trattato internazionale noto come "Protocollo di Kyoto", ha emesso la Direttiva 2005/32/EC, chiamata comunemente Direttiva di ECODESIGN, mirata ad implementare l'efficienza energetica negli apparecchi utilizzatori di energia elettrica.
Successivamente, nel 2009, con la Direttiva 2009/125/EC, l'ambito della precedente Direttiva è stato ampliato ed esteso anche agli apparecchi correlati all'utilizzo dell'energia elettrica e, in tale contesto, sono state previste regole specifiche per i trasformatori di piccola, media e grande potenza, riportate nel Regolamento UE N. 548/2014.

3.1. Che importanza ha promuovere l'efficienza energetica dei trasformatori?

È ben noto che i trasformatori siano tra i dispositivi elettrici più efficienti, con rendimenti che possono andare oltre al 99% per le macchine di grossa taglia. Ma se ci fermiamo a pensare all'enorme quantità di unità installate e al fatto che sono progettate per lavorare decenni prima di essere sostituite, appare chiaro che anche piccoli miglioramenti nella loro prestazione energetica, possono portare ad un enorme risparmio in termini di energia.

Risparmio di energia che si traduce in:

- tonnellate di CO_2 in meno riversate in atmosfera
- notevole risparmio in termini economici, considerando che le perdite (a vuoto e a carico) rappresentano la principale voce di costo di un trasformatore nel corso del suo ciclo di vita.

Considerando qualche dato:

se pensiamo che nel 2011, soltanto in Europa, si stimavano circa 3.6 milioni di trasformatori installati e si prevede che il numero possa salire a 4.7 milioni di unità nel 2025, l'impatto della normativa ECODESIGN sarà considerevole.

Dagli studi condotti dalla Commissione Europea, si stima che la regolamentazione possa portare ad un risparmio energetico di circa 16 TWh all'anno dal 2020 in poi, corrispondenti a circa 3.7 Mt di CO_2 in meno riversate in atmosfera.

Questo persegue il duplice scopo, previsto dal "Protocollo di Kyoto", di ridurre l'effetto serra ed incrementare il risparmio energetico.

3.2. Vediamo più nel dettaglio cosa dice la norma

La normativa racchiude i requisiti che devono avere i trasformatori immessi sul mercato o posti in servizio all'interno dell'Unione Europea. Riguarda la maggior parte delle tipologie di trasformatori, con l'esclusione di alcune categorie particolari, come i trasformatori di misura, trasformatori di messa a terra, trasformatori per saldatrici, ecc.

La regolamentazione introdotta dalla commissione Europea prevede l'adeguamento ai requisiti ECODESIGN in due fasi:

- prima fase, già avviata, a partire dal 1° luglio 2015
- seconda fase, con obiettivi più ambiziosi, a partire dal 1° luglio 2021

La norma fa riferimento ai trasformatori di potenza piccoli, medi e grandi, intendendo con:

- *"trasformatore di potenza piccolo"* un trasformatore di potenza la cui tensione di uscita massima sia ≤ 1.1 kV
- *"trasformatore di potenza medio"* un trasformatore di potenza la cui tensione di uscita massima sia ≥ 1.1 kV ma ≤ 36 kV e con potenza nominale ≥ 5 kVA ma ≤ 40MVA
- *"trasformatore di potenza grande"* un trasformatore di potenza la cui tensione di uscita sia ≥ 36 kV e con potenza nominale ≥ 5kVA, oppure con potenza nominale ≥ 40 MVA indipendentemente dalla massima tensione di uscita.

I requisiti in termini di rendimento vengono espressi:

- Per macchine con Sn ≤ 3150 kVA, con i valori massimi di perdite a vuoto e in corto, da non superare.
- Per macchine con Sn > 3150 kVA, con i valori minimi di PEI (*Peak Efficiency Index*), al di sotto dei quali non si deve andare.

Il <u>*PEI*</u>, l'indice di efficienza di picco, viene calcolato nel modo seguente, secondo l'*Equazione 1*:

$$PEI = 1 - \frac{2(P_0 + P_{c0})}{S_r\sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}}$$

Equazione 1

Con:

P_0: perdite a vuoto alla tensione nominale e alla frequenza nominale, sulla presa nominale;

P_{c0}: potenza elettrica necessaria per il sistema di raffreddamento per il funzionamento a vuoto;

P_k: perdite a carico misurate alla corrente nominale e alla frequenza nominale sulla presa nominale, adeguate alla temperatura di riferimento;

S_r: potenza nominale del trasformatore sulla quale si basa P_K.

Con riferimento alla gamma di macchine prodotte dall'azienda, ovvero alle macchine oggetto di studio, di seguito riportiamo un estratto del regolamento UE 548/2014, dove vengono indicati i requisiti minimi in materia di efficienza energetica applicabili ai trasformatori di potenza medi, immersi in un liquido.

Nella *Tabella 1* della pagina seguente, vengono indicati i massimi valori di perdite a vuoto e a carico per trasformatori con potenza nominale ≤ 3150 kVA, immersi in liquido isolante, con un avvolgimento con Vn ≤ 24 kV e l'altro con Vn ≤ 1,1 kV.

Sulle perdite a vuoto e sulle perdite a carico riportate nella *Tabella 1* e su quelle usate nei calcoli nell'*Equazione 1*, è prevista una tolleranza del 5% tra valore dichiarato e valore effettivamente misurato.

	Fase 1 (dal 1° luglio 2015)		Fase 2 (dal 1° luglio 2021)	
Potenza nominale (kVA)	**Perdite massime a carico P_k (W)**	**Perdite massime a vuoto P_0 (W)**	**Perdite massime a carico P_k (W)**	**Perdite massime a vuoto P_0 (W)**
≤ 25	900	70	600	63
50	1100	90	750	81
100	1750	145	1250	130
160	2350	210	1750	189
250	3250	300	2350	270
315	3900	360	2800	324
400	4600	430	3250	387
500	5500	510	3900	459
630	6500	600	4600	540
800	8400	650	6000	585
1000	10500	770	7600	693
1250	11000	950	9500	855
1600	14000	1200	12000	1080
2000	18000	1450	15000	1305
2500	22000	1750	18500	1575
3150	27500	2200	23000	1980

Tabella 1 – Massime perdite a vuoto e a carico per trasformatori in olio, previste per la fase 1 e la fase 2 di applicazione del Regolamento UE N. 548/2014

Per trasformatori con potenza nominale > 3150 kVA, nella *Tabella 2* vengono riportati i valori minimi di PEI in %.

	Fase 1 (dal 1° luglio 2015)	Fase 2 (dal 1°luglio 2021)
Potenza nominale (kVA)	**Valore minimo dell'indice di efficienza di picco (%)**	
3150 < Sr ≤ 4000	99,465	99,532
5000	99,483	99,548
6300	99,510	99,571
8000	99,535	99,593
10000	99,560	99,615
12500	99,588	99,640
16000	99,615	99,663
20000	99,639	99,684
25000	99,657	99,700
31500	99,671	99,712
40000	99,684	99,724

Tabella 2 – Minimi valori di PEI per trasformatori in olio, previsti per la fase 1 e la fase 2 di applicazione del Regolamento UE N. 548/2014

Per quanto riguarda i trasformatori di distribuzione in resina, la normativa ha previsto perdite massime più elevate rispetto ai trasformatori in olio, come si può vedere in *Tabella 3.*

Trasformatori a secco				
	Fase 1 (dal 1° luglio 2015)		**Fase 2 (dal 1° luglio 2021)**	
Potenza nominale (kVA)	**Perdite massime a carico P_k (W)**	**Perdite massime a vuoto P_0 (W)**	**Perdite massime a carico P_k (W)**	**Perdite massime a vuoto P_0 (W)**
≤ 50	1700	200	1500	180
100	2050	280	1800	252
160	2900	400	2600	360
250	3800	520	3400	468
400	5500	750	4500	675
630	7600	1100	7100	990
800	8000	1300	8000	1170
1000	9000	1550	9000	1395
1250	11000	1800	11000	1620
1600	13000	2200	13000	1980
2000	16000	2600	16000	2340
2500	19000	3100	19000	2790
3150	22000	3800	22000	3420

Tabella 3 – Massime perdite a vuoto e a carico per trasformatori a secco, previste per la fase 1 e la fase 2 di applicazione del Regolamento UE N. 548/2014

Analogamente, anche per le potenze > 3150 kVA, il PEI minimo previsto (*Tabella 4*) è inferiore rispetto a quello delle rispettive classi di potenza dei trasformatori in olio.

	Fase 1 (dal 1° luglio 2015)	**Fase 2 (dal 1°luglio 2021)**
Potenza nominale (kVA)	**Valore minimo dell'indice di efficienza di picco (%)**	
3150 < Sr ≤ 4000	99,348	99,382
5000	99,354	99,387
6300	99,356	99,389
8000	99,357	33,390
≥ 10000	99,357	99,390

Tabella 4 – Minimi valori di PEI per trasformatori a secco, previsti per la fase 1 e la fase 2 di applicazione del Regolamento UE N. 548/2014

3.3. Situazione precedente alla normativa ECODESIGN

Precedentemente all'entrata in vigore della normativa ECODESIGN, i trasformatori di distribuzione in olio erano regolamentati dalla normativa CEI EN 50464-1.
Tale normativa prevedeva la suddivisione in 4 classi di efficienza energetica (A, B, C, D), riportando i valori di perdite a vuoto e a carico riferiti alla pratica corrente in Europa.

Tuttavia la norma riportava che, tali valori, "sono frutto di valutazioni che possono cambiare nel tempo e possono essere differenti per ciascun paese o ciascun utilizzatore, a seconda degli investimenti locali o delle politiche energetiche locali".
Pertanto la normativa riferisce che i trasformatori possono essere richiesti e offerti con valori di perdite a vuoto e/o a carico diverse da quelle riportate nelle tabelle.

La *Tabella 5* riassume quanto indicato nella vecchia normativa CEI EN 50464-1.

Potenza nominale (kVA)	**D_0 (W)**	**D_k (W)**	**C_0 (W)**	**C_k (W)**	**B_0 (W)**	**B_k (W)**	**A_0 (W)**	**A_k (W)**	**Vcc %**
50	145	1350	125	1100	110	875	90	750	4
100	260	2150	210	1750	180	1475	145	1250	
160	375	3100	300	2350	260	2000	210	1700	
250	530	4200	425	3250	360	2750	300	2350	
315	630	5000	520	3900	440	3250	360	2800	
400	750	6000	610	4600	520	3850	430	3250	
500	880	7200	720	5500	610	4600	510	3900	
630	1030	8400	860	6500	730	5400	600	4600	
630	940	8700	800	6750	680	5600	560	4800	6
800	1150	10500	930	8400	800	7000	650	6000	
1000	1400	13000	1100	10500	940	9000	770	7600	
1250	1750	16000	1350	13500	1150	11000	950	9500	
1600	2200	20000	1700	17000	1450	14000	1200	12000	
2000	2700	26000	2100	21000	1800	18000	1450	15000	
2500	3200	32000	2500	26500	2150	22000	1750	18500	

Tabella 5 – Massime perdite previste per trasformatori in olio, dalla precedente normativa CEI EN 50464-1

Questa norma è stata sostituita dalla CEI EN 50588-1 ai sensi del nuovo regolamento UE N. 548/2014, di cui abbiamo precedentemente riportato un estratto (*Tab. 1* e *Tab. 2*).

Con la nuova regolamentazione, invece, se il trasformatore non è conforme ai limiti riportati nelle tabelle, non può essere venduto/messo in servizio nel mercato Europeo.

3.4. Confronto tra CEI EN 50464 (precedente) e CEI EN 50588 (attuale)

Guardando le due normative si può notare che, per definire le massime perdite della serie ECO, sono state prese:

- le perdite a vuoto della classe A_0
- le perdite a carico della serie C_K (per $S_N \leq 1000$ kVA) e B_K (per $S_N \geq 1250$ kVA).

con riferimento alle classi della normativa precedente.

Questo lo si può notare dalle tabelle seguenti, in cui si riportano le differenze di ciascuna classe della normativa precedente rispetto alle perdite previste dalla nuova normativa.
In particolare, la *Tabella 6* mette in evidenza il fatto che le perdite a vuoto della serie ECO coincidono con le perdite a vuoto della Classe A della vecchia normativa.

Potenza nominale (kVA)	**Δ (P_0 ECO-D_0)**	**Δ (P_0 ECO-C_0)**	**Δ (P_0 ECO-B_0)**	**Δ (P_0 ECO-A_0)**
50	-38%	-28%	-18%	0%
100	-44%	-31%	-19%	0%
160	-44%	-30%	-19%	0%
250	-43%	-29%	-17%	0%
315	-43%	-31%	-18%	0%
400	-43%	-30%	-17%	0%
500	-42%	-29%	-16%	0%
630	-42%	-30%	-18%	0%
800	-43%	-30%	-19%	0%
1.000	-45%	-30%	-18%	0%
1.250	-46%	-30%	-17%	0%
1.600	-45%	-29%	-17%	0%
2.000	-46%	-31%	-19%	0%
2.500	-45%	-30%	-19%	0%

Tabella 6 – Confronto tra massime perdite a vuoto previste dalla vecchia normativa CEI EN 50464-1 e quelle previste dalla nuova normativa CEI EN 50588-1, per trasformatori in olio

Si può aggiungere che la serie ECO ha ridotto le perdite a vuoto di circa un 40 % rispetto alla classe D, di circa un 30 % rispetto alla classe C e di circa un 20 % rispetto alla classe B della vecchia normativa.

Nella *Tabella 7* emerge che le perdite a carico della serie ECO riprendono le perdite corrispondenti alle classi C e B della vecchia normativa, rispettivamente per potenze fino ai 1000 kVA e oltre ai 1250 kVA.
Le perdite a carico della Normativa ECODESIGN sono addirittura superiori a quelle che erano previste dalla classe A e dalla classe B (fino a 1000 kVA).

Potenza nominale (kVA)	**Δ (P_K ECO-D_K)**	**Δ (P_K ECO-C_K)**	**Δ (P_K ECO-B_K)**	**Δ (P_K ECO-A_K)**
50	-19%	0%	26%	47%
100	-19%	0%	19%	40%
160	-24%	0%	18%	38%
250	-23%	0%	18%	38%
315	-22%	0%	20%	39%
400	-23%	0%	19%	42%
500	-24%	0%	20%	41%
630	-23%	0%	20%	41%
800	-20%	0%	20%	40%
1.000	-19%	0%	17%	38%
1.250	-31%	-19%	0%	16%
1.600	-30%	-18%	0%	17%
2.000	-31%	-14%	0%	20%
2.500	-31%	-17%	0%	19%

Tabella 7 - Confronto tra massime perdite a carico previste dalla vecchia normativa CEI EN 50464-1 e quelle previste dalla nuova normativa CEI EN 50588-1, per trasformatori in olio

Quindi appare evidente che il regolatore ha deciso, con la nuova normativa, di ridurre maggiormente le perdite nel ferro (scegliendo come riferimento la vecchia classe A) rispetto alle perdite a carico (prendendo come riferimento le classi B e C).

Questo fatto si può ricondurre alla seguente motivazione:

mentre le perdite a carico dipendono dalla presenza del carico e dal relativo assorbimento, le perdite a vuoto sono presenti dal momento che il trasformatore viene energizzato, indipendentemente dalla presenza o meno del carico e dall'entità dello stesso. Questo significa che le perdite a vuoto sono presenti 24 ore al giorno e per 365 giorni all'anno (salvo fuori servizio per guasti o manutenzione ordinaria/straordinaria).
Per tale motivo, anche se la potenza istantaneamente dissipata a vuoto è di piccola entità, il consumo energetico che ne deriva dopo decenni di continuo allacciamento alla rete risulta di parecchi TWh.

4. EFFETTI DELLA NUOVA NORMATIVA SULLE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE

Riprendendo il discorso di *pag. 9*, la normativa ECODESIGN ha avuto effetti maggiori sulla produzione dei trasformatori in olio. Infatti, mentre si riescono ancora a progettare trasformatori in resina con la tecnologia tradizionale, conformi alla normativa ECODESIGN e a prezzi competitivi, per i trasformatori in olio si è rivelato necessario modificare la tecnologia costruttiva per adeguarsi alla Fase 1 e, verosimilmente, sarà necessario rivedere il processo produttivo per la Fase 2, del 2021.

4.1. Adeguamento al 1° step (1° luglio 2015)

Con l'entrata in vigore della nuova normativa dal 1° luglio 2015, per produrre trasformatori destinati al mercato europeo è stato necessario adeguare la produzione per permettere di realizzare macchine che rispettassero i vincoli di perdite massime (o di minimo PEI, se ci riferiamo a macchine con Sn > 3150 kVA) previsti dal nuovo regolamento UE N. 548/2014. Tutto ciò cercando di mantenere bassi i costi di produzione, in modo da poter offrire i trasformatori a prezzi competitivi sul mercato.
La soluzione, per quanto riguarda i trasformatori da distribuzione di taglia media fino ai 2500 kVA, si è trovata passando da avvolgimenti con sezione circolare ad *avvolgimenti con sezione ovale*.
Nella *Figura 1* sottostante si può osservare la caratteristica sezione ovale dell'avvolgimento.

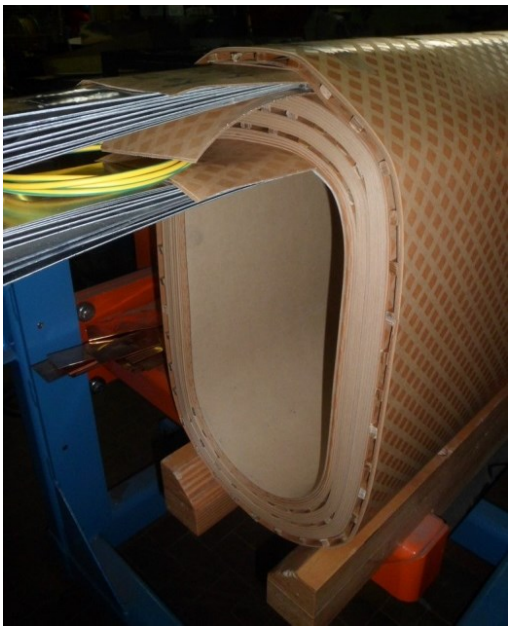


Figura 1 – Avvolgimento BT in lastra di alluminio con sezione interna ovale

Tale soluzione ha permesso di ridurre la lunghezza dei gioghi superiore e inferiore e questo porta, complessivamente, ad una riduzione del volume di ferro nella macchina con conseguente riduzione delle perdite a vuoto e della corrente a vuoto.

La *Figura 2* seguente rappresenta qualitativamente quanto appena detto, basandosi su misure riferite a trasformatori da 1000 kVA in olio, con avvolgimenti in rame.

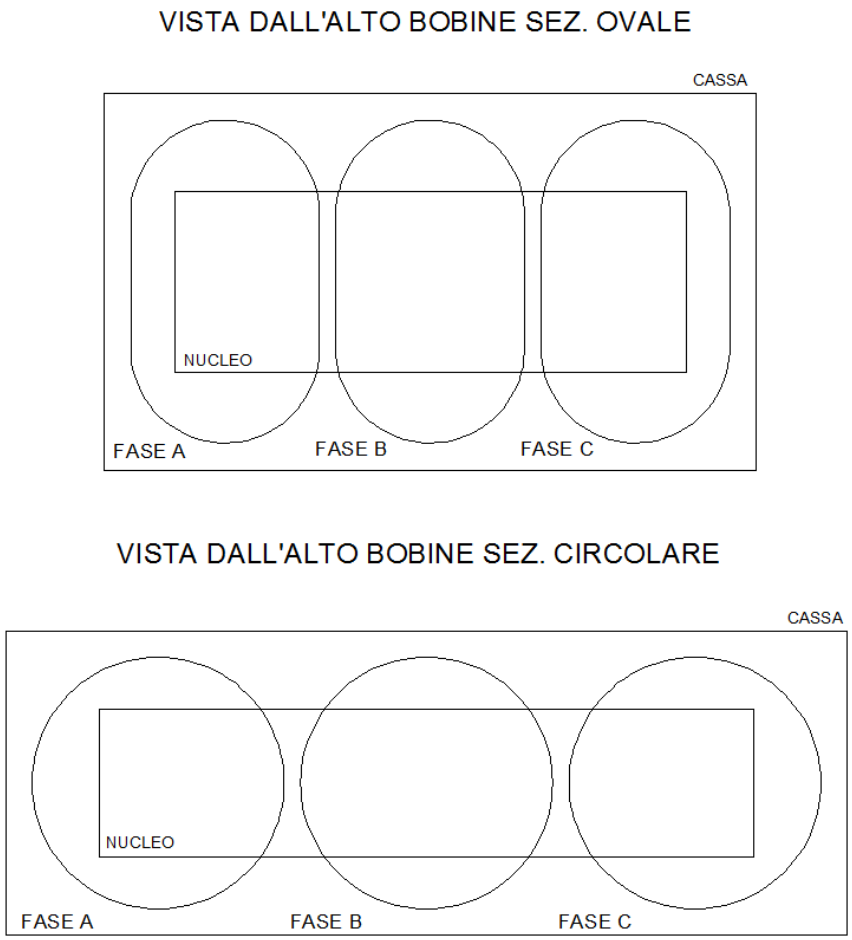


Figura 2 – Confronto qualitativo tra trasformatori da 1000 kVA con avvolgimenti in rame. Sopra l'attuale tecnologia costruttiva con bobine di sezione ovale; sotto la tecnologia tradizionale con bobine circolari.

Una possibile alternativa a tale soluzione poteva essere quella di realizzare il nucleo con lamierini magnetici di prima qualità, mantenendo inalterata la forma delle bobine.
Bisogna però tenere presente che:

1. Il costo delle materie prime utilizzate aumenta notevolmente, con la conseguenza di non riuscire ad offrire sul mercato trasformatori in maniera competitiva.
2. Nei trasformatori di piccola taglia, caratterizzati da un fattore di costruzione[1] ("*building factor*") più elevato, il vantaggio in termini di perdite a vuoto non è così consistente da giustificare l'aumento di prezzo e addirittura non è garantito che si riesca a rimanere nei limiti di perdite indicati dalla nuova normativa.

Pertanto, lo stato dell'arte per quanto riguarda i trasformatori da distribuzione in olio fino ai 2500 kVA, prevede:

- Nucleo tradizionale, con lamierini a grano orientato impilati secondo la tecnologia "*step-lap*"
- Avvolgimenti con sezione ovale, vista dall'alto.

Con il progressivo aumento della taglia dei trasformatori, il "*building factor*" che caratterizza il nucleo diminuisce, pertanto l'utilizzo di un lamierino magnetico di qualità superiore garantisce una consistente diminuzione delle perdite a vuoto. Ciò permette per trasformatori di taglia più elevata, di rimanere conformi alla normativa ECODESIGN, senza la necessità di passare alla sezione ovale degli avvolgimenti.

A sostegno della scelta di 2500 kVA come linea di confine tra sezione circolare e sezione ovale, si può aggiungere che:

per trasformatori di potenza superiore, la norma prevede di considerare il PEI come requisito di efficienza energetica. Il PEI tiene conto sia delle perdite a vuoto che delle perdite a carico, ma lascia al progettista la scelta di come bilanciarle. Ciò significa che, nel caso non si riuscisse a tenere basse le perdite a vuoto in fase di progettazione, si può compensare riducendo le perdite a carico. L'importante è garantire il minimo valore di PEI indicato dalla norma.

[1] Il "building factor", espresso in %, rappresenta la variazione di perdite a vuoto prima e dopo il processo di lavorazione del lamierino magnetico e costruzione del nucleo.

4.2. In previsione del 2° step (1° luglio 2021)

Come accennato prima, il passaggio ad avvolgimenti con sezione ovale ha permesso di adattare la produzione dei trasformatori di distribuzione in olio, fino a Sn ≤ 2500 kVA, alla fase 1 della normativa ECODESIGN.
Tuttavia il margine che si riesce a tenere tra perdite reali e limiti normativi è piuttosto stretto e in previsione dell'entrata in vigore della Fase 2 del regolamento UE dal 1° luglio 2021, che contempla un'ulteriore riduzione delle perdite a vuoto e a carico, si rivela molto difficile riuscire a realizzare macchine conformi alle norme, utilizzando l'attuale tecnica costruttiva. Discorso valido soprattutto per quello che riguarda le macchine di piccola taglia, per le problematiche discusse in precedenza.

Questo crescente interesse nel migliorare l'efficienza energetica sta portando a rivalutare tecnologie costruttive che nel passato sembravano inutili o sconvenienti. Un esempio è la realizzazione del nucleo ferromagnetico avvolto.

Nucleo avvolto come possibile soluzione per il 2021

La tecnologia del nucleo avvolto è studiata già dagli anni '80, tuttavia non ha mai trovato applicazione nel settore dei trasformatori da distribuzione. A tutt'oggi la tecnologia utilizzata per la realizzazione dei nuclei dei trasformatori da distribuzione rimane quella tradizionale, ovvero quella che prevede l'impilamento dei lamierini, come si può osservare nella *Figura 3*.

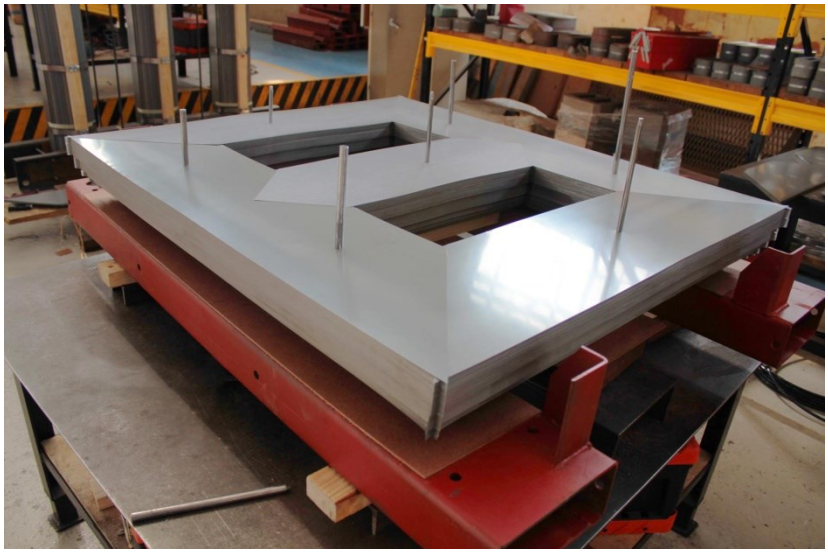


Figura 3 – Montaggio di un nucleo tradizionale con lamierini impilati, tagliati a 45°.

La principale ragione di questa scelta è che la tecnologia del nucleo avvolto è sempre stata associata all'utilizzo di acciaio amorfo, il quale presenta molte difficoltà di utilizzo pratico e ha proprietà meccaniche non molto adatte per i nuclei di trasformatori. Si tratta di un materiale estremamente fragile, quindi difficile da piegare e con tendenza a sfogliarsi negli anni, a seguito delle continue vibrazioni che interessano il nucleo magnetico di un trasformatore. Tali pezzi finiscono all'interno della macchina, inquinando l'olio e causando possibili corto-circuiti.
Oggigiorno i progressi tecnologici hanno permesso di realizzare macchine piegatrici, con le quali si possono realizzare nuclei avvolti con il tradizionale acciaio da lamierini. Questo materiale, essendo più duttile dell'amorfo, permette di essere piegato con curve ad angolo retto, permettendo così la realizzazione di nuclei avvolti di forma più compatta e con caratteristiche meccaniche migliori.

In questo contesto, in collaborazione con la *"Elettromeccanica Piossasco S.r.l."* abbiamo costruito un prototipo da 100 kVA in olio e confrontato con un trasformatore di pari potenza, costruito con la tecnologia attualmente adottata.
In questo modo, con l'azienda, possiamo confrontare le due soluzioni costruttive sotto ogni aspetto, valutarne pro e contro, e decidere così se la nuova tecnologia può essere adottata in futuro come standard di produzione per realizzare trasformatori conformi alla normativa che entrerà in vigore nel 2021.

Nella *Figura 4* è rappresentato un nucleo avvolto a 5 colonne, della tipologia da noi utilizzata per realizzare il prototipo.

Figura 4 – Esempio di nucleo avvolto, a 4 elementi

4.3. Perché il nucleo avvolto?

Rispetto al nucleo tradizionale, il nucleo avvolto presenta tre vantaggi principali:

1. Meno tagli nel nucleo

Il nucleo tradizionale a tre colonne, viene realizzato assemblando 5 pezzi separati: le tre colonne e i gioghi superiore e inferiore. Tuttavia questa configurazione non garantisce un comportamento ottimale del nucleo magnetico, in quanto i numerosi traferri che il flusso si trova a dover attraversare causano un aumento della riluttanza del nucleo magnetico, con conseguente incremento della corrente a vuoto del trasformatore.

La *Figura 5* mostra le varie parti di cui è costituito un nucleo tradizionale a tre colonne ed evidenzia i diversi traferri che il flusso è costretto ad attraversare.

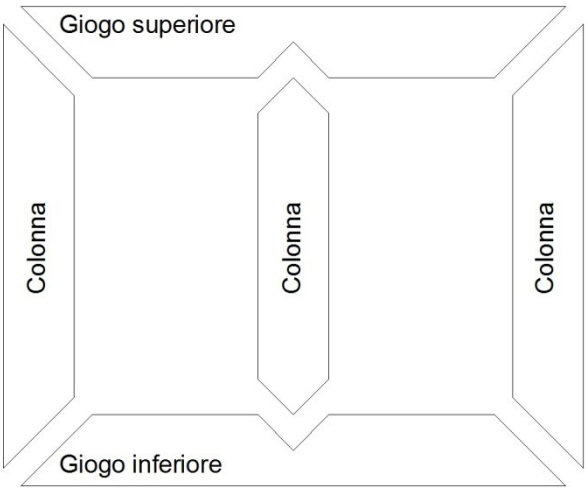


Figura 5 – Traferri nel nucleo tradizionale a lamierini impilati

La ragione che ha portato fino ad oggi ad utilizzare tale tecnologia costruttiva è data dal fatto che questa soluzione rende più facile il montaggio degli avvolgimenti sulla macchina, che viene realizzato togliendo il giogo superiore e calando dall'alto le tre bobine, come si può notare dalla *Figura 6* a fianco.

Figura 6 – Montaggio di bobina a sezione ovale sulla colonna centrale del trasformatore

Il nucleo avvolto permette di ridurre notevolmente i tagli dei lamierini. La *Figura 7* mostra una foto di esempio, con dettaglio costruttivo.

Figura 7 – Esempio di un elemento del nucleo avvolto

Se andiamo a considerare il singolo lamierino che compone il nucleo avvolto (*Figura 8*) e lo confrontiamo con il nucleo tradizionale, si può notare che il numero di traferri viene considerevolmente ridotto, con conseguente riduzione della riluttanza complessiva del circuito magnetico. Nel disegno il traferro è volutamente esagerato per rendere più chiara la conformazione del lamierino.

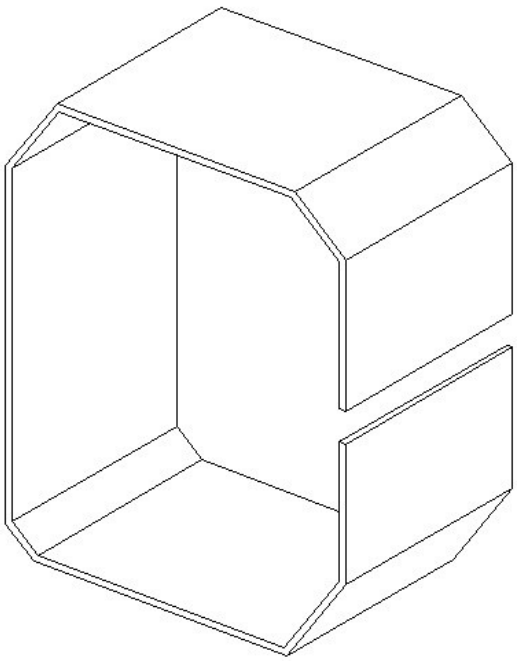


Figura 8 – Disegno singolo lamierino della tipologia vista in Figura 7

Con riferimento alla *Figura 7,* si può osservare la particolare tecnologia con cui viene realizzato. Le varie parti che costituiscono il nucleo vengono assemblate secondo una particolare struttura a traferri distribuiti (distributed gap o step-lap): set di lamierini vengono ripetuti ciclicamente a formare il nucleo. Ciascun set di lamierini forma un gradino (step). La *Figura 9* mostra schematicamente tale tipologia di assemblaggio.

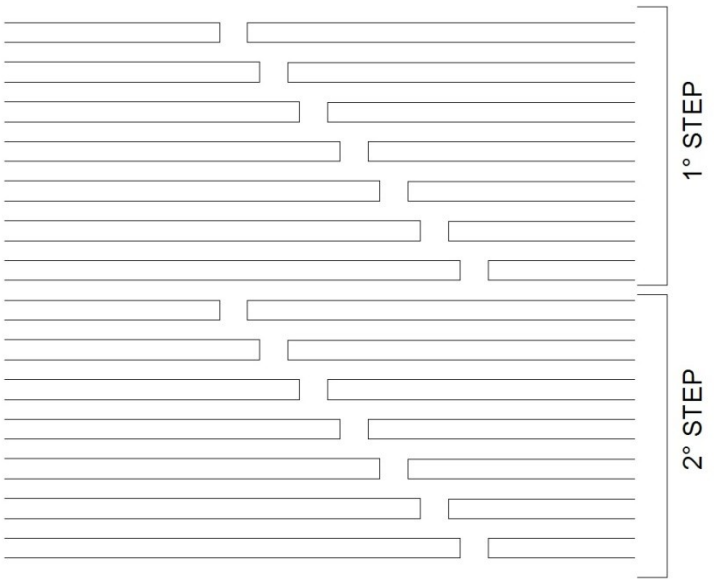


Figura 9 – Disegno schematico dell'assemblaggio step-lap. Nell'esempio ogni step è formato da 7 gradini

Questa struttura a traferri distribuiti, come si può osservare nella *Figura 10*, garantisce una maggiore omogeneità del circuito magnetico: il flusso si trova ad avere un numero maggiore di percorsi in ferro da poter attraversare nel passaggio da un lamierino all'altro, in corrispondenza delle giunzioni. Pertanto non ha la necessità di attraversare i traferri.

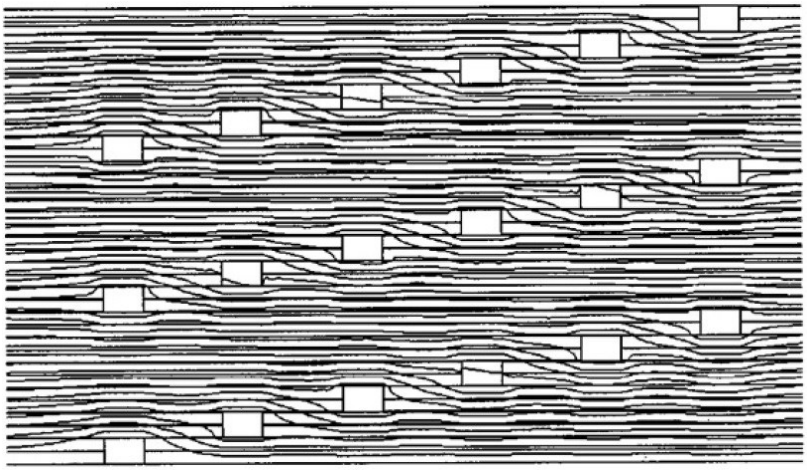


Figura 10 – Flusso nel nucleo assemblato step-lap

Viceversa, nel nucleo assemblato non step-lap, il flusso ha meno percorsi in ferro in cui poter fluire durante il salto da un lamierino all'altro; conseguentemente, in tali punti, si manifesta un aumento dell'induzione che può portare alla saturazione, costringendo il flusso ad attraversare il traferro per proseguire. In questo modo, il flusso vede complessivamente aumentare la riluttanza del percorso.

La *Figura 11* illustra tale fenomeno.

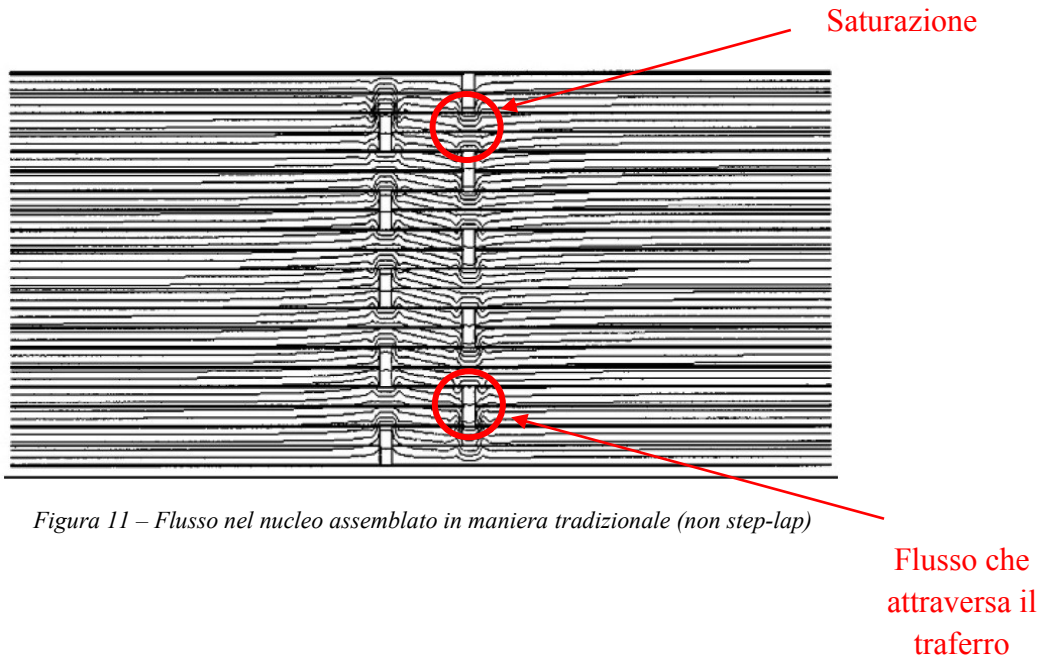


Figura 11 – Flusso nel nucleo assemblato in maniera tradizionale (non step-lap)

2. Flusso sempre nella direzione di laminazione del nucleo

Ad oggi la quasi totalità dei nuclei di trasformatori, perlomeno per quanto riguarda la fascia di potenze di nostro interesse, viene realizzata con lamierini a grano orientato. Tali lamierini sono realizzati in modo da presentare una elevata permeabilità magnetica in una direzione, che diventa la direzione preferenziale del flusso. Nei punti in cui il flusso percorre il lamierino con una direzione diversa, le caratteristiche peggiorano notevolmente. Questo fenomeno si evidenzia, per quanto riguarda i nuclei tradizionali, in corrispondenza dei giunti. Nella *Figura 12* viene rappresentato schematicamente il fenomeno: le frecce verdi rappresentano i tratti in cui il flusso percorre il lamierino nella direzione preferenziale (ovvero la direzione di laminazione del lamierino), mentre nelle zone rosse il flusso e la laminazione hanno direzioni diverse. Pertanto, nelle zone evidenziate di rosso si ha un aumento delle perdite nel ferro.

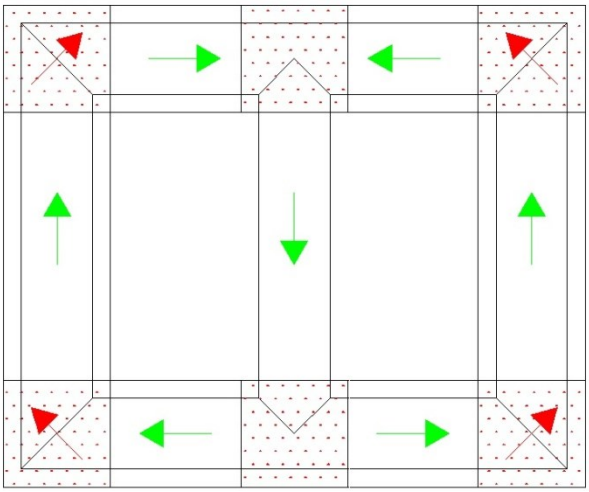


Figura 12 – Direzione del flusso nel nucleo tradizionale. In verde flusso segue direzione di laminazione del lamierino; in rosso la direzione del flusso è diversa da direzione laminazione

Viceversa, la particolare struttura a nucleo avvolto permette di avere il flusso di macchina che percorre il nucleo sempre nella direzione preferenziale di laminazione, evitando così il fenomeno sopra descritto riguardante i nuclei tradizionali. La *Figura 13* aiuta a comprendere quanto detto.

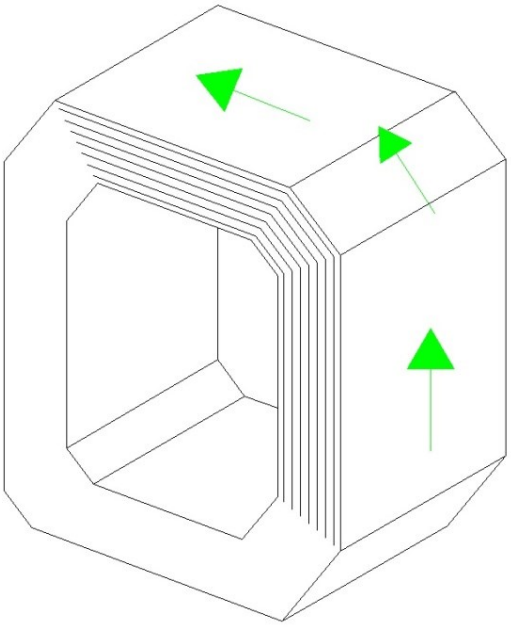


Figura 13 – Direzione del flusso nel nucleo avvolto. Direzione del flusso sempre concorde alla direzione di laminazione

3. Maggiore larghezza del lamierino

Un ulteriore vantaggio derivante dalla struttura a nucleo avvolto, è la possibilità di avere una maggiore larghezza del lamierino, come si può osservare dalla *Figura 14*.

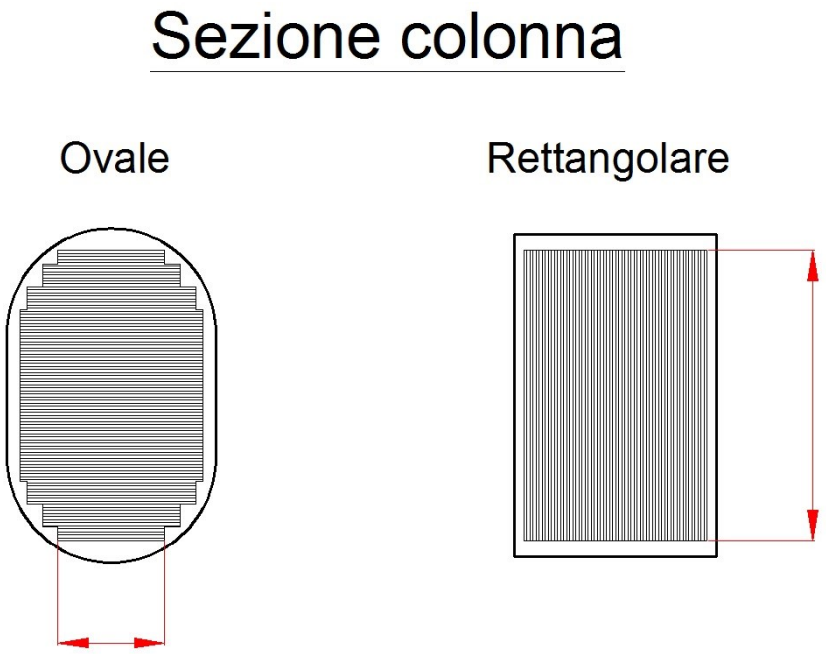


Figura 14 – A sx sezione colonna per bobina di forma interna ovale; a dx sezione colonna per bobina di forma interna rettangolare.

Come si può vedere dalla *Figura 14,* che mostra la sezione della colonna del nucleo tradizionale (per bobine di forma interna ovale) e la sezione della colonna del nucleo avvolto (per bobine di forma interna rettangolare), utilizzando quest'ultima tipologia di nucleo si riescono ad eliminare i gradini di larghezza minore, che sono quelli caratterizzati da una cifra di perdita maggiore.

L'aumento delle perdite è dovuto all' "*effetto di bordo*": in corrispondenza delle zone di taglio si ha un danneggiamento dei grani cristallini, con conseguente peggioramento della permeabilità magnetica del lamierino ed aumento delle perdite. Minore è la larghezza a cui taglio il lamierino e maggiore sarà l'incidenza di tale effetto sulle perdite dello stesso.
Nella *Figura 15* viene mostrata la struttura cristallografica a grani orientati di un acciaio da lamierino, senza il rivestimento isolante.

Figura 15 – Struttura cristallografica di acciaio da lamierini a grano orientato

Il fatto di poter tagliare il lamierino più largo, rende anche possibile l'utilizzo di lamierini magnetici ad alta permeabilità (Hi-Grade Electrical Steel), caratterizzati da una maggiore dimensione del grano. Maggiore è la dimensione del grano, superiore sarà l'effetto peggiorativo delle proprietà magnetiche dovute al taglio dei lamierini.

Nella *Figura 16* seguente, si può notare l'enorme differenza di dimensione del grano tra un lamierino a grano orientato ad alta permeabilità (HGO steel) e un lamierino a grano orientato convenzionale (CGO steel).

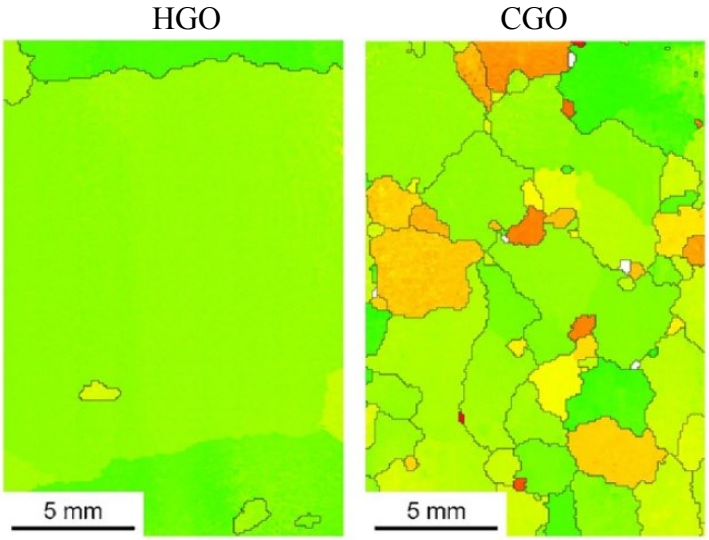


Figura 16 – Confronto tra dimensione dei grani in lamierino a grano orientato ad alta permeabilità (HGO) e un lamierino a grano orientato convenzionale (CGO).

Pertanto nei nuclei tradizionali per trasformatori di piccole potenze, la ridotta larghezza alla quale bisogna tagliare i lamierini rende pressoché inutile, se non svantaggioso, l'impiego di lamierini ad alta permeabilità.
Il nucleo avvolto, invece, permette di utilizzare un lamierino ad alta permeabilità, con la possibilità di abbattere ulteriormente le perdite a vuoto.

RICOTTURA DEL NUCLEO

I lamierini a grano orientato hanno una particolare struttura cristallina, responsabile delle basse perdite del materiale nella direzione di laminazione. Durante il processo di piegatura dei lamierini, per la realizzazione dei nuclei avvolti, la struttura cristallina del materiale viene ad essere rovinata in corrispondenza delle pieghe, con conseguente aumento delle perdite del materiale. Tale fenomeno va ad aumentare il cosiddetto "*building factor*".
Nella *Figura 17* sottostante, sono evidenziati in rosso alcuni dei punti in cui la macchina piegatrice va a curvare ciascun singolo lamierino. Questo tipo di nucleo presenta 8 punti di piegatura lungo il perimetro.

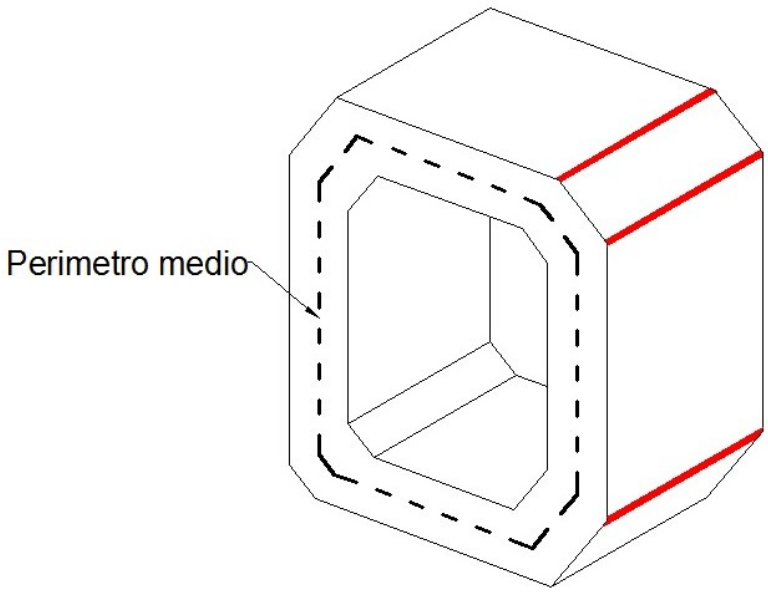


Figura 17 – In rosso alcuni dei punti di piegatura dei lamierini nel nucleo avvolto

Attraverso il processo di *ricottura*, che consiste nel portare il materiale ad una certa temperatura inferiore a quella di fusione (compresa tra i 780°C e gli 820 °C), seguito da una permanenza a tale temperatura per un determinato periodo di tempo (due ore o più) e poi da un lento raffreddamento, è possibile ridurre lo stress subìto dal materiale in corrispondenza delle piegature, portando così ad una riduzione delle perdite (ovvero ad una riduzione del "building factor").

Il trattamento di ricottura non è uno standard per quanto riguarda il nucleo avvolto, ma è un trattamento extra che va valutato per ogni singolo progetto, a seconda del livello di perdite richiesto, della taglia del nucleo e del materiale utilizzato per il lamierino.

Dalla *Figura 17*, si può osservare che al crescere della taglia, ovvero del perimetro medio del nucleo, diminuisce l'incidenza delle piegature sulle proprietà magnetiche dello stesso. Pertanto, al crescere della taglia del trasformatore, il trattamento termico di ricottura del nucleo porta benefici complessivi sempre meno tangibili.

Inoltre, vi sono alcuni materiali utilizzati per i lamierini (come per esempio quelli che hanno subito un trattamento laser) che vedrebbero aumentare la loro cifra di perdita in seguito ad un processo di ricottura. Pertanto in questi casi, tale processo, non solo non porta benefici, ma addirittura porterebbe a peggiorare le caratteristiche del nucleo ferromagnetico.

Il nucleo del trasformatore oggetto di tesi non è stato sottoposto ad un processo di ricottura, in quanto il materiale scelto per i lamierini ha subito trattamento laser e consente già di raggiungere il livello di perdite richiesto da progetto.

5. PROCESSO PRODUTTIVO CON TECNOLOGIA ATTUALE

5.1. Nucleo impilato e bobine a sezione ovale

- AVVOLGIMENTO DI BASSA TENSIONE

Come primo step si procede alla realizzazione delle bobine, in particolare dall'avvolgimento BT a lastra.
In base alla dimensione interna dell'avvolgimento calcolata con il software in fase di progettazione, si montano i tegoli adeguati sulla macchina avvolgitrice.
Si comincia ad avvolgere la lastra su un cartoccio da 1 mm di spessore, che garantirà l'isolamento tra avvolgimento e colonna del trasformatore, come si può osservare nella *Figura 18*.

Figura 18 – Inizio avvolgitura bobina BT a lastra di alluminio, con forma interna ovale

Dopodiché si prosegue l'avvolgitura con l'interposizione tra i vari strati di un foglio isolante di carta diamantata (*Figura 19*).

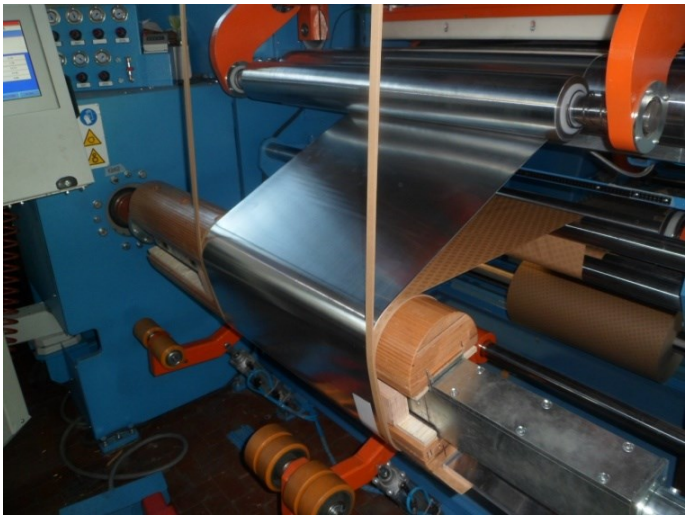


Figura 19 – Fase dell'avvolgitura bobina BT, con inserimento collarini e carta diamantata come isolante interstrato

Dalla *Figura 20* si possono notare i collarini di compensazione che vengono avvolti alle due estremità della lastra, con la doppia funzione di:

- Isolamento del conduttore BT da sopra e sotto
- Compensazione dell'altezza della bobina, per avere avvolgimento primario e secondario geometricamente alti uguali per ragioni meccaniche di montaggio.

Qualora previsti in fase di progettazione, vengono aggiunti i necessari canali di raffreddamento realizzati con stecche di legno equidistanti disposte nel tratto curvo dell'avvolgimento *(Figura 20)*. I canali di raffreddamento consentono il passaggio dell'olio, con conseguente funzione raffreddante degli avvolgimenti.

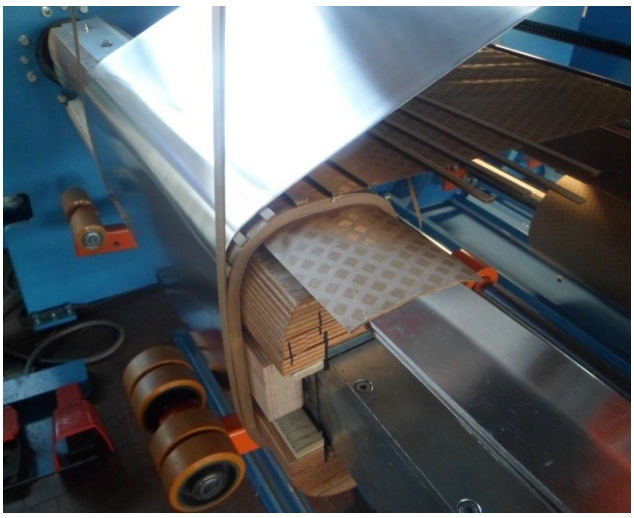


Figura 20 – Dettaglio realizzazione canale di raffreddamento sul lato corto

Completato il numero di spire dell'avvolgimento BT, si avvolgono diversi giri di carta diamantata, si procede con il montaggio della cosiddetta "tapparella", dopodiché si effettuano altrettanti giri di carta diamantata, in base al livello di isolamento da raggiungere (*Figura 21*).
La "tapparella" consiste in un foglio di carta su cui sono incollate stecche di legno, equispaziate lungo tutto il perimetro dell'avvolgimento. La funzione della tapparella, oltre a quella di consentire il passaggio dell'olio per raffreddare, è quella di contribuire all'isolamento tra avvolgimento primario e secondario.

Figura 21 – Inserimento "tapparella", ovvero canale di separazione tra BT e MT

- AVVOLGIMENTO DI MEDIA TENSIONE

Completato questo step, si sposta l'avvolgimento BT sulla macchina avvolgitrice a filo/piattina; qui avviene l'avvolgitura della bobina MT direttamente sull'avvolgimento BT. Il procedimento è del tutto simile con la differenza che, avvolgendo il filo/piattina, l'interstrato di carta isolante viene realizzato con nastrino ad avanzamento graduale e non a foglio intero come per la lastra.
Nella *Figura 22* si può vedere l'inizio dell'avvolgitura della bobina MT, realizzata con piattina isolata in carta.

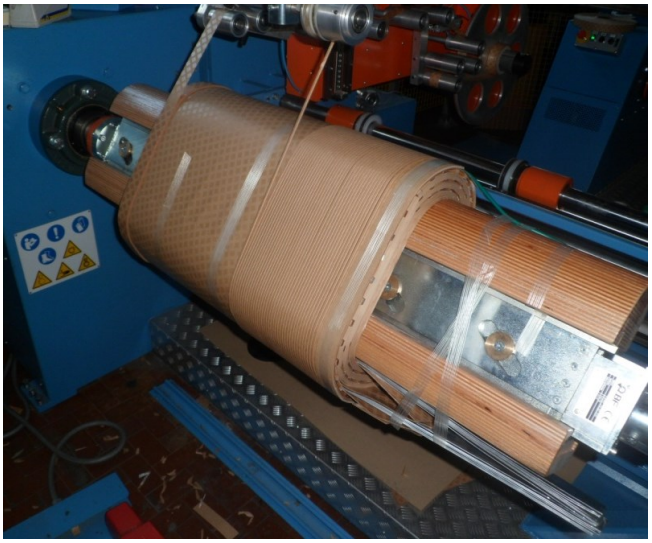


Figura 22 – Avvolgitura piattina isolata in carta per realizzazione avvolgimento MT

Molto spesso è necessario predisporre delle prese intermedie, da utilizzare come regolazione della tensione attraverso un commutatore. Per questo tipo di trasformatori da distribuzione si usa un commutatore manovrabile a vuoto. Solitamente si regola durante la fase di messa in servizio del trasformatore e non viene più azionato se non per rilevanti variazioni della tensione di rete alla quale la macchina è connessa.

Nella *Figura 23* a fianco, si può osservare un dettaglio di come viene realizzata una presa intermedia, dopo un certo numero di spire calcolato in fase di progettazione.

Figura 23 – Saldatura per realizzazione presa intermedia di regolazione

Completato anche il numero di spire dell'avvolgimento MT, si ripete lo stesso procedimento per gli avvolgimenti delle altre due fasi. Nella *Figura 24* sotto, si può vedere una bobina finita pronta per il montaggio sul nucleo. Si può notare la caratteristica sezione ovale attualmente impiegata.

Figura 24 – Bobina finita (BT + MT)

- MONTAGGIO BOBINE E NUCLEO

A questo punto si può procedere con il montaggio delle bobine sul nucleo.
Con il nucleo tradizionale, il montaggio si esegue togliendo il giogo superiore e calando le tre bobine dall'alto, come si può osservare nella *Figura 25.*

Figura 25

Si procede così al rimontaggio del giogo e quindi al serraggio delle armature.
Nella *Figura 26* seguente si può notare un dettaglio del montaggio del giogo superiore.

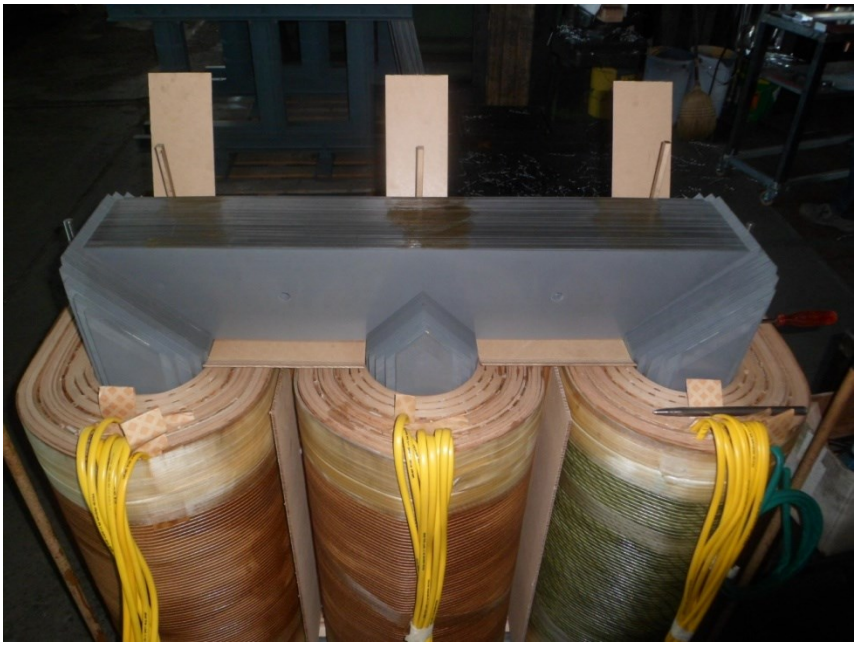


Figura 26 – Fase di montaggio giogo superiore

- MONTAGGIO COPERCHIO E REALIZZAZIONE COLLEGAMENTI ELETTRICI

Successivamente si monta il coperchio e si eseguono i collegamenti elettrici dei terminali degli avvolgimenti con gli isolatori e il commutatore.
Nella *Figura 27* si possono notare i collegamenti BT a sbarra, dove sono stato utilizzati per i terminali isolatori monoblocco in resina (tipo a barra passante).

Figura 27 – Realizzazione collegamenti BT in barra di alluminio ai terminali BT di tipo a barra passante (in questo caso)

Mentre nella *Figura 28*, si vedono i collegamenti MT per un trasformatore in cui sono stati impiegati isolatori in porcellana; si vedono anche i collegamenti con le prese del commutatore.

Figura 28 – Realizzazione collegamenti MT in filo inguainato, ai terminali MT di tipo in porcellana (in questo caso)

- TRATTAMENTO TERMICO E RIEMPIMENTO OLIO

Successivamente si passa al trattamento termico del frutto (parte del trasformatore estraibile dalla cassa) per circa 24 ore, seguito da circa 6 ore di vuoto per eliminare ogni traccia di umidità.
In *Figura 29* si può vedere l'inserimento in forno del frutto.

Figura 29 – Inserimento in forno del frutto del trasformatore

Il passaggio in forno permette il corretto trattamento della carta diamantata: si tratta di una carta in pura cellulosa, stampata a rombi con resina epossidica in stadio B. I rombi occupano circa il 30% della superficie della carta. Ad una temperatura compresa tra i 110 ÷ 130 °C la resina fluidifica e aderisce al conduttore passando irreversibilmente allo stato C. In tale stato la resina non può essere aggredita dall'olio. Le parti di carta prive di resina permettono l'evacuazione dell'umidità in fase di essicazione e, successivamente, garantiscono micro-canali per il passaggio dell'olio.
L'impiego della carta diamantata come isolante interstrato permette di conferire maggiore rigidità alla bobina e un maggiore bloccaggio delle spire, garantendo una migliore resistenza agli sforzi radiali e assiali conseguenti a forti correnti.

Nella *Figura 30* si può osservare un dettaglio della carta diamantata, con i caratteristici rombi di resina epossidica.

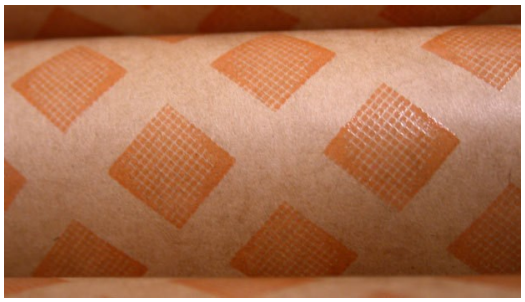


Figura 30 – Dettaglio carta diamantata usata come isolante interstrato. I rombi sono di resina epossidica.

A questo punto si prosegue con l'inserimento del frutto nella cassa e si serra il coperchio.

Come ultimo passaggio si procede con il riempimento d'olio; il riempimento avviene tramite trattamento sottovuoto e l'olio viene precedentemente riscaldato per eliminare ogni traccia di umidità.
L'olio svolge la doppia funzione di fluido isolante e di raffreddamento. Oltre al classico olio minerale largamente utilizzato, può essere richiesto:

- Olio siliconico, caratterizzato da un elevato punto di infiammabilità, richiesto per migliorare le caratteristiche nei confronti dell'incendio.
- Olio biodegradabile, di origine sintetica o vegetale, per garantire un minore impatto ambientale

A questo punto si aspetta qualche ora per far sì che la carta isolante si impregni d'olio, dopodiché il trasformatore è pronto per essere collaudato.

6. PROCESSO PRODUTTIVO CON NUOVA TECNOLOGIA

6.1. Nucleo avvolto e bobine a sezione rettangolare

- AVVOLGIMENTO DI BASSA TENSIONE

Come primo passo si procede alla realizzazione degli avvolgimenti BT a lastra.
Da progetto si può vedere come deve essere la sezione interna dell'avvolgimento (*Figura 31*). Per poter realizzare la sezione rettangolare, sono stati realizzati due tegoli in legno di dimensioni 100x15 mm, da montare sulla macchina avvolgitrice. La lunghezza 174 mm viene poi raggiunta andando a regolare l'apertura dello stampo della macchina avvolgitrice.

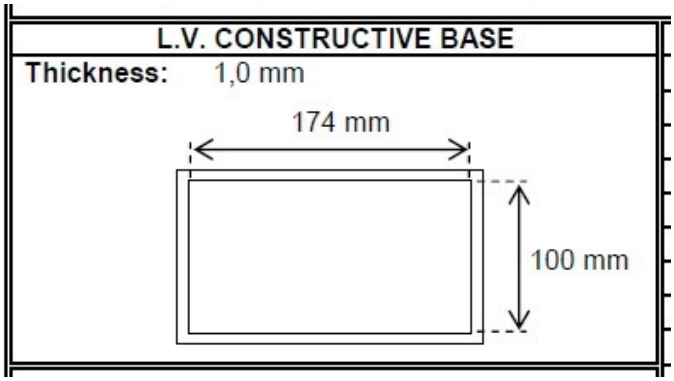


Figura 31 – Stampo interno dell'avvolgimento previsto in fase progettuale

Viene inizialmente avvolto un cartoccio di spessore 1 mm; questo è piuttosto rigido e le piegature a 90° rischiano di rovinarlo negli spigoli, pertanto viene ricoperto da 4 giri di carta diamantata, per non rischiare problemi di isolamento.

Nella foto di *Figura 32* si possono osservare i tegoli in legno, sui quali è stato avvolto il cartoccio da 1 mm di spessore, ricoperto da 4 giri di carta diamantata di spessore 0.13 mm.

Figura 32 – Montaggio tegoli sul mandrino della macchina avvolgitrice

Una volta saldata la barra di uscita dell'avvolgimento (Al 30x2 mm), si fissa la lastra di conduttore alla carta e si inizia con l'avvolgitura (*Figura 33*).

Figura 33 – Inizio avvolgimento BT in lastra di alluminio, con barra di uscita saldata sulla lastra

Il conduttore scelto per l'avvolgimento BT è una lastra di alluminio, alta 280 mm e spessa 0.4 mm. Con il conduttore a lastra si ha una spira per strato, pertanto si eseguono tanti strati quante sono le spire da progetto.
Si inseriscono i collarini (15x0.4 mm) che garantiscono l'isolamento del conduttore da sopra e sotto (rispetto al nucleo e rispetto agli strati adiacenti) e si prosegue fino al raggiungimento delle 46 spire previste da progetto. Nella *Figura 34* si può osservare un dettaglio dell'avvolgitura.

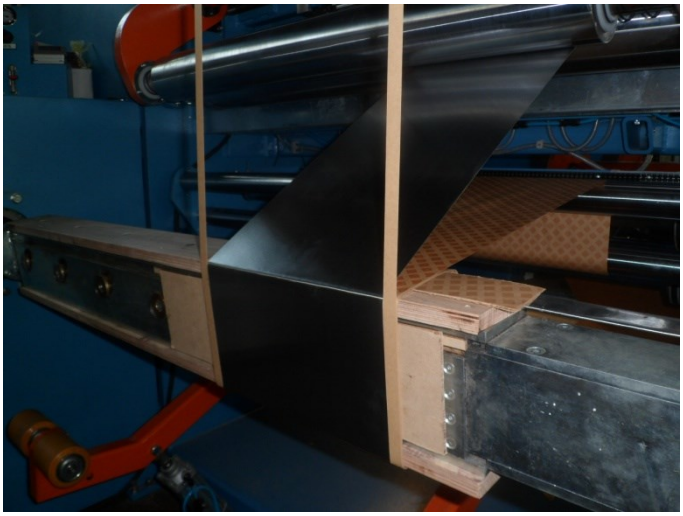


Figura 34 - Fase dell'avvolgitura bobina BT, con inserimento collarini e carta diamantata come isolante interstrato

Completato il numero di spire si procede con la realizzazione di un'intercapedine, con stecche di legno equispaziate disposte lungo tutto il perimetro dell'avvolgimento (*Figura 35*). Questa, denominata "tapparella", viene poi avvolta da un foglio di cartoccio da 1 mm (*Figura 36*) e da qualche giro di carta diamantata, necessari per raggiungere il corretto livello d'isolamento tra avvolgimento primario e secondario. Inoltre, il canale realizzato permette una corretta circolazione dell'olio tra i due avvolgimenti con funzione raffreddante, oltre che isolante.
In questo tipo di macchine, l'olio circola all'interno della macchina per solo effetto dei moti convettivi, causati dalle diverse temperature dello stesso all'interno della cassa. Durante il funzionamento l'olio lambisce le pareti della cassa, le quali scambieranno calore con l'ambiente esterno. Per macchine di piccola taglia, come in questo caso, sia la circolazione dell'olio che quella dell'aria che lambisce la cassa, avvengono in modo libero e non forzato da pompe/ventilatori. Questo tipo di raffreddamento viene indicato con la sigla ONAN (Olio Naturale Aria Naturale).

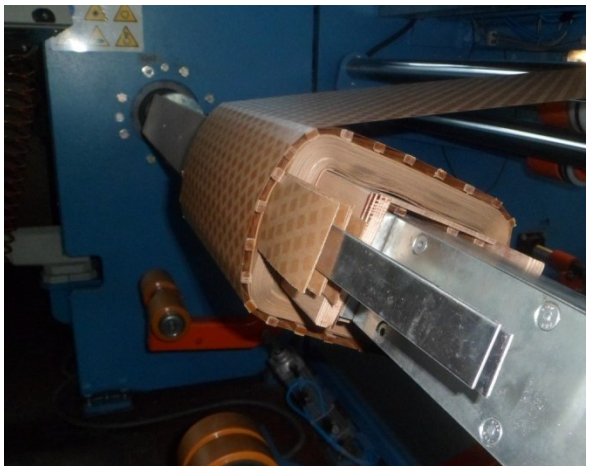


Figura 35 - Inserimento "tapparella", ovvero canale di separazione tra BT e MT

Come anticipato sopra, nella *Figura 36* si può osservare la fase di inserimento del cartoccio al di sopra del canale di raffreddamento.

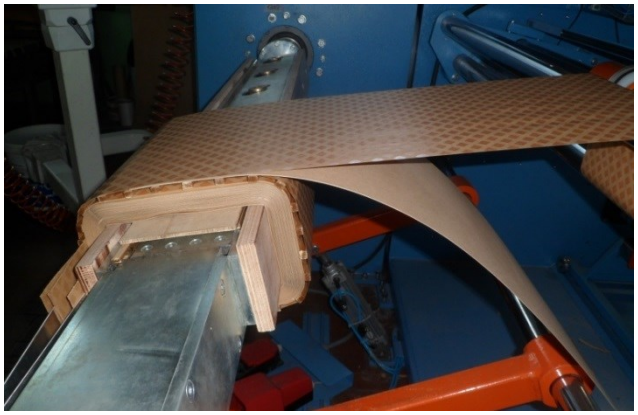


Figura 36 – Inserimento cartoccio isolante per chiusura "tapparella"

Nella *Figura 37* si può osservare come appare l'avvolgimento BT finito, tolto dalla macchina avvolgitrice.

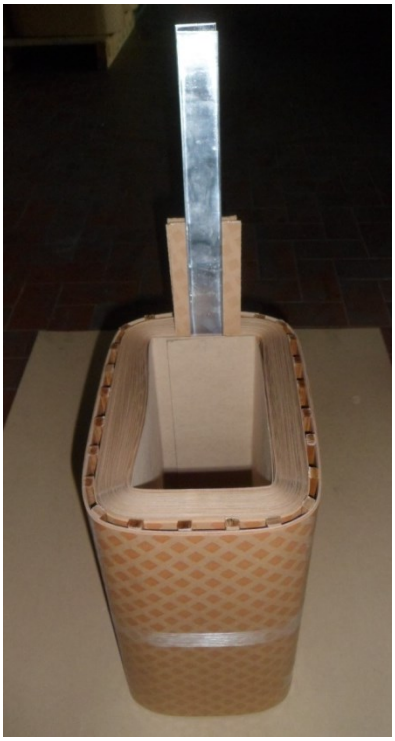


Figura 37 – Avvolgimento BT finito

Allo stesso modo si procede per le altre due bobine.
A questo punto è necessario effettuare le dovute misurazioni, per verificare che le dimensioni reali coincidano con quelle previste in fase di progetto.

Verificate le misure, si procede con il montaggio dell'avvolgimento BT sulla macchina avvolgitrice per filo/piattina e si esegue l'avvolgimento di media tensione direttamente su quello di bassa tensione.

- AVVOLGIMENTO DI MEDIA TENSIONE

Completato l'avvolgimento BT si procede con la realizzazione dell'avvolgimento MT. Con le macchine avvolgitrici a nostra disposizione, è possibile realizzare l'avvolgimento MT direttamente su quello BT, montando quest'ultimo sulla macchina che avvolge il filo. Il filo scelto in fase progettuale è un filo in alluminio smaltato di diametro 1.12 mm.

Qui l'isolante interstrato è realizzato con nastrino di carta largo 25 mm, ad avanzamento graduale: il rullo che tende il nastrino avanza gradualmente, sovrapponendo in parte il nastrino sullo strato precedente. L'isolamento interstrato viene quindi garantito da tre nastrini di carta diamantata di spessore 0.13 mm.
Nella *Figura 38* si può vedere un dettaglio del momento di avvolgitura.

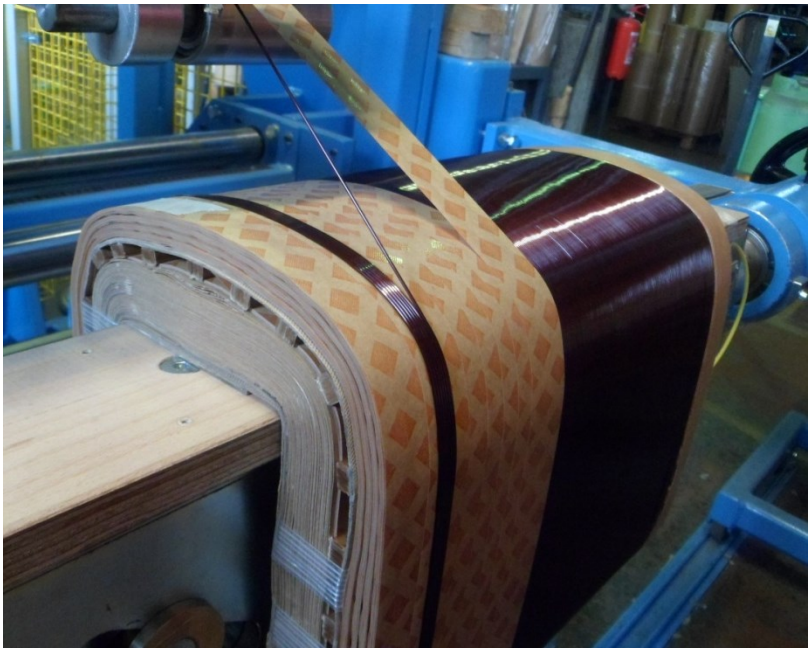


Figura 38 – Dettaglio realizzazione avvolgimento MT in filo smaltato e isolante interstrato ad avanzamento graduale.

Sull'avvolgimento MT sono previste delle prese di regolazione della tensione, da collegare al commutatore a vuoto.
In particolare è prevista una regolazione di tensione pari a 20 kV ± 2x2.5%, corrispondente ad una variazione di tensione pari a ± 2x500 V. Con una tensione ai capi di ogni spira pari a 5 V, il "gradino" tra ogni presa di regolazione è pari a 100 spire.

Avendo un numero totale di spire pari a 4184, alla spira n° 2092 (metà spire) l'avvolgimento viene separato in due parti e avremo le prese di regolazione così distribuite:

- Spira n° 1992 (-100 spire)
- Spira n° 1892 (-200 spire)
- Spira n° 2192 (+100 spire)
- Spira n° 2292 (+200 spire)

Pertanto, al corretto numero di spire calcolato in fase di progetto, bisogna prevedere le uscite del filo per realizzare i collegamenti con il commutatore. Nella *Figura 39* sottostante, si può notare un dettaglio della realizzazione di due prese di regolazione consecutive.

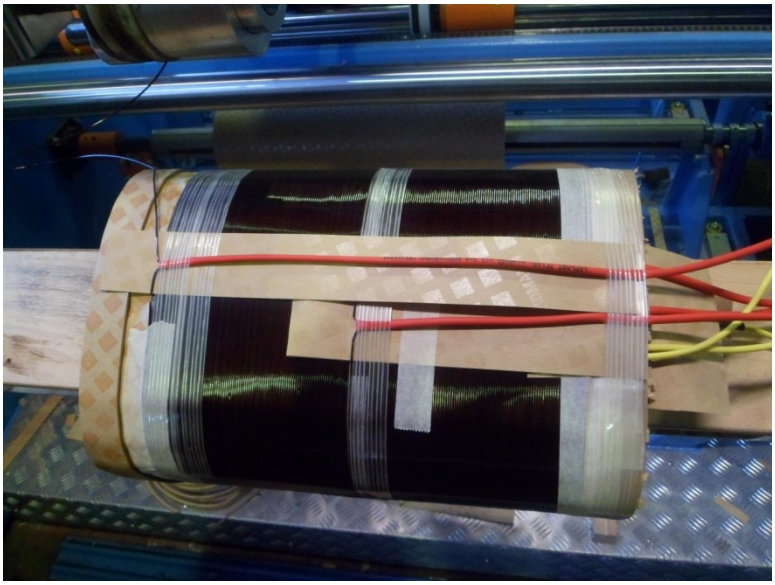


Figura 39 – Dettaglio realizzazione prese intermedie di regolazione

È prevista la realizzazione di un canale di raffreddamento nell'avvolgimento MT. Il canale viene realizzato soltanto sui lati corti della bobina (*Figura 40*). Questo perché, nelle macchine che rispondono alla normativa ECO, le perdite molto contenute permettono di ridurre le superfici di scambio termico necessarie per mantenere le temperature al di sotto dei limiti richiesti.
In questo modo si può eliminare il canale sul lato lungo delle bobine, potendo così ridurre l'interasse colonne del nucleo e avere gioghi più corti (meno materiale ferromagnetico).

Lo spessore delle stecche, quindi del canale di raffreddamento, è pari a 3 mm nel nostro caso.

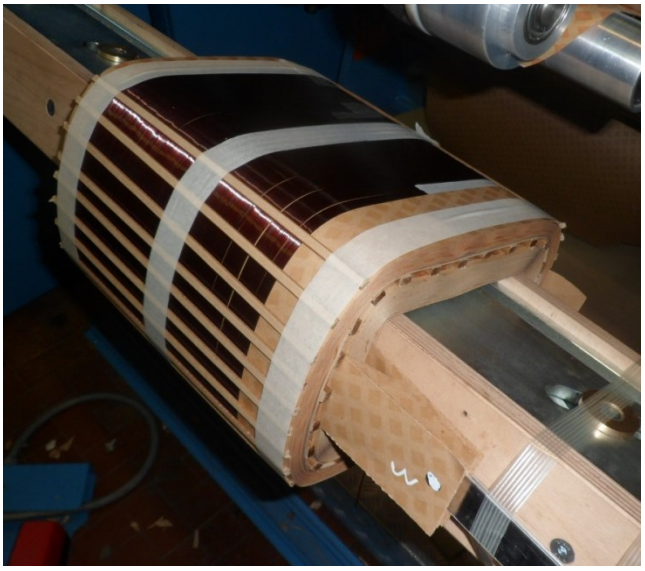


Figura 40 - Dettaglio realizzazione canale di raffreddamento sul lato corto

Raggiunto il numero totale di spire previsto da progetto, ovvero 4184, l'avvolgimento è concluso. Si completa con qualche giro di nastro di cotone per dare maggiore compattezza e robustezza all'avvolgimento nei confronti degli sforzi elettrodinamici. Nella *Figura 41* si può vedere l'avvolgimento completo, dove si può notare l'avvolgimento BT interno e l'avvolgimento MT esterno, separati dal canale realizzato con la cosiddetta "tapparella".

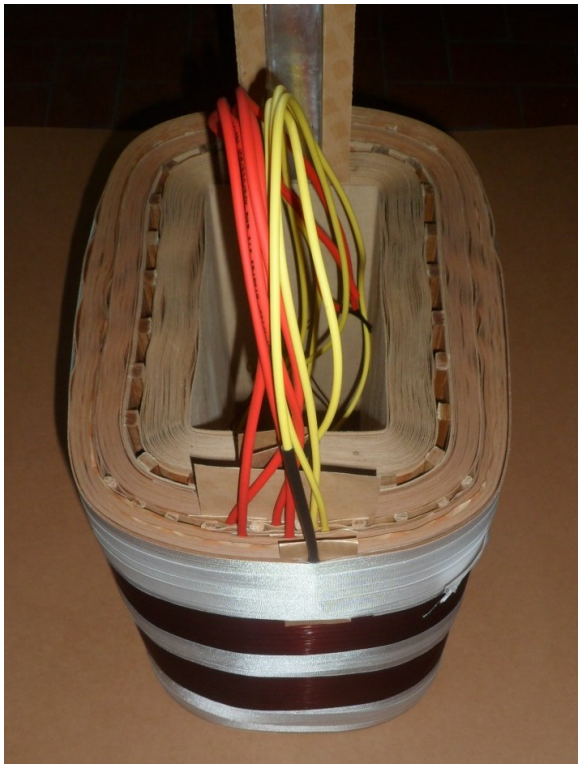


Figura 41 – Avvolgimento completo (BT+MT) visto dal lato delle connessioni MT

Nella *Figura 42* si può notare la sezione interna rettangolare, che caratterizza questo tipo di avvolgimenti.

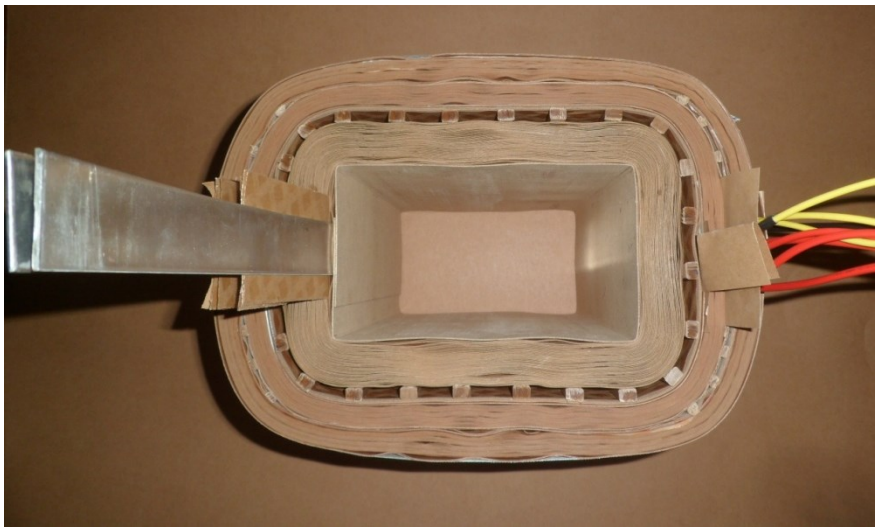


Figura 42 – Dettaglio sulla forma interna rettangolare

- MONTAGGIO DEL NUCLEO E ARMATURE

Per procedere con il montaggio di questo tipo di nucleo, si posizionano gli avvolgimenti in posizione orizzontale, alla corretta distanza l'uno dall'altro, considerando le dimensioni della finestra del nucleo, come si può vedere nella *Figura 43*. Le bobine sono state appoggiate su piedini in gomma a forma di sella, normalmente utilizzati per bloccare le ruote dei trasformatori durante il trasporto.

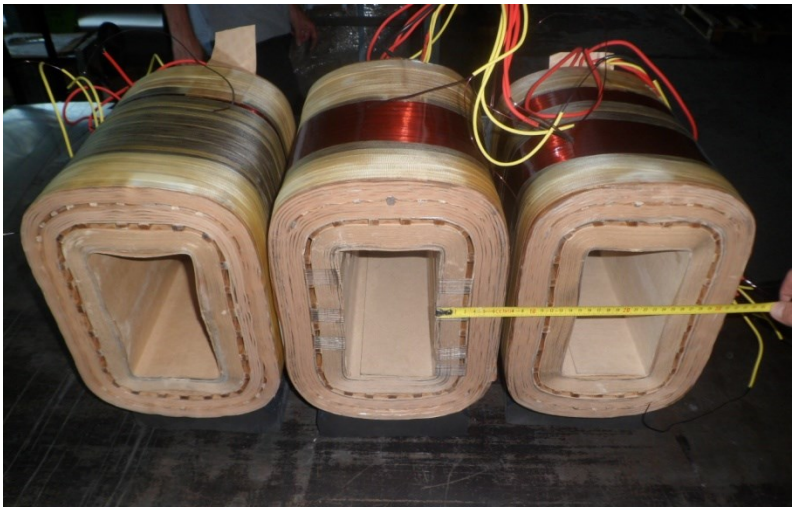


Figura 43 – Posizionamento bobine per montaggio nucleo

Si posiziona un rialzo per arrivare all'altezza dell'interno avvolgimento, in modo da avere un appoggio per il nucleo durante il montaggio. In questo caso è stato utilizzato un ferro a U, con appoggiato sopra un lamierino di scarto, per rovinare il meno possibile i lamierini del nucleo durante l'assemblamento. La *Figura 44* mostra meglio quanto detto.
Il nastro presente nella bobina centrale, messo per aiutarci nel calettamento della stessa sul mandrino della macchina avvolgitrice, è stato rimosso, in quanto così ostruirebbe il passaggio dell'olio nel canale.

Figura 44 – Realizzazione piano di appoggio per il nucleo in fase di montaggio

Nella *Figura 45* si vede il nucleo così come viene spedito, ovvero i 4 elementi vengono forniti già montati.

Figura 45 – I 4 elementi del nucleo così come ci sono stati spediti. Si possono vedere i 2 elementi interni più grandi e i 2 elementi esterni più piccoli

Per proseguire nel montaggio dello stesso sugli avvolgimenti, si procede con un elemento alla volta, partendo dai due elementi interni (più grossi) e proseguendo con i due esterni, più piccoli.

Quindi si provvede a "spacchettare" il singolo elemento, come mostrato in *Figura 46.*

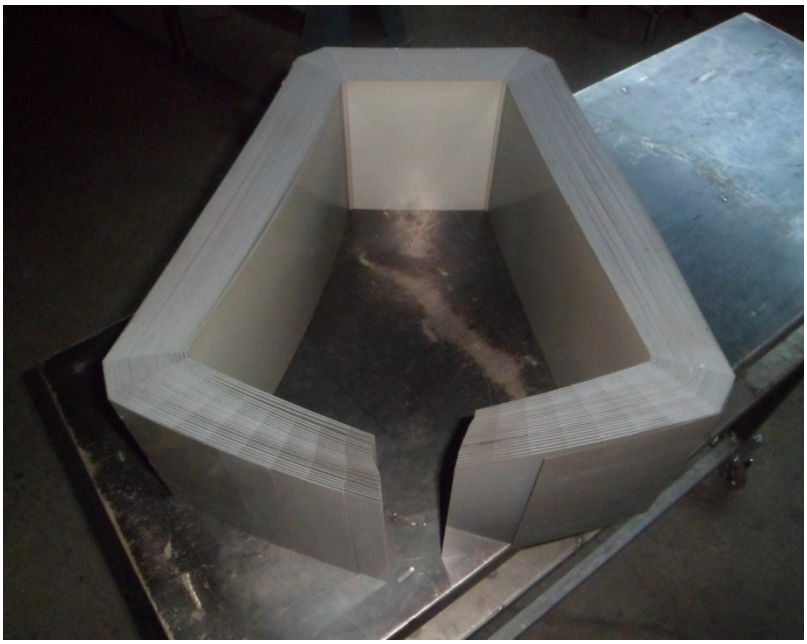


Figura 46 – Spacchettamento elemento interno del nucleo per il montaggio

Si procede prendendo uno *"step"* alla volta, partendo da quelli più interni. Ciascuno step, in questo caso, è formato da 8 gradini, come si può vedere in *Figura 47*.

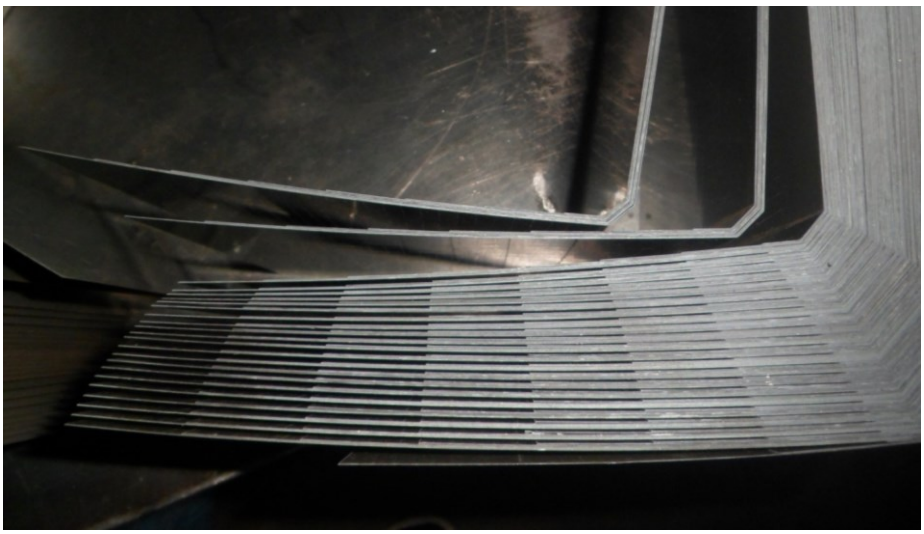


Figura 47 – Dettaglio realizzativo nucleo, con in evidenza i primi due step (interni) ciascuno formato da 8 gradini

Il primo lamierino si inserisce da solo (*Figura 48*), per poter verificare il corretto distanziamento delle bobine e per inserire più agevolmente i cartocci isolanti tra nucleo ed estremità degli avvolgimenti (si possono notare in *Figura 49*).

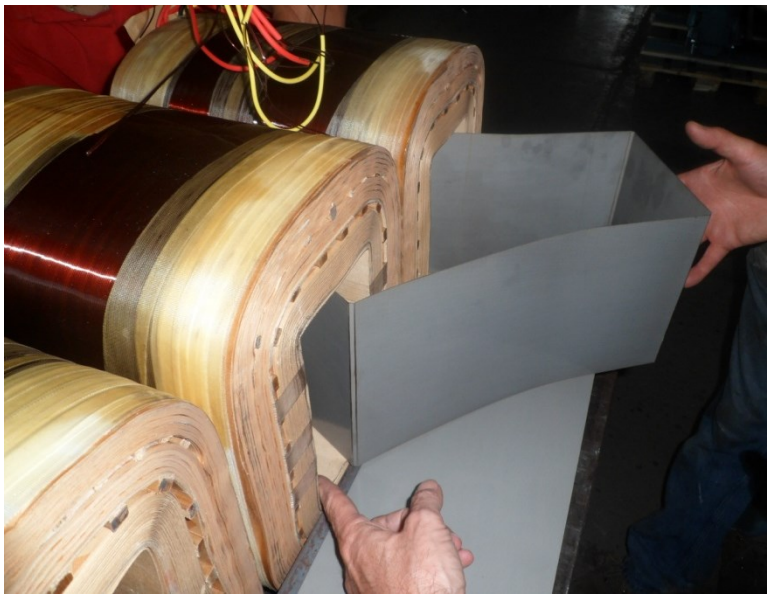


Figura 48 – Inserimento primo lamierino

Dopodiché si procede con il primo step completo. Nella *Figura 49* si può osservare in dettaglio la composizione del singolo step, con in evidenza la particolare struttura detta "*Distributed gap*".

Figura 49 – Dettaglio primo step montato. Visibile il cartoccio isolante interposto tra nucleo e bobine

Si prosegue con i successivi step di lamierini e, ogni qualvolta i traferri in corrispondenza dei tagli dei lamierini appaiono eccessivi, si provvede ad un compattamento del pacco aiutandosi con delle cinghie e battendo delicatamente con un martello di gomma (*Figura 50*).

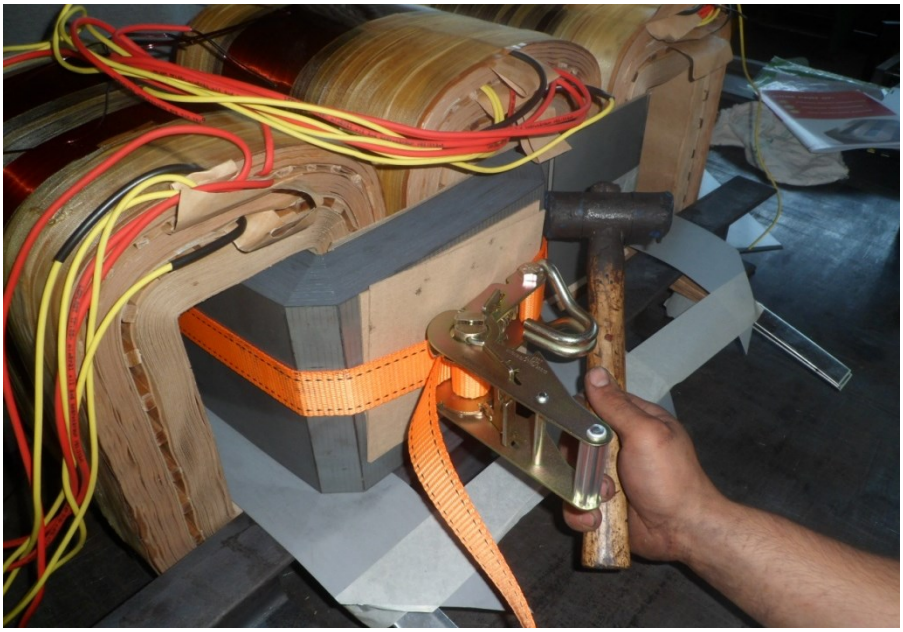


Figura 50 – Assestamento del primo elemento montato, per compattare i vari lamierini e ridurre i traferri

Completato il montaggio dei due elementi interni, analogamente si possono montare gli elementi esterni, preparandosi i cartocci isolanti provvisti di canali per separare nucleo e avvolgimenti (*Figura 51)*.

Figura 51 – Si vedono i due elementi interni montati e, in primo piano, il cartoccio con stecche incollate per realizzare il canale di separazione/raffreddamento tra nucleo e lati esterni degli avvolgimenti

Gli elementi esterni del nucleo presentano i tagli sul lato lungo, come si può notare dalla *Figura 52* seguente, ma il montaggio è del tutto analogo.

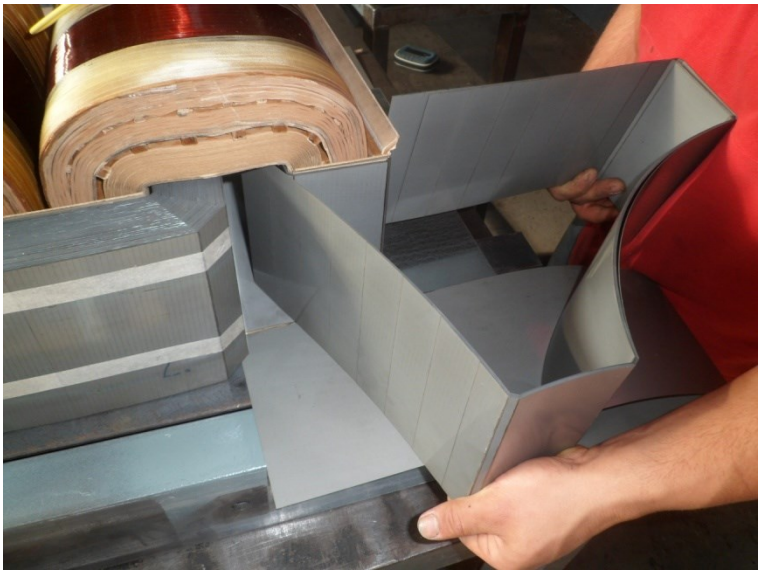


Figura 52 – Inserimento di uno step dell'elemento esterno del nucleo

Durante questa fase, essendo gli spazi disponibili sempre più stretti, ci si può aiutare con un lamierino di guida, per assicurare la corretta corrispondenza tra i diversi gradini durante l'inserimento di ciascuno step (*Figura 53*).

Figura 53 – Fase di montaggio dell'elemento esterno del nucleo, con l'aiuto di un lamierino per facilitare la chiusura dello step inserito

In linea generale, per rendere il nucleo più compatto e meno rumoroso possibile, si cercano di posizionare i tagli nel modo più strategico. Questo significa, per gli elementi interni che hanno i tagli sul lato corto, fare in modo che rimangano sul fondo del trasformatore, in modo che il peso degli avvolgimenti e del nucleo stesso tenda a schiacciarli e compattarli. Per gli elementi esterni del nucleo, dove i tagli sono sul lato lungo, si posizionano verso l'interno della finestra, dove verranno poi compattati incastrando dei cartocci (*Figura 54*).

Figura 54 – Inserimento cartoccio tra i due elementi del nucleo

Nella *Figura 55* si può osservare come appare il nucleo, una volta montati tutti e quattro gli elementi.

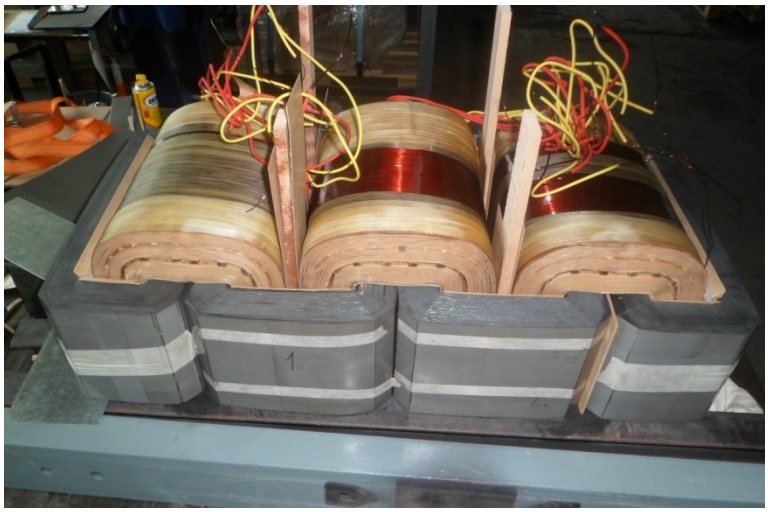


Figura 55 – Nucleo completamente assemblato

Per rendere il tutto più compatto, ciascuno dei 4 elementi del nucleo ha l'ultimo lamierino dedicato a qualche punto di saldatura (per esempio TIG).
Contestualmente, abbiamo saldato un lamierino di scarto per poter poi collegare tutti gli elementi del nucleo alle armature, quindi a terra.

Si procede quindi al montaggio delle armature (*Figura 56*), prevedendo l'interposizione di strisce di cartoccio tra nucleo e i ferri delle armature, con la duplice funzione di:

- compattare ulteriormente i lamierini del nucleo
- attutire le vibrazioni, quindi il rumore della macchina.

Figura 56 – Montaggio armature

Dalla *Figura 57* si può vedere come appaiono le armature completamente montate, in cui si notano le asole che permetteranno il collegamento con il coperchio del trasformatore.

Figura 57 - Armature completamente montate

- MONTAGGIO COPERCHIO E REALIZZAZIONE COLLEGAMENTI ELETTRICI

Lo step successivo prevede il collegamento del coperchio alle armature del trasformatore e i collegamenti elettrici.

La *Figura 58* mostra i collegamenti lato MT, in particolare:

- l'esecuzione della connessione a triangolo dell'avvolgimento
- la realizzazione dei collegamenti delle prese intermedie degli avvolgimenti al commutatore a vuoto
- la connessione con i relativi terminali, posti sugli isolatori in porcellana

Figura 58 – Realizzazione collegamenti MT in filo inguainato ai terminali e al commutatore a vuoto

Mentre in *Figura 59* si può vedere come sono stati eseguiti i collegamenti per realizzare la stella sull'avvolgimento BT e collegare i terminali ai relativi isolatori.

Figura 59 – Realizzazione collegamenti BT in barra di alluminio ai rispettivi terminali

Per verificare la corretta esecuzione dei collegamenti e degli avvolgimenti, prima di procedere con i successivi step di lavorazione, si prova il trasformatore con uno strumento chiamato rapportimetro (*Figura 60*).

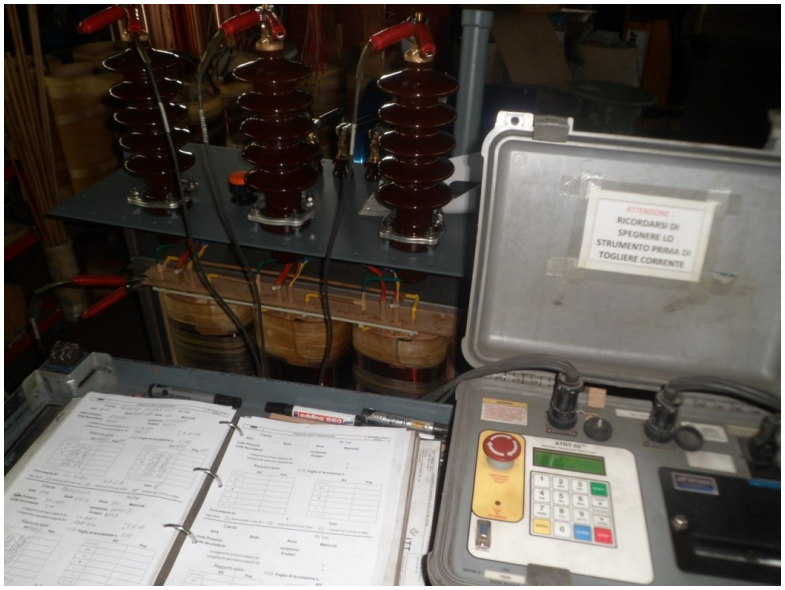


Figura 60 – Misura con il rapportimetro

Lo strumento permette di verificare il gruppo di collegamento del trasformatore (Dyn11 in questo caso) ed il rapporto di trasformazione dello stesso, per ciascuna posizione del commutatore.

- TRATTAMENTO TERMICO E RIEMPIMENTO OLIO

La parte estraibile del trasformatore (*Figura 61*) è ora pronta per il trattamento termico.

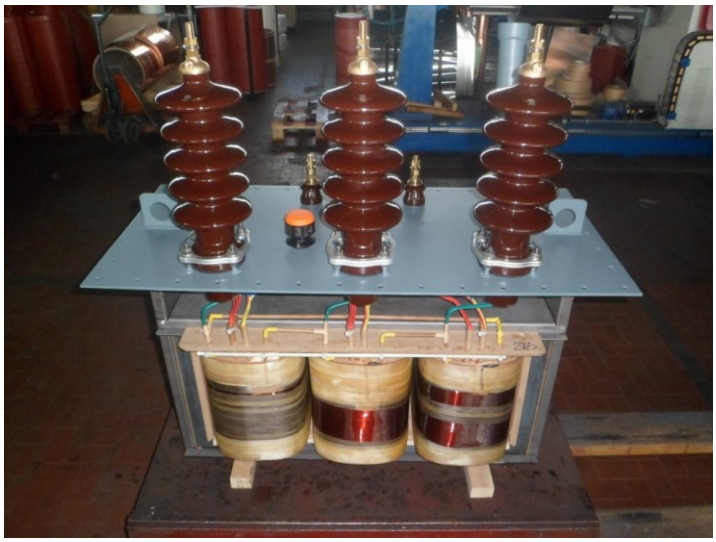


Figura 61 – Parte estraibile del trasformatore (frutto), vista dal lato terminali MT

Dopo il trattamento termico, seguito dal trattamento sottovuoto per eliminare ogni traccia di umidità, si procede con l'inserimento della parte estraibile all'interno della cassa (*Figura 62*).

Figura 62 – Inserimento frutto all'interno della cassa

Dopo aver serrato i bulloni del coperchio si procede con il riempimento dell'olio; l'olio viene portato a circa 70 °C per ridurre il contenuto di umidità ed il riempimento avviene sottovuoto, per evitare il contatto dello stesso con l'aria.

Come si può vedere dalla *Figura 63*, mentre l'olio viene mandato all'interno della cassa attraverso l'apposita valvola posta sul fondo, la pompa del vuoto aspira dall'estremità della colonnina.

Figura 63 – Fase di riempimento dell'olio. Mandata dell'olio da sotto (tubo nero) e aspirazione da sopra (tubo bianco)

Dopo aver lasciato il trasformatore a bagno d'olio per qualche giorno, si procede con il rabbocco, in quanto parte dell'olio verrà assorbito dalla carta isolante.
A questo punto il trasformatore è pronto per essere collaudato.

Nella *Figura 64* sottostante si può osservare il trasformatore completo, con la presenza di tutti gli accessori previsti.

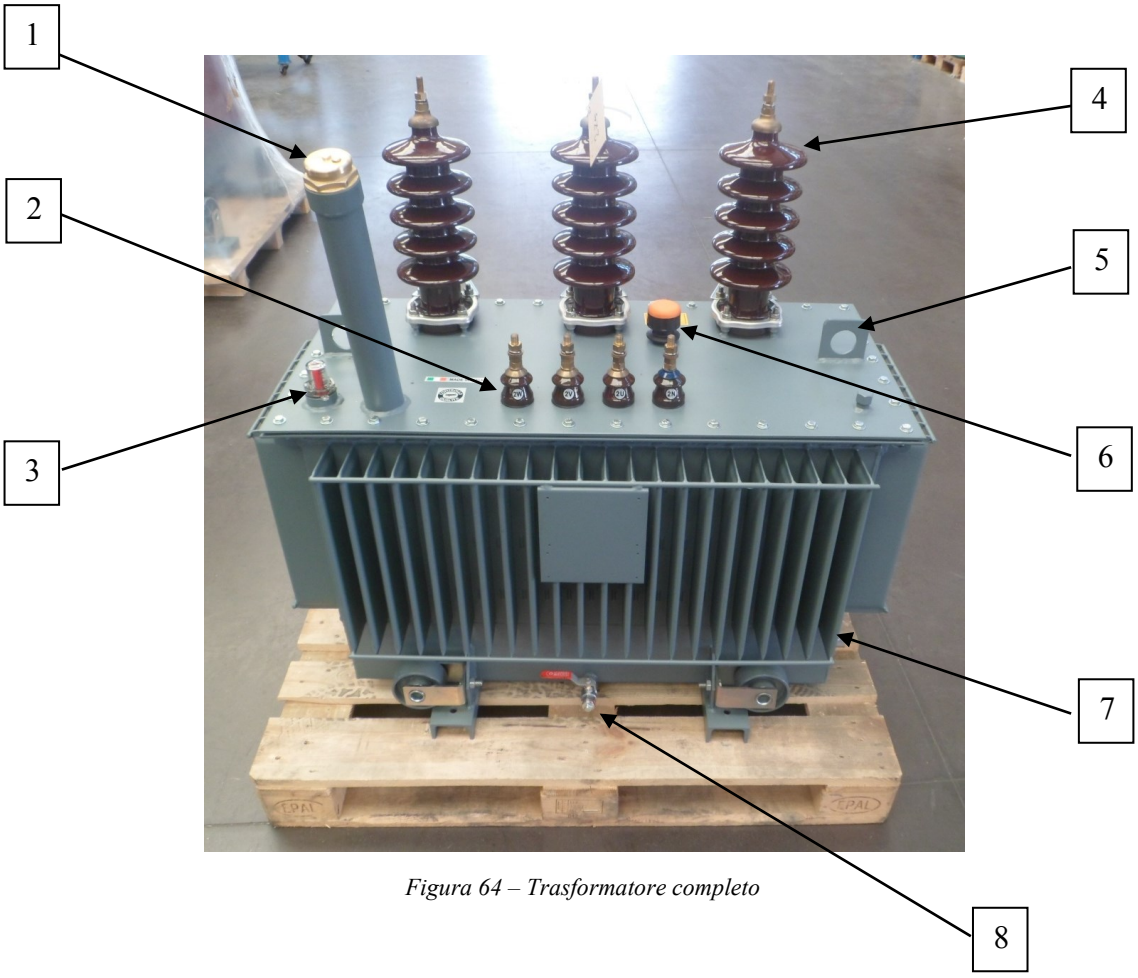


Figura 64 – Trasformatore completo

1. Valvola di sovrapressione
2. Isolatori BT
3. Indicatore livello olio
4. Isolatori MT
5. Golfare di sollevamento
6. Commutatore a vuoto
7. Morsetto di terra
8. Valvola di scarico

7. SCELTE PROGETTUALI

Alcune delle decisioni che hanno guidato le scelte progettuali, sono state dettate dalla necessità di poter realizzare un confronto tra il prototipo e un trasformatore già costruito dall'azienda secondo l'attuale tecnologia (bobine ovali e nucleo impilato), così da poter comparare i risultati delle prove.

7.1. Scelta della taglia

La scelta della taglia del trasformatore si basa sulla destinazione d'uso della macchina, quindi dai carichi che dovrà alimentare.
Per questo trasformatore, essendo un prototipo per valutare la nuova tecnologia costruttiva, si è scelta una taglia di 100 kVA, tra le più piccole prodotte dall'azienda. In questo modo, ci è stato possibile testare il nuovo processo produttivo con un trasformatore di pesi e ingombri limitati e affrontando un costo iniziale modesto.
Inoltre, è proprio sulle macchine di piccola taglia che la nuova tecnologia costruttiva risulta particolarmente vantaggiosa perché, come visto in precedenza, i nuclei di piccole dimensioni costruiti con la tecnologia tradizionale presentano un elevato "*building factor*".

7.2. Scelta delle tensioni e dei collegamenti

La scelta della tensione primaria e secondaria si basa sul fatto che si tratta di un trasformatore da distribuzione MT/BT. Un tipico utilizzo di questo trasformatore può essere quello di essere inserito in una cabina secondaria, per interconnettere la rete di distribuzione di media tensione a quella di bassa tensione.
La rete di distribuzione MT, perlomeno per quanto riguarda la situazione italiana, è trifase ed il neutro non viene distribuito; ha come valori tipici 15 kV e 20 kV. La rete BT viene distribuita a 400 V e a quattro fili (3F+N), ovvero viene distribuito anche il neutro.
Per questi motivi il trasformatore avrà tensioni 20.000/400 V ed un collegamento Dyn, ovvero primario a 20 kV connesso a triangolo e secondario a 400 V connesso a stella con neutro. L'avvolgimento MT sarà previsto di prese intermedie di regolazione della tensione (± 2x2.5%) che andranno ad essere collegate al commutatore (commutatore a vuoto).

7.3. Scelta della tensione di corto circuito

La tensione di corto circuito è correlata con l'impedenza interna del trasformatore. Tanto minore è la Vcc%, tanto minore sarà la caduta di tensione in fase di esercizio. D'altra parte però, minore è la Vcc%, maggiore sarà la corrente di corto circuito del trasformatore (*Formula 2*).

$$\frac{I_{CC}}{I_N} = \frac{100}{v_{cc}\%}$$

Formula 2

Più la Vcc% è bassa e migliore è la qualità del trasformatore. Però avendo correnti di corto circuito maggiori, bisogna installare protezioni in grado di interrompere correnti più elevate, quindi protezioni più costose.
Quello che si fa nella pratica è privilegiare la qualità del trasformatore tanto più la taglia della macchina è piccola; con l'aumentare della taglia si preferisce ridurre la corrente di corto circuito, aumentando la Vcc% di progetto.

Per il nostro trasformatore, trattandosi di una taglia piccola, si è scelta una Vcc % del 4%. Per trasformatori di distribuzione difficilmente si scende al di sotto di tale valore in quanto diminuendo la Vcc% diminuisce l'impedenza di corto circuito della macchina e, in caso di parallelo con un altro trasformatore, si rischia di avere un'impedenza equivalente di corto circuito eccessivamente bassa e correnti di circolazione elevate se le tensioni secondarie a vuoto non sono perfettamente identiche in modulo e fase.

Sulla Vcc% reale è prevista una tolleranza di ± 10% rispetto a quella progettuale.

7.4. Scelta della classe di efficienza energetica

Quando si dimensiona un trasformatore, bisogna stabilire a priori quale dovrà essere la classe di efficienza energetica della macchina. Prima dell'entrata in vigore della cosiddetta normativa ECODESIGN, la scelta era frutto di un accordo tra committente e progettista. Con l'entrata in vigore della nuova normativa, ogni trasformatore immesso sul mercato europeo deve rispettare i limiti di efficienza imposti dalle norme. Come visto in precedenza, fino alla taglia 3150 kVA compresa, la norma stabilisce un limite massimo di perdite a vuoto e in corto circuito, da non superare.

Questo trasformatore si è scelto di dimensionarlo in conformità alla Fase 1 della normativa ECODESIGN, ovvero lo si è dimensionato per i requisiti attualmente in vigore. Così facendo possiamo fare un confronto tra il nuovo trasformatore e un trasformatore di pari potenza costruito con la tecnologia attuale (cosa che non avremmo potuto fare se avessimo dimensionato il nuovo trasformatore conforme alla Fase 2 della normativa ECODESIGN).

Detto questo, i limiti imposti dalla normativa per il trasformatore in questione sono:

- $P_0 \leq 145\ W$
- $P_K \leq 1750\ W$

con una tolleranza prevista del 5% tra valori misurati e limiti normativi.

7.5. Dimensionamento degli avvolgimenti

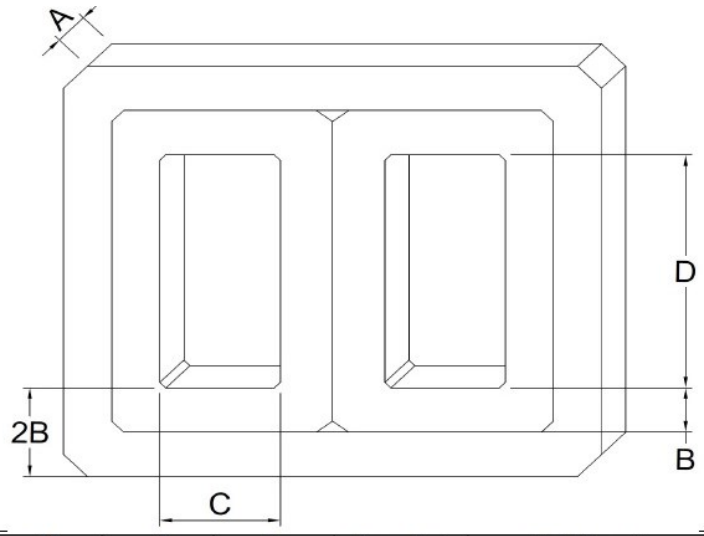
La scelta dell'alluminio come materiale conduttore è stata fatta nel contesto di avere un ridotto costo di produzione della macchina. Essendo un prototipo per valutare la nuova tecnologia costruttiva e non avendo particolari esigenze di ingombro, l'alluminio permette un notevole risparmio sulla materia prima, rispetto al rame. Questo va anche incontro all'attuale tendenza del mercato, che ha come priorità quella di affrontare il minimo esborso iniziale.
Gli avvolgimenti possono essere realizzati a filo, a piattina o a lastra. Il conduttore in alluminio può essere fatto lavorare ad una densità di corrente fino a 2 A/mm^2 (per i trasformatori in olio).
Per l'avvolgimento BT, caratterizzato da una corrente nominale di circa 144 A, è stata scelta una lastra di 280x0.4 mm, che permette di avere una sezione di 112 mm^2. Con queste scelte si fa lavorare l'avvolgimento BT ad una densità di corrente di circa 1.3 A/mm^2.

L'avvolgimento MT ha una corrente nominale di circa 1.66 A ed è stato scelto un conduttore in filo smaltato di 1.12 mm di diametro, con sezione di 0.98 mm^2. In questo modo, l'avvolgimento MT lavorerà con una densità di corrente di circa 1.7 A/mm^2.
Si può notare che entrambi gli avvolgimenti lavorano con una densità di corrente inferiore al valore teorico massimo di 2 A/mm^2. In particolare, essendo l'avvolgimento BT interno, quindi con minor coefficiente di scambio termico, si è scelto di farlo lavorare ad una densità leggermente inferiore.

7.6. Dimensionamento del nucleo

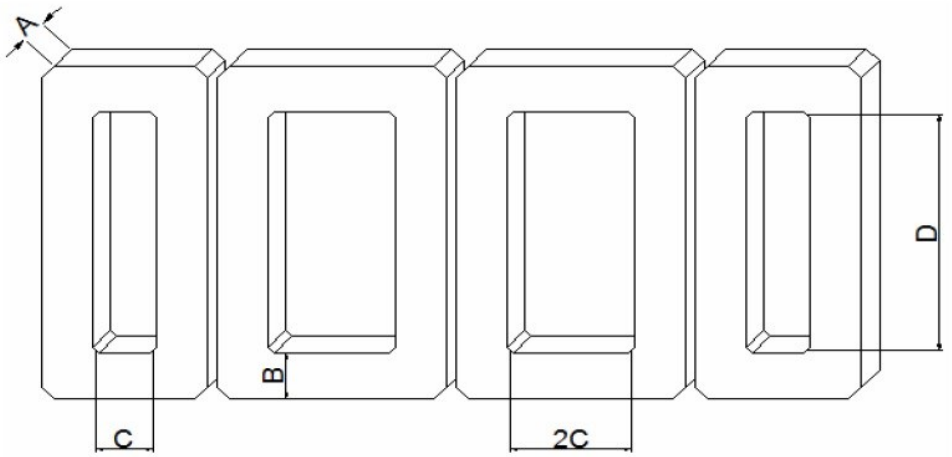
I parametri che entrano in gioco nel dimensionamento del nucleo sono: il materiale del lamierino, il valore dell'induzione di lavoro e la forma dello stesso (tre o cinque colonne).
Per consentire un confronto ragionevole tra la tecnologia costruttiva attuale e quella nuova, il materiale del nucleo magnetico avvolto è stato scelto uguale a quello utilizzato nei nuclei tradizionali; si tratta di un materiale laser, caratterizzato da uno spessore di 0,23 mm e da una cifra di perdita di 0,85 W/kg garantiti a 1,7 T di induzione.
Tipicamente l'induzione di lavoro dei nuclei dei trasformatori tradizionali si attesta tra 1.2 ÷ 1.9 T. Il valore calcolato nel nostro caso si colloca circa a metà dell'intervallo indicato.
La struttura del nucleo è stata scelta a 5 colonne. Solitamente, per i trasformatori da distribuzione, la struttura magnetica prevalente è quella a 3 colonne. Tale struttura tende a limitare il flusso omopolare che si manifesta in caso di squilibrio del carico, in quanto tale flusso è costretto a richiudersi in aria, vedendo un circuito ad alta riluttanza. Viceversa, con la struttura a 5 colonne, l'eventuale flusso omopolare può circolare nel nucleo ferromagnetico, vedendo quindi un percorso a bassa riluttanza. Il flusso omopolare potrebbe causare una dissimmetria delle tensioni.
C'è però da aggiungere che, il trasformatore in questione, come quasi tutti i trasformatori da distribuzione MT/BT, è caratterizzato da un collegamento Dyn con il neutro collegato direttamente a terra. In questo modo si ancora il potenziale del centro-stella a quello del terreno, preso come riferimento, e così facendo si rendono le tensioni di fase il più possibile costanti, nonostante la presenza di squilibri di carico.
Pertanto, con neutro collegato direttamente a terra, non si riscontrano particolari differenze di funzionamento tra il nucleo a tre colonne e quello a cinque colonne. La scelta è quindi volta a minimizzare le perdite e la corrente a vuoto, cercando di ridurre il costo complessivo della macchina.
Infatti, se facciamo una simulazione utilizzando il nucleo a tre colonne, ragionando a parità di perdite a vuoto e mantenendo inalterate le distanze di isolamento tra gli avvolgimenti e tra avvolgimento e nucleo, emerge che tale nucleo è costretto a lavorare con un'induzione inferiore del 5% rispetto al nucleo a 5 colonne e presenta, di conseguenza, un peso maggiore del 11,5 %.

Le *Figure 65 e 66* seguenti, rappresentano le differenze costruttive tra i due tipi di nuclei.



A	B	2B	C	D	Cores Dist.	Total Lenght	Total Height
170 mm	49,84 mm	99,69 mm	154, mm	320 mm	0 mm	607,07 mm	419,69 mm

Figura 65 – Misure nucleo 3 colonne



A	B	C	2C	D	Cores Dist.	Total Lenght	Total Height
170 mm	47,79 mm	77 mm	149 mm	320 mm	0 mm	834 mm	416 mm

Figura 66 – Misure nucleo a 5 colonne

Oltre alle differenze in termini di induzione di lavoro, quindi di pesi, i due nuclei presentano anche una diversa difficoltà in termini di processo di montaggio. Infatti, il nucleo a tre colonne ha l'elemento esterno di dimensioni più grandi, il quale richiede, oltre ad un maggiore tempo per il taglio, un tempo più lungo per l'assemblaggio.

8. PROVE DI COLLAUDO

Con le prove si vuole verificare la conformità delle caratteristiche del trasformatore ai dati di targa e alle specifiche dell'ordine, calcolate da progetto.

La Norma CEI 14-4 prevede la classificazione delle prove in tre categorie:

- Prove di accettazione
- Prove di tipo
- Prove speciali

Le prove di accettazione prevedono:

- Misura del rapporto di trasformazione
- Verifica del gruppo di collegamento
- Misura resistenza avvolgimenti
- Prova a vuoto
    - *verifica delle perdite a vuoto*
    - *verifica della corrente a vuoto*
- Prova in corto circuito
    - *verifica delle perdite di corto circuito alla temperatura ambiente*
    - *valore della tensione di corto circuito*
- Prova di isolamento con tensione applicata
- Prova di isolamento con tensione indotta

Le prove di tipo sono:

- Prova di riscaldamento
- Prova di impulso

Le prove speciali consistono in:

- Misura del livello di rumore
- Prova di tenuta al corto circuito
- Collaudo a 60 Hz

Le prove di tipo e le prove speciali vengono eseguite, tendenzialmente, su particolare richiesta del committente e, per la loro esecuzione, può essere necessario appoggiarsi a particolari enti esterni all'azienda.
Noi ci occuperemo soltanto delle prove di accettazione, in quanto l'aspetto che vogliamo approfondire maggiormente in questo contesto, è quello relativo all'efficienza energetica della macchina. Le prove sono condotte interamente presso la sala prove dell'azienda.
Le prove eseguite secondo le norme CEI IEC 60076-1/12 e CEI EN 50588-1.

8.1. Misura del rapporto di trasformazione e verifica del gruppo di collegamento

Con questa prova si vuole verificare la conformità del collegamento del trasformatore e del rapporto di trasformazione rispetto ai valori garantiti.
Questa prova si esegue con l'utilizzo di un rapportimetro su ogni presa dell'avvolgimento, alimentando il trasformatore a 220 V, lato MT.
Questa prova serve anche come test preliminare per verificare la corretta realizzazione degli avvolgimenti e il corretto collegamento elettrico. Viene condotta sul frutto del trasformatore (parte estraibile dalla cassa) prima del trattamento in forno.

8.2. Misura resistenza avvolgimenti

Tale prova serve per poter valutare le perdite a carico, la tensione di corto circuito e le sovratemperature medie degli avvolgimenti.
La prova va eseguita su macchina diseccitata da almeno tre ore; in questo modo, si può assumere che la temperatura dell'olio sia uguale a quella degli avvolgimenti, quindi alla temperatura ambiente.
Si può utilizzare un metodo Volt-Amperometrico, alimentando ciascuna coppia di terminali con una tensione continua e valutando l'assorbimento di corrente.
Di conseguenza $R_{avv} = V_{prova}/I_{prova}$. La corrente di prova non deve superare il 10% della corrente nominale di avvolgimento, in modo che il riscaldamento non alteri la temperatura di prova.
Di seguito viene riportato lo schema di misura (*Figura 67*).

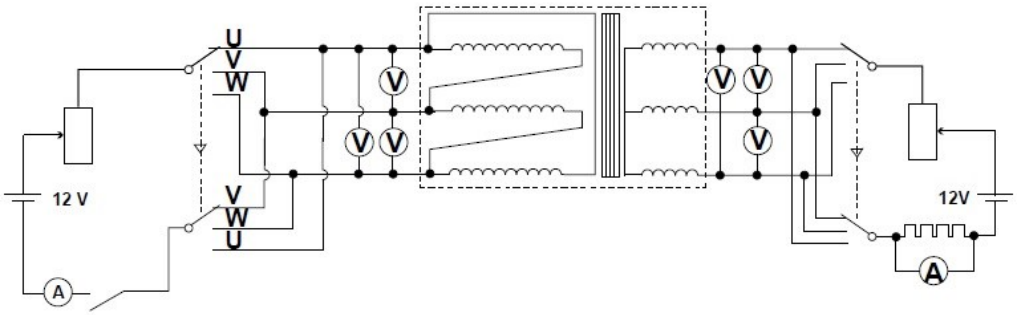


Figura 67 – Schema elettrico misura resistenza avvolgimenti

Bisogna tenere presente che i valori di resistenza letti sugli strumenti corrispondono a:

- R = 2r , per l'avvolgimento collegato a stella
- R = 2/3r , per l'avvolgimento collegato a triangolo

Trattandosi di valori calcolati in corrente continua, vanno maggiorati della componente addizionale, che tiene conto del fatto che i conduttori sono immersi in un campo magnetico variabile nel tempo e diventano sede di correnti parassite. Tali correnti si oppongono alla corrente di carico, alterandone la distribuzione nel tempo e nello spazio e provocando perdite Joule addizionali.
Infine sia la R_{DC} che la R_{add} vanno riportate alla temperatura convenzionale di 75°C (per trasformatori in olio). A questo punto si ha la R_{AC} per valutare quanto necessario.

8.3. Prova a vuoto

Questa prova è necessaria per identificare le perdite del trasformatore nel funzionamento a vuoto e la corrente assorbita al primario. Si alimenta un avvolgimento della macchina e si lasciano aperti i morsetti dell'altro avvolgimento. Si può ritenere praticamente indifferente, a fini dei risultati, alimentare l'avvolgimento BT oppure l'avvolgimento MT.
Solitamente si alimenta l'avvolgimento BT, come si può vedere nello schema di collegamento della *Figura 68.*

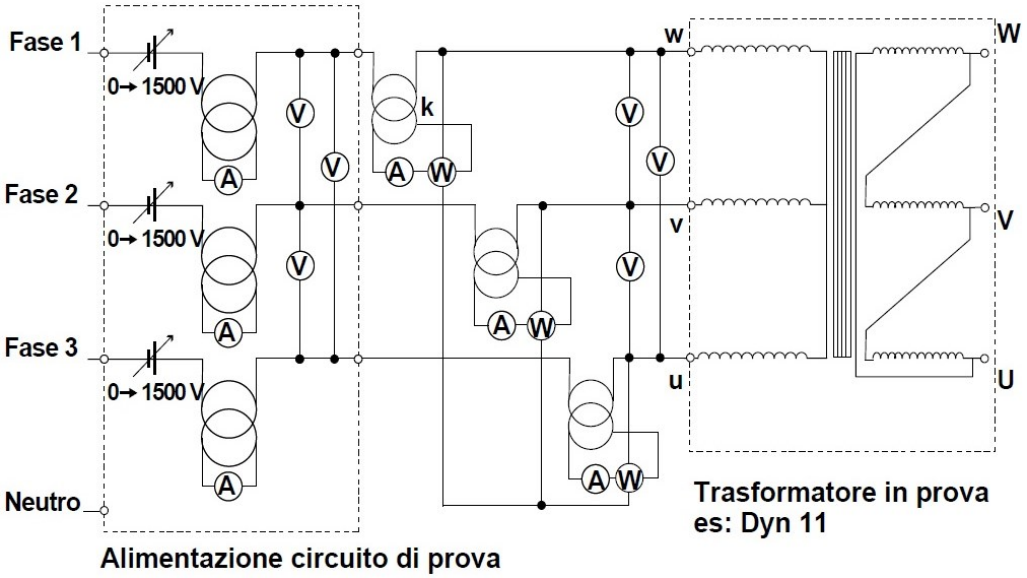


Figura 68 – Schema elettrico prova a vuoto

Viene misurata la corrente a vuoto di ogni fase e la media delle letture dei tre amperometri viene assunta come corrente a vuoto. Le perdite a vuoto si ottengono come somma delle letture dei tre wattmetri, con le eventuali correzioni, come si può vedere dalla formula seguente:

$$P_{0\,tot} = [(\Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3)\ x\ C_{te}] - K$$

Dove:

C_{te} tiene conto della portata degli strumenti e di eventuali riduttori di corrente
K tiene conto dell'assorbimento degli strumenti di misura

8.4. Prova in corto circuito

Con questa prova si vanno a valutare le perdite dovute al carico (perdite ohmiche e addizionali) ed il valore della tensione di corto circuito.
Si chiudono in cortocircuito i morsetti di un avvolgimento e si alimenta l'altro avvolgimento (solitamente MT) con una tensione necessaria a far circolare la corrente nominale negli avvolgimenti (tensione di corto circuito).

Di seguito è riportato lo schema della prova (*Figura 69*).

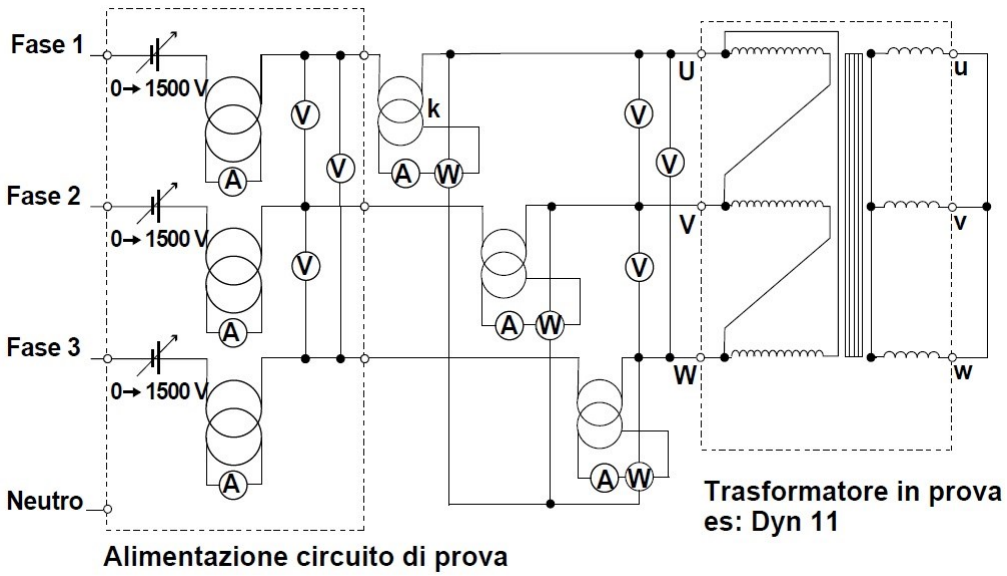


Figura 69 – Schema elettrico prova in corto circuito

Sommo le letture dei tre Wattmetri, riporto il risultato alla corrente nominale e ottengo P_{CC}. Sottraggo le perdite ohmiche totali e ottengo le addizionali. Riporto le ohmiche e le addizionali a 75 °C, le sommo e ottengo le perdite totali in corto circuito a 75°C.

Le perdite ohmiche si calcolano per l'avvolgimento MT e BT utilizzando i valori di resistenza misurati e le correnti nominali degli avvolgimenti, come riportato nella formula seguente.

$$P_{J-tot} = \frac{3}{2} R_{MT} I^2 + \frac{3}{2} R_{BT} I^2$$

Queste le sottraggo alla P_{CC}, ottenuta come somma delle letture dei tre wattmetri, e ottengo le P_{add}.

$$P_{add} = P_{cc} - P_{J-tot}$$

Ora riporto le P_{J-tot} e le P_{add} a 75° C e poi le sommo. Ottengo così le perdite totali in corto circuito a 75°C.

8.5. Prova di isolamento con tensione applicata

Questa prova ha lo scopo di verificare l'isolamento del trasformatore tra un avvolgimento e l'altro e tra ciascun avvolgimento e terra. Viene eseguita applicando una tensione monofase a 50 Hz, il cui valore dipende dalla classe di isolamento con cui è stato progettato e realizzato il trasformatore.
La classe di isolamento dipende dalla tensione nominale per cui sono dimensionati gli avvolgimenti (si sceglie il valore immediatamente superiore alla tensione nominale).
La tensione di prova è scelta in base alla classe di isolamento, come possiamo vedere da un estratto della norma CEI 14-4, riportato nella *Tabella 8*:

Classe di isolamento (valore efficace)	**Tensione nominale di tenuta di breve durata a frequenza industriale (valore efficace)**
kV	**kV**
1,1	3
3,6	10
7,2	20
12	28
17,5	38
24	50
36	70

Tabella 8 – Classi di isolamento e relativi valori di tensione da utilizzare per la prova di isolamento a tensione applicata

La prova si esegue su ciascun avvolgimento, con i terminali degli altri avvolgimenti e le parti metalliche collegate a terra e la tensione va applicata per 60 secondi.

La prova si esegue secondo lo schema riportato in *Figura 70.*

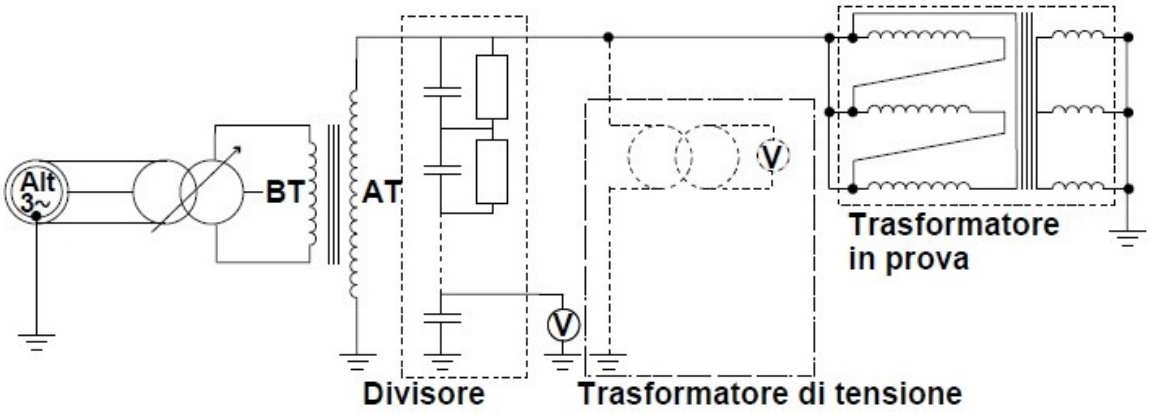


Figura 70 – Schema elettrico prova di isolamento con tensione applicata

Si ha esito favorevole se non si verifica alcun cedimento dell'isolamento durante la prova.

8.6. Prova di isolamento con tensione indotta

Con questa prova si vuole verificare l'assenza di difetti di isolamento tra le spire degli avvolgimenti o tra le fasi.
Si alimenta l'avvolgimento BT al doppio della tensione nominale, mantenendo aperti i morsetti dell'avvolgimento MT.
Per evitare la saturazione del nucleo, la frequenza di prova viene elevata. La durata della prova dipende dal valore della frequenza con cui si alimenta, secondo la relazione:

$$t = 120\ x\ \frac{frequenza\ nominale}{frequenza\ di\ prova}$$

Con l'impianto di prova aziendale a 200 Hz, la durata della prova sarà di 30 secondi.
Lo schema di prova è praticamente quello della prova a vuoto, come si può vedere dal circuito di *Figura 71*.

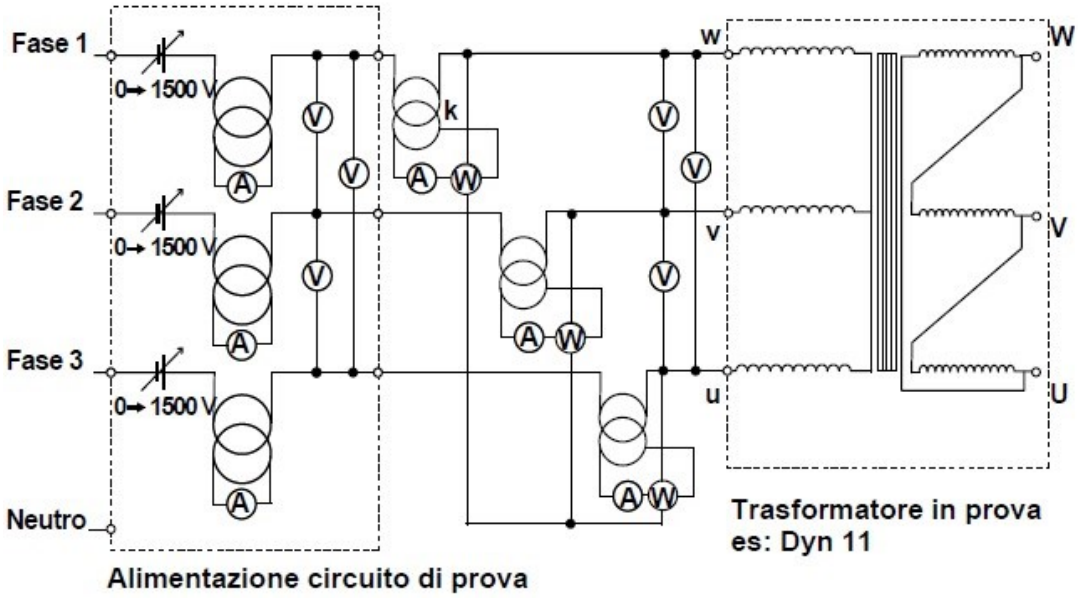


Figura 71 - Schema elettrico prova di isolamento con tensione indotta

La prova ha esito positivo se non si verifica alcuna caduta di tensione o deviazioni amperometriche.

8.7. Risultati collaudo

Dati di targa			**Fasi**	**3**	**Freq. Hz**	**50**
Potenza	100	kVA	Gruppo	Dyn11	Anno	2017
Tens.Prim.V1	20000	Volt	Regolaz.MT	± 2 x 2,5%	Prim.(A)	2,88
Tens.Sec.V2o	400	Volt	Vcc%	4,00	Sec. (A)	144

PROVE DI TENSIONE

Tensione applicata per 60 s.
Primario kV 50
Secondar.kV 3

Tensione Indotta - Hz 200 per 30 s.
tensione sul secondario
kV 0,8 / 30 s

RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE A VUOTO metodo POTENZIOMETRICO

variazione % di una posizione del commutatore 2,5

posizione	Tens.V1	Tens.V2o	Rappor.teor.	misura	misura	misura
5	21000	400	52,500	52,49	52,50	52,50
4	20500	400	51,250	51,22	51,24	51,24
3	20000	400	50,000	49,98	49,99	49,99
2	19500	400	48,750	48,72	48,73	48,73
1	19000	400	47,500	47,47	47,47	47,47

PROVA VUOTO SULLA BT

I1 (A) =	0,691	V1 (Volt) =	401	W1 (Watt)=	57,0
I2 (A) =	0,582	V2 (Volt) =	399	W2 (Watt)=	43,0
I3 (A) =	0,574	V3 (Volt) =	398	W3 (Watt)=	48,0
ka =	1	kv =	1	kw =	1
Imed.(A)=	0,616	Vmed.(Volt)=	399,3333333	Perd. Po(Watt) =	148,0

MISURA DI RESISTENZA Kt = 1,172 Temp.pozz.= 31

MT	U - V	V - W	U - W			
VOLT				K volt =	1	
AMPERE				K ampere =	0,005	
OHM	69,120	68,370	66,920	R media =	68,137	ohm
BT	u - v	v - w	u - w			
VOLT				K volt =	0,001	
AMPERE				K ampere =	0,1	
OHM	0,015790	0,015730	0,015810	R media =	0,01578	ohm

Perdite ohmiche MT (In) =	847,729	Perdite ohmiche BT (In) =	493,037
P. ohmiche totali (Watt) =	1340,767	P. ohmiche totali a 75°(Watt) =	1571,211

PROVA CORTO CIRCUITO Temperatura pozzetto °C 31 20000 400

I1 (A) =	2,880	V1 (Volt) =	810,00	W1 (Watt)=	478,0	Consumo=
I2 (A) =	2,870	V2 (Volt) =	804,00	W2 (Watt)=	455,0	(Watt)
I3 (A) =	2,900	V3 (Volt) =	808,00	W3 (Watt)=	471,0	0
ka =	1	kv =	1	kw =	1	
Imed.(A)=	2,883	Vmedio =	807,33	Pcc =	1404,0	Watt
Inom.(A)=	2,880	Vcc =	806,40	Pcc (In) =	1400,8	Watt

Rapporto	20000	400				
ZI% =	4,032	RI% =	1,401	XI% =	3,781	
ZI% 75°=	4,114	RI% 75°=	1,622	cosficc =	0,3943	
P.add. =	59,99	P.add.75°=	51,191	P.tot.75°=	1622	Watt

RIASSUNTORISULTATI	GARANZIE	TOLLERANZE		MISURE		
Perdite a vuoto (Vn) =	145	Watt	0%	Watt	**148**	2,069%
Corrente vuoto% (Vn) =	0,9	%	+30%	%	0,427	-52,607%
Perdite in C.C. a 75° =	1750	Watt	0%	Watt	**1622**	-7,291%
Tensione di C.C. a 75° =	4	%	±10%	%	4,114	2,856%
Perdite totali =	1895	Watt	0%	Watt	1770	-6,575%

9. CONFRONTO TRA LE DUE TECNOLOGIE COSTRUTTIVE

100 kVA tradizionale			100 kVA nucleo avvolto		
CARATTERISTICHE ELETTRICHE					
P_0	147	W	P_0	148	W
P_K	1655	W	P_K	1622	W
V_{CC} %	4,15	%	V_{CC} %	4,11	%
PESI MATERIE PRIME					
Peso nucleo	362	kg	Peso nucleo	245	kg
Peso conduttore BT senza isolante	26	kg	Peso conduttore BT senza isolante	28	kg
Peso conduttore MT senza isolante	44	kg	Peso conduttore MT senza isolante	30	kg
Peso alluminio tot.	70	kg	Peso alluminio tot.	58	kg
Peso olio	245	kg	Peso olio	175	kg
Peso totale	915	kg	Peso totale	635	kg
INGOMBRI CASSA					
Lunghezza	1020	mm	Lunghezza	1100	mm
Larghezza	530	mm	Larghezza	560	mm
Altezza cassa	840	mm	Altezza cassa	661	mm
INDICE SFRUTTAMENTO MATERIALI					
δ_{BT}	1	p.u.	δ_{BT}	0,85	p.u.
δ_{AT}	1	p.u.	δ_{AT}	1,25	p.u.
B	1	p.u.	B	1,33	p.u.

Tabella 9 – Confronto tra il trasformatore oggetto di tesi, con nucleo avvolto (colonna dx) e trasformatore equipollente costruito con nucleo tradizionale e bobine di forma interna ovale (colonna sx)

Nella *Tabella 9*, il trasformatore oggetto di tesi viene messo a confronto con un trasformatore di pari caratteristiche elettriche, costruito utilizzando un nucleo tradizionale con lamierini impilati.

Il confronto viene fatto sulla base di:

- peso materie prime utilizzate
- volumi d'ingombro
- indice di sfruttamento materiali

Entrambi i trasformatori rispondono alla normativa ECODESIGN attualmente in vigore (perdite e Vcc si equivalgono, a meno di piccoli scostamenti dovuti alla realizzazione pratica).

La differenza sostanziale sta nel diverso sfruttamento del nucleo ferromagnetico; se prendiamo come riferimento l'induzione di lavoro del nucleo tradizionale (pari a 1 p.u.), il nucleo avvolto viene fatto lavorare ad un'induzione maggiore del 33%.
Questo perchè il nucleo avvolto presenta un minore "*building-factor*" rispetto al nucleo tradizionale, quindi minori perdite specifiche, pertanto si riesce a rimanere nei limiti normativi imposti per le P_0, pur aumentando l'induzione di lavoro del nucleo.
Aumentare l'induzione significa:

- poter ridurre la sezione del nucleo ferromagnetico
- poter ridurre la quantità di alluminio degli avvolgimenti (a pari perdite Joule e caduta di tensione di corto circuito).

Proprio come conseguenza a questi motivi, il trasformatore con nucleo avvolto, a pari perdite rispetto al trasformatore con nucleo tradizionale, presenta un risparmio sui materiali come riassunto nella *Tabella 10* seguente:

	Peso nucleo	**Peso Alluminio**	**Peso olio**
	[kg]	**[kg]**	**[kg]**
Nucleo tradizionale	362	70	245
Nucleo avvolto	245	58	175
Delta	-32%	-17%	-29%

Tabella 10 – Risparmio materiali utilizzando trasformatore a nucleo avvolto rispetto al nucleo impilato tradizionale

Le differenze a livello di processo produttivo si riscontrano nella realizzazione degli avvolgimenti e, ovviamente, nel montaggio del nucleo.
Il processo produttivo degli avvolgimenti a sezione interna rettangolare è del tutto analogo a quello degli avvolgimenti a sezione ovale; è possibile utilizzare le stesse macchine avvolgitrici, soltanto cambiando la forma dei tegoli di legno da montare sul mandrino della macchina (si vedano la *Figura 18* di pag. 27 e la *Figura 32* di pag. 34).

Il montaggio del nucleo presenta notevoli differenze, come si può evincere dalla diversità realizzativa delle due tipologie.
Il montaggio del nucleo avvolto si è rivelato piuttosto intuitivo; le piccole difficoltà incontrate sono state inerenti ai ridotti spazi a disposizione e alla forma non perfettamente rettangolare della sezione interna di un avvolgimento. Questi problemi saranno facilmente risolvibili in futuro, acquisendo maggior consapevolezza sulle tolleranze di produzione e producendo avvolgimenti sempre più rispondenti alle dimensioni previste da progetto.

Un aspetto su cui si può riflettere e che si potrebbe presentare in futuro, riguarda lo smontaggio del nucleo per provvedere ad una eventuale riparazione/sostituzione di uno o più avvolgimenti, in seguito al guasto del trasformatore.
Verosimilmente, data l'estrema compattezza del nucleo e gli spazi ridotti tra nucleo e avvolgimenti, tale operazione sarà più difficile e lunga con il nucleo avvolto rispetto al nucleo tradizionale.

10. CONCLUSIONI

I vantaggi teorici evidenziati ad inizio della tesi, derivanti dall'utilizzo di un nucleo ferromagnetico caratterizzato da un minore building-factor e in cui il flusso magnetico scorre sempre nella direzione di laminazione dei lamierini, hanno trovato riscontro nella realizzazione pratica del trasformatore.
Ovvero, con questa tecnologia, si è riusciti a realizzare una macchina rispondente all'attuale normativa ECODESIGN, con un notevole risparmio di materia prima utilizzata.
Tutto questo perchè diventa possibile aumentare l'induzione di lavoro del nucleo ferromagnetico, il che significa un migliore sfruttamento del materiale impiegato nella costruzione.

Infatti, si può parlare di ECODESIGN, non soltanto guardando le perdite della macchina in valore assoluto, ma piuttosto ponendo l'attenzione sullo sfruttamento dei materiali.
In altre parole, è più corretto definire ECO una macchina in cui i materiali utilizzati vengono sfruttati al meglio, piuttosto che soffermarsi sui Watt di perdita.

Un corretto sfruttamento dei materiali trova riscontro in una diminuzione dei costi di produzione, come si può vedere nella *Tabella 11* seguente, facendo riferimento a prezzi attualmente in vigore.

	Peso nucleo	Costo unitario nucleo	Peso All	Costo unitario All	Peso olio	Costo unitario olio	Costo nucleo	Costo All	Costo olio	Costo TOT materiali
	[kg]	[€/kg]	[kg]	[€/kg]	[kg]	[€/kg]	[€]	[€]	[€]	[€]
Nucleo tradizionale	362	3,8	70	3,20	245	1,20	1.376	224	294	1.894
Nucleo avvolto	245	3,8	58	3,20	175	1,20	931	186	210	1.327
Delta	-32%		-17%		-29%		-32%	-17%	-29%	**-30%**

Tabella 11 – Confronto tra le due tecnologie, con particolare riferimento al risparmio economico

Complessivamente, il costo dei materiali viene abbattuto di circa il 30 %.

Questo aspetto ha sicuramente una notevole importanza dal punto di vista dell'azienda, perché permetterebbe di produrre trasformatori, rispettando l'attuale normativa, in maniera maggiormente competitiva; questo aspetto assume una rilevanza ancora superiore in vista dell'entrata in vigore della seconda fase del Regolamento UE N. 548/2014, prevista per il 1° luglio 2021.

I valori massimi di perdita previsti dalla seconda fase di regolamentazione, indicati in *Tabella 1* di pag. 8, subiranno un'ulteriore riduzione come riportato in *Tabella 12*:

Potenza nominale (kVA)	**Riduzione prevista sulle P_0 dal 2021**	**Riduzione prevista sulle P_K dal 2021**
≤ 25	-10%	-33%
50	-10%	-32%
100	-10%	-29%
160	-10%	-26%
250	-10%	-28%
315	-10%	-28%
400	-10%	-29%
500	-10%	-29%
630	-10%	-29%
800	-10%	-29%
1000	-10%	-28%
1250	-10%	-14%
1600	-10%	-14%
2000	-10%	-17%
2500	-10%	-16%
3150	-10%	-16%

Tabella 12 – Riduzione prevista sulle perdite a vuoto e a carico, dallo step 2015 allo step 2021

Con un ulteriore abbattimento delle perdite a vuoto di una percentuale pari al 10%, diventa impensabile riuscire a realizzare il trasformatore con il nucleo tradizionale, in quanto lo si dovrebbe progettare per lavorare con induzioni eccessivamente basse e ci si troverebbe con una macchina di dimensioni, pesi e costi eccessivi, che la renderebbero assolutamente NON competitiva sul mercato.
La soluzione adottata nel prototipo realizzato contestualmente a questo lavoro di tesi, ovvero il nucleo ferromagnetico avvolto, si propone come una possibile soluzione in vista dei prossimi cambiamenti normativi.

APPENDICE A - CALCOLO TENSIONE DI CORTO CIRCUITO

Di seguito vengono riportati i passaggi per il calcolo della tensione di corto circuito, conoscendo le dimensioni e la conformazione degli avvolgimenti. Tale parametro risulta il più difficile da stimare, in quanto può variare molto facilmente se le dimensioni degli avvolgimenti si discostano da quanto previsto in fase progettuale.
Si procede con il calcolo della reattanza di corto circuito, della resistenza di corto circuito e delle rispettive cadute di tensione in percentuale.

- **CALCOLO DELLA X_{CC}**

Formula appunti macchine elettriche:

$$X_{cc} = \omega \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot perimetro_{medio} \cdot \frac{1}{h_{avv}} \cdot \left(\frac{spess_{MT}}{3} + spess_{canale} + \frac{spess_{BT}}{3}\right) \cdot 10^{-10} \quad [\mathrm{m\Omega}]$$

Formula Software:

$$X_{cc} = 7.8 \cdot k_R \cdot f_n \cdot N^2 \cdot perimetro_{medio} \cdot \frac{1}{h_{avv}} \cdot \left(\frac{spess_{MT}}{3} + spess_{canale} + \frac{spess_{BT}}{3}\right) \cdot \cdot 10^{-9} \quad [\mathrm{m\Omega}]$$

In entrambe le formule è stato riportato per semplicità il perimetro medio dell'intero avvolgimento, in quanto l'aspetto su cui ci vogliamo concentrare in prima battuta è sulle differenze tra le due formule, non su come viene calcolato il perimetro medio.

Le due formule si equivalgono, a meno del fattore $\mathbf{k_R}$. Tale fattore viene indicato come coefficiente di Rogowski:

$$k_R = 1 - \frac{spess_{MT} + spess_{BT} + spess_{canale}}{\pi \cdot h_{avv}}$$

Dopodiché, calcolata la Xcc, se voglio ottenere l'induttanza di dispersione basta dividere la Xcc per la pulsazione elettrica $\omega = 2\pi f$ (frequenza nominale di 50 Hz):

$$L_{disp} = \frac{X_{CC}}{2\pi f} \quad [mH]$$

Dati:

- **N** = 46 spire (n° spire dell'avvolgimento cui si vuole riferire la Xcc, in questo caso BT)
- $\boldsymbol{h_{avv}} = \frac{h_{elt\ BT}+h_{elt\ MT}}{2} = \frac{280+260}{2} = 270\ mm$

Dalla *Figura 72* sotto, si possono ricavare:

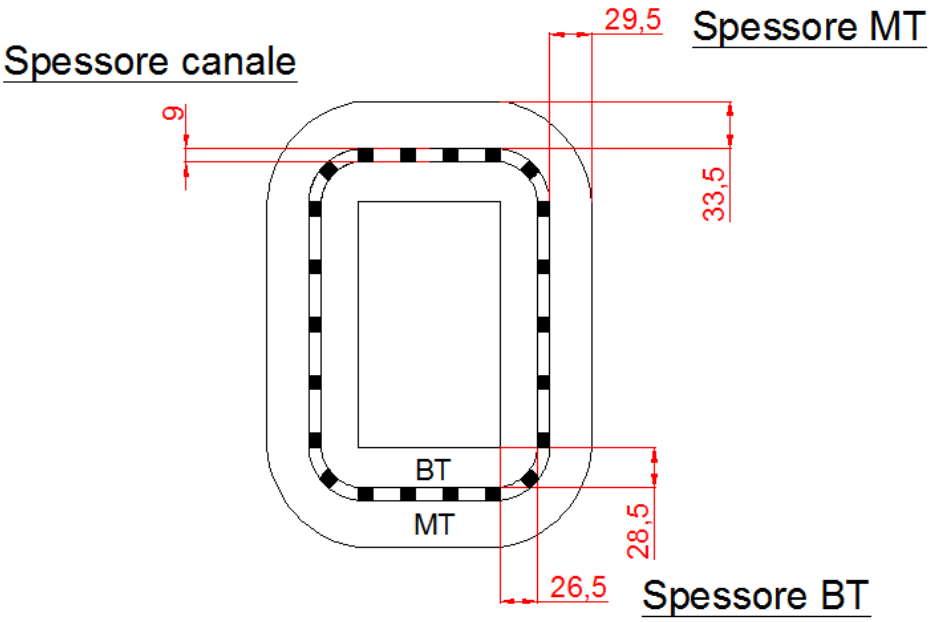


Figura 72 – Vista dall'alto dell'avvolgimento completo, con in evidenza gli spessori delle varie parti che lo costituiscono

- **Spessore avvolgimento BT** (media tra spessore avvolgimento lato lungo e spessore avvolgimento lato corto)

$$spess_{BT} = \frac{26.5 + 28.5}{2} = 27.5\ \ mm$$

- **Spessore avvolgimento MT** (media tra spessore avvolgimento lato lungo e spessore avvolgimento lato corto)

$$spess_{MT} = \frac{33.5 + 29.5}{2} = 31.5\ \ mm$$

- **Spessore canale** di separazione tra avvolgimento BT e MT**:** *9 mm*

Come ultimo dato manca da determinare il **perimetro medio dell'avvolgimento**.

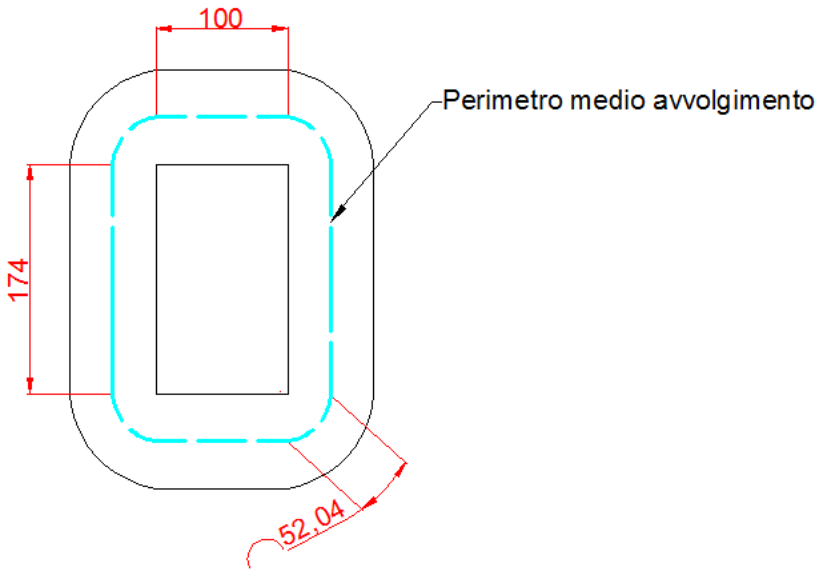


Figura 73 – Vista dall'alto avvolgimento, con in evidenza il perimetro medio

Dalla *Figura 73* sopra riportata, il perimetro medio dell'avvolgimento si può calcolare come:

$$Perimetro_{medio} = (100 \cdot 2) + (174 \cdot 2) + (52{,}04 \cdot 4) \cong 756 \ \ mm$$

Inserendo i dati nelle due formule otteniamo:

Formula appunti:

$$X_{cc} = \omega \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot perim_{medio} \cdot \frac{1}{h_{avv}} \cdot \left(\frac{spess_{MT}}{3} + spess_{canale} + \frac{spess_{BT}}{3}\right) \cdot 10^{-10} =$$
$$= 2\pi 50 \cdot 4\pi \cdot 46^2 \cdot 756 \cdot \frac{1}{270}\left(\frac{31{,}5}{3} + 9 + \frac{27.5}{3}\right) \cdot 10^{-10} = 0{,}067\ \Omega$$

Formula software (approssimando i perimetri con il perimetro medio dell'avvolgimento):

$$X'_{CC} = 7.8 \cdot k_R \cdot f_n \cdot N^2 \cdot perimetro_{medio} \cdot \frac{1}{h_{avv}} \cdot \left(\frac{spess_{MT}}{3} + spess_{canale} +\right.$$
$$\left. + \frac{spess_{BT}}{3}\right) \cdot 10^{-9} = 7{,}8 \cdot 0{,}92 \cdot 50 \cdot 46^2 \cdot 756 \cdot \frac{1}{270} \cdot \left(\frac{31{,}5}{3} + 9 + \frac{27.5}{3}\right) \cdot 10^{-9} =$$
$$= 0{,}0609\ \Omega$$

Con:

$$k_R = 1 - \frac{spess_{MT} + spess_{BT} + spess_{canale}}{\pi \cdot h_{avv}} = 1 - \frac{31{,}5 + 27.5 + 9}{\pi \cdot 270} = 0{,}92$$

La differenza tra le due formule sta proprio nel fattore di Rogowski (K_R), infatti:

$$\frac{X'_{CC}}{X_{CC}} = \frac{0{,}0609}{0{,}067} = 0{,}91$$

Utilizzando la reattanza di corto circuito calcolata con la formula del software, ci possiamo calcolare la caduta di tensione sulla parte induttiva, ovvero la $XI_{\%}$, necessaria per arrivare a calcolare la $Vcc_{\%}$. Se il numero di spire utilizzato prima è riferito alla BT, anche V_N e I_N saranno riferite all'avvolgimento BT.

Ovvero:

$$XI_{\%} = X_{CC} \cdot \frac{I_n}{V_n} = 0{,}0609 \cdot \frac{144{,}33}{230{,}94} \cdot 100 = 3{,}81\ \%$$

Utilizzando il risultato ottenuto dalle formule standard della teoria, si ottiene:

$$XI_{\%} = X_{CC} \cdot \frac{I_n}{V_n} = 0{,}067 \cdot \frac{144{,}33}{230{,}94} \cdot 100 = 4{,}19\ \%$$

- **CALCOLO DELLA R_{CC}**

La resistenza degli avvolgimenti può essere vista come la somma di due termini:

- R_{DC}, resistenza in corrente continua, calcolata da disegno della macchina
- R_{ADD}, che tiene conto del fatto che i conduttori sono investiti dal flusso disperso e diventano sede di correnti parassite che ostacolano la circolazione della corrente di linea negli avvolgimenti.

La resistenza in corrente continua si può calcolare con la formula seguente:

$$R_{DC} = \rho \cdot \frac{l}{\xi \cdot S_p \cdot b}$$

Con:

$$\xi = \frac{a}{S_p}\sqrt{\frac{n_y \cdot b}{h_{avv}}} \qquad \text{e} \qquad S_p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0}}$$

Dove:

- *a* e *b* sono rispettivamente le dimensioni perpendicolare e parallela alla direzione del flusso disperso
- *l* è la lunghezza dell'avvolgimento
- S_p è lo spessore di penetrazione
- ξ è l'altezza ridotta del conduttore
- ρ è la resistività elettrica dell'alluminio

Per il calcolo della resistenza addizionale si ricorre alla formula seguente:

$$R_{ADD} = \frac{5 \cdot n_x^2 - 1}{45} \cdot \frac{a^3}{\rho} \cdot \left(\frac{n_y}{h_{avv}} \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot f\right)^2 \cdot l \cdot b$$

Dove: *ny è* il numero di spire per strato, *nx* il numero di strati e h_{avv} è l'altezza elettrica dell'avvolgimento.

La *Figura 74* a fianco, indica come ricavare le dimensioni utilizzate nelle formule precedenti.

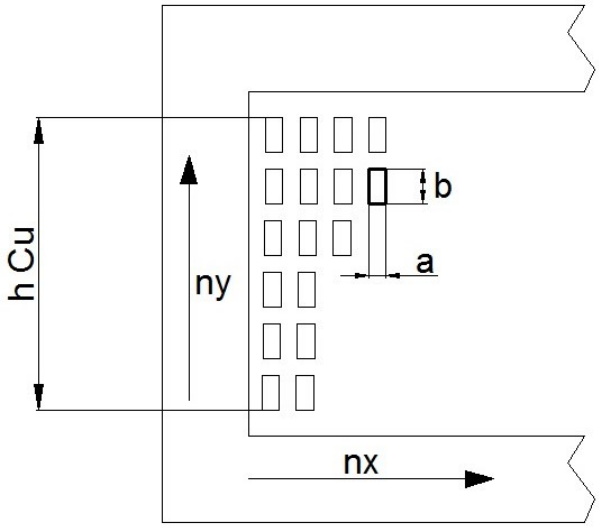


Figura 74 – Disegno schematico per capire le caratteristiche e le dimensioni dell'avvolgimento

Calcolo della resistenza dell'avvolgimento BT

Utilizzando le formule sopra riportate, calcoliamo la resistenza dell'avvolgimento BT. Tale avvolgimento è costituito da 46 spire di lastra d'alluminio di dimensioni 280x0,4 mm.
Pertanto:

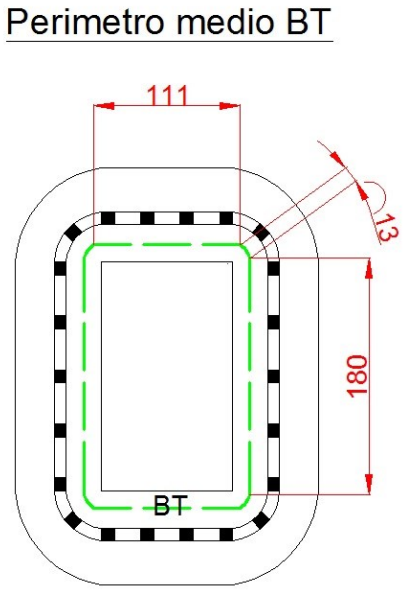
$$S_p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{2{,}75 \cdot 10^{-8}}{\pi \cdot 50 \cdot 4\pi 10^{-7}}} = 0{,}0118\, mm$$

$$\xi = \frac{a}{S_p}\sqrt{\frac{n_y \cdot b}{h_{avv}}} = \frac{0.4 \cdot 10^{-3}}{0{,}0118 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 280 \cdot 10^{-3}}{280 \cdot 10^{-3}}} = 33{,}9$$

$$R_{DC-25°C} = \rho \cdot \frac{l}{\xi \cdot S_p \cdot b} = 2{,}75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{29164 \cdot 10^{-3}}{33{,}9 \cdot 0{,}0118 \cdot 10^{-3} \cdot 280 \cdot 10^{-3}} = 7{,}16\ m\Omega$$

La resistenza va riportata alla temperatura di riferimento, che è di 75°C per i trasformatori in olio:

$$R_{DC-75°C} = R_{DC-25°C} \cdot \frac{225 + 75}{225 + 25} = 8{,}592\ m\Omega$$



Dalla *Figura 75* a fianco, possiamo ricavarci la lunghezza dell'avvolgimento come il perimetro medio dello stesso moltiplicato per il numero di spire.

Ovvero:

$$l = 46 \cdot [(4 \cdot 13) + (2 \cdot 111) + (2 \cdot 180)] =$$

$$= 29164\, mm$$

Figura 75 – Vista dall'alto dell'avvolgimento, con in evidenza il perimetro medio dell'avvolgimento BT

Calcolo R_{ADD}:

$$R_{ADD-25°C} = \frac{5 \cdot n_x^2 - 1}{45} \cdot \frac{a^3}{\rho} \cdot \left(\frac{n_y}{h_{avv}} \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot f\right)^2 \cdot l \cdot b =$$

$$= \frac{5 \cdot 46^2 - 1}{45} \cdot \frac{(0{,}4 \cdot 10^{-3})^3}{2{,}78 \cdot 10^{-8}} \cdot \left(\frac{1}{280 \cdot 10^{-3}} \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot \pi \cdot 50\right)^2 \cdot 29164 \cdot 10^{-3} \cdot 28 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0{,}0022 \ \ m\Omega$$

Riporto a 75°C, tenendo presente che la R_{ADD} diminuisce all'aumentare della temperatura:

$$R_{ADD-75°C} = R_{ADD-25°C} \cdot \frac{225 + 25}{225 + 75} = 0{,}00183 \ \ m\Omega$$

Quindi, la resistenza complessiva dell'avvolgimento BT, riportata a 75°C, risulta:

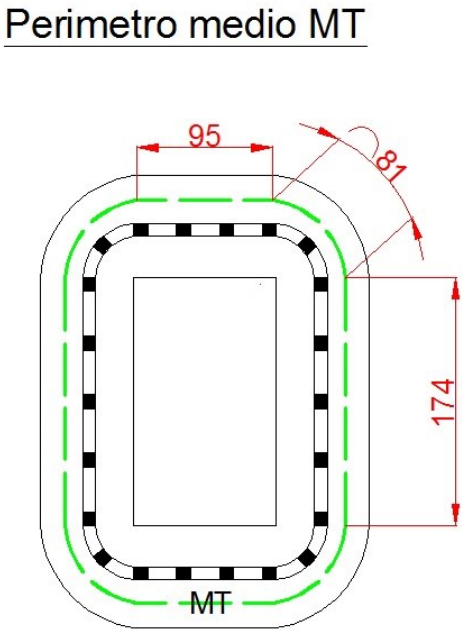
$$R_{BT-75°C} = R_{DC-75°C} + R_{ADD-75°C} = 8{,}592 + 0{,}00183 = 8{,}594 \ \ m\Omega$$

Calcolo della resistenza dell'avvolgimento MT

Calcoliamo ora la resistenza dell'avvolgimento MT, considerando che viene utilizzato un filo di sezione circolare, con diametro di 1,12 mm, per un totale di 3984 spire. Per il calcolo si può approssimare il filo come un conduttore di sezione quadrata, che abbia la stessa sezione del filo, ovvero 0,9847 mm^2 (quadrato di lato 0,9923 mm).

$$\xi = \frac{a}{S_p} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot b}{h_{avv}}} = \frac{0.9923 \cdot 10^{-3}}{0{,}0118 \cdot 10^{-3}} \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 0{,}9923 \cdot 10^{-3}}{260 \cdot 10^{-3}}} = 75{,}28$$

$$R_{DC-25°C} = \rho \cdot \frac{l}{\xi \cdot S_p \cdot b} = 2{,}75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{3434208 \cdot 10^{-3}}{75{,}28 \cdot 0{,}0118 \cdot 10^{-3} \cdot 0.9923 \cdot 10^{-3}} = \\ = 107{,}14\ \Omega$$



Dalla *Figura 76* a fianco, possiamo ricavarci la lunghezza dell'avvolgimento come il perimetro medio dello stesso moltiplicato per il numero di spire.

Ovvero:

$$l = 3984 \cdot [(4 \cdot 81) + (2 \cdot 95) + (2 \cdot 174)] \\ = 3434208\ mm$$

Figura 76 - Vista dall'alto dell'avvolgimento, con in evidenza il perimetro medio dell'avvolgimento MT

Riporto a 75°C:

$$R_{DC-75°C} = R_{DC-25°C} \cdot \frac{225 + 75}{225 + 25} = 128{,}57\ \Omega$$

Calcolo R_{ADD}:

$$R_{ADD-25°C} = \frac{5 \cdot n_x^2 - 1}{45} \cdot \frac{a^3}{\rho} \cdot \left(\frac{n_y}{h_{avv}} \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot f\right)^2 \cdot l \cdot b =$$

$$= \frac{5 \cdot 20^2 - 1}{45} \cdot \frac{(0{,}9923 \cdot 10^{-3})^3}{2{,}78 \cdot 10^{-8}} \cdot \left(\frac{210}{260 \cdot 10^{-3}} \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot \pi \cdot 50\right)^2 \cdot 3434208 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}9923 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0{,}135 \ \Omega$$

Riporto a 75°C:

$$R_{ADD-75°C} = R_{ADD-25°C} \cdot \frac{225 + 25}{225 + 75} = 0.1125 \ m\Omega$$

Quindi, la resistenza complessiva dell'avvolgimento BT, a 75°C, risulta:

$$R_{MT-75°C} = R_{DC-75°C} + R_{ADD-75°C} = 128{,}57 + 0{,}1125 = 128{,}68 \ \Omega$$

Con le R_{CC} degli avvolgimenti BT ed MT, posso calcolarmi le P_{CC} a 75°C:

$$P_{CC_BT-75°C} = 3 \cdot R_{BT-75°C} \cdot I_f^2 = 3 \cdot 8{,}594 \cdot 10^{-3} \cdot 144^2 = 534{,}6 \ W$$

$$P_{CC_MT-75°C} = 3 \cdot R_{MT-75°C} \cdot I_f^2 = 3 \cdot 128{,}68 \cdot 1{,}67^2 = 1076{,}7 \ W$$

Quindi: $P_{CC-75°C} = P_{CC_BT-75°C} + P_{CC_MT-75°C} = \mathbf{1611{,}3 \ W}$

A questo punto ci possiamo calcolare la caduta di tensione percentuale sulla R_{CC}:

$$RI_{\%} = \frac{P_{CC-75°C}}{S_N} = \frac{1611{,}3}{100 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1{,}61 \ \%$$

Il valore ottenuto dal calcolo con le formule del software è pari a 1,72%.

Ora, possiamo arrivare a calcolarci la **V_{CC} %**. Utilizzando i risultati delle formule teoriche standard:

$$V_{CC}\% = \sqrt{XI_{\%} + RI_{\%}} = \sqrt{4{,}19^2 + 1{,}61^2} = 4{,}49\ \%$$

E utilizzando i risultati delle formule del software:

$$V_{CC}\% = \sqrt{XI_{\%} + RI_{\%}} = \sqrt{3{,}81^2 + 1{,}72^2} = 4{,}18\ \%$$

Di seguito vengono riassunti in due tabelle (*Tabella 13 e 14*) i risultati dei calcoli svolti secondo le formule della teoria di macchine elettriche e svolti secondo le formule utilizzate nel software di progettazione. Tali risultati vengono confrontati con i valori provenienti dal bollettino di collaudo del trasformatore oggetto di tesi e vengono messi in evidenza gli scostamenti percentuali tra valori calcolati e misurati.

	XI%	**RI%**	**Vcc%**
Bollettino	3,78	1,622	4,114
Formule teoriche	4,19	1,61	4,49
Scostamento tra formule teoriche e bollettino	11%	-1%	**9%**

Tabella 13 – Scostamenti tra valori calcolati con formule standard e valori misurati

	XI%	**RI%**	**Vcc%**
Bollettino	3,78	1,622	4,114
Formule software	3,81	1,72	4,18
Scostamento tra formule software e bollettino	1%	6%	**2%**

Tabella 14 – Scostamenti tra valori calcolati con formule software e valori misurati

Si può osservare che le correzioni apportate nelle formule utilizzate nel software di dimensionamento, permettono di avvicinarsi molto di più ai valori di Vcc% ricavati dalle misure sul trasformatore, rispetto alle formule standard della teoria di macchine elettriche.
Le correzioni apportate alle formule standard dal progettista ed utilizzate nel software sono frutto di prove sperimentali e di esperienza pregressa.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- *http://www.wwf.it/il_pianeta/cambiamenti_climatici/*

- *COMMISSION REGULATION (EU) No 548/2014 of 21 May 2014 on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to small, medium and large power transformers*

- *Norma CEI EN 60076-1: Trasformatori di potenza. Generalità*

- *CEI EN 50464-1: Trasformatori trifase per distribuzione immersi in olio a 50 Hz, da 50 kVA a 2500 kVA con tensione massima per il componente non superiore a 36 kV. Prescrizioni generali*

- *https://ceimagazine.ceinorme.it/ceifocus/osservatorio/la-direttiva-ecodesign/*

- *http://timglobalmedia.com/events/wp-content/uploads/2014/06/006-Energy-Media-Event_Colla.pdf*

- *https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/electrical-steel/electrical-steel-grain-oriented/electrical-steel-grain-oriented.html*

- *Texture measurement of grain-oriented electrical steels after secondary recrystallization M. Frommerta, C. Zobrista, L. Lahnb, A. Bottcherb, D. Raabea, S. Zaefferera*
  Publication: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 320, Issue 20, p. e657-e660 – Year 2008 – DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.04.102

- *Power transformers energy efficiency programs: a critical review - A. Baggini, F. Bua*
  Publication: IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) – Year 2015 - DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165474

- *http://www.aemcores.com.au/*

- *Guida alle prove di collaudo trasformatori di distribuzione immersi in olio – Schneider Electric*

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il prof. Pastorelli per il supporto e la consulenza durante la stesura della tesi.

Ringrazio l'azienda "Elettromeccanica Piossasco" per aver messo a disposizione locali e risorse, al fine di realizzare questa tesi sperimentale.

Ringrazio la mia famiglia per il supporto e per avermi dato la possibilità di intraprendere e concludere questo percorso di studi.