



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

Corso di Dottorato in
Metodi, Modelli e Tecnologie per l'Ingegneria
curriculum Ingegneria Elettrica

Ciclo XXXIV

Progettazione e realizzazione di un dispositivo
per l'attuazione di emergenza durante eventi catastrofici

SSD: ING-IND/32

Coordinatore del Corso
Chiar.mo Prof. Fabrizio Marignetti

Dottorando
Paolo Conti

Supervisore
Chiar.mo Prof. Fabrizio Marignetti

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato condotto sotto la sapiente e preziosa guida del Ch.mo Prof. Fabrizio Marignetti; non meno prezioso è stato il supporto del Prof. Roberto Luigi Di Stefano e, in particolar modo, dell'ing. Guido Rubino, che ha fornito il suo notevole apporto nella realizzazione del dispositivo in questione.

Per le fasi di prototipazione, è stato determinante il contributo dell'ing. Mario Carmine Trotta, unitamente ai sig.ri Franco Ferrini e Michelangelo Bornò.

È stata altresì fondamentale la collaborazione con due Aziende, la prima è la B.C.M. Power & Tools s.a.s. di Veroli (FR), rappresentata dal sig. Claudio Quattrococchi, mentre la seconda è la Neatech s.r.l., di Cercola (NA), rappresentata dall'ing. Raffaele Grosso.

È doveroso anche, da parte mia, ringraziare quei colleghi che, più di tutti, hanno costituito un supporto morale durante tutto il corso del mio dottorato; in particolare, non posso dimenticare l'aiuto fornitomi dai colleghi ing. Daniele Marciano, ing. Yassine Boukadida, ing. Filippo Milano e, in modo speciale, dall'ing. Pasquale Damiano, Dirigente della Polizia di Stato.

Il mio grato pensiero è rivolto anche al carissimo ing. Lamberto Sordini, carissimo amico personale del mio papà Lucio, che ci guarda e ci assiste dal Cielo.

Infine, non posso non ringraziare anche tutti gli studenti della cui tesi di laurea (triennale o magistrale) ho avuto l'onore di essere co-relatore, ovvero Gianluca Vizzaccaro, Tommaso Di Zoglio, Giovanni Paone, Manuel Capaldi, Luca Coppola, Antonio Nocella, Luca Capraro, Simone Marandola, Lucia Bove, Emiliano Risi, Jason Rodi, Massimiliano Venditti, Claudia Di Mambro.

RIASSUNTO

Il presente lavoro di tesi ha come oggetto la realizzazione di un prototipo di dispositivo attuatore, il quale, in caso di emergenza, dovuta ad eventi catastrofici quali incendi, calamità e simili, è in grado di operare la movimentazione di una valvola per l'apertura o la chiusura di un circuito idraulico (ad esempio, una conduttura di gas o di acqua).

L'attenzione è focalizzata sulla macchina elettrica candidata ad operare quale attuttore per la movimentazione della valvola: viene pertanto analizzata dapprima la macchina sincrona ad autoeccitazione (SESM) e, successivamente, quella cosiddetta "claw-pole", ovvero con i poli a forma di artiglio.

E' stato studiato ed implementato il protocollo di comunicazione tra i vari dispositivi, i quali devono necessariamente operare in rete al fine di garantire il tempestivo intervento laddove si verifica l'evento emergenziale.

Sono state altresì eseguite prove acustiche in camera semi-anecoica, per valutare l'impatto ambientale sonoro di tale dispositivo.

Infine, viene descritta la realizzazione del prototipo, che adotta, quale soluzione finale per l'attuatore, un solenoide rotante; tale realizzazione viene affiancata da un'altra, che invece impiega un motore DC; entrambe le versioni sono caratterizzate dal fatto di non impiegare magneti permanenti, in quanto non sarebbero adatti (per le loro caratteristiche fisiche) ad essere installati su dispositivi attuatori da impiegarsi in casi di eventi catastrofici.

Le prove finali di collaudo, effettuate in laboratorio, completano la trattazione del dispositivo di emergenza oggetto del presente lavoro.

SOMMARIO

Ringraziamenti.....	1
RIASSUNTO	I
SOMMARIO	II
Elenco delle Figure	V
Elenco delle Tabelle.....	VII
INTRODUZIONE	1
1. I componenti principali del dispositivo attuatore	1
1.1 Sezione di attuazione	1
1.2 Sezione di controllo	3
1.3 Sezione di elettronica	5
1.4 Sezione di rete integrata	6
2. La macchina SESM	8
2.1 Introduzione alle macchine sincrone autoeccitate	8
2.2 Descrizione del progetto.....	11
2.3 Modello matematico del SESM.....	12
2.3.1 Analisi delle armoniche di spazio	12
2.3.2 Ampiezza dell'induzione magnetica e fattore di avvolgimento.....	14
2.3.3 Forza contro elettromotrice indotta	16
2.3.4 Coppia e densità di coppia	19
2.4 Test di laboratorio.....	21
2.4.1 Test di isolamento	21
2.4.2 Misure di impedenza degli avvolgimenti.....	22
2.5 Primi risultati	22
2.5.1 Confronto tra le simulazioni e le misure di laboratorio:	24
2.5.1.1 5 ^a armonica:	24
2.5.1.2 7 ^a armonica:	25
3. La macchina CLAW POLE	27
3.1 Introduzione.....	27
3.2 Descrizione del progetto “claw-pole”	28
3.2.1 Struttura proposta ed analisi del modello.....	31

SOMMARIO

3.2.2	Stima delle perdite nel rame.....	33
3.3	Rendering 3D.....	34
3.4	Alimentazione e relativo azionamento	35
3.4.1	Inverter	36
3.4.2	Schematico	38
3.4.3	Layout finale della board	41
3.4.4	Considerazioni conclusive sull'inverter.....	44
3.5	Realizzazione del prototipo di macchina “claw-pole”	47
4.	Il protocollo di trasmissione multicast per reti magliate LoRa in condizioni critiche di comunicazione	49
4.1	La tecnologia LoRa candidata per applicazioni in condizioni critiche	49
4.1.1	Cenni alla tecnologia LoRa	49
4.1.2	La rete dei sensori e degli attuatori	50
4.1.3	Limiti della tecnologia LoRa	51
4.2	Strategia generale di comunicazione	52
4.2.1	Modalità operative della rete.....	53
4.2.2	Struttura delle tabelle di instradamento.....	54
4.2.3	Gestione delle comunicazioni tra i nodi.....	54
4.2.4	Verifica della qualità della trasmissione	55
4.3	Modalità di instaurazione della comunicazione	55
4.3.1	Procedure operative di test di comunicazione tra i nodi	56
4.3.2	Procedura generale di comunicazione tra i nodi della rete	56
4.3.3	Formato dei pacchetti trasmessi nella rete	57
4.4	Descrizione dei test di comunicazione effettuati.....	58
4.4.1	Modalità di esecuzione dei test	59
4.4.2	Risultati ottenuti	60
5.	Analisi del Rumore e delle Vibrazioni di Motori Elettrici alimentati tramite Inverter.....	61
5.1	Introduzione.....	63
5.2	Analisi delle vibrazioni.....	64
5.3	Apparato sperimentale.....	65
5.3.1	Motore ad induzione	65
5.3.2	Azionamento SVPWM.....	67
5.4	Risultati sperimentali.....	68
5.4.1	Mappe di ottava.....	68
5.4.2	Livello di pressione sonora	71

SOMMARIO

5.4.3	Spettro delle frequenze.....	72
5.4.4	Diagrammi a cascata	74
5.4.5	Conclusioni	76
6.	Prototipazione	77
6.1	Descrizione preliminare del prototipo	77
6.2	Il solenoide rotante	77
6.2.1	Considerazioni progettuali	79
6.2.2	Pilotaggio dell'azionamento.....	80
6.3	Illustrazioni del prototipo	81
6.4	Set up del banco di prova e collaudo	86
6.5	Prove finali di collaudo	88
6.5.1	Valvola con motore DC senza magneti permanenti.....	88
6.5.2	Valvola azionata dal solenoide rotante	89
6.5.3	Test LoRa per la fase di chiusura della valvola	90
6.5.4	Test LoRa per la fase di apertura della valvola.....	91
CONCLUSIONI		93
Appendice A Attrezzatura di laboratorio utilizzata		94
Appendice B Strumentazione software utilizzata		95
Appendice C Controllore di corrente per solenoidi, relè e valvole		96
Appendice D Specifiche tecniche del microfono e dell'accelerometro.....		97
Bibliografia		99

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 2-1 Distribuzione della forza magnetomotrice della 10° e 14° armonica..	14
Figura 2-2 Analisi FFT della MMF generata al traferro	15
Figura 2-3 Circuito di rotore sincrono con la 10° armonica	18
Figura 2-4 Circuito di rotore sincrono con la 14° armonica	18
Figura 2-5 Velocità di sincronismo 5° armonica	22
Figura 2-6 Velocità di sincronismo 7° armonica	23
Figura 2-7 Simulazione circuito equivalente 5° armonica.....	24
Figura 2-8 Simulazione degli andamenti del circuito 5° armonica.....	24
Figura 2-9 Risultati sperimentali del circuito di 5° armonica	25
Figura 2-10 Simulazione circuito equivalente 7° armonica.....	25
Figura 2-11 Simulazione degli andamenti del circuito 7° armonica.....	26
Figura 2-12 Risultati sperimentali del circuito di 7° armonica	26
Figura 3-1 Rendering 3D macchina Claw Pole.....	34
Figura 3-2 Struttura di sostegno della macchina Claw Pole	35
Figura 3-3 Circuito integrato per l'alimentazione della macchina claw-pole	35
Figura 3-4 Inverter trifase per macchina Claw Pole	36
Figura 3-5 Schematico della board per azionamento di macchina claw-pole.....	38
Figura 3-6 Filtro a "pi-greco"	39
Figura 3-7 Ramo di ponte dell'inverter trifase	40
Figura 3-8 Strato superiore della PCB	42
Figura 3-9 Strato inferiore della PCB	42
Figura 3-10 Vista 3D laterale SX della PCB	43
Figura 3-11 Vista 3D laterale DX della PCB.....	43
Figura 3-12 Sovrapposizione degli "artigli" del nucleo di macchina	47
Figura 3-13 Avvolgimento nel nucleo "claw-pole"	48
Figura 3-14 Avvolgimenti nel nucleo "claw-pole" visto di profilo	48
Figura 4-1 Esempio di topologia di rete LoRa.....	50
Figura 4-2 Diagramma di flusso di comunicazione LoRa	57
Figura 4-3 Formato dei pacchetti del protocollo LoRa.....	57
Figura 4-4 Dispositivo LoRa utilizzato nei test	59

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 5-1 Vista superiore del motore ad induzione	65
Figura 5-2 Vista laterale del motore ad induzione	66
Figura 5-3 SVPWM	67
Figura 5-4 Microfono campo vicino @ 50 V	68
Figura 5-5 Microfono campo vicino @ 100 V	69
Figura 5-6 Microfono campo vicino @ 150 V	69
Figura 5-7 Microfono campo vicino @ 200 V	70
Figura 5-8 Livello di pressione sonora	71
Figura 5-9 Spettro stazionario	72
Figura 5-10 Spettro stazionario (evidenza banda critica)	72
Figura 5-11 Grafico a cascata $f = 1,25$ kHz	74
Figura 5-12 Grafico a cascata $f = 2,00$ kHz	74
Figura 5-13 Grafico a cascata $f = 3,20$ kHz	75
Figura 5-14 Grafico a cascata $f = 8,50$ kHz	75
Figura 6-1 Componenti del solenoide rotante	78
Figura 6-2 Stati di funzionamento del solenoide rotante	78
Figura 6-3 Dettaglio di installazione del solenoide rotante	79
Figura 6-4 Schematico del dispositivo TI DRV110	80
Figura 6-5 Vista laterale SX del prototipo	81
Figura 6-6 Vista frontale superiore del prototipo	82
Figura 6-7 Vista laterale DX del prototipo	83
Figura 6-8 Vista frontale del prototipo	84
Figura 6-9 Dettaglio di installazione del prototipo	85
Figura 6-10 Dettaglio di installazione delle schede di alimentazione	85
Figura 6-11 Prima installazione del dispositivo sul banco di prova	86
Figura 6-12 Installazione del prototipo sul banco di prova	87
Figura 6-13 Test valvola con motore DC senza magneti permanenti	89
Figura 6-14 Test valvola con solenoide rotante	90
Figura 6-15 Test LoRa (fase di chiusura della valvola)	91
Figura 6-16 Test LoRa (fase di apertura della valvola)	92

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2.1 Ampiezza induzione magnetica e fattore di avvolgimento	15
Tabella 2.2 Misura dell'impedenza degli avvolgimenti del SESM.....	22
Tabella 3.1 Parametri della macchina Claw Pole.....	31
Tabella 4.1 Parametri della trasmissione LoRa.....	54
Tabella 5.1 Parametri caratteristici del motore testato.....	66

INTRODUZIONE

L'attività di ricerca del presente lavoro riguarda la progettazione e realizzazione dimostrativa di un dispositivo di sicurezza che consente la realizzazione di attuazioni o di movimentazioni in condizioni di emergenza, come quelle conseguenti al verificarsi di eventi catastrofici, come ad esempio terremoti, alluvioni o incendi.

I recenti eventi catastrofici verificatisi in Italia e in Europa hanno riproposto la necessità di disporre di dispositivi che siano in grado di azionare valvole o paratie per l'attivazione di impianti antincendio o per il sezionamento di gasdotti, acquedotti, oleodotti, elettrodotti, impianti industriali contenenti gas o liquidi in pressione o nocivi per gli esseri viventi o per l'ambiente etc. In corrispondenza di tali eventi potrebbe anche essere necessario compiere altri tipi di attuazioni, come l'apertura o la chiusura di cancelli, di saracinesche, l'attivazione di pompe, la movimentazione di carichi quali ascensori, carichi pericolosi, etc.

Il dispositivo è composto da elementi connessi in rete tra di loro e gestiti in remoto, che siano in grado di garantire, anche in condizioni ambientali estreme, l'attuazione meccanica di diverse tipologie di meccanismi, con lo scopo di facilitare e rendere più efficiente la gestione delle emergenze.

Queste manovre devono essere effettuate anche in condizioni di black-out e in presenza di elevate o ridotte temperature esterne, di gas esplosivi, di condizioni meteorologiche avverse.

Il dispositivo proposto è finalizzato all'esecuzione di tali compiti. Dal punto di vista costruttivo, esso si compone di una sezione denominata di attuazione, da una sezione di accumulo energetico e da una sezione elettronica, una di controllo e una di rete integrata.

INTRODUZIONE

Nel Lazio sono presenti 175 aziende impegnate nella produzione e commercializzazione di impianti, attrezzature e materiali antincendio, 8 raffinerie e diversi poli industriali includenti impianti contenenti gas pericolosi o esplosivi. La ricerca si rivolge preferibilmente, ma non limitatamente, a questo tessuto aziendale, di cui il Lazio, anche per la sua storia pregressa, è particolarmente ricco. L'interesse è testimoniato anche dalle lettere di adesione al presente progetto, di imprese laziali e no.

Recentemente, eventi sismici che hanno coinvolto interi centri anche di popolose comunità laziali, incidenti come quello di Viareggio, oppure l'esplosione nella raffineria ENI nel pavese del 01 dicembre 2016, hanno portato all'attenzione dei media importanti problemi che coinvolgono la sicurezza delle persone e degli impianti.

In particolare, la problematica dell'antincendio e della risposta alle calamità naturali è oggi al centro di diverse normative nazionali e internazionali.

Di seguito si riportano alcuni riferimenti normativi a cui il dispositivo in oggetto dovrà essere conforme, contenenti indicazioni sui tipi di impianto in cui esso può trovare applicazione:

1. Prevenzione incendi attività 68 - ospedali: DM 18/9/2002 "Regola tecnica di prevenzione incendi relativa alle strutture sanitarie pubbliche e private";
2. Prevenzione incendi attività 69 - attività commerciali: DM 27/7/2010 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio delle attività commerciali con superficie superiore a 400 mq";
3. Prevenzione incendi attività 74 - impianti termici gas: DM 12/4/1996 "Regola tecnica di prevenzione incendi per impianti termici alimentati da combustibili gassosi";
4. Prevenzione incendi attività 74 - impianti termici combustibili liquidi: DM 28/4/2005 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione e l'esercizio degli impianti termici alimentati da combustibili liquidi";

INTRODUZIONE

5. Prevenzione incendi attività 49 - gruppi elettrogeni: D.M. 13/7/2011 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la installazione di motori a combustione interna accoppiati a macchina generatrice elettrica o ad altra macchina operatrice e di unità di cogenerazione a servizio di attività civili, industriali, agricole, artigianali, commerciali e di servizi";
6. Prevenzione incendi attività 17-18 - esplosivi: R.D. 6 maggio 1940, n. 635 "Regolamento per l'esecuzione del testo unico 18 giugno 1931, n. 773 delle leggi di pubblica sicurezza";
7. Prevenzione incendi oli minerali: DM 31/07/1934 "Norme di sicurezza per la lavorazione, l'immagazzinamento, l'impiego o la vendita di oli minerali e per il trasporto degli oli stessi" coordinato con successive modifiche e integrazioni;
8. Prevenzione incendi contenitori distributori rimovibili: DM 12/09/2003 "Regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio di depositi di gasolio per autotrazione ad uso privato, di capacità geometrica non superiore a 9 mc, in contenitori-distributori rimovibili per il rifornimento di automezzi destinati all'attività di autotrasporto"; DM 19/03/1990 "Norme per il rifornimento di carburanti, a mezzo di contenitori-distributori mobili, per macchine in uso presso aziende agricole, cave e cantieri";
9. Prevenzione incendi attività 3B - depositi bombole GPL: Circ. M.I. n. 74 del 20/9/1956 "Norme di sicurezza per la costruzione e l'esercizio di depositi di G.P.L. contenuti in recipienti portatili e delle rivendite";
10. Prevenzione incendi attività 4B - depositi GPL: DM 14/5/2004 "Regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio dei depositi di GPL con capacità non superiore a 13 mc"; Testo aggiornato con le modifiche introdotte dal DM 5 luglio 2005 e dal DM 4 marzo 2014;
11. Prevenzione incendi attività 4B - grandi depositi GPL: DM 13/10/1994 "Regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 mc e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg";
12. Prevenzione incendi attività 13 - Distributori stradali carburanti liquidi: Circ. M.I. n. 10 del 10/2/1969 "Distributori stradali di carburanti"; DM 29/11/2002 "Requisiti tecnici per la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei serbatoi interrati destinati allo stoccaggio di carburanti liquidi per autotrazione, presso gli impianti di distribuzione";

INTRODUZIONE

13. Prevenzione incendi attività 13 - Distributori stradali GPL: DPR 24/10/2003 n. 340 "Regolamento recante disciplina per la sicurezza degli impianti di distribuzione stradale di G.P.L. per autotrazione";
14. Prevenzione incendi attività 13 - Distributori stradali metano: DM 28/6/2002 (rettifica dell'allegato al DM 24/5/2002) "Norme di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione stradale di gas naturale per autotrazione";
15. DM 30/04/2012 "Regola tecnica di prevenzione incendi per l'installazione e l'esercizio di apparecchi di erogazione ad uso privato, di gas naturale per autotrazione";

Questi sono soltanto alcuni dei possibili settori interessati all'applicazione in oggetto. Tuttavia, il campo è molto più vasto. Attualmente il mercato propone dispositivi simili a quello oggetto del presente progetto; tuttavia essi sono caratterizzati dai seguenti aspetti negativi:

1. la forza o la coppia che essi producono assume valori elevati all'inizio dell'azione di emergenza e decadendo con gradualità. Questo rappresenta un problema per quei sistemi di chiusura che richiedono invece un'azione più intensa al termine del profilo cinematico, come ad esempio le valvole a sfera;
2. in generale, non è previsto per tali dispositivi una qualunque tipo di comunicazione con una rete centralizzata. In alcuni casi sono previsti metodi di comunicazione dati, ma essi si basano su tecnologie in cavo, quindi non adatte a situazioni ambientali estreme. Questa circostanza rende impossibile conoscere da remoto e con certezza se un singolo dispositivo di sicurezza è entrato nello stato di emergenza.

Di seguito sono riportati i links ad alcuni di questi attuatori speciali di emergenza.

<http://www.schiebel-actuators.com/>

<http://www.moog.com/literature/ICD/Moog-PowerGen-Actuator-Fail-Safe-Overview.pdf>

<http://www.rciactuators.com/docs/98-20001x3.pdf>

<http://www.rotork.com/en/product/index/controlnetworks>

<http://www1.auma.com/cms/AUMA/unitedkingdom/>

INTRODUZIONE

Il progetto intende superare i suddetti limiti, mediante l'adozione di soluzioni innovative in ciascuna delle sezioni che lo compongono.

1. I COMPONENTI PRINCIPALI DEL DISPOSITIVO ATTUATORE

Il dispositivo è composto da 4 sezioni principali:

- Sezione di attuazione;
- Sezione di controllo;
- Sezione di elettronica;
- Sezione di rete integrata;

Per ciascuna sezione viene di seguito indicata la funzionalità e i vantaggi competitivi rispetto ai dispositivi presenti sul mercato:

1.1 Sezione di attuazione

La macchina elettrica inizialmente proposta per questo tipo di applicazioni è di tipo sincrono autoeccitato. Questa tipologia di macchina si inserisce nella ricerca di una valida alternativa alle macchine a magneti permanenti oggi largamente utilizzate. Queste ultime sono generalmente utilizzate a causa dell'elevato rapporto coppia/volume che esse presentano. Tuttavia, la quasi la totalità della produzione mondiale di materiali inclusi nel gruppo di elementi chimici denominati terre rare (specialmente Neodimio e Samario), necessari per costruire i magneti permanenti, è concentrata per più dell'80% in Cina, il che rende i produttori di macchine elettriche fortemente dipendenti da fornitori asiatici. Inoltre, le terre rare sono elementi chimici che vanno smaltiti con particolare cura e il cui Life Cycle Assessment (LCA) deve essere effettuato con cura.

CAPITOLO 1

A fronte di questa problematica, la ricerca scientifica è oggi concentrata nella ricerca di nuove tipologie di macchine in grado di fare a meno completamente o parzialmente di questi materiali. A dimostrazione di ciò sono numerosi i bandi internazionali che spingono a ricercare valide alternative all'utilizzo di terre rare.

Inoltre, per esposizione ad elevate temperature ambientali, si riduce l'induzione residua dei magneti permanenti, che rischiano addirittura di smagnetizzarsi. Evitare l'utilizzo di terre rare, permette pertanto di allargare il range di funzionamento delle macchine elettriche in particolare condizioni di funzionamento (ad esempio quando si hanno alte temperature: incendi, catastrofi ecc.).

I motori elettrici oggi utilizzati sono principalmente costituiti da uno statore trifase e un rotore sede di poli in numero pari a quelli dell'avvolgimento statorico. Tali poli possono essere realizzati mediante:

- Magnet permanenti (PM);
- Conduttori percorsi da corrente continua posizionati su espansioni polari o in cave;

Il presente progetto mira a risolvere i problemi presenti in entrambe le tipologie, (la presenza delle spazzole per i primi e l'utilizzo di magneti permanenti per i secondi), e allo stesso tempo mantenere le loro caratteristiche positive in termini di densità di coppia.

I requisiti di sicurezza derivanti dalle condizioni estreme di funzionamento del motore elettrico impongono che esso non possa essere basato esclusivamente su magneti permanenti, la cui induzione residua è fortemente influenzata dalla temperatura e, inoltre, che esso non debba contenere collettori, spazzole o anelli, che possono essere sede di scintillio. La presente proposta consiste pertanto nell'adozione di un motore speciale, di tipo sincrono autoeccitato, che è allo studio del gruppo di ricerca da diversi anni, ed è stato oggetto di pubblicazioni scientifiche.

La macchina che è stata inizialmente realizzata è un sincrono trifase autoeccitato; quindi, un generatore senza spazzole che non sfrutta magneti permanenti per generare il campo di eccitazione.

CAPITOLO 1

Le soluzioni tecniche che sono state utilizzate per la sua realizzazione sono differenti da quelle già note in letteratura; perciò, si ritiene che possibili riscontri positivi provenienti dalla sua realizzazione potrebbero portare anche ad un eventuale brevetto.

L'idea di base per ottenere l'autoeccitazione è quella di sfruttare le armoniche di spazio della Forza Magnetomotrice (FMM) prodotte dall'avvolgimento di statore, per generare, nel rotore stesso, l'alimentazione necessaria ad ottenere il campo di eccitazione.

Il SESM risulta particolarmente vantaggioso per queste applicazioni; infatti, oltre al mancato utilizzo di materiali costosi e nocivi per l'ambiente, garantisce tutte quelle caratteristiche aggiuntive essenziali per ottenere requisiti di sicurezza negli impianti di processo.

Le alternative oggi presenti sul mercato, pur garantendo prestazioni ottimali in termini funzionamento della macchina, non possono assolutamente essere utilizzate in sistemi di sicurezza, in quanto in condizioni eccezionali o di emergenza non sono più in grado di garantire il loro funzionamento.

Il SESM rispetta i requisiti per applicazioni safety-related e riduce drasticamente la necessità di manutenzione. Per di più, il fatto che non possieda contatti striscianti di alcun tipo per generare il campo di eccitazione ne garantisce anche il funzionamento in luoghi a rischio esplosioni, a causa, ad esempio, di polveri o residui vari dovuti a lavorazioni. Il suo utilizzo nel campo "oil & gas" è ideale. Tale industria impone alti standard di qualità legate al pericolo di potenziali esplosioni.

1.2 Sezione di controllo

La gestione ottimale delle attuazioni in un impianto industriale non può prescindere da una raccolta puntuale dei dati relativi a tutte le funzioni svolte dai sottosistemi: condizioni di apertura/chiusura valvole, consumi elettrici, stato di carica degli elementi di accumulo, eventuali condizioni di guasto, etc.

CAPITOLO 1

I dati raccolti, insieme al monitoraggio continuo delle funzioni e delle condizioni di utilizzo permetteranno di sia di migliorare le prestazioni complessive in termini di consumi, ma soprattutto di adottare le strategie indispensabili per la manutenzione preventiva e la previsione di guasti, nonché di dare ad eventuali soccorritori l'informazione sullo stato delle attuazioni nell'impianto. Allo stato attuale, non esistono prodotti in commercio dotati di tutte queste caratteristiche nel funzionamento online.

Nessun dispositivo analogo in commercio possiede queste caratteristiche.

In alcuni dispositivi simili (p.es. i contatori di energia o i dispositivi di segnalazione guasti), i dati generalmente vengono accumulati dalle singole unità e vengono trasferiti su un sistema di elaborazione che tratta le informazioni e produce indicazioni utili.

Tuttavia, questo metodo comporta una serie di difficoltà non facilmente gestibili per la presente applicazione.

Tra queste, l'attivazione di un link locale per il download dei dati e la conoscenza differita di dati che potrebbero avere un carattere d'urgenza. Per questo motivo il controllo ed il monitoraggio della sezione di attuazione non avvengono in tempo reale.

Queste considerazioni suggeriscono di adottare un sistema continuo di trasmissione dati, quindi anche durante il servizio del dispositivo, viene più diffusamente spiegato nella sezione dedicata alla trasmissione in rete.

I dispositivi realizzati sono dotati di moduli TX/RX; ciascuno di essi costituisce un nodo che può trasmettere e ricevere informazioni. I nodi saranno in comunicazione con uno o più gateway, i quali ancora potranno essere connessi ad un server che raccoglie ed elabora i dati.

CAPITOLO 1

Al server farà riferimento almeno una workstation tramite la quale sarà possibile un monitoraggio in tempo reale della flotta mediante applicazioni che renderanno “human-friendly” la leggibilità delle informazioni; ad esempio, mediante la sovrimposizione delle tracce su una mappa, oppure tramite una grafica analogica che offrirà un colpo d’occhio immediata sull’esercizio delle macchine ed eventuali situazioni di emergenza.

La bi-direzionalità delle informazioni permetterà di interagire con le singole macchine anche modificando i parametri operativi e permettendo, in caso di necessità/emergenza, di adottare sia in automatico, sia in manuale, provvedimenti che evitino il fermo macchina oppure il verificarsi di danni maggiori.

1.3 Sezione di elettronica

Il modulo di comunicazione stabilisce un canale periferico di trasmissione radio per il trasferimento di dati che si riferiscono allo stato del sistema e per la commutazione dello stesso negli stati di funzionamento previsti in base all’asserzione di determinati segnali.

L’elettronica di potenza è costituita da un ponte trifase per l’alimentazione delle fasi di statore e da un convertitore destinato alla regolazione della corrente di eccitazione di rotore. Il sistema di controllo gestisce la sezione di potenza in base ai segnali di regolazione che impongono la corrente e la velocità della macchina. Esso è connesso con i dispositivi elettronici periferici, con la sensoristica dell’intero sistema e con il modulo di comunicazione.

Il modulo di comunicazione rappresenta uno dei nodi terminali di una rete che comprende numerosi elementi omogenei nel contenuto informativo, ma che possono svolgere diverse funzioni di protezione.

1.4 Sezione di rete integrata

Per la trasmissione delle informazioni che si scambieranno i diversi attuatori, verrà adottato un sistema continuo di trasmissione dati. La tecnologia che sarà adottata è una tecnologia innovativa a banda molto stretta, con bassissima potenza di trasmissione, ma in grado di sostenere efficacemente e con grande affidabilità distanze sufficienti a coprire il campo operativo degli attuatori, anche in presenza di ostacoli, senza necessitare di appoggiarsi a reti operate da gestori telefonici.

La tecnologia con tali caratteristiche è nota come Low-Power Wide Area Network (LoRaWAN®) basata sul metodo “chirp spread spectrum modulation” già adottata con successo in ambito militare.

Si noti che, sebbene le tecnologie di trasmissione GSM-LTE permettano di trasmettere grandi volumi di informazioni, questa caratteristica non è richiesta nel caso specifico, dato che i dati acquisiti e trasmessi sono caratterizzati da una bassa densità di informazioni. Inoltre, la banda molto larga su cui esse operano potrebbe non essere compatibile con la suscettibilità elettromagnetica dell'ambiente operativo.

Attualmente, LoRaWAN® è sostenuta da un consorzio di aziende che producono i dispositivi di trasmissione e si impegnano a sviluppare e migliorare la tecnologia. Essa è caratterizzata da un raggio d'azione di molti km, ottenuto soprattutto aumentando la sensibilità degli apparati riceventi, piuttosto che la potenza di trasmissione; dalla possibilità di criptare i dati trasmessi; da consumi energetici estremamente bassi; dalla possibilità di creare nodi telematici e quindi un network flessibile.

La tecnologia proposta è, per certi aspetti, simile alla SOTDMA (Self-organized time-division multiple access), ma si distingue per i criteri di suddivisione e di allocazione, che si baseranno su algoritmi adattativi che terranno in considerazione diversi gradi di priorità attribuiti ai singoli nodi e diversi gradi di rischio ambientale cui essi fanno riferimento.

CAPITOLO 1

Il modulo di comunicazione si baserà sul sistema LoRaWAN®. Questa tecnologia presenta caratteristiche che si adattano bene alla specifica applicazione; infatti, essa permette di gestire parametri di comunicazione in modo da fissare con sufficiente precisione la distanza utile di trasmissione e quindi definire l'area nella quale è implementata la rete di comunicazione. Inoltre, ha la possibilità di criptare i pacchetti dati e garantire un'elevata affidabilità, riservatezza e sicurezza. Questa tecnologia è a bassissimo consumo, tale caratteristica garantisce una elevatissima affidabilità ed in grado di garantire la sua funzionalità anche in condizioni ambientali estreme.

Per la scelta della macchina elettrica coinvolta nella progettazione del dispositivo, sono stati condotti degli appositi test in camera semi-anecoica, al fine di misurare le emissioni acustiche prodotte dal motore elettrico candidato ad essere impiegato nel presente progetto; tali prove hanno consentito anche di verificare l'influenza della frequenza di commutazione dell'inverter di alimentazione del motore oggetto di test sullo spettro delle emissioni acustiche da esso prodotte.

2.LA MACCHINA SESM

2.1 Introduzione alle macchine sincrone autoeccitate

Le macchine sincrone auto-eccitate (SESM) rappresentano a tutt'oggi una valida alternativa a quelle a magneti permanenti, in quanto non necessitano di alcuna alimentazione addizionale per la generazione del campo di eccitazione; per di più, esse possono venire impiegate sia come generatori che come motori. L'idea qui descritta e sperimentata è quella di una macchina auto-eccitata, che sfrutta le armoniche di spazio della forza magnetomotrice per la generazione del campo di eccitazione.

I primi generatori autoeccitati che sono stati progettati risalgono a metà anni '60 del secolo scorso, mentre, a metà degli anni '90, molti studi rilevanti sono stati condotti e sviluppati allo scopo di eliminare ogni fonte esterna di alimentazione per l'avvolgimento di eccitazione. In conseguenza di ciò, è stata costruita un'ampia varietà di strutture e di tipologie di macchine sincrone autoeccitate, ognuna delle quali caratterizzata dall'adozione di una differente modalità di generazione del campo di eccitazione, ciò evitando l'integrazione di un generatore di alimentazione elettrica o una connessione ad una fonte di energia per l'alimentazione dell'avvolgimento di eccitazione medesimo. In questo lavoro, il motore viene proposto per la sua attitudine al funzionamento in apparecchiature d'emergenza, data la mancanza sia di magneti permanenti che di contatti striscianti.

L'idea di una trasmissione di energia senza contatto galvanico tra lo statore e il rotore ha origine negli anni '80 del secolo scorso, quando venne implementata nel "MagLev", ovvero *Transrapid Magnetic Levitation and Propulsion System* (Meins, Miller, & Mayer, 1988).

In tale progetto, il sistema di propulsione è simile ad un motore rotante ad induzione, il cui statore è, di fatto, srotolato: infatti, lo statore stesso ha la classica

CAPITOLO 2

configurazione ad avvolgimenti trifase a passo intero (Dickhart, Status Of Transrapid Maglev, 1991). Invece, i magneti collocati in tale struttura consentivano non solo la levitazione, ma anche la propulsione ed il trasferimento di energia; per quest'ultimo scopo, veniva impiegato anche un avvolgimento addizionale, posizionato nei poli di rotore, che sfruttava principalmente le armoniche spaziali delle cave, cosicché la forza contro elettromotrice indotta è prodotta dal risultato dell'alternanza tra ciascuna cava ed i denti che la delimitano. Tutto ciò permette l'induzione di una tensione che viene successivamente raddrizzata, al fine di ricaricare le batterie presenti a bordo del veicolo elettrico, fino a raggiungere velocità di circa 150 km/h (Bohn & Steinmetz, 1984) (Lu, Chong, He, Zhang, & Pan, 2003) (Dickhart, Transrapid MagLev Update, 1987).

Nello specifico, il *Transrapid* di Shanghai usa due meccanismi per generare le armoniche spaziali di MMF (Luguang, 2006): il primo consiste nell'iniezione di armoniche di corrente nel sistema di alimentazione attraverso un processo che coinvolge la commutazione dei dispositivi di elettronica di potenza; il secondo invece sfrutta le armoniche generate dalle operazioni svolte dall'inverte; quest'ultimo, di fatto, ricade entro la casistica delle macchine auto-eccitate che sfruttano le armoniche temporali di MMF.

Nella macchina SESM proposta, è lo statore stesso che genera la forza contro elettromotrice indotta negli avvolgimenti di rotore, al fine di generare il campo di eccitazione. Le armoniche spaziali di MMF risultano essere limitate a causa dell'adozione di cave semichiusure. Il rotore è a traferro costante ed è privo di salienze, cosicché non si rende necessario l'impiego di speciali tacche di rotore, che avrebbero l'effetto indesiderato di aumentare la coppia di impuntamento.

I due avvolgimenti del SESM qui considerato possono essere usati alternativamente come indotto e generatore di campo, così da poter cambiare le performance della macchina oggetto di studio.

La nostra macchina, infatti, sfrutta due armoniche spaziali di MMF prodotte da un avvolgimento statorico concentrato e a cave frazionarie (Marignetti, D'Aguanno,

CAPITOLO 2

& Di Stefano, 2015). Le distribuzioni della densità di flusso prodotte dallo statore ruotano in direzioni opposte. Sul rotore sono installati due avvolgimenti: uno con lo stesso numero di coppie polari dell'armonica spaziale controrotante, che è appunto quello di input, mentre l'altro, che è quello vero e proprio di eccitazione, caratterizzato da un numero di coppie polari pari a quello dell'altra armonica spaziale, rotante nella medesima direzione del rotore.

È quindi chiaro ora il principio di funzionamento: la forza controelettromotrice indotta dal campo controrotante viene sfruttata per generare l'energia sufficiente all'alimentazione dell'avvolgimento di eccitazione; in vero, la corrente e la tensione prodotta dall'avvolgimento, poc'anzi denominato di input, vengono rettificata ed iniettate in quello di eccitazione; la corrente circolante in quest'ultimo, interagendo con il campo rotante di macchina, genera la coppia disponibile all'asse di macchina.

La macchina SESM ha pertanto una struttura magnetica molto semplice e simmetrica. La trasmissione dell'energia viene realizzata tramite un avvolgimento polifase di statore e richiede solamente un raddrizzatore standard collocato alla base del rotore. Un altro vantaggio della configurazione proposta è la possibilità di variare l'eccitazione, mediante un raddrizzatore opportunamente controllato.

In tal modo, tale macchina ben si candida a svolgere il ruolo di attuatore per dispositivi di sicurezza, chiamati ad operare in condizioni critiche, specialmente in alte temperature, laddove i classici magneti permanenti non risultano essere adatti (Di Stefano & Marignetti, 2019). Tuttavia, data la possibilità di lavorare a bassa velocità e con differenti scelte nel numero delle coppie polari, tale struttura potrebbe essere anche impiegata come generatore nelle turbine eoliche.

2.2 Descrizione del progetto

Il progetto è partito dal prototipo di motore elettrico da impiegare per la movimentazione in emergenza della valvola di chiusura: si è scelto di realizzare di una macchina a 20 poli, sincronizzata con la decima armonica dell'induzione. L'avvolgimento dello statore è posizionato in 24 slot ed è avvolto con la tecnica delle “cave frazionarie”, mentre il rotore è costituito da due avvolgimenti separati: uno utilizzato per la sincronizzazione con la decima armonica dell'induzione, il secondo per interagire con la quattordicesima armonica; dal punto di vista delle connessioni elettriche, il rotore è composto da due avvolgimenti separati, interfacciati da un convertitore per ottenere l'autoeccitazione della macchina rotante.

Alimentando la parte statorica, si ottengono negli avvolgimenti di rotore delle tensioni indotte che opportunamente rettificate sono reimmesse tramite un convertitore AC/DC (non controllato o controllato ecc.) generando il campo di eccitazione. Se la macchina è sincronizzata con la quinta armonica, la settima armonica viene utilizzata dal convertitore AC/DC per alimentare il campo di eccitazione di quinta armonica e viceversa.

Entrambi gli avvolgimenti del rotore sono monofase, quindi è sufficiente utilizzare un ponte di Graetz con una capacità di livellamento. Tuttavia, le prestazioni della macchina SESM dipendono molto dalla qualità del regolatore sulla corrente di campo. Utilizzando un raddrizzatore non controllato, come un ponte di Graetz, non avremo alcun controllo sulla corrente di campo e quindi avremo una coppia variabile.

Per il prototipo, l'uso di un ponte di Graetz accelera le operazioni di verifica e caratterizzazione dei parametri della macchina, ma per ottimizzare la macchina SESM occorre utilizzare regolatori controllati.

Di tale macchina, è stato formulato dapprima un modello matematico che descrive l'andamento delle armoniche spaziali della forza magnetomotrice e che consente, a livello analitico, di stimare la coppia erogata e la relativa densità di coppia, essendo quest'ultima una importante figura di merito per la valutazione della bontà di tale progetto.

Invece, le principali fasi dello sviluppo sperimentale sono state le seguenti:

- Test di isolamento;
- Misure di impedenza degli avvolgimenti;
- Misure di caratterizzazione dei parametri del circuito elettrico equivalente della SESM;
- Simulazione SESM tramite software di simulazione circuitale.

2.3 Modello matematico del SESM

2.3.1 Analisi delle armoniche di spazio

Quando lo statore della macchina viene alimentato ad una pulsazione ω_s , la velocità angolare della v -esima armonica di spazio della forza magnetomotrice (indicata anche con MMF) è:

$$|\omega_{vs}| = \pm \frac{|\omega_s|}{v} \quad 2.1$$

Le componenti armoniche si propagano quindi a velocità differenti ed anche in versi opposti (ciò spiega il segno $\pm$).

Ogni armonica di spazio induce la tensione alla rispettiva frequenza negli avvolgimenti di statore. L'ordine dell'armonica indica quante lunghezze d'onda sono contenute in una distanza pari a $2\tau_p$, ovvero il doppio di un passo polare rispetto all'armonica fondamentale. Ciò ci conduce a definire il passo polare della v -esima armonica:

$$\tau_{pv} = \frac{\tau_p}{v} \quad 2.2$$

CAPITOLO 2

Pertanto, l'armonica spaziale della forza magnetomotrice indotta al traferro si propagherà con velocità angolare ω_{ls}/ν ; da ciò consegue pertanto che il rotore si muove sincronicamente alla stessa velocità angolare delle armoniche spaziali di MMF soltanto se l'ordine dell'armonica considerata ha il medesimo numero di coppie polari del rotore stesso, ovvero $\nu=p$.

Nel caso invece più generale di asincronismo della rotazione del motore ad una generica velocità Ω_r , lo scorrimento delle differenti armoniche spaziali è definito come:

$$s_\nu = \frac{\omega_s - \nu\Omega_r}{\omega_s} \quad 2.3$$

Tale scorrimento calcolato rispetto alla ν -esima armonica può essere calcolato anche come:

$$s_\nu = 1 - \frac{\nu}{p}(1 - s) \quad 2.4$$

La frequenza angolare della ν -esima armonica è data pertanto da:

$$\omega_{\nu s} = \omega_s s_\nu = \omega_s \left(1 - \frac{\nu}{p}(1 - s) \right) \quad 2.5$$

In conclusione, le armoniche spaziali della forza magnetomotrice generata al traferro dagli avvolgimenti di statore possono essere suddivise in tre gruppi (rispetto ad un generico ordine k , scelto tra i numeri naturali):

- Primo gruppo in cui $\nu = 6k + 3$: nei sistemi trifase, queste armoniche tendono ad elidersi tra di loro;
- Secondo gruppo in cui $\nu = 6k + 1$: armoniche spaziali che ruotano nel verso convenzionalmente definito positivo;
- Terzo gruppo in cui $\nu = 6k - 1$: armoniche spaziali controrotanti.

CAPITOLO 2

L'andamento spaziale della forza magnetomotrice indotta dagli avvolgimenti statorici è riportato nella figura seguente: la 10° armonica e la 14° armonica hanno andamento sinusoidale e vengono rappresentate per metà della lunghezza della periferia di macchina.

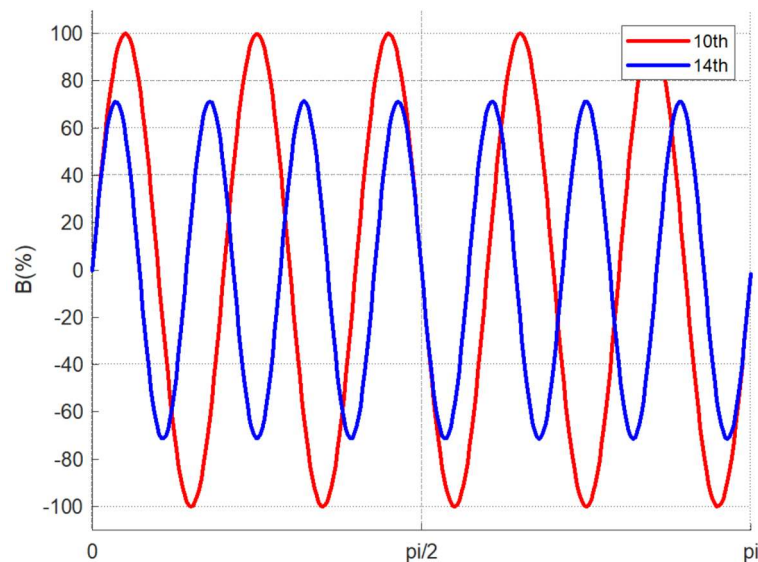


Figura 2-1 Distribuzione della forza magnetomotrice della 10° e 14° armonica

2.3.2 Ampiezza dell'induzione magnetica e fattore di avvolgimento

L'ampiezza dell'induzione magnetica ed il modulo del fattore di avvolgimento calcolato rispetto alle armoniche spaziali sono stati ricavati ed i rispettivi valori sono stati tabulati di seguito; si noti a proposito che l'ampiezza dell'armonica della forza magnetomotrice è espressa in percentuale, in quanto essa è stata ottenuta imponendo una corrente di 1 A che scorre in un singolo conduttore presente in ogni cava di rotore.

Ordine armonica MMF	Ampiezza (%)	Fattore di avvolgimento
2°	35.658	0.067
10°	100	0.933
14°	71.317	0.933
22°	3.488	0.067
26°	2.713	0.067
34°	29.457	0.933
38°	25.581	0.933
46°	1.705	0.067
50°	1.667	0.067
58°	17.054	0.933
62°	15.503	0.933
70°	0.775	0.067
74°	0.620	0.067

Tabella 2.1 Ampiezza induzione magnetica e fattore di avvolgimento

L'analisi mediante FFT (Fast Fourier Transform) della forza magnetomotrice indotta è mostrata nella figura seguente. Dal momento che l'avvolgimento statorico è composto da una sezione di base ripetuta due volte (ovvero, abbiamo di base un numero di coppie polari $p = 2$), la prima armonica spaziale significativa è proprio la 2°; tuttavia, l'avvolgimento ci fornisce due armoniche dominanti significative, ovvero la 10° e la 14°, le quali sono sfruttate per l'erogazione della coppia da parte della macchina stessa.

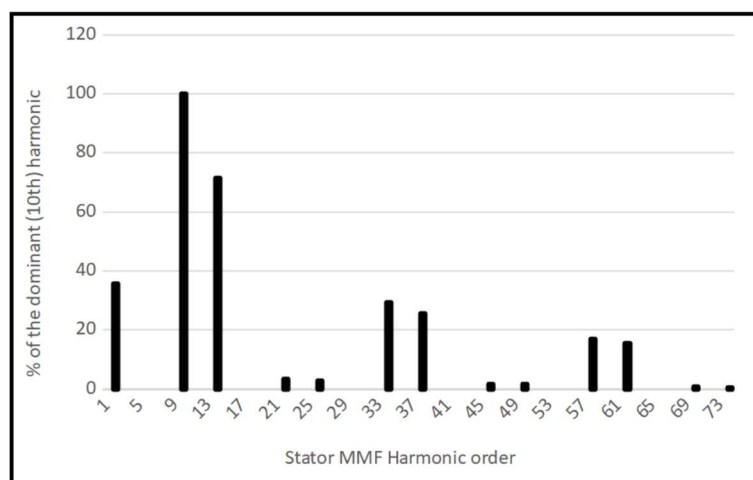


Figura 2-2 Analisi FFT della MMF generata al traferro

CAPITOLO 2

L'espressione della ν -esima armonica della densità di flusso rotorica B^R , rispetto al riferimento angolare di rotore β , viene ora calcolata introducendo la permeabilità magnetica nel vuoto μ_0 e la lunghezza del traferro δ :

$$B^R(\beta, t) = \frac{m_s}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{2\delta} \frac{N_s K_{w,\nu}}{\nu} I_M \sin(\nu(\beta + \Omega_r t) \mp \omega_s t) \quad 2.6$$

dove:

- N_s è il numero di spire di statore in serie;
- m_s è il numero di fasi di statore;
- $K_{w,\nu}$ è il fattore di avvolgimento della ν -esima armonica;
- I_M è il valore massimo della corrente statorica.

In termini dello scorrimento s , l'equazione precedente diventa, per le armoniche rotanti nel verso convenzionalmente positivo:

$$B^R(\beta, t) = \frac{m_s}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{2\delta} \frac{N_s K_{w,\nu}}{\nu} I_M \sin\left(\nu\beta + \left(\frac{\nu}{p}(1-s) - 1\right)\omega_s t\right) \quad 2.7$$

Per le armoniche controrotanti, invece si ottiene:

$$B^R(\beta, t) = \frac{m_s}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{2\delta} \frac{N_s K_{w,\nu}}{\nu} I_M \sin\left(\nu\beta + \left(\frac{\nu}{p}(1-s) + 1\right)\omega_s t\right) \quad 2.8$$

Possiamo pertanto concludere che, per una stessa frequenza delle grandezze elettriche di alimentazione, la velocità di sincronismo è differente a seconda dell'armonica spaziale a cui la rotazione del rotore viene agganciata.

2.3.3 Forza controlettromotrice indotta

Se il rotore è sincrono con la 14° armonica spaziale, la 10° armonica del campo rotante induce una forza controlettromotrice nel corrispondente avvolgimento di rotore. L'opposto avviene quando il rotore è sincrono con la 10° armonica spaziale di MMF.

CAPITOLO 2

La forza controelettromotrice indotta in ciascun avvolgimento di rotore, denominata e_{10} ed e_{14} , è composta da diversi contributi:

- la tensione indotta dall'armonica spaziale di forza magnetomotrice prodotta dallo statore, il cui ordine è pari al numero di coppie polari del rotore, ovvero $v = p$;
- la tensione indotta dalle armoniche spaziali della forza elettromotrice prodotta dal rotore, in cui $v \neq p$;
- la tensione indotta dall'accoppiamento del flusso prodotto da ciascuno dei due avvolgimenti, che, per il teorema di reciprocità, risulta essere:

$$e_{14r}e_{10r} = e_{10r}e_{14r}.$$

In generale, pertanto, si ha:

$$\begin{cases} e_{10r} = e_{10}^{10} + e_{10}^{14} + e_{10}^h + e_{10r,14r} \\ e_{14r} = e_{14}^{14} + e_{14}^{10} + e_{14}^j + e_{14r,10r} \end{cases} \quad 2.9$$

dove il pedice indica il numero di coppie polari dell'avvolgimento di rotore, mentre l'apice indica l'ordine dell'armonica spaziale della forza magnetomotrice (essendo $h, j \neq 10, 14$).

Il circuito elettrico equivalente dei due avvolgimenti di rotore può essere descritto analiticamente dal seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} V_{ab10} = e_{10r}(t) + L_{10r} \frac{di_{10r}}{dt} - R_{10r}i_{10r} \\ V_{ab14} = e_{14r}(t) - L_{14r} \frac{di_{14r}}{dt} - R_{14r}i_{10r} \end{cases} \quad 2.10$$

dove V_{ab} è la tensione ai capi del raddrizzatore.

La tensione indotta dal reciproco accoppiamento dei due avvolgimenti di rotore può essere considerata trascurabile, vista la loro disposizione nelle cave del rotore medesimo. Pertanto, considereremo $e_{14r}e_{10r} = e_{10r}e_{14r} \approx 0$.

CAPITOLO 2

Gli schematici dei relativi circuiti di rotore saranno pertanto i seguenti:

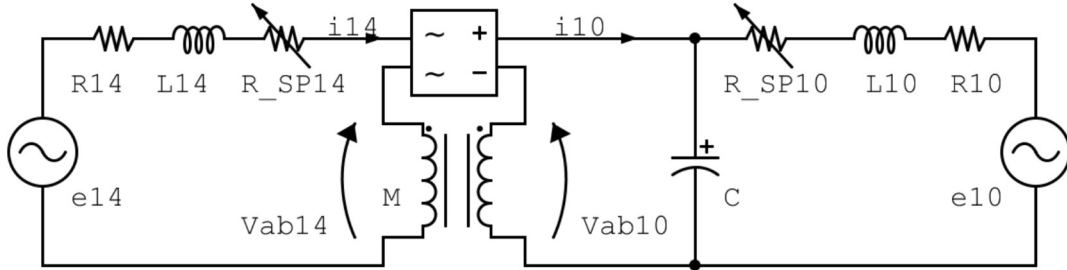


Figura 2-3 Circuito di rotore sincrono con la 10° armonica

Essendo:

$$|V_{ab10}| = \left| e_{10}^{10} + L_{10r} \frac{di_{10r}}{dt} - R_{10r} i_{10r} \right| \quad 2.11$$

Per l'altro circuito di rotore si avrà invece:

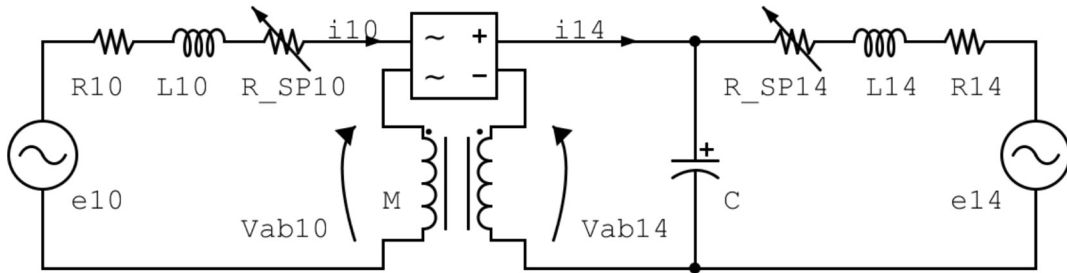


Figura 2-4 Circuito di rotore sincrono con la 14° armonica

Essendo:

$$|V_{ab14}| = \left| e_{14}^{14} - L_{14r} \frac{di_{14r}}{dt} - R_{14r} i_{14r} \right| \quad 2.12$$

Le tensioni indotte negli avvolgimenti di rotore possono essere calcolate integrando la seguente equazione:

$$e_v^h = h \frac{D}{2} N_{r,h} L \frac{d}{dt} \int_{-\frac{\pi}{2h}}^{\frac{\pi}{2h}} B_v^r(\beta, t) d\beta \quad 2.13$$

CAPITOLO 2

In tale equazione, gli indici conservano il medesimo significato già specificato nel presente paragrafo, essendo altresì D il diametro di alesaggio, L la lunghezza ideale di macchina (trascurando gli effetti di bordo) ed $N_{r,h}$ il numero di spire dell'avvolgimento di rotore.

Le forze controelettromotrici indotte, in corrispondenza dell' h -esima armonica di forza magnetomotrice in un avvolgimento di rotore avente h coppie polari, vengono ora calcolate nel caso di asincronismo tra l'armonica di MMF rotante ed la rotazione del rotore medesimo, considerando s il parametro di scorrimento; in particolare, per le armoniche rotanti nel verso convenzionalmente positivo si ha:

$$e_h^{h+} = E_{M,h} s \omega_s \cos(s \omega_s t) \quad 2.14$$

Mentre le per armoniche controrotanti si ha:

$$e_h^{h-} = E_{M,h} (2 - s) \omega_s \cos((2 - s) \omega_s t) \quad 2.15$$

Il termine $E_{m,h}$ posto nelle due precedenti equazioni è pari a:

$$E_{M,h} = \frac{D}{2} N_{r,h} L \frac{m_s}{2} \frac{4}{\pi} \frac{\mu_0}{2\delta} \frac{N_s K_{w,h}}{h^2} 2I_M \quad 2.16$$

Da queste equazioni si deduce che, sia l'ampiezza che la frequenza delle forze elettromotrici indotte aumentano linearmente man mano che il rotore si allontana dalla velocità di sincronismo.

2.3.4 Coppia e densità di coppia

La coppia erogata dalla macchina può essere ricavata dalla formula di Lorentz applicata agli avvolgimenti di rotore, come segue:

$$T_{el} = \frac{D}{2} N_{r,h} L \int_{-\frac{\pi}{2h}}^{\frac{\pi}{2h}} B_h^R(\beta, t) \theta_h(\beta, t) d\beta \quad 2.17$$

CAPITOLO 2

dove D è il diametro di alesaggio, L la lunghezza ideale di macchina e $\Theta_h(\beta, t)$ la distribuzione di corrente per unità di lunghezza sulla periferia del rotore avente h coppie polari.

Si ha che:

$$\Theta_h(\beta, t) = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} N_{r,h} I_e(t) \sin(h\beta - \delta) \quad 2.18$$

dove $I_e(t)$ è la corrente di eccitazione, δ è l'angolo di carico e $N_{r,h}$ è il numero di spire dell'avvolgimento che genera il campo.

Al sincronismo, essendo $s = 0$ ed, inoltre, $h = p$, si ottiene quindi:

$$T_{el} = DLm_s \frac{1}{\pi^2} \frac{\mu_0}{\delta} \frac{N_s K_{w,h}}{h} N_{r,h} I_M I_e(t) \int_{-\frac{\pi}{2h}}^{\frac{\pi}{2h}} \sin(h\beta) \sin(h\beta - \delta) d\beta \quad 2.19$$

Infine, svolgendo il calcolo dell'integrale, si ottiene:

$$T_{el} = DLm_s \frac{1}{2\pi} \frac{\mu_0}{\delta} \frac{N_s K_{w,h}}{h^2} N_{r,h} I_M I_e(t) \cos \delta \quad 2.20$$

La densità di coppia può essere ottenuta dividendo la coppia stessa per il volume di macchina (ipotizzandola idealmente cilindrica avente diametro esterno pari a D_0):

$$V = \frac{\pi}{4} D_0^2 L \quad 2.21$$

Pertanto, tale figura di merito risulta essere pari a:

$$T_{dens} = \frac{D}{D_0^2} m_s \frac{2}{\pi^2} \frac{\mu_0}{\delta} \frac{N_s K_{w,h}}{h^2} N_{r,h} I_M I_e(t) \quad 2.22$$

CAPITOLO 2

Introducendo il concetto di carico elettrico per lo statore:

$$a_s = \frac{m_s N_s K_{w,h} I_M}{\pi D} \quad 2.23$$

ed analogamente per il rotore:

$$a_r = \frac{N_{r,h} I_e}{\pi D} \quad 2.24$$

l'espressione della densità di coppia risulta pari a:

$$T_{dens} = D \lambda^2 \frac{2\mu_0}{\delta h^2} a_s a_r \quad 2.25$$

essendo λ il rapporto tra il diametro di alesaggio ed quello esterno di macchina.

Pertanto, sfruttando la 10° armonica di MMF si ottiene una densità di coppia più alta rispetto al caso in cui viene impiegata la 14° armonica.

Si noti infine che il carico elettrico del rotore è comunque limitato dalla presenza di due avvolgimenti distinti presenti su di esso; tale limitazione riduce la densità di coppia della metà rispetto ad una macchina sincrona tradizionale.

2.4 Test di laboratorio

2.4.1 Test di isolamento

È stato eseguito un test di isolamento sugli avvolgimenti dello statore e del rotore rispetto al telaio. Per eseguire tale test, si è utilizzato lo strumento Instek GPT-9800 impostato a 1000 V AC @ 50Hz per 1 minuto usando una rampa di tensione. La massima corrente di dispersione è: $V_{test} = 1000 \text{ V} \rightarrow I = 0.98 \text{ mA}$.

2.4.2 Misure di impedenza degli avvolgimenti

L'impedenza di ciascuna fase dello statore e di entrambi gli avvolgimenti di rotore è stata misurata utilizzando un misuratore RLC automatico FLUKE® PM6306 @ 50 Hz.

		Resistenza [Ω]	Induttanza [mH]
STATORE	R	0.315	1.527
	S	0.323	1.573
	T	0.321	1.788
ROTORE	5th	0.3853	1.767
	7th	0.4557	1.756

Tabella 2.2 Misura dell'impedenza degli avvolgimenti del SESM

2.5 Primi risultati

Lo sviluppo del progetto ha portato ai seguenti primi risultati, ovvero all'individuazione della velocità di sincronismo nella rotazione a SX (5a armonica di campo):

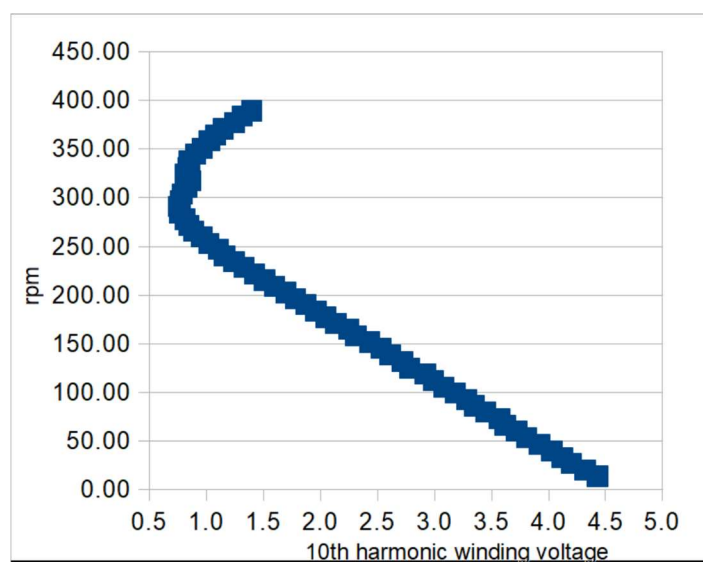


Figura 2-5 Velocità di sincronismo 5° armonica

CAPITOLO 2

Analogamente, è stata altresì individuata la velocità di sincronismo nella rotazione a DX (7a armonica di campo):

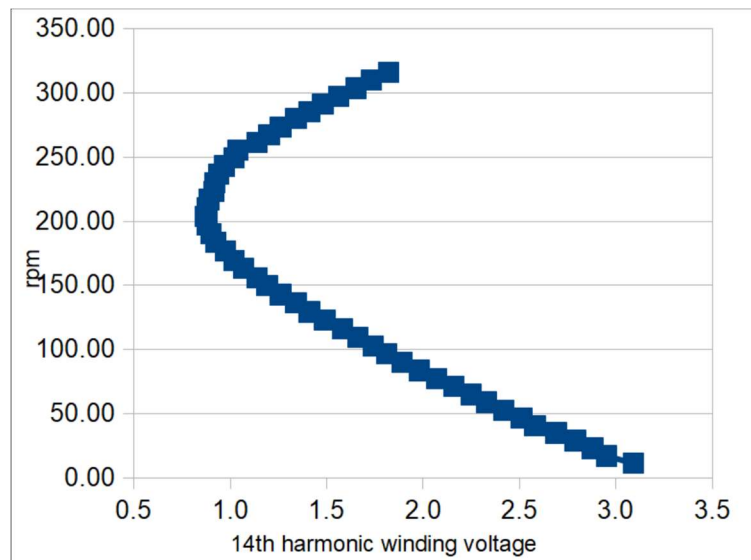


Figura 2-6 Velocità di sincronismo 7° armonica

Si noti che, nella rotazione a DX, il sistema ha un valore di minimo intorno ai 214.29 rpm.

2.5.1 Confronto tra le simulazioni e le misure di laboratorio:

2.5.1.1 5^a armonica:

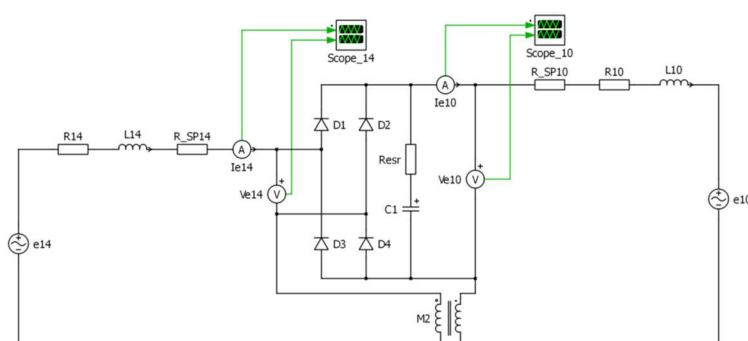


Figura 2-7 Simulazione circuito equivalente 5° armonica

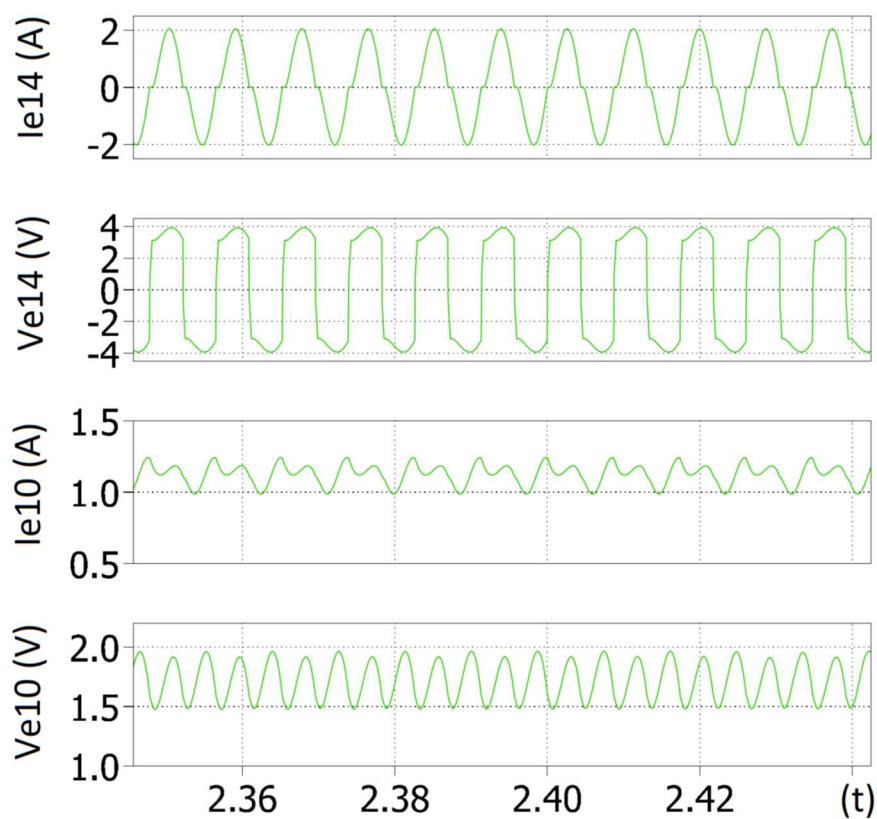


Figura 2-8 Simulazione degli andamenti del circuito 5° armonica

CAPITOLO 2

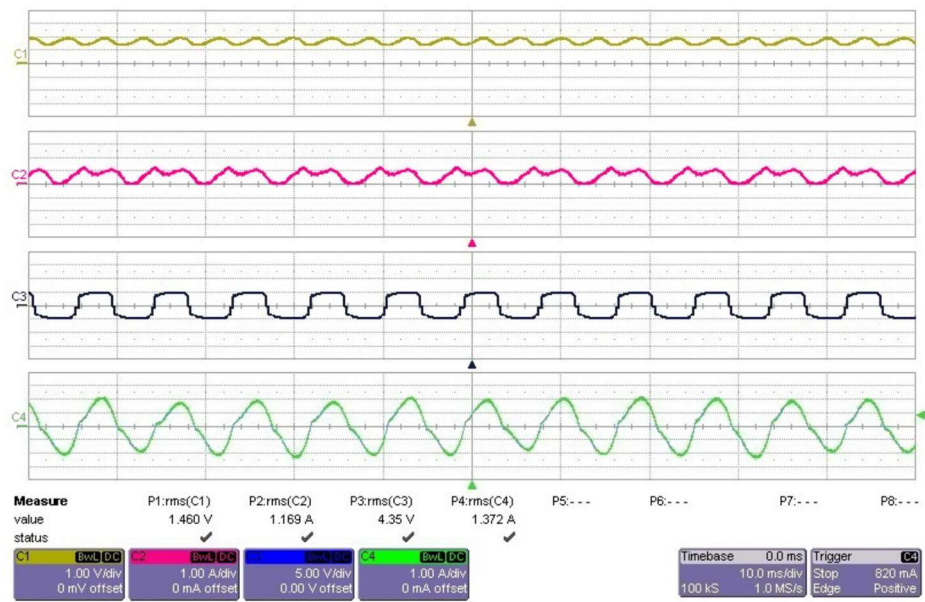


Figura 2-9 Risultati sperimentali del circuito di 5° armonica

2.5.1.2 7^a armonica:

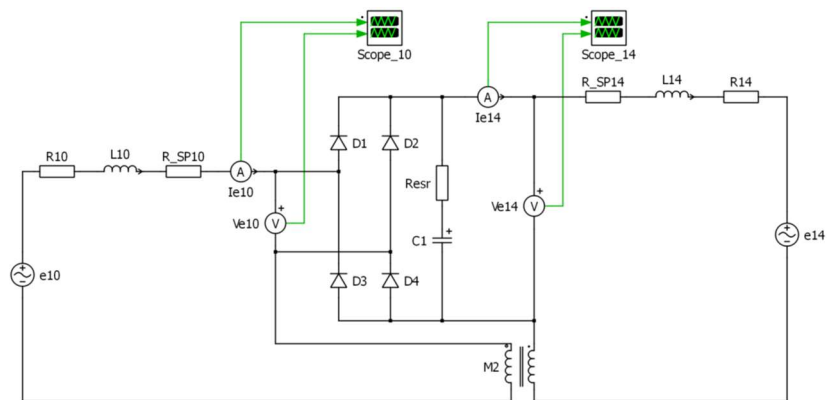


Figura 2-10 Simulazione circuito equivalente 7° armonica

CAPITOLO 2

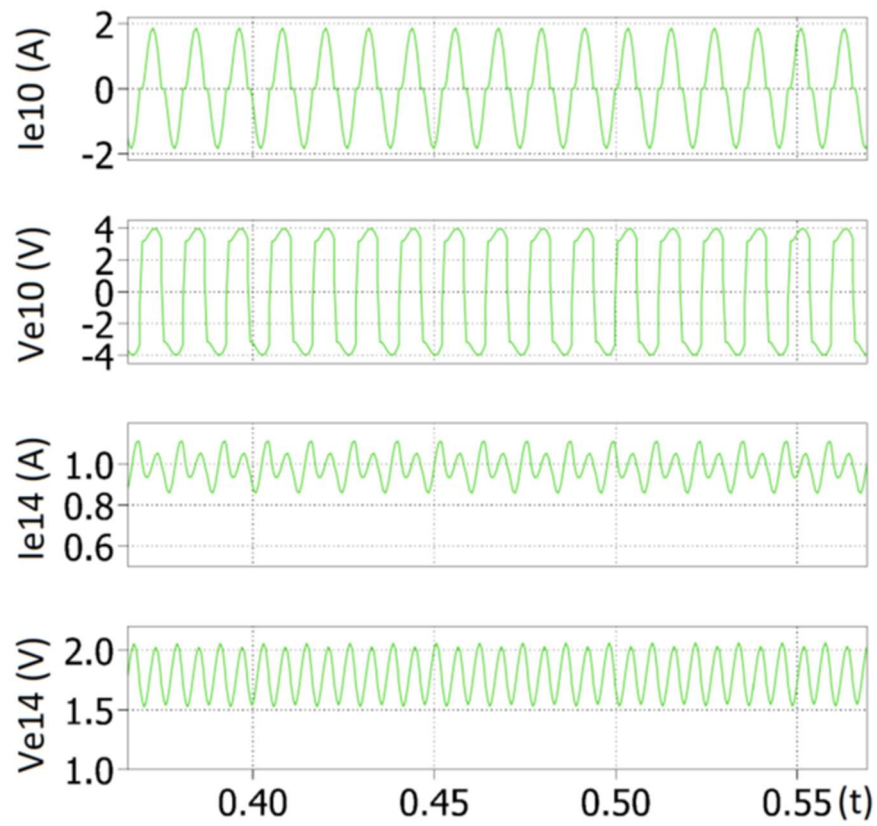


Figura 2-11 Simulazione degli andamenti del circuito 7° armonica

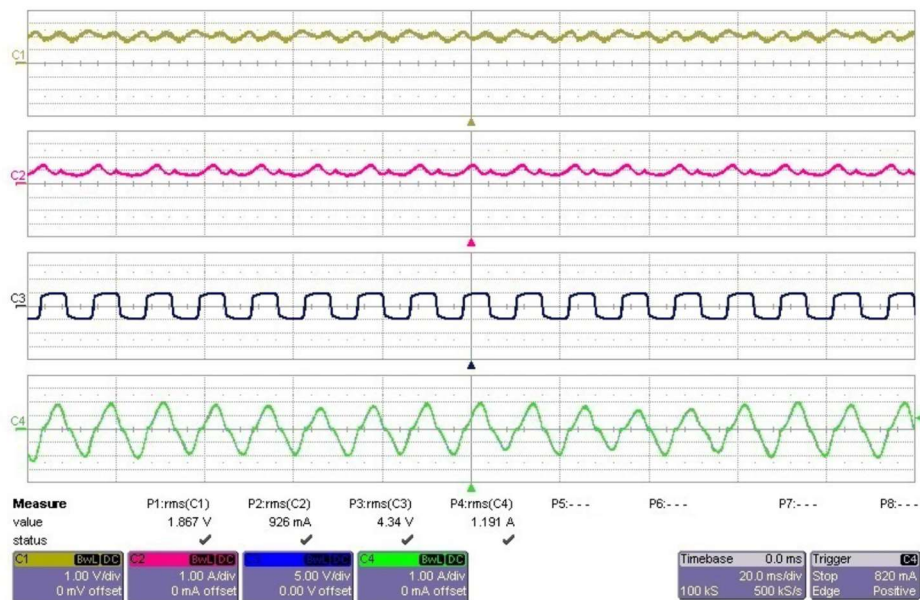


Figura 2-12 Risultati sperimentali del circuito di 7° armonica

3. LA MACCHINA CLAW POLE

3.1 Introduzione

È stata effettuata la realizzazione di una nuova unità di motorizzazione, basata su un differente principio operativo, ovvero la cosiddetta macchina “Claw-Pole”. Mentre le macchine Claw-Pole tradizionali montano un avvolgimento di armatura sullo statore e hanno un rotore a poli salienti con avvolgimento alimentato da un sistema di spazzole-anelli, in questo capitolo viene proposto un motore avente lo statore dotato di avvolgimenti anulari e il rotore a magneti permanenti.

Tale dispositivo è un motore elettrico sincrono ad alta densità di coppia, avente rotore esterno a magneti permanenti, realizzato mediante l’impiego di materiali SMC (Soft Magnetic Composites). Lo statore è di tipologia cosiddetta “claw pole”, ovvero i poli sono costituiti da veri e propri “artigli” o “griffe” attraverso i quali viene fatto passare il flusso di induzione magnetica. In questa tesi il motore viene studiato nella configurazione a magneti permanenti a causa della elevata densità di coppia, che lo renderebbe adatto per attuazioni di carichi speciali.

L’idea originale è stata mutuata dalla tecnologia impiegata negli attuatori e negli alternatori a tutt’oggi utilizzati nel campo dell’automotive e della robotica; il nostro motore, rispetto alla tecnologia già esistente sul mercato, fornisce però una densità di coppia superiore rispetto ai progetti tradizionali e, pertanto, è davvero assai competitivo per una vastissima gamma di applicazioni in ambito industriale.

La vera innovazione è costituita dall’elevata densità di coppia rispetto alle tecnologie finora esistenti: infatti, il nostro motore è in grado di erogare fino a 37,65 Nm/L per bassi valori di duty-cycle e di 10,75 Nm/L per operazioni in modalità continua (a pieno duty-cycle).

Particolare attenzione è stata rivolta all'uso sperimentale dei materiali impiegati: l'acciaio laminato non è infatti indicato per questa tipologia di macchina, in quanto la distribuzione del flusso di induzione magnetica si sviluppa in tutte e tre le dimensioni spaziali; si è pertanto reso necessario l'impiego di materiali SMC (Soft Magnetic Composites), composti da polveri di metallo, caratterizzati da una permeabilità magnetica isotropica (ovvero uguale in tutte le direzioni) e bassissima conduttività; con tale soluzione, si è ottenuto il duplice vantaggio di diminuire la riluttanza offerta al flusso di induzione magnetica di macchina e la notevole limitazione delle correnti parassite, che costituiscono una delle principali cause di perdita di efficienza delle macchine elettriche.

3.2 Descrizione del progetto “claw-pole”

Le macchine “claw-pole” sono largamente utilizzate negli alternatori installati nelle automobili. Per applicazioni robotiche, tipo quelle impiegate nei bracci protesici, si richiede che esse operino in uno spazio compatto, a bassa velocità e con elevata coppia.

Esse possono essere classificate entro la famiglia delle macchine elettriche a flusso trasversale. La semplice struttura dell'avvolgimento di armatura (cosiddetta “hoop-wound”) diminuisce i costi di fabbricazione, rendendo tale dispositivo particolarmente adatto ad una produzione di massa (Lundmark S. , 2005) (Lundmark & Hamdi, 2006).

Questo tipo di macchina produce densità di coppia molto più alte rispetto a quelle convenzionali, per il fatto che i circuiti elettrici e magnetici risultano disaccoppiati, cosicché l'incremento del numero di coppie polari non comporta l'incremento del volume degli avvolgimenti. In conseguenza di ciò, la forza magnetomotrice (MMF) per ciascun polo non viene ridotta (Mecrow, Jack, Atkinson, Dickinson, & Swaddle, 2002) (Cai, Gu, Yi, & Fahimi, 2014).

CAPITOLO 3

Generatori sincroni “claw-pole” di piccola taglia usati quali alternatori nelle automobili sono già stati introdotti in letteratura (Bai, Zhang, Gruenberger, & Nolle, 2007) (Min, Xiuhe, & Changqing, 2016), ove si riporta, ad esempio, un alternatore “claw-pole” ad eccitazione ibrida progettato per soddisfare il crescente fabbisogno di energia a bordo del veicolo.

Un altro esempio di generatore “claw-pole” per un sistema di raccolta dell’energia, che converte l’energia cinetica in elettricità, viene altresì presentato in (Mönnich, Daweke, & Lehr, 2014). Tutte queste applicazioni traggono vantaggio dalla struttura “claw-pole” che consente un’elevata densità di coppia.

In aggiunta, il progetto di un rotore esterno consente di massimizzare la coppia, pur rimanendo la macchina confinata in determinati spazi, a causa del fatto che il raggio del rotore viene massimizzato (dal momento che la coppia è proporzionale al quadrato del raggio stesso). In aggiunta a ciò, la struttura a rotore esterno riduce il volume degli avvolgimenti di armatura, cosicché le perdite nel rame possano essere ridotte. I magneti permanenti sono installati sulla superficie interna del rotore, cosicché essi possano essere ben protetti in caso di eventi di emergenza e la loro struttura di sostegno possa essere agevolmente rimossa in caso di manutenzione (Zhang, Wang, Liu, & Du, 2015).

Diversi motori sincroni di tipologia “claw-pole” a rotore esterno con magneti permanenti sono stati proposti in questi ultimi anni, aventi applicazione in alternatori per automobili, pompe e ventole (Guo, Zhu, Watterson, & Wu, 2003) (F. Jurca, 2011) (Zhang, Zhang, & Liu, 3D Finite element analysis and experiment for axial sectional claw pole machine with permanent magnet outer rotor, 2010) (Leitner, Gruebler, & Muetze, 2018); pur tuttavia, tutte queste applicazioni sono caratterizzate da alta velocità, elevata taglia volumetrica e bassa coppia rispetto al motore che viene proposto in questa sede.

Uno dei punti di attenzione, per quanto riguarda il progetto, è la densità di flusso; esso, infatti, viaggia da un artiglio ad un altro, cosicché lo statore è caratterizzato da un maggior flusso disperso rispetto alle macchine tradizionali. Per di più, il suo percorso tridimensionale aumenta la complessità del progetto risultante dal requisito della restrizione del volume occupato (Rebhi, Ibala, & Masmoudi,

2014). Questi due sono i principali svantaggi che limitano l'efficienza della macchina in questione e condizionano la scelta dei materiali nella configurazione proposta.

Perdite del flusso magnetico si verificano primariamente attorno ai magneti del rotore e intorno alle bobine di statore. Altra sede di perdita di flusso è tra artigli adiacenti; altra ancora è tra le varie fasi di statore (Lundmark S. , 2005). La riduzione di efficienza causata dai flussi dispersi è un compromesso con l'ottenimento di una elevata densità di coppia, dovuta all'utilizzo della struttura in questione.

L'acciaio laminato non è pertanto la scelta adatta per il materiale ferromagnetico di macchina, a causa della presenza di una distribuzione tridimensionale del flusso magnetico concatenato con i suoi elementi. Piuttosto, come poc'anzi accennato, i materiali compositi morbidi (Soft Magnetic Composites) costituiti da polveri di metallo rappresentano la scelta migliore, dal momento che possiedono una permeabilità magnetica isotropica (e quindi non direzionale) e, allo stesso tempo, bassa conducibilità elettrica; ciò consente la conduzione del flusso magnetico nelle tre dimensioni, riuscendo comunque a contenere le perdite per correnti parassite (Guo, Zhu, Watterson, & Wu, 2003).

In questa sede, viene proposta un motore sincrono a magneti permanenti e a rotore esterno, avente elevata densità di coppia, realizzato tramite materiali SMC al posto dell'acciaio laminato nello statore. La sua applicazione al dispositivo di emergenza in caso di eventi catastrofici può essere comunque estesa nell'ambito automobilistico e della robotica.

Questo motore, inoltre, fornisce alta densità di coppia rispetto ad analoghe macchine convenzionali; pertanto, può essere competitivo per una realmente vasta gamma di applicazioni.

L'idea di fondo è pertanto quella che la coppia venga generata quando il flusso di rotore tende ad essere allineato con quello di statore; il flusso stesso, generato dal magnete permanente, attraversa il traferro, il più vicino artiglio di statore, il giogo di statore (realizzato in SMC), ritorna successivamente nell'artiglio posto nell'altro lato dello statore ed, infine, attraversando di nuovo il traferro, si richiude nell'altro polo del magnete permanente di rotore (Lundmark & Hamdi, 2006) .

3.2.1 Struttura proposta ed analisi del modello

La metodologia analitica di progetto viene qui riportata, al fine di individuare la geometria di macchina secondo le specifiche progettuali.

Le dimensioni ed i parametri del motore proposto sono riportati nella tabella seguente:

Parametro	Quantità	Unità di misura
Velocità stimata	100	rpm
Potenza stimata	120	W
Coppia stimata	7.53	Nm
Densità di corrente	19.1	A/mm ²
Frequenza stimata	16.67	Hz
Numero di poli	20	
Numero di spire per fase	167	
Diametro esterno rotore	71	mm
Diametro interno rotore	65	mm
Diametro statore	60.4	mm
Diametro avvolgimento	40	mm
Lunghezza media traferro	0.3	mm
Lunghezza del nucleo di ciascuna fase	15	mm
Volume complessivo	0.2	L

Tabella 3.1 Parametri della macchina Claw Pole

CAPITOLO 3

La coppia elettromagnetica è data da:

$$T_{em} = 60P_n/(2\pi n_n) \quad 3.1$$

dove P_n e n_n sono rispettivamente la potenza e la velocità stimata.

Il passo polare τ può essere ottenuto da:

$$\tau = \pi D_s/20 \quad 3.2$$

essendo D_s il diametro di statore.

Il valore di picco del flusso generato dai magneti permanenti è calcolato:

$$\phi_{PM_{max}} = (2/\pi)B_{gPM}\tau l_{stack} \quad 3.3$$

dove $2/\pi$ è il coefficiente della serie di Fourier approssimante la forma d'onda rettangolare, B_{gPM} è il valore medio di induzione al traferro e l_{stack} la lunghezza del nucleo di lamierino di ciascuna fase.

Per questa tipologia di macchina, la coppia può essere calcolata come:

$$T_{em} = (3/2)p^2\phi_{PM_{max}}^2 I_{peak}\omega_{coil} \quad 3.4$$

dove p è il numero delle coppie polari, I_{peak} è la corrente di picco in ciascuna spira dell'avvolgimento e ω_{coil} è il numero di spire della bobina.

Di conseguenza, la densità di corrente (RMS) può essere ricavata dal valore totale (RMS) della corrente medesima come:

$$j_{rms} = I_{peak}\omega_{coil}/(\sqrt{2}A_{slot}) \quad 3.5$$

CAPITOLO 3

Per assumere un elevato valore di densità di coppia, il fattore di riempimento viene posto pari al 70%.

3.2.2 Stima delle perdite nel rame

Le perdite nel rame rappresentano uno dei parametri più importanti per l'efficienza della macchina.

La resistenza del rame può essere calcolata, con ovvio significato dei simboli, come:

$$R_{Cu} = (\rho_{Cu} L_{Cu}) / A_{Cu} \quad 3.6$$

Pertanto, le perdite totali possono essere calcolate, con ovvio significato dei simboli, come:

$$P_{Cu} = 3I^2 R_{Cu} \quad 3.7$$

3.3 Rendering 3D

Di seguito si riporta il disegno 3D di progetto della macchina “claw-pole” realizzata, così da evidenziarne l’aspetto sia interno che esterno:

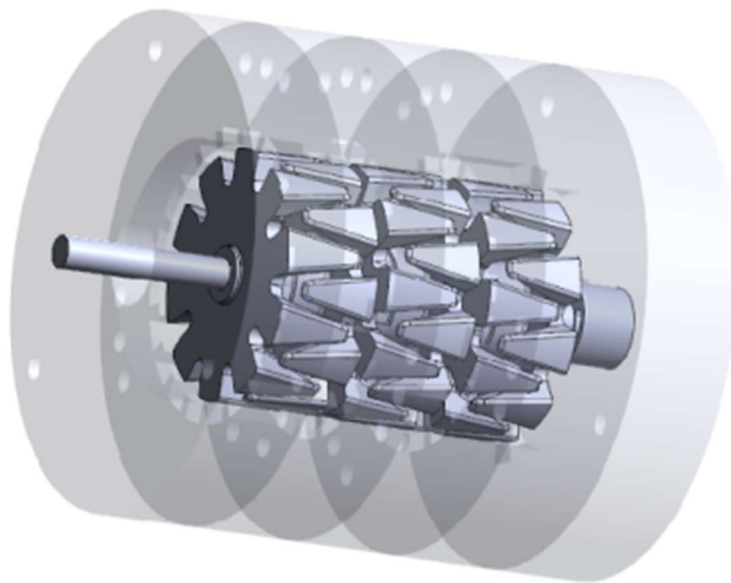


Figura 3-1 Rendering 3D macchina Claw Pole

Il disegno del progetto è stato ulteriormente raffinato, prestando altresì la massima attenzione alla lavorazione meccanica del motore, mettendo in opera le tecnologie comunemente adottate nell’industria per la sua fattiva realizzazione:

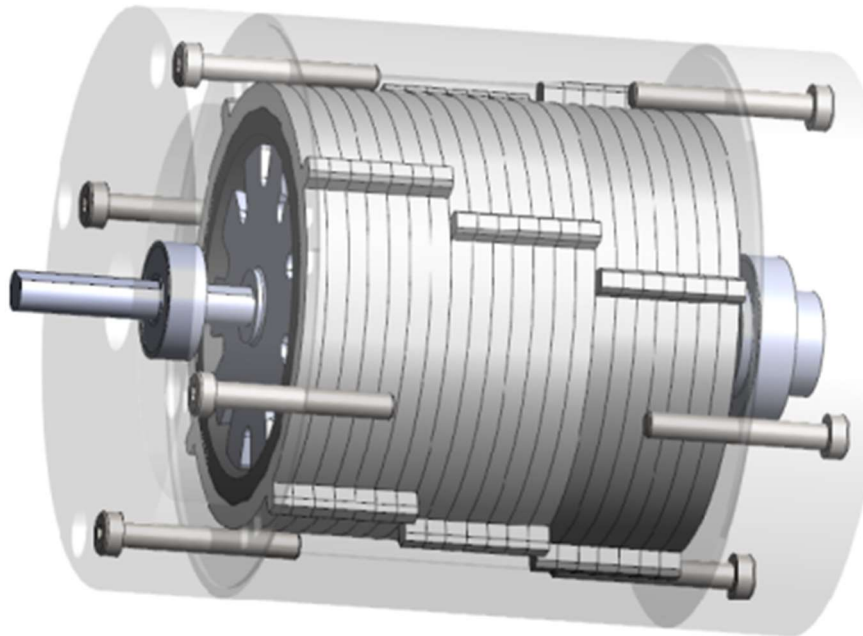


Figura 3-2 Struttura di sostegno della macchina Claw Pole

3.4 Alimentazione e relativo azionamento

È stata altresì realizzata l'elettronica di potenza atta all'azionamento del motore "claw-pole" sopra illustrato. Di seguito l'illustrazione del circuito integrato realizzato:

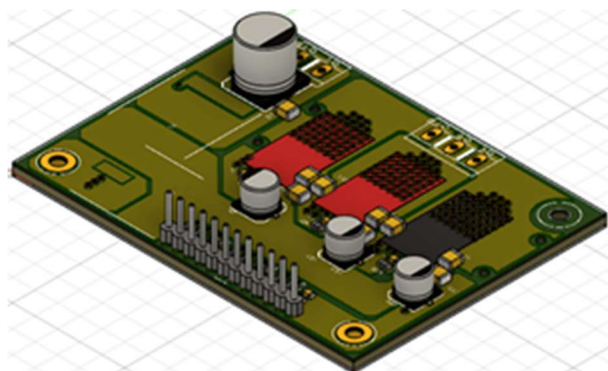


Figura 3-3 Circuito integrato per l'alimentazione della macchina claw-pole

Di seguito verranno presentati i principali passi di progetto che hanno portato alla realizzazione fisica della scheda PCB per l’azionamento del dispositivo attuatore in caso di disaster recovery. In particolare, sono mostrati e successivamente approfonditi i principali requisiti che la scheda dovrà soddisfare e l’architettura scelta per quest’ultima. Infine, viene analizzata la parte di progetto svolta su CAD elettronici che ha permesso di realizzare la scheda PCB su circuito stampato.

3.4.1 Inverter

La scheda progettata di interpone tra la valvola e i sistemi di controllo e si occupa di gestire la sezione di elettronica di potenza. Tale scheda viene denominata “inverter”. L’inverter è un convertitore di potenza c.c./c.a. che permette la conversione da una sorgente di tensione continua a una tensione alternata tipicamente sinusoidale della quale è possibile regolare ampiezza e frequenza. Nel caso in oggetto, dovendo alimentare un motore elettrico trifase, viene utilizzato un inverter trifase, costituito da tre sezioni half-bridge monofasi (vedi Figura). Questa configurazione “tipica” utilizza in totale sei switch. Ogni ramo dell’inverter è connesso a una fase del motore e vengono generate tre tensioni sfasate fra loro di 120° . Nell’esempio di Figura la tensione di BUS DC (E) è stata divisa in due ($E/2$) e si è fissato il potenziale intermedio a 0 V . In questo modo si rientra nella impostazione tipica utilizzata per lo studio dell’inverter. La massa è una massa virtuale, utilizzata solo al fine di semplificarne lo studio. Prendendo il primo ramo come esempio, si ha che quando $Q1$ è chiuso (e quindi $Q4$ aperto) la tensione di fase VAO vale $E/2$, e viceversa, $-E/2$ con $Q4$ chiuso e $Q1$ aperto.

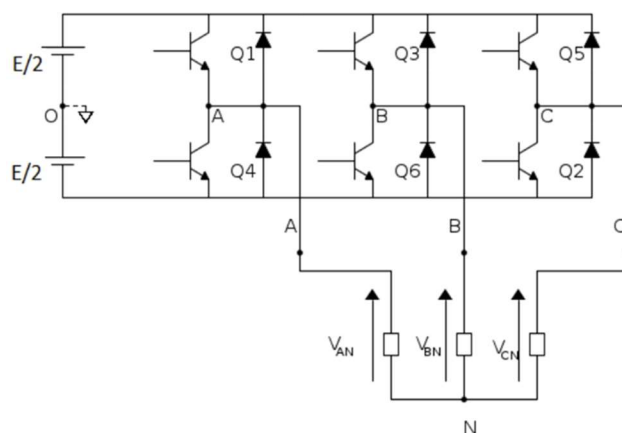


Figura 3-4 Inverter trifase per macchina Claw Pole

CAPITOLO 3

Nella nostra applicazione la tensione di BUS sarà quella fornita dal convertitore boost e il potenziale $E/2$ non sarà disponibile. Per dimensionare correttamente il convertitore boost occorrerà quindi determinare il livello di tale tensione. Come sistema di modulazione si è scelto di utilizzare la seno-triangolo (conosciuta meglio come PWM) che può essere implementato facilmente in qualsiasi microcontrollore, scegliendo come frequenza di commutazione degli switch 25 kHz.

L'inverter utilizzato, visibile nella figura che segue è realizzato con tre moduli di potenza IFX007T della Infineon configurati in Half-bridge per ramo.

Le caratteristiche dell'inverter sono (per ramo):

- Tensione max: 40V;
- Corrente max: 50°;
- Temperatura di funzionamento(min/max): -40° / +150°;
- Protezioni hardware: Inversione polarità, Sovratemperatura; Sovracorrente;
- Regolazione “slew rates” per ottimizzazione EMI (interferenze elettromagnetiche);
- Ingresso per segnali di pilotaggio da microcontrollori.

3.4.2 Schematico

Di seguito si riporta lo schematico della board di potenza per il pilotaggio del dispositivo.

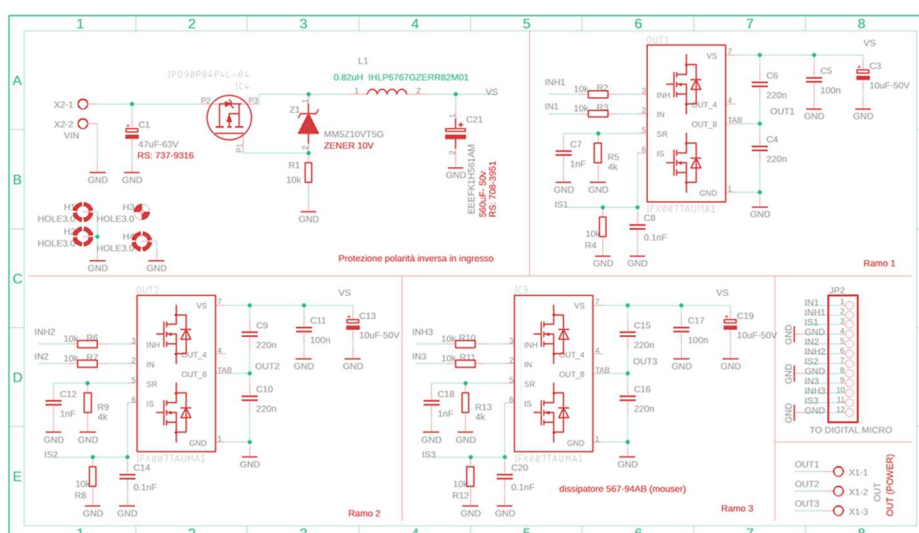


Figura 3-5 Schematico della board per azionamento di macchina claw-pole

Lo schema circuitale dell'inverter qui presentato si può dividere idealmente in una parte in ingresso, composta da un filtro a "pi greco", e un'altra parte relativa ai rami di ponte.

3.1.1.1. Filtro a "pi-greco"

Questo filtro viene collocato in ingresso all'inverter per ragioni di compatibilità elettromagnetica, vale a dire per non immettere disturbi elettromagnetici nella linea di alimentazione (disturbi condotti) e nell'ambiente circostante (disturbi irradiati).

Come si può vedere dalla figura seguente, oltre al filtro è presente anche una protezione per polarità inversa, perché, nel caso venisse fornita una tensione negativa al ramo di ponte, i diodi di richiusura si troverebbero polarizzati direttamente e, conseguentemente, verrebbe cortocircuitata l'alimentazione.

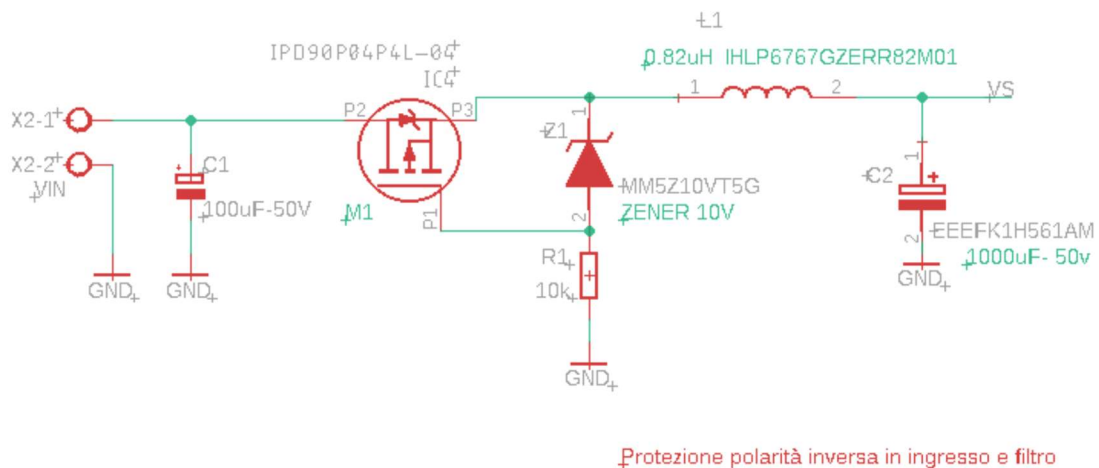


Figura 3-6 Filtro a "pi-greco"

I componenti del filtro e della protezione sono:

- M1: MOSFET a canale p (per essere portato in conduzione ha bisogno di una V_{GS} negativa): quando la tensione di alimentazione viene fornita con la corretta polarità, il diodo interno al dispositivo conduce, il source (P3) assume il potenziale alto della tensione di alimentazione e dato che la gate (P1) è a massa, la V_{GS} è negativa e quindi il MOSFET è in conduzione¹;
- Diodo *zener*: viene utilizzato per mantenere stabile ad un valore di -10V la tensione V_{GS} del MOSFET (dalle caratteristiche tecniche del dispositivo).
- R1: porta a terra il potenziale di gate del MOSFET;
- C2 (DC-link): questo componente è uno dei più importanti dell'inverter in quanto funge da buffer di energia nel processo di commutazione.

¹ Il dispositivo non può condurre con una la polarità dell'alimentazione invertita, perché nell'ipotesi in cui fosse in conduzione, il source si troverebbe ad un potenziale negativo, la gate si troverebbe a massa e la V_{GS} sarebbe positiva e quindi non si forma il canale.

3.1.1.2. Ramo di ponte

Il singolo ramo di ponte è rappresentato nella figura seguente:

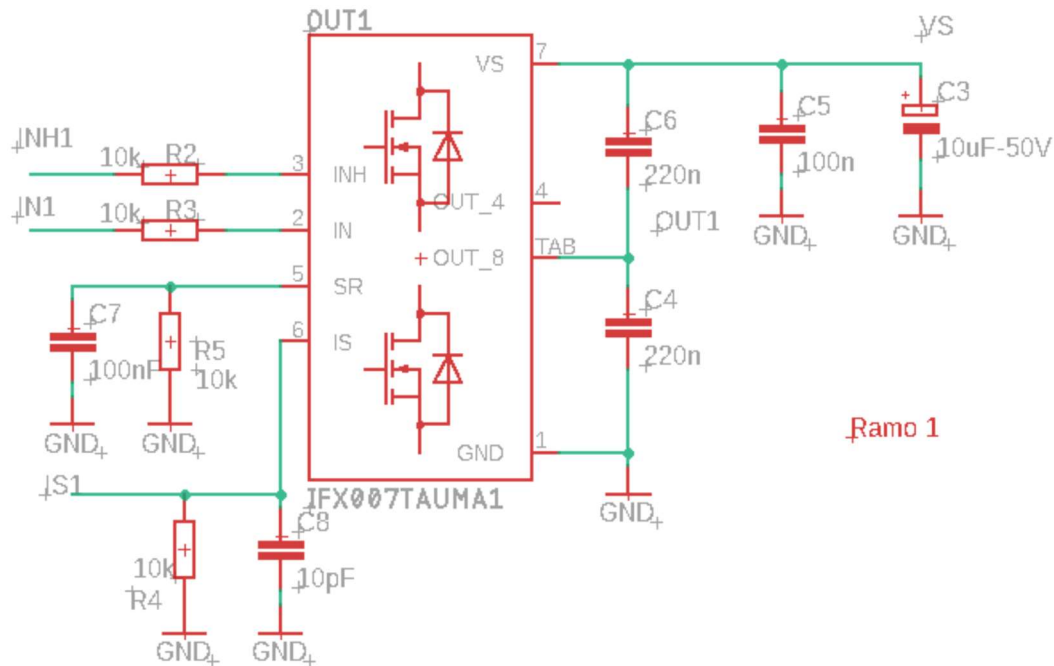


Figura 3-7 Ramo di ponte dell'inverter trifase

I componenti scelti sono:

- C₅: questo condensatore in ceramica supporta il DC-link a mantenere basso il *ripple* di tensione V_S e copre i transitori veloci, per cui, il valore deve essere piuttosto basso; è stato scelto pari a 100 nF;
- C₆: per evitare l'ingresso di disturbi elettromagnetici EMI16 nel modulo, tra l'ingresso V_S e l'uscita OUT viene impiegato questo condensatore di capacità, indicata dal costruttore, pari a 220 nF;
- C₄: viene impiegato per contenere i disturbi EMI e ESD17; la capacità vale 220 nF;

- C3: quando si verificano cortocircuiti a bassa impedenza, l'elevata corrente di cortocircuito provoca sulla linea di alimentazione una caduta di tensione sufficientemente alta da causare un abbassamento di tensione sul pin di alimentazione V_S del dispositivo; pertanto, questo condensatore ha la funzione di stabilizzare la tensione V_S , durante il cortocircuito, in modo tale da garantire al dispositivo il tempo necessario per attivare la limitazione di corrente ed eventualmente per disattivarsi; il costruttore consiglia un valore di 10 μF ;
- R5 (R_{SR}): il datasheet dell'IFX007T raccomanda un periodo di commutazione pari a dieci volte il tempo di salita/discesa².

3.4.3 Layout finale della board

Il layout del circuito stampato (*printed circuit board* ovvero PCB) è stato ottenuto considerando che lo stesso PCB deve rispettare i seguenti requisiti:

- Condurre le correnti prestabilite;
- Garantire l'isolamento tra le piste;
- Contenere disturbi elettromagnetici;
- Consentire la dissipazione del calore generato.

Poiché essi sono correlati tra di loro, il risultato conseguito si ritiene essere un compromesso tra requisiti stessi.

² Il produttore, inoltre, fornisce il valore dei tempi di salita e dei tempi di discesa (misurati per diverse temperature), in funzione della resistenza collegata al pin SR del MOSFET superiore e di quello inferiore; tra questi, a parità R_{SR} , risultano maggiori quelli del MOSFET superiore, in particolare il tempo di salita, dal quale dunque dipenderà la massima frequenza di commutazione.

CAPITOLO 3

Il layout della board che segue principalmente le regole di progettazione standard e quelle fornite dal produttore del componente IFX007T. Per migliorare la dissipazione del calore prodotto dal componente di potenza, su PCB sono stati create delle aree termiche che migliorano la dissipazione e il piano GND.

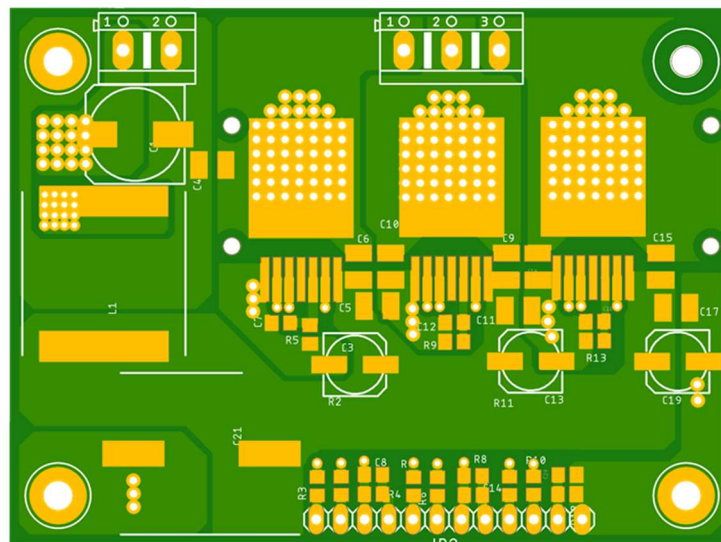


Figura 3-8 Strato superiore della PCB

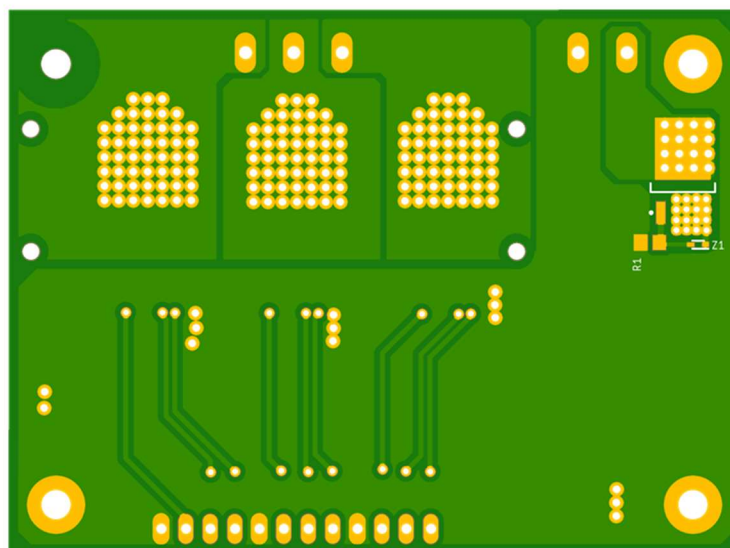


Figura 3-9 Strato inferiore della PCB

CAPITOLO 3

Di seguito la versione 3D finale della board dal lato superiore e inferiore.

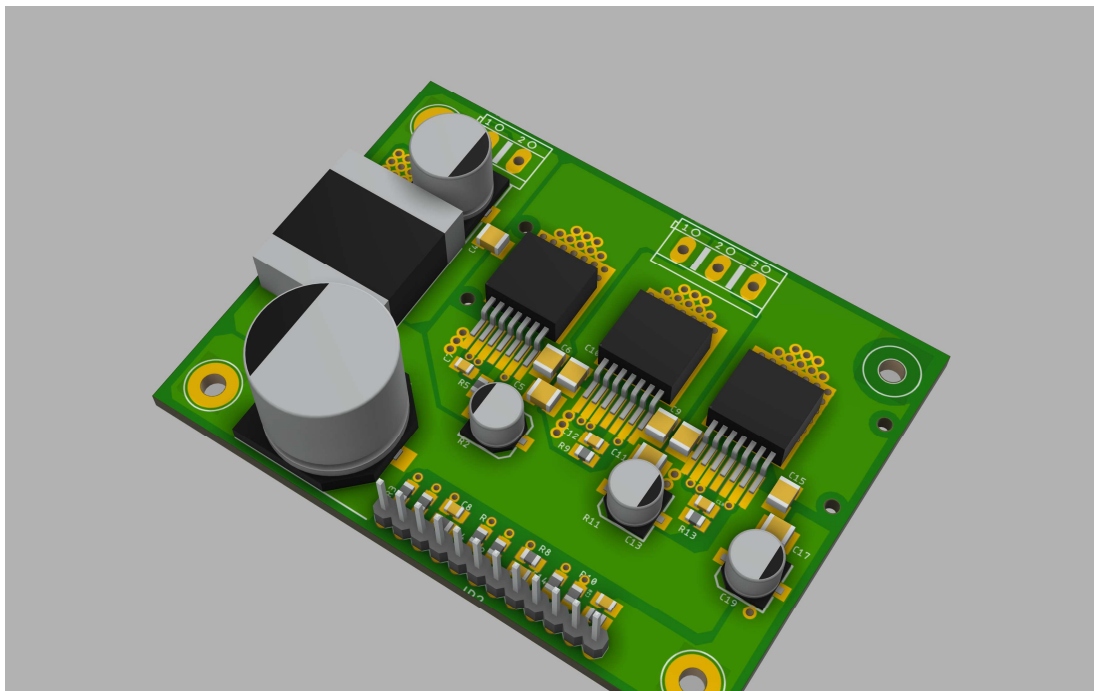


Figura 3-10 Vista 3D laterale SX della PCB

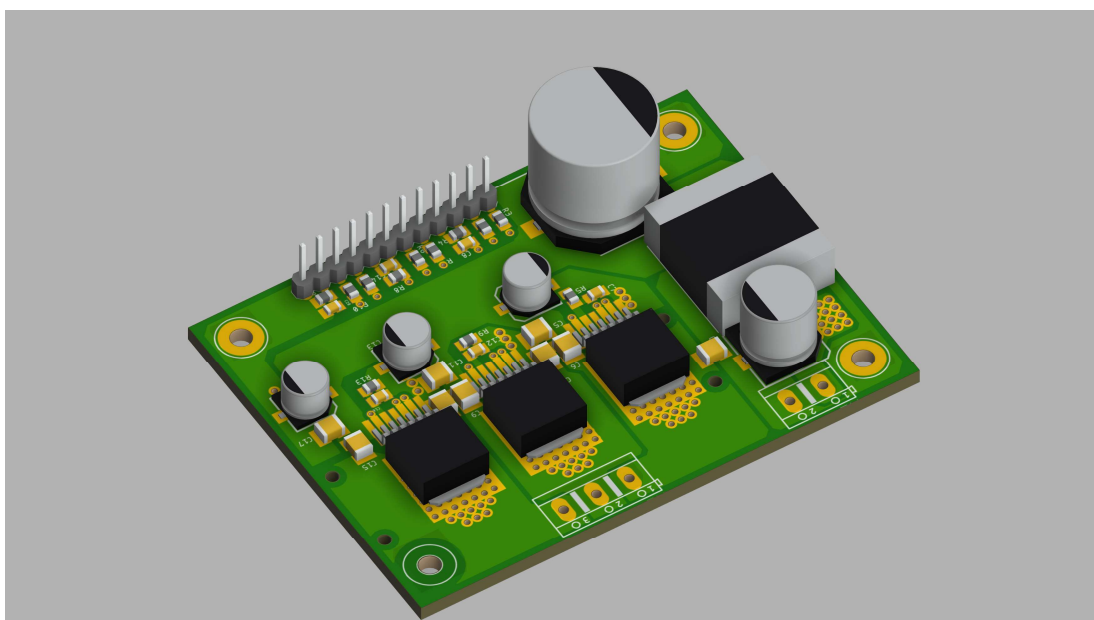


Figura 3-11 Vista 3D laterale DX della PCB

3.4.4 Considerazioni conclusive sull'inverter

- Le piste del circuito stampato devono essere dimensionate in modo da riuscire a portare la corrente senza che la loro temperatura aumenti troppo. Lo spessore di tutte le tracce è stato scelto pari a 35 μm come compromesso tra costo e dimensioni totali dell'inverter. La larghezza delle piste di segnale, lato bottom, è stata scelta pari a 0,5mm. Con questa larghezza e con lo spessore prefissato, (derivante dalle norme IPC-222118), i circa 1,25 A di corrente che scorrono in queste piste provocano un incremento di temperatura (rispetto alla temperatura ambiente) di 10 °C. Se si considera che la corrente maggiore scorre nelle tracce collegate al pin IS ed è pari a 6,1 mA, l'incremento di temperatura precedente è più che accettabile;
- Sul lato *top* sono stati utilizzati dei *pad* poiché le correnti da trasportare sono elevate; essi infatti garantiscono una sezione maggiore della parte conduttiva e una superficie maggiore per lo scambio termico con l'ambiente, per l'aumento del quale si può ricorrere ad un sistema di raffreddamento a convezione forzata, che utilizza alcune ventole per rimuovere, dalla superficie del PCB, il calore prodotto nelle piste;
- La distanza di isolamento tra le piste deve essere sufficiente per evitare la formazione di archi elettrici dovuti a sovratensioni. Le condizioni ambientali e il materiale di isolamento influiscono notevolmente sulla distanza minima che garantisce l'isolamento. Esistono alcune tecniche per aumentare l'isolamento senza modificare le dimensioni del PCB, ma, dato che per questo caso le tensioni nel circuito non sono elevate, viene considerata solo la distanza tra le tracce;
- La distanza tra le piste è stata fissata tenendo anche conto del fatto che l'umidità o la polvere che si accumula sul circuito stampato può andare a ridurre la distanza effettiva di isolamento tra le piste stesse; inoltre, poiché tra una pista e l'altra si formano delle capacità parassite, alle alte frequenze si possono verificare dei piccoli spikes sull'alimentazione;

- I disturbi elettromagnetici EMI devono essere contenuti quanto più possibile sia in termini di emissione che di ricezione, poiché questi possono provocare malfunzionamenti sia ai dispositivi elettronici presenti nell'ambiente circostante che a quelli presenti nell'inverter. La disposizione dei componenti sul circuito stampato segue la successione esatta dei componenti nello schema circuitale, ossia prima i componenti relativi al filtro e alla protezione per la polarità inversa, poi i tre moduli in parallelo con i relativi componenti; in questo modo, si limita la lunghezza delle piste e delle induttanze parassite associate alle piste stesse; inoltre, poiché alle alte frequenze un induttore si comporta da antenna, le induttanze parassite ridotte permettono di contenere i disturbi EMI;
- Le piste di potenza sono state posizionate su un layer (top) diverso da quello dove sono presenti le piste di segnale (bottom), ciò per minimizzare la quantità di rumore che queste ultime possano raccogliere, come i disturbi EMI e crosstalk; per non far entrare nei tre moduli dell'inverter i disturbi elettromagnetici EMI, i quattro condensatori di disaccoppiamento (per ogni modulo) sono stati posizionati il più vicino possibile al dispositivo IFX007T; le induttanze parassite, inoltre, possono alterare il comportamento di questi condensatori e renderli inefficaci alle alte frequenze;
- Si è evitato di formare angoli retti con le tracce, poiché tendono ad assumere la forma di una spira, la quale, in questo caso, si comporterebbe da "antenna";
- Il calore generato in un apparecchio elettronico deve comunque essere disperso nell'ambiente per evitare che la temperatura dei componenti aumenti fino a portarli al danneggiamento; questo compito viene svolto dai dissipatori, i quali sono degli elementi formati da materiale ad alta conducibilità termica e presentano una elevata superficie dove far avvenire lo scambio termico con l'ambiente. Nell'inverter, le cause maggiori della produzione di calore sono: commutazione degli interruttori, potenza joule dissipata nella fase di ON negli interruttori e potenza joule dissipata nelle piste e nei pad.
- La potenza persa per commutazione negli interruttori a semiconduttore è, in percentuale, molto maggiore rispetto alle altre, ma poiché in un ramo di ponte sono presenti anche le perdite per conduzione, per un miglior dimensionamento del dissipatore devono essere prese in considerazione anche queste ultime; Pertanto, se si tiene conto che la massima frequenza di commutazione alla quale verrà fatto funzionare l'inverter è di 50 kHz, la potenza dissipata in calore può essere approssimativamente stimata considerando le seguenti ipotesi:

CAPITOLO 3

- La corrente del carico nella fase di commutazione rimane costante;
 - La tensione sugli interruttori ha un comportamento lineare (il periodo di commutazione è molto minore rispetto alla costante di tempo del transitorio relativo alla tensione sugli interruttori);
- Infine, per ridurre ulteriormente la resistenza termica tra i dispositivi e l'ambiente, può essere aggiunta una pasta termica tra la superficie dei moduli e quella del dissipatore e/o si può aggiungere una ventola sul dissipatore.

3.5 Realizzazione del prototipo di macchina “claw-pole”

La realizzazione del prototipo della macchina “claw-pole” è, allo stato attuale, in corso d’opera. Di seguito verranno riportati alcuni dettagli.

In primo luogo, viene illustrata la sovrapposizione dei cosiddetti “artigli”, come riportato nella figura seguente:



Figura 3-12 Sovrapposizione degli "artigli" del nucleo di macchina

Dalla figura riportata si può notare la perfetta corrispondenza, ottenuta grazie ad un’attenta lavorazione tramite tornio a controllo numerico, tra i due nuclei realizzati in materiale SMC (Soft Magnetic Composites).

CAPITOLO 3

L'avvolgimento di statore viene installato all'interno del nucleo poc'anzi illustrato, come riportato nella figura seguente:

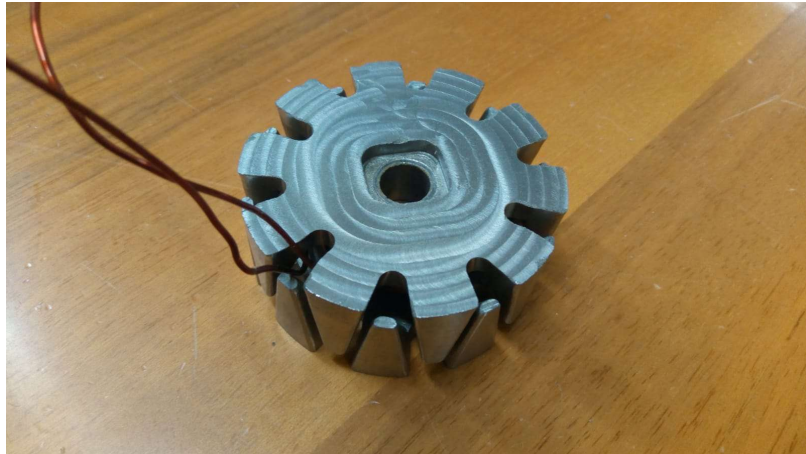


Figura 3-13 Avvolgimento nel nucleo "claw-pole"

La figura successiva riporta il medesimo nucleo con l'avvolgimento installato, visto però di profilo.

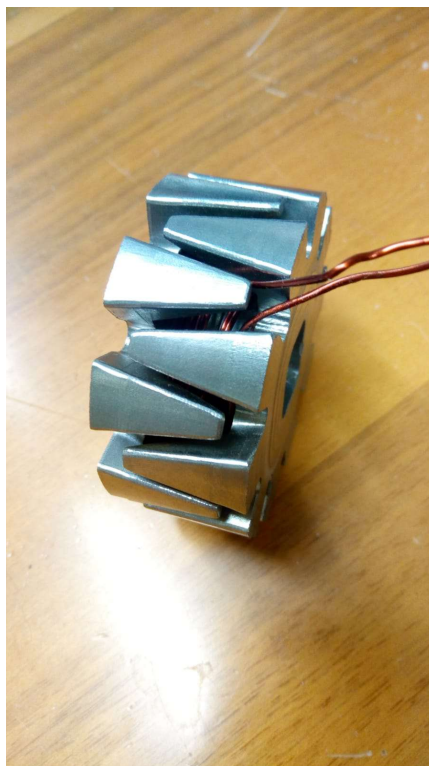


Figura 3-14 Avvolgimenti nel nucleo "claw-pole" visto di profilo

4.IL PROTOCOLLO DI TRASMISSIONE MULTICAST PER RETI MAGLIATE LoRa IN CONDIZIONI CRITICHE DI COMUNICAZIONE

4.1 La tecnologia LoRa candidata per applicazioni in condizioni critiche

4.1.1 Cenni alla tecnologia LoRa

LoRa è sinonimo di comunicazione a lungo raggio (Long-Range communication) ed è una tecnica di modulazione di proprietà di Semtech, che permette il collegamento radio a lunga distanza (alcuni chilometri) perché a fronte della sua elevata sensibilità (10 dB meglio di GFSK) è una tecnologia a basso consumo energetico (Semtech, 2015). È derivata dal Chirp Spread Spectrum (CCS) (Reynders & Pollin, 2016) con un Forward Error Correction incorporato e consente di codificare più bit (SF) per simbolo. Le frequenze di trasmissione che sono di solito utilizzati sono allocate appena sotto 869 MHz o 928 MHz, mentre altre frequenze sono utilizzate in Asia. Un dispositivo LoRa richiede l'impostazione di molti parametri: trasmissione a fattore di diffusione (SF), potenza (TP), larghezza di banda (BW), velocità di codifica (CR), frequenza della portante (CF).

Questo rende questa tecnologia molto flessibile e permette di identificare diverse possibili opzioni che hanno influenza sulla distanza di trasmissione, sul tempo di trasmissione, sulla integrità dei dati e sul consumo di energia.

Per questo motivo, i ricercatori (Bor & Roedig, 2017) (Lim & Han, 2018) (Qin & McCann, 2017) (Cuomo, et al., 2017) (Yu, Zhu, & Fan, 2017) (Georgiou & Raza, 2017) hanno cercato di identificare i criteri generali per ottenere le migliori prestazioni dalla giusta combinazione dei parametri, anche in relazione all'ambiente e al numero di dispositivi coinvolti.

4.1.2 La rete dei sensori e degli attuatori

Il progetto ha come oggetto la costituzione di una rete di sensori ed attuatori cooperanti. Il fattore chiave, in questo caso è la costruzione di una rete che consenta lo scambio delle informazioni e la riconfigurazione automatica degli ingressi-uscite in caso di guasto su impianti complessi. La topologia di rete, che è stata presa in considerazione in questo progetto, è sostanzialmente composta da nodi statici. I nodi possono essere collegati a sensori ed attuatori situati in una certa area e installati per scopi diversi. Ad esempio, può essere considerata una grande area industriale, in cui è necessario controllare gli attuatori di emergenza e monitorare alcuni aspetti ambientali variabili, oppure un'area metropolitana, dove è necessario misurare l'inquinamento, il traffico o, in generale, altre condizioni o variabili di interesse. I nodi potrebbero anche essere installati in ambienti chiusi, come tunnel, miniere, fonderie, ecc. In sostanza, è una rete che, dal punto di vista geometrico, non è influenzata da importanti cambiamenti.

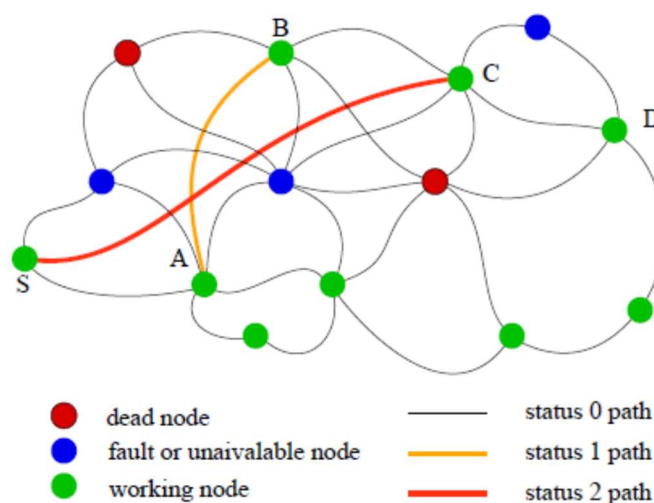


Figura 4-1 Esempio di topologia di rete LoRa

CAPITOLO 4

La rete stessa, però, può essere fortemente influenzata da eventi straordinari che possono rendere inattivi alcuni nodi, ad esempio incendi, esplosioni, ed anche aumenti di temperatura semplicemente incontrollati (Cattani & Rmer, 2017).

Il protocollo di comunicazione proposto è stato progettato per consentire, per quanto tecnicamente possibile, il trasferimento di informazioni da un nodo all'altro, identificando il miglior percorso possibile e minimizzando i percorsi di rete quando si verifica una situazione critica, sfruttando così al massimo le caratteristiche della tecnologia LoRa.

Nella figura riportata è illustrato un esempio di una possibile topologia di rete. A questo proposito, si noti che nessuno dei suoi nodi ha un accesso diretto ad Internet quale backup, anche se dovesse essere connesso ad un server locale. Il dato inviato da un nodo deve raggiungere i nodi bersaglio anche nel caso in cui alcuni di essi (in rosso) vengano esclusi.

4.1.3 Limiti della tecnologia LoRa

I tradizionali protocolli LoRa presentano delle limitazioni note. Ci sono infatti numerosi studi recenti che chiariscono i limiti reali della tecnologia LoRaWAN in diverse condizioni ambientali, anche definendo modelli analitici che consentono di calcolare le prestazioni reali della rete (Georgiou & Raza, 2017) (Pop, Raza, Kulkarni, & Sooriyabandara, 2017) (Bankov, Khorov, & Lyakhov, 2017) (Rahman & Tepe, 2014). La probabilità di collisione dei pacchetti, che potrebbe essere misurata utilizzando il tasso di ricezione pacchetti (Packet Reception Rate, PRR), deriva dalla difficoltà di coordinare le trasmissioni verso monte, e questo compromette la scalabilità della rete in modo significativo. Un ulteriore fattore che può limitare la dimensione della rete riguarda la relazione tra spreading factor (SF), bit rate (BR), larghezza di banda (BW) e velocità di codifica (CR):

$$BR = SF \frac{4}{(4 + CR) \left(\frac{2 \cdot SF}{BW} \right)} \quad 4.1$$

Infatti, al fine di limitare il tempo necessario per trasmettere il payload, è necessario considerare valori più bassi dello spreading factor. In Europa, altre limitazioni derivano dalla conformità con i requisiti imposti dallo European Telecommunications Standards Institute (ETSI), che richiede un duty-cycle per ciascun dispositivo non superiore all'1% e una massima potenza di uscita in trasmissione di +14 dBm.

4.2 Strategia generale di comunicazione

La strategia di comunicazione proposta considera due diversi stati operativi, quello normale, in cui i nodi sono alimentati dalla rete elettrica o comunque non hanno particolari requisiti di risparmio energetico, e quello di emergenza, durante il quale la rete potrebbe essere influenzata da perdite di connessione, mancanza di potenza e nodi inattivi. Quando la rete opera in condizioni normali, la strategia di comunicazione mira a identificare i percorsi ottimali, ma identifica anche possibili alternative da utilizzare in caso si verificano alterazioni della topologia. In questo stato, è preferibile che i nodi effettuino periodici tentativi di riconfigurazione al fine di stabilire un certo numero di percorsi alternativi, i quali vengano archiviati sistematicamente in tabelle gerarchiche che verranno utilizzate se i percorsi predefiniti non fossero disponibili.

Quando la rete è in stato di emergenza, il percorso di comunicazione viene scelto tra i possibili percorsi memorizzati nelle tabelle gerarchiche. Il percorso individuato verrà scartato se nessun riscontro tornerà indietro dal nodo finale di destinazione. In questo caso, un altro instradamento verrà scelto quale alternativa. Il processo di commutazione dei percorsi di instradamento sarà descritto in seguito nel dettaglio.

Questa strategia consente alla rete di riconfigurarsi facilmente al verificarsi dello stato di emergenza, offrendo una alternativa immediata alle comunicazioni precedentemente stabilite, riducendo parimenti i fabbisogni di alimentazione dei nodi, proprio nel momento in cui l'energia non dovrebbe mai essere sprecata.

4.2.1 Modalità operative della rete

Lo stato operativo della rete può assumere diversi gradi di emergenza. Il più basso è quello in cui lo stato dei nodi è nella normale operatività o in una condizione di sospensione programmata; a tale stato corrisponde l'uso della tabella di instradamento di default.

Lo stato successivo corrisponde ad una situazione in cui uno o più nodi non possono garantire il trasferimento delle informazioni a causa di un evento imprevisto. In questo caso, tutti i nodi utilizzano il secondo set della tabella di instradamento.

Se ci fosse anche un ulteriore set di tabelle di instradamento, esso potrebbe essere altresì adottato da tutti i nodi della rete qualora il secondo set non dovesse essere in grado di garantire il trasferimento delle informazioni.

Il meccanismo di commutazione tra i vari stati deve coinvolgere tutti i nodi della rete; ciò si rende necessario per mantenere la consistenza tra le tabelle di instradamento adottate dai nodi medesimi, poiché le informazioni immagazzinate in esse riguardano anche i parametri di trasmissione e ricezione, che devono essere perfettamente corrispondenti in tutti i nodi della rete stessa. Tale circostanza può essere garantita soltanto nel caso in cui tutti i nodi impieghino la medesima tabella di instradamento.

Ogni nodo può decidere autonomamente in quale condizione operare, sulla base delle informazioni ricevute dagli altri nodi, oppure sulla base delle informazioni che ancora non ha ricevuto.

Quando la rete è nelle normali condizioni operative, la distanza massima tra una coppia di nodi è sufficiente per garantire la comunicazione efficiente con un bassissimo fattore di spread (SF); ciò consente di incrementare la frequenza dei pacchetti trasmessi, rispettando il limite del duty-cycle riportato nel precedente paragrafo, al fine di identificare tutti i possibili percorsi e di creare la prima tabella di instradamento, ovvero quella a più alta priorità.

4.2.2 Struttura delle tabelle di instradamento

La tabella seguente mostra una possibile tabella di instradamento relativa ad un certo nodo.

La prima colonna mostra lo stato del nodo; è possibile notare come ci sono due possibili percorsi per la destinazione 16; il primo, relativo allo stato zero, passa attraverso il relè 10, mentre il secondo, relativo allo stato 1, conduce direttamente alla destinazione 16 con gli adeguati parametri di trasmissione.

status	type T	dest D-ID	next relay T-ID	TX/RX parameters
0	C	12	8	short
0	D	16	3	short
0	D	16	10	short
1	D	16	16	long
0	S	12	10	short
0	D	12	10	short

Tabella 4.1 Parametri della trasmissione LoRa

4.2.3 Gestione delle comunicazioni tra i nodi

Nel caso un nodo non sia in grado di comunicare con un nodo ad esso adiacente, una procedura di verifica è attivata per valutare se tale malfunzionamento sia dovuto ad un guasto permanente piuttosto che ad una irregolarità temporanea. Al termine di questa fase, il nodo può entrare nel successivo stato (da 0 ad 1) ed usare un differente percorso di instradamento.

Chiaramente, il passaggio di stato implica differenti parametri di trasmissione e ricezione anche per altri nodi, cosicché dovranno essere stabilite nuove finestre temporali, anche di differente dimensione, durante le quali il nodo commuterà la sua modalità operativa di funzionamento (TX / RX).

Naturalmente, le informazioni necessarie per comunicare entro queste finestre temporali, mediante l'impiego dei corretti parametri di trasmissione e ricezione, deve essere trasmessa ai nodi adiacenti regolarmente in funzione.

4.2.4 Verifica della qualità della trasmissione

La qualità della trasmissione viene verificata considerando i valori del parametro RSSI (indicatore della forza del segnale ricevuto), nonché conteggiando il numero di errori corretti durante la trasmissione dei messaggi di test.

4.3 Modalità di instaurazione della comunicazione

Considerando la numerosità dei nodi della rete di telecomunicazione, la loro identificazione non può essere fatta utilizzando il classico MAC Address, composto da 8 bytes, ma da un identificativo univoco ID formato da un numero di bytes inferiore, ad esempio soltanto 2.

Tale identificativo viene settato in maniera univoca e non ambigua (analogamente al MAC Address) nella fase di installazione dei dispositivi LoRa. Ciò consente di risparmiare sulle dimensioni del payload, favorendo così una più elevata frequenza di trasmissione.

Quando i canali di comunicazioni risultano essere stabili, si avrà che, nell'arco di una finestra temporale limitata, una coppia di nodi posti ad una certa distanza cercherà di stabilire la comunicazione mediante opportuni parametri di trasmissione e ricezione, con altresì adeguato fattore di spread.

Tale operazione viene effettuata attraverso la trasmissione di un pacchetto speciale di richiesta di instradamento RREQ (route request) verso il nodo con il quale si vuole comunicare.

4.3.1 Procedure operative di test di comunicazione tra i nodi

Il segnale RREQ poc'anzi descritto definisce i parametri di trasmissione e ricezione per le comunicazioni tra due nodi ed, inoltre, definisce i parametri temporali entro i quali la trasmissione avrà luogo. Tali informazioni vengono riportate nel payload del pacchetto di RREQ.

Pertanto, dopo lo scambio di tale informazione, ci sarà una finestra temporale ben definita, durante la quale due nodi potranno stabilire una connessione di test, utile a verificare la bontà della comunicazione instaurata. Se il test risulterà essere positivo, la corrispondente tabella di instradamento verrà aggiornata.

Il test può fallire sia perché il segnale ricevuto risulta essere troppo debole, sia per la difficoltà di ricevere il segnale originario senza errori; ovviamente, anche il timeout del dispositivo ricevitore produce il medesimo risultato del fallimento del test di trasmissione, con conseguente perdita dell'informazione trasmessa. Per questa ragione, si rende necessario che ciascun nodo mantenga almeno due o più tabelle di instradamento e, periodicamente, metta in atto le opportune operazioni volte all'aggiornamento delle medesime.

4.3.2 Procedura generale di comunicazione tra i nodi della rete

Nella figura seguente, si riporta il diagramma di flusso generale della procedura, che è schedata nella logica presente a bordo di ciascun nodo:

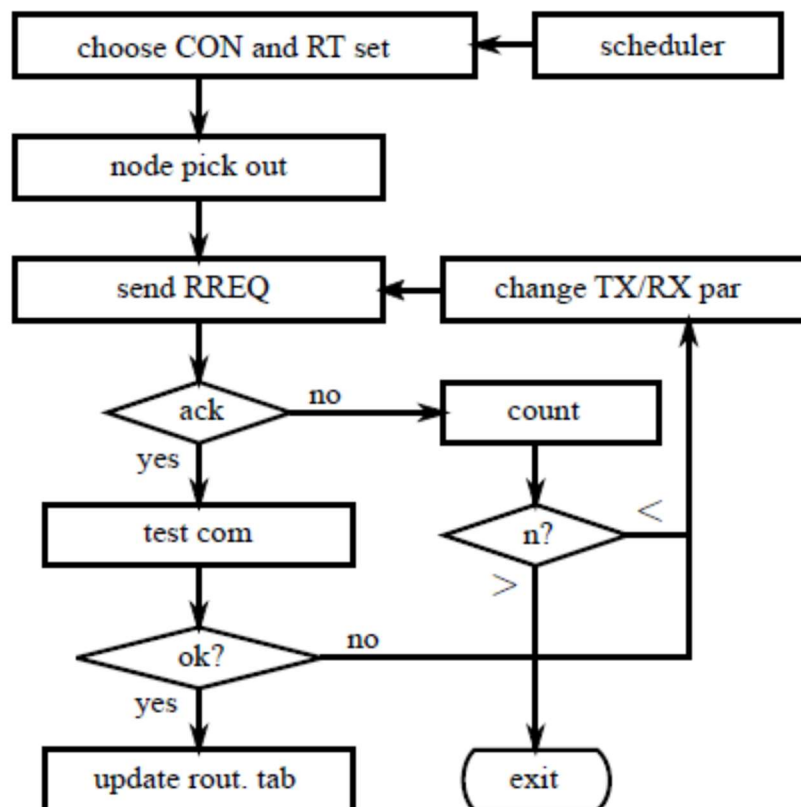


Figura 4-2 Diagramma di flusso di comunicazione LoRa

4.3.3 Formato dei pacchetti trasmessi nella rete

È stato individuato in maniera ottimale il formato da impiegare allo scopo della efficiente comunicazione tra i vari nodi della rete; esso è illustrato nella figura seguente:

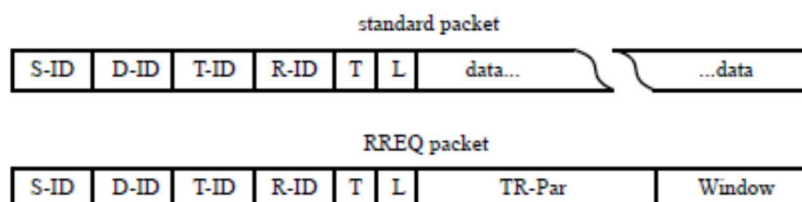


Figura 4-3 Formato dei pacchetti del protocollo LoRa

Nello specifico, viene riportato sia il formato standard del pacchetto, sia quello per il segnale di richiesta di instradamento (RREQ).

I campi presenti vengono brevemente descritti:

- S-ID: identificativo della sorgente (2 bytes);
- D-ID: identificativo della destinazione (2 bytes);
- T-ID: identificativo del trasmettitore (2 bytes);
- R-ID: identificativo del ricevitore (2 bytes);
- T: tipologia di messaggio (1 byte);
- L: livello di priorità della tabella di instradamento (1 byte);
- TR-Par: i nuovi parametri di trasmissione e ricezione (6 bytes);
- Windows: caratteristiche della finestra temporale usata (4 bytes).

Si noti altresì che il pacchetto RREQ ha lo stesso formato di quello standard, eccetto per i contenuti degli identificativi; infatti, S-ID e T-ID sono gli stessi, così come D-ID e R-ID; nello specifico, esso viene trasmesso ad un nodo non contiguo per chiedere l'instaurazione di un nuovo percorso di rete.

Il nodo che riceve un pacchetto RREQ risponde alla richiesta con un messaggio di ACK, rispedendo indietro lo stesso pacchetto ricevuto, ma chiaramente con l'informazione relativa agli S-ID e D-ID scambiata.

4.4 Descrizione dei test di comunicazione effettuati

La strategia di comunicazione ed i relativi protocolli sono stati testati simulando un insieme di nodi, ciascuno dei quali costituito da un modulo LoRa SX1276, installato su di una scheda di sviluppo e programmazione STM32L476RG, che si comporta come un microcontrollore a bassissima potenza di consumo.

Alcuni di questi moduli sono anche equipaggiati con una scheda di sensori IKS01A1, la quale fornisce numerosi dati relativi alle variabili di ambiente.

Un esempio di dispositivo utilizzato è riportato nella figura seguente:



Figura 4-4 Dispositivo LoRa utilizzato nei test

4.4.1 Modalità di esecuzione dei test

Al fine di procedere ad un'accurata e completa simulazione della rete dei dispositivi, è stato impiegato il tool OMNeT++, il quale è costituito da un set completo di librerie utili a simulare molti tipi di topologie di rete, consentendo anche la creazione di nodi customizzati, di sensori nonché di opportuni protocolli di comunicazione tra di essi.

Grazie a tale tool, siamo in grado di valutare in tempo reale le performances dei sistemi di rete di telecomunicazioni man mano implementati.

La caratteristica principale di tale tool è la sua modularità: infatti, esso può essere facilmente integrato in altri contesti software, che consentono la simulazione off-line reti di telecomunicazioni conformi agli standard.

La rete proposta nei test impiega anche alcune librerie software per i dispositivi LoRa, denominate FLoRa, sviluppate alla Scuola Universitaria di Scienze di Aalto (Finlandia).

4.4.2 Risultati ottenuti

Le simulazioni hanno consentito di rilevare le statistiche relative ai pacchetti persi, a causa delle collisioni, nonché di misurare le tempistiche dinamiche di creazione e di aggiornamento delle tabelle di instradamento dei pacchetti.

Inoltre, l'uso di un accurato sistema virtuale è stato particolarmente utile per verificare le performances della rete in situazioni che assai difficilmente potrebbero essere ricreate in via sperimentale.

5. ANALISI DEL RUMORE E DELLE VIBRAZIONI DI MOTORI ELETTRICI ALIMENTATI TRAMITE INVERTER

Questo capitolo presenta uno studio sperimentale delle vibrazioni e del rumore acustico emesso da un motore trifase ad induzione alimentato mediante inverter.

Oggi un importante campo di studio dei motori elettrici è quello della loro caratterizzazione dal punto di vista del rumore acustico e della sensibilità rispetto alle vibrazioni meccaniche. Attualmente la ricerca si concentra sulle performance acustiche e vibrazionali delle macchine ad induzione e a magneti permanenti. La ricerca sull'argomento è oggi fortemente trainata dall'elettificazione veicolare. Nel settore automotive, infatti, limitare il rumore e le vibrazioni è uno dei fattori più importanti nel miglioramento del comfort di guida. In ogni caso, l'applicazione delle tecniche NVH non è limitata solo al settore automotive, ma si estende anche a quello industriale.

Il capitolo riporta, a titolo di esempio, le misure NVH eseguite sul motore ad induzione. La macchina ad induzione si adatta a numerose applicazioni; ciò è dovuto al suo costo competitivo, alla ridotta necessità di manutenzione, al suo alto rendimento, alla sua lunga vita utile, al suo peso ridotto e, non ultimo, alle sue dimensioni compatte. A causa della sua robustezza e del non utilizzo di magneti permanenti, la macchina ad induzione viene utilizzata in applicazioni riguardanti la sicurezza e l'emergenza.

CAPITOLO 5

In questo capitolo, tecniche di controllo basate su SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) sono state impiegate per controllare le tensioni di fase del motore trifase ad induzione, al fine di condurre analisi sperimentali riguardanti il rumore acustico e le vibrazioni. I risultati sperimentali, ottenuti attraverso i test di laboratorio, sono stati eseguiti e analizzati/interpretati.

5.1 Introduzione

In tempi recenti, la richiesta di motori ad induzione trifase con rotore a gabbia di scoiattolo a bassa emissione di rumore è considerevolmente aumentata. La letteratura scientifica riporta molte analisi di rumore, vibrazione e ruvidità dell'andatura (NVH, Noise, Vibration and Harshness) di differenti tipologie di motori elettrici; un approccio generale sulla diagnostica delle vibrazioni per azionamenti industriali di motori elettrici è stata esplorata in (Bate, 2007).

Per quanto riguarda i motori ad induzione, l'analisi delle vibrazioni è stata eseguita in (Wang & Lai, 1999) ed in (Maliti, 2000), quest'ultima relativa a motori aventi rotore a gabbia; indagini più approfondite adatte per la diagnostica dei guasti si trovano in (Iorgulescu & Beloiu, 2008). Altri esempi si trovano in (Pindoriya, Mishra, Rajpurohit, & Kumar, 2018), riguardanti motori ed azionamenti DC Brushless, mentre la correlazione tra la modulazione PWM di un inverter di un motore ad induzione ed il suo conseguente rumore acustico ed elettromagnetico è stato approfondito in (Radha & Ripin, 2014).

L'implementazione della modulazione SVPWM per gli inverter trifase alimentati in tensione, descritta in (Naik & Singh, 2014), è usata per azionare il motore oggetto di prova, come descritto in (Boukadida, Marignetti, Fiengo, Stefano, & Ungaro, 2019).

Studi sperimentali della distribuzione radiale delle vibrazioni e del rumore acustico ed elettromagnetico emesso da un motore trifase ad induzione con rotore a gabbia a vuoto (a carico nullo) sono stati presi in esame in (Hirotsuka, Niwa, Tsuboi, & Kawakami, 2008), mentre il comportamento acustico di un motore ad induzione da 45 kW di potenza è stato analizzato in (Fodorean, et al., 2015).

Le vibrazioni causate dalle componenti armoniche delle correnti di statore sono state analizzate mediante applicazioni di monitoraggio delle vibrazioni prive di sensori in (Riley, Lin, Habetler, & Kliman, 1999); metodi di previsione delle vibrazioni nelle macchine elettriche utilizzando funzioni di trasferimento ricavate sperimentalmente, unitamente ad analisi magnetostatiche ad elementi finiti, sono illustrate in (Saito, Kuroishi, & Nakai, 2016).

5.2 Analisi delle vibrazioni

Il rumore acustico è una emissione udibile normalmente indesiderata. Le vibrazioni sono percepite direttamente perché esse sono trasmesse direttamente al corpo umano. In ogni caso, il suono emesso da un corpo vibrante è molto importante nella generazione acustica del rumore. Oltretutto, esiste anche il rumore elettromagnetico, dovuto alle vibrazioni elettromagnetiche generate dall'interazione delle onde della densità di flusso di induzione magnetica al traferro di macchina.

Lo studio delle principali cause delle vibrazioni elettromeccaniche da cui scaturisce l'elevato rumore del motore è fondamentale al fine di ottimizzare il progetto di un motore ad induzione avente emissioni acustiche ridotte. Altro aspetto che deve essere preso in considerazione è il fatto che la distribuzione radiale delle vibrazioni elettromagnetiche e del rumore è asimmetrica, vista (ad esempio) la presenza dell'involucro delle terminazioni (testate) e dei piedini (flange) impiegati per fissare il rumore sopra le relative strutture di supporto.

Come descritto più avanti nella sezione 4, l'analisi NVH può essere eseguita combinando tre parametri che descrivono la risposta del motore in differenti condizioni operative di lavoro. Malgrado una notevole disponibilità di strumentazione è ampiamente disponibile allo scopo, decisioni soggettive devono comunque essere tenute in conto.

In questo capitolo, misureremo la distribuzione radiale del rumore e delle vibrazioni elettromagnetiche prodotte da un motore ad induzione, alimentato da un convertitore elettronico di potenza, mediante l'impiego di microfoni pick-up collegati ad un Siemens LMS Scadas Mobile®. I risultati sperimentali verranno discussi ed esaminati nel dettaglio.

5.3 Apparato sperimentale

5.3.1 Motore ad induzione

Al fine di testare il motore, un microfono è stato posizionato davanti al motore, in linea con il suo albero, e tre accelerometri sono stati collocati in posizioni significative: 1) sopra la base di supporto, 2) in linea con l'albero e 3) nel rivestimento posteriore. Le specifiche tecniche del microfono e degli accelerometri sono riportate nell'Appendice D.

La vista superiore del banco prova è riportata nella figura seguente:

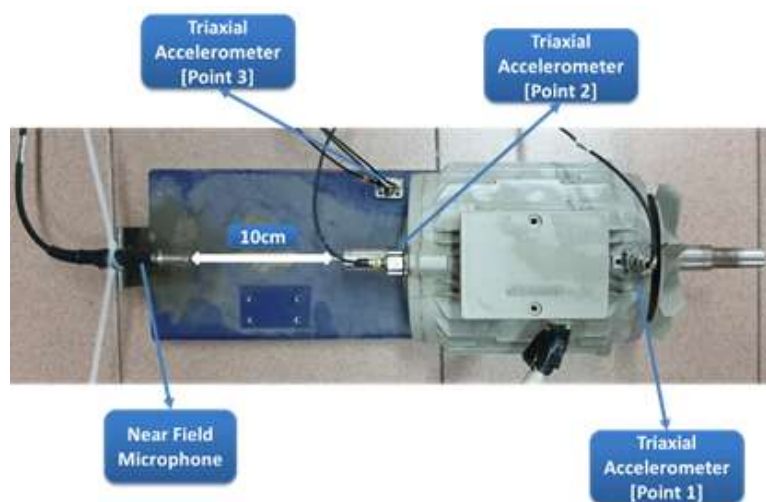


Figura 5-1 Vista superiore del motore ad induzione

La vista laterale, che mostra i medesimi sensori, è riportata nella figura seguente:

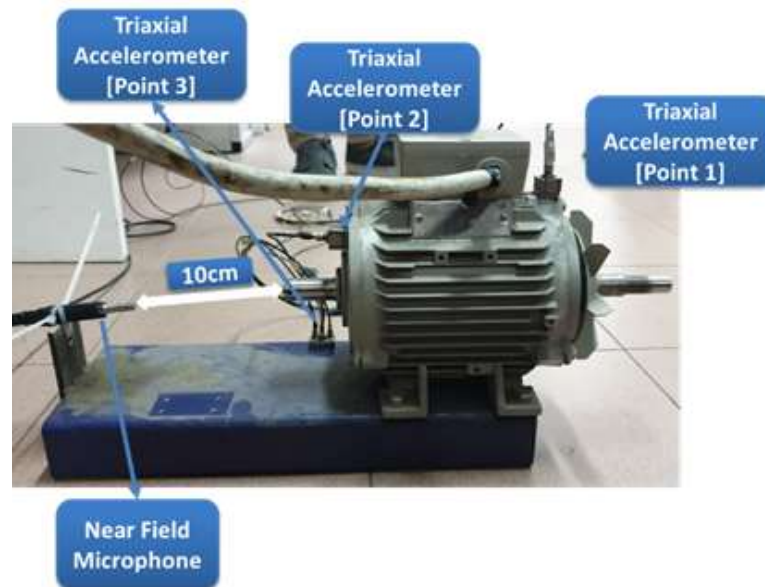


Figura 5-2 Vista laterale del motore ad induzione

I parametri caratteristici del motore ad induzione a gabbia usato per gli esperimenti sono riportati nella seguente tabella:

Specifica	Valore	Unità
P	0,75	kW
$\cos\varphi$	0,8	
V_{Δ}	230	V
V_y	380	V
I_{Δ}	3,25	A
I_y	1,88	A
n	1395	rpm

Tabella 5.1 Parametri caratteristici del motore testato

5.3.2 Azionamento SVPWM

L'azionamento elettrico è controllato con una tecnica di modulazione a vettori di spazio e a larghezza di impulso (SVPWM) implementata in una FPGA (Field Programmable Gate Array) installata in un sistema di controllo NI-PXI costruito dalla National Instruments®.

Lo schema di controllo è implementato tramite l'ambiente software Labview® FPGA; in particolare, il dispositivo FPGA genera i segnali PWM di gate che controllano gli interruttori dell'inverter trifase alimentato in tensione (VSI, Voltage Source Inverter), il quale, a sua volta, alimenta il motore.

Lo schema di principio della tecnica di modulazione SWM (vettori di spazio) è riportato nella figura seguente; nel dettaglio, nella sezione (a) gli stati di commutazione degli interruttori sono rappresentati in forma vettoriale, mentre nella sezione (b) le tre tensioni trifase modulate in ampiezza sono mostrate per il ramo superiore dell'inverter, nell'istante in cui il vettore di riferimento è nel primo settore (vedasi di nuovo sezione (a)).

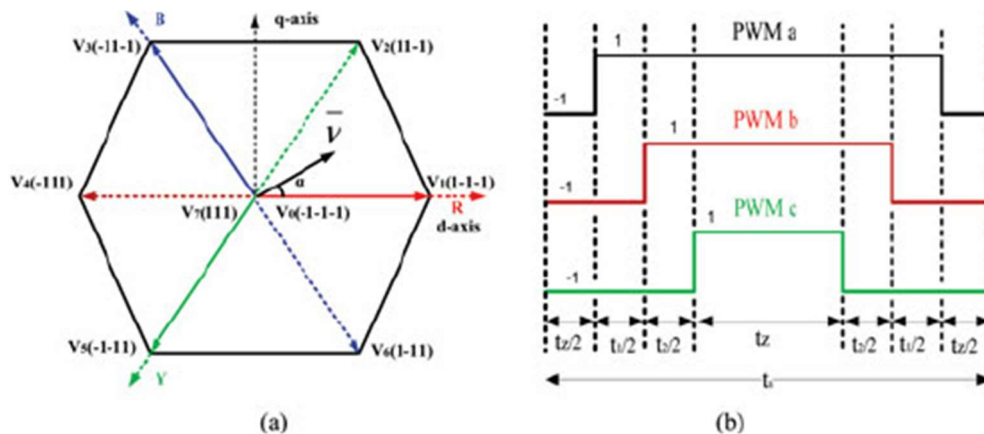


Figura 5-3 SVPWM

5.4 Risultati sperimentali

5.4.1 Mappe di ottava

Mediante il microfono di campo vicino, sono state ottenute le mappe di ottava (rappresentate mediante passi di 1/3 di ottava) per differenti valori di tensione dell'inverter (50 V, 100 V, 150 V e 200 V), in corrispondenza di differenti frequenze di commutazione (1,25 kHz, 2,00 kHz, 3,2 kHz e 8,5 kHz), mostrate rispettivamente nelle quattro figure seguenti.

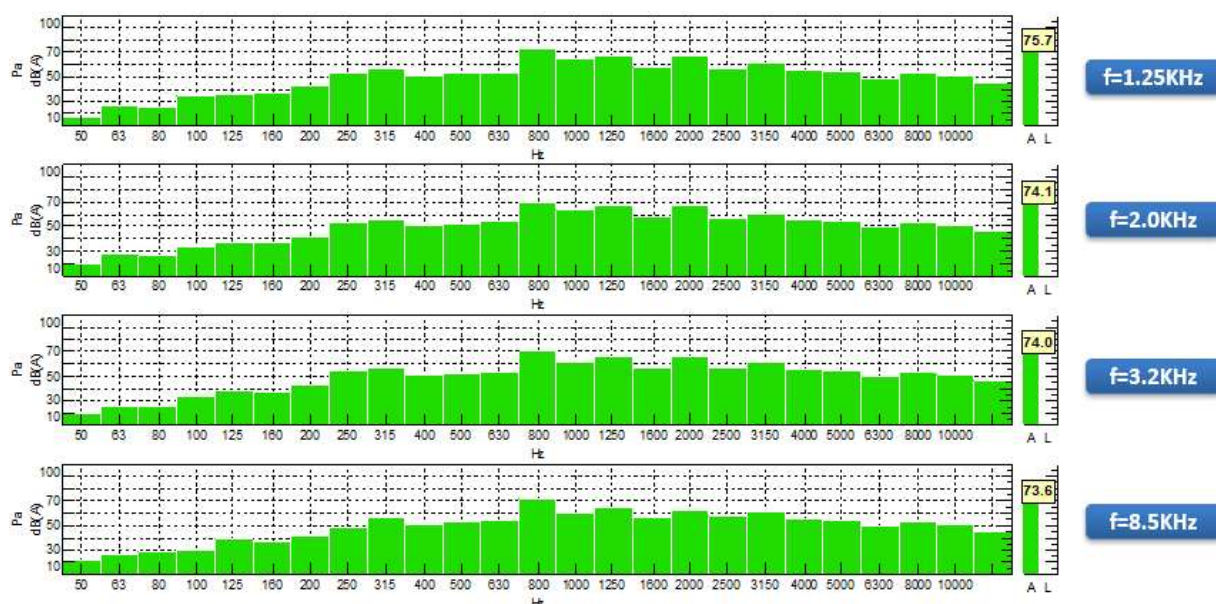


Figura 5-4 Microfono campo vicino @ 50 V

CAPITOLO 5

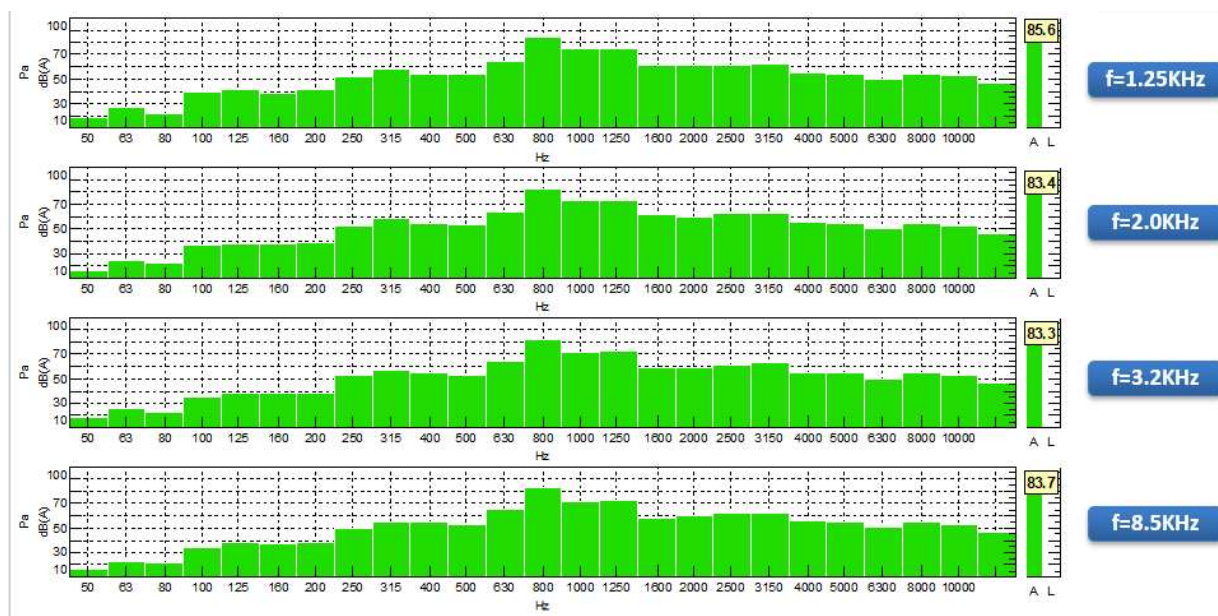


Figura 5-5 Microfono campo vicino @ 100 V

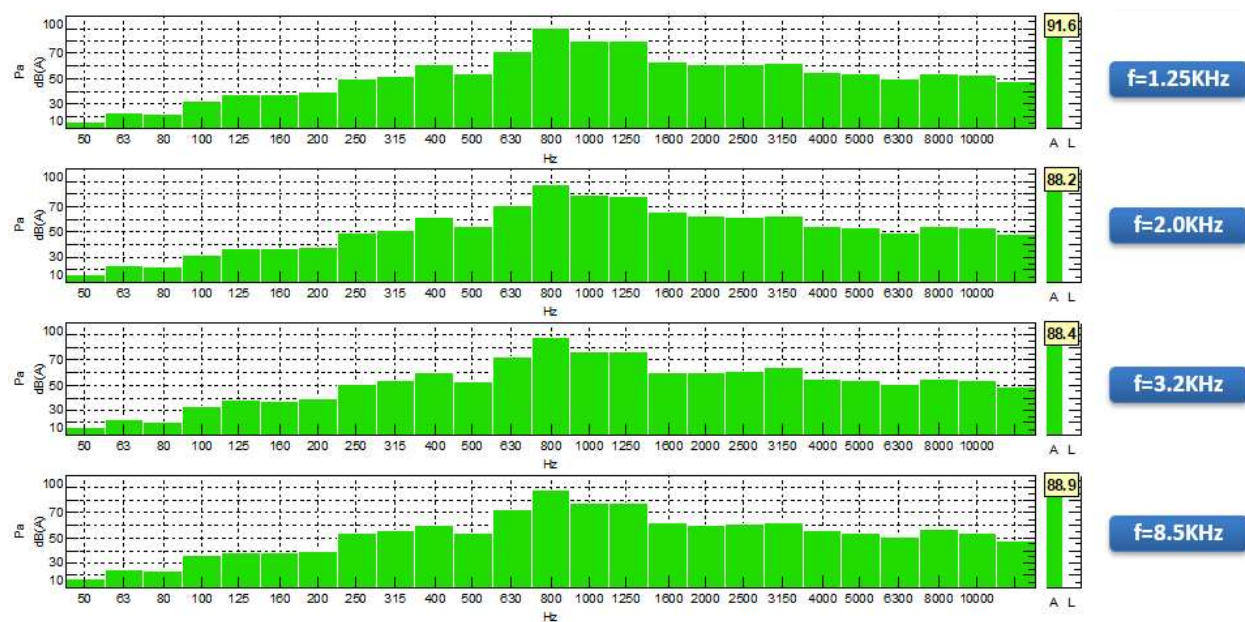


Figura 5-6 Microfono campo vicino @ 150 V

CAPITOLO 5

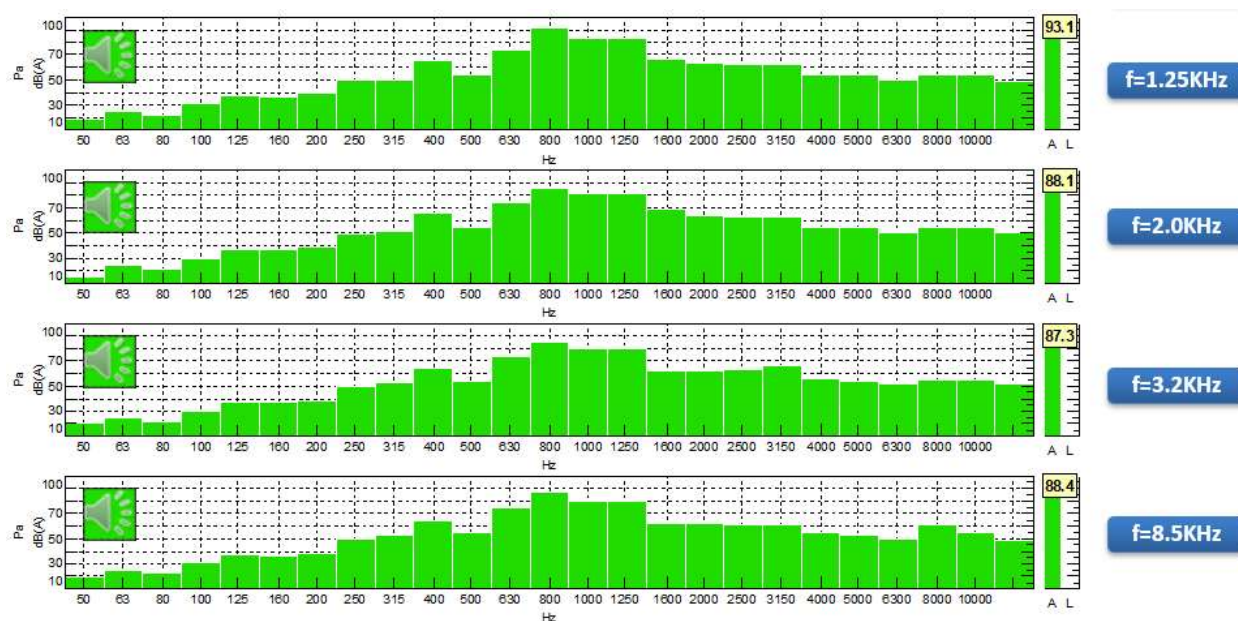


Figura 5-7 Microfono campo vicino @ 200 V

L'analisi acustica mostra che l'ottava predominante è centrata in banda intorno agli 800 Hz per tutte le configurazioni prese in esame; inoltre, tale banda è ancora la predominante per tutte le frequenze di commutazione, ma, nel passaggio da 1,25 kHz a 2,00 kHz, il livello di pressione acustica decresce significativamente.

5.4.2 Livello di pressione sonora

L'istogramma relativo al livello di pressione sonora SPL (Sound Pressure Level) relativo alle differenti frequenze di commutazione è riportato nella figura seguente; per frequenze superiori a 2 kHz, non si riscontrano benefici apprezzabili in termini di emissione acustica.

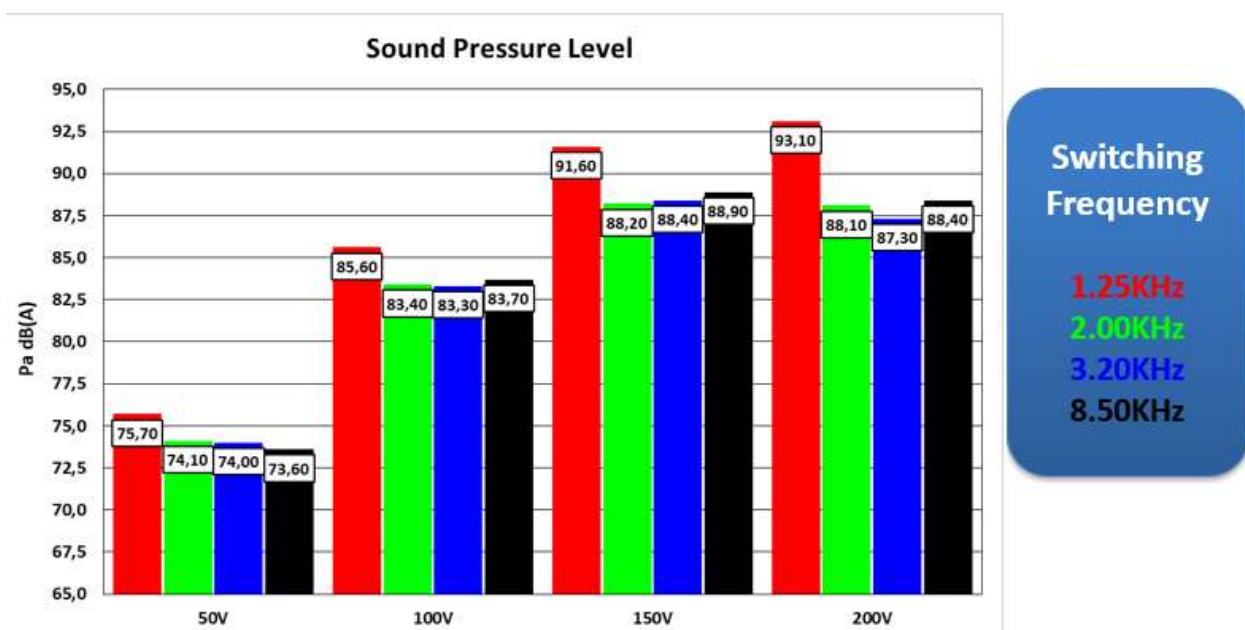


Figura 5-8 Livello di pressione sonora

5.4.3 Spettro delle frequenze

Lo spettro delle frequenze di rumore acquisito tramite i microfoni di campo vicino in condizioni stazionarie, per le differenti tensioni e frequenze, è riportato nelle figure seguenti:

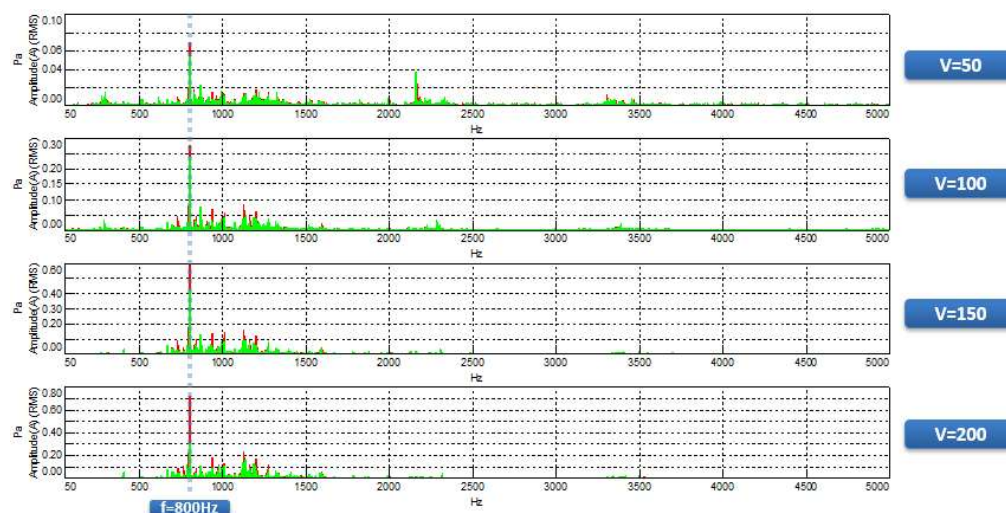


Figura 5-9 Spettro stazionario

Il dettaglio dello spettro nella “banda critica” è riportato nella figura seguente:

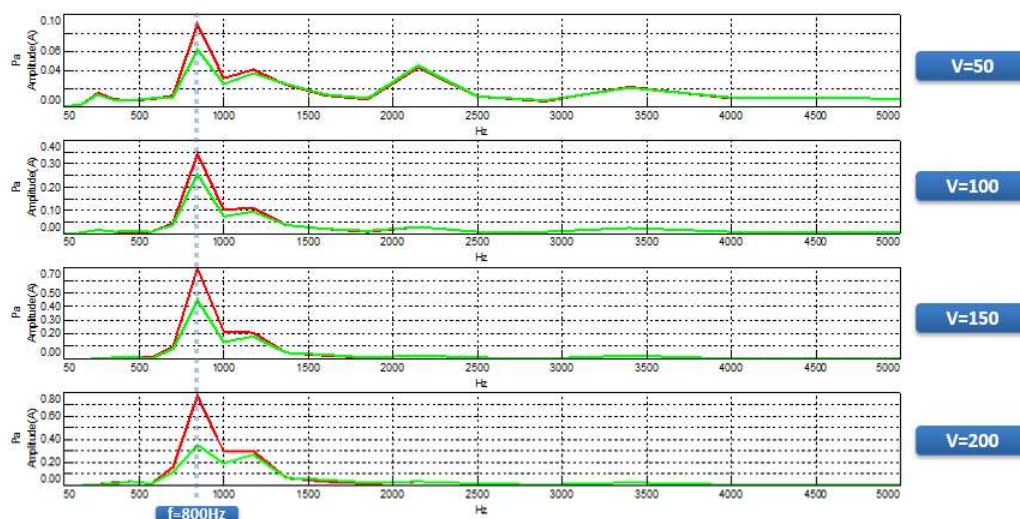


Figura 5-10 Spettro stazionario (evidenza banda critica)

CAPITOLO 5

Variando la frequenza di commutazione da 1,25 kHz fino a 2,00 kHz, l'analisi spettrale evidenzia l'impatto dell'emissione acustica nella banda che va dai 700 Hz fino a 1200 Hz.

Come mostrato da queste ultime due figure, la banda critica impattante nelle emissioni acustiche è centrata intorno agli 800 Hz.

5.4.4 Diagrammi a cascata

I grafici a cascata, raffigurati per le tensioni dell'inverter da 50 V fino a 200 V, sono di seguito riportati nelle quattro figure seguenti:

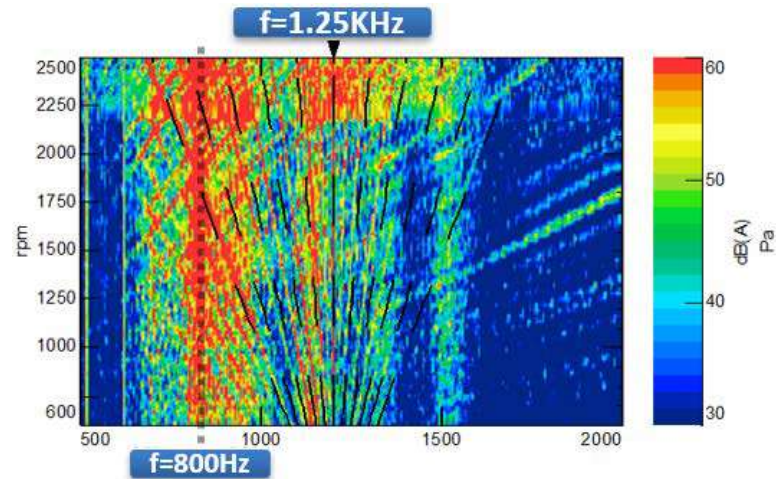


Figura 5-11 Grafico a cascata $f = 1,25 \text{ kHz}$

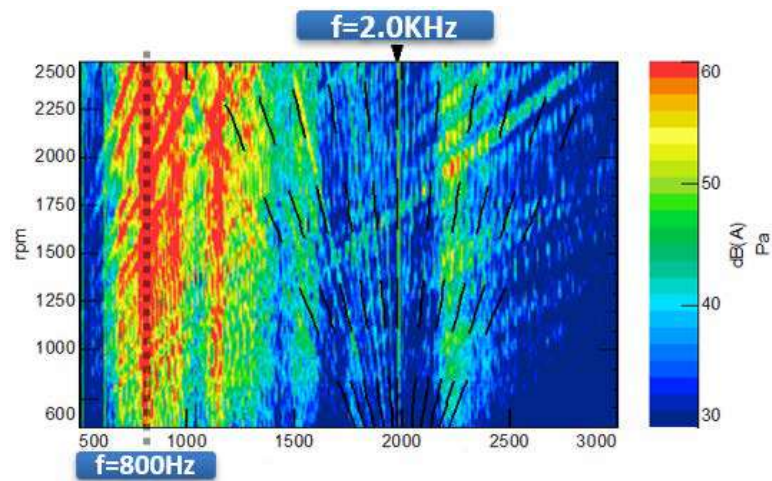


Figura 5-12 Grafico a cascata $f = 2,00 \text{ kHz}$

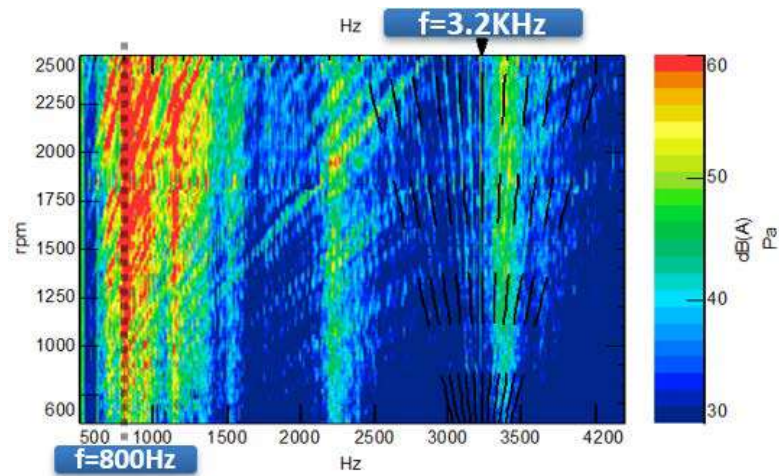


Figura 5-13 Grafico a cascata $f = 3,20 \text{ kHz}$

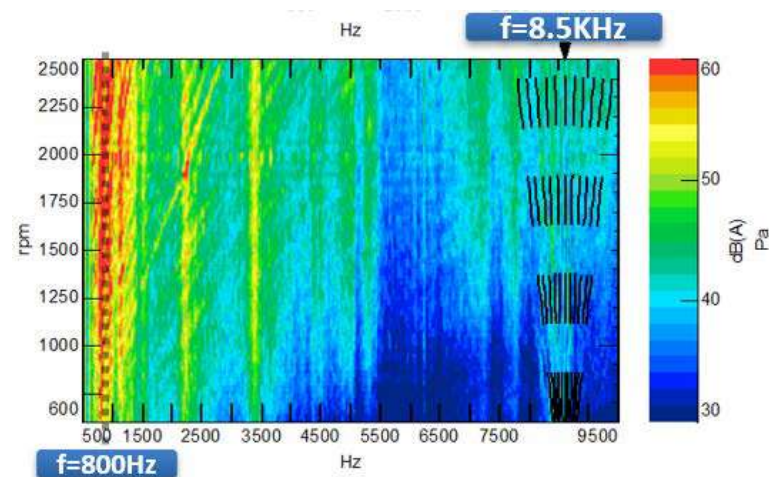


Figura 5-14 Grafico a cascata $f = 8,50 \text{ kHz}$

Le bande spettrali relative dinamiche di commutazione si allargano verticalmente man mano che la velocità del motore aumenta; la loro forma particolare è direttamente collegata alla tecnica con la quale l'inverter viene controllato, ovvero la modulazione SVPWM descritta nel precedente paragrafo.

La frequenza fondamentale (portante) dell'inverter è rappresentata dalla linea verticale (evidenziata in cima di ciascuna figura) ed è circondata in entrambi i lati (nelle bande laterali) dalle proprie componenti spettrali modulanti.

Il guadagno ottenuto in termini di livelli di pressione acustica è dovuto al fatto che i segnali modulanti, a partire dalla frequenza di 2,00 kHz, non impattano la banda critica centrata sugli 800 Hz (che può essere considerata la frequenza di risonanza del sistema).

5.4.5 Conclusioni

Dall'analisi allo stato stazionario qui presentata, in corrispondenza delle differenti velocità di rotazione del motore, possiamo affermare le seguenti conclusioni:

- variando la frequenza di commutazione da 1.25 kHz fino a 2.00 kHz, si ottengono benefici in termini di emissioni acustiche relative ai livelli di pressione sonora (SPL) di circa 1.5 dB (A) per basse velocità (50 V) e di circa 5 dB (A) ad elevate velocità (200 V);
- per frequenze di commutazioni superiori a 2.00 kHz, nessun beneficio evidente viene ottenuto in termini di emissioni acustiche;
- la banda critica relativa alle emissioni acustiche è centrata sugli 800 Hz;
- il guadagno ottenuto in termini di livello di pressione sonora (SPL) è dovuto al fatto che i segnali modulanti centrati intorno alla frequenza di commutazione di 2.00 kHz sono distanti in banda dalla frequenza di 800 Hz;
- l'impatto evidente nel rumore dovuto alle vibrazioni è evidenziato variando la frequenza di commutazione da 1.25 kHz fino a 8.5 kHz.

6. PROTOTIPAZIONE

6.1 Descrizione preliminare del prototipo

Il prototipo del dispositivo attuatore in emergenza viene realizzato applicando ad esso due valvole, ognuna delle quali viene azionata in modalità differente: una tramite un solenoide rotante ed una mediante un motore elettrico DC avente il rotore avvolto, anziché a magneti permanenti.

Ambedue le soluzioni consentono di ottenere un duplice vantaggio: da un lato, entrambe consentono di avere una notevole coppia disponibile al momento in cui l'attuatore deve intervenire, garantendo così la rapida chiusura del circuito idraulico su cui la valvola è applicata; dall'altro, sia l'una che l'altra sono realizzate evitando l'impiego di magneti permanenti, come ci si era prefissi nelle fasi di ideazione del presente progetto; infatti, in situazioni di emergenza, laddove l'aumento della temperatura di ambiente può costituire un pericolo per l'integrità dell'attuatore (si pensi soltanto che un calore eccessivo porta alla compromissione della magnetizzazione delle cosiddette "terre rare"), è necessario che il dispositivo garantisca comunque le prestazioni richieste, senza che eventuali guasti strutturali ne possano compromettere il corretto funzionamento richiesto nelle fasi emergenziali.

Di seguito si riporta un approfondimento sulla soluzione adottata del solenoide rotante.

6.2 Il solenoide rotante

Tale dispositivo, a simmetria assiale cilindrica, è costituito da diversi componenti al suo interno, tutti quanti calettati sul suo asse; essi sono riportati nella figura seguente:

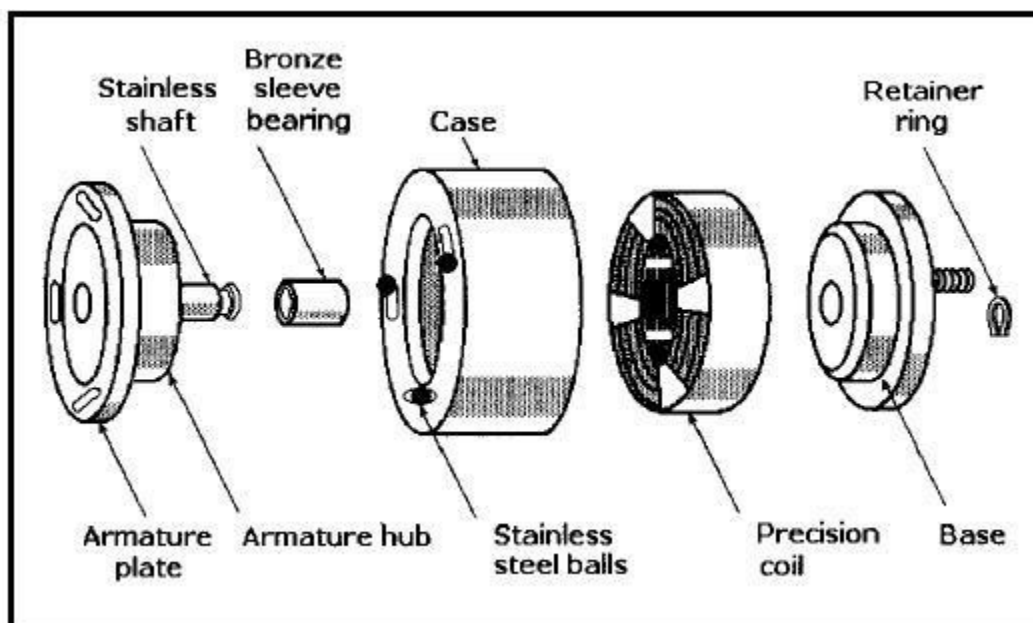


Figura 6-1 Componenti del solenoide rotante

Il funzionamento di tale dispositivo viene illustrato nella figura seguente; esso si trova normalmente in uno stato de-energizzato (a), mentre, a seguito della attuazione, esso passa nello stato energizzato (b). Tale comportamento può essere reversibile, in modo tale che l'attuazione avvenga invece passando dallo stato (b), che diviene quello normalmente energizzato, allo stato (a); ciò risulta particolarmente utile quando, in situazioni di emergenza, viene a mancare l'energia elettrica per l'alimentazione dei dispositivi di emergenza.

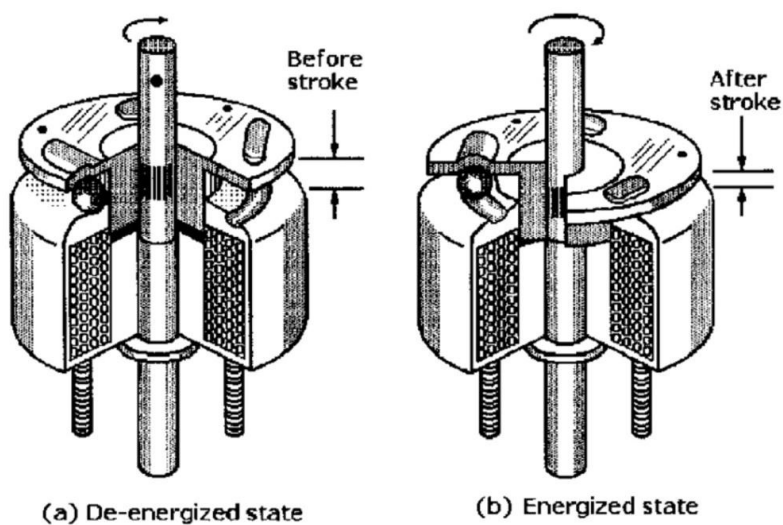


Figura 6-2 Stati di funzionamento del solenoide rotante

CAPITOLO 6

Il dispositivo descritto viene installato nel prototipo. Il dettaglio viene illustrato nella figura seguente:



Figura 6-3 Dettaglio di installazione del solenoide rotante

6.2.1 Considerazioni progettuali

Nella fase di richiusura della valvola, è richiesta comunque una certa quantità di energia. La corrente istantanea che attiva l'attuatore (solenoido rotante), denominata *corrente di picco* (I_{peak}), può anche essere piuttosto elevata. Tuttavia, una volta che la valvola viene chiusa, la corrente richiesta per mantenerla in tale condizione, denominata *corrente di tenuta* (I_{hold}) è significativamente molto minore della corrente di picco. Tipicamente, si ha che $I_{hold} \ll I_{peak}$.

Qualora il dispositivo venisse pilotato in tensione, la corrente che scorre attraverso le spire del solenoide è continua ed è, di norma, più alta rispetto al caso in cui esso venga azionato e controllato direttamente in corrente. Infatti, diversamente dall'azionamento in tensione, quello in corrente non è influenzato dalle variazioni dei parametri quali la temperatura e la conseguente variazione di resistenza dell'avvolgimento. Tale modalità è pertanto la più adatta per le attuazioni in emergenza, ove i fattori di ambiente possono essere particolarmente ostativi per il suo corretto funzionamento.

Inoltre, ai fini di risparmiare l'energia da impiegare per l'azionamento dell'attuatore (aspetto fondamentale nelle fasi emergenziali), la regolazione di tale dispositivo in corrente costituisce la maniera più accurata per il controllo della coppia erogata dall'attuatore medesimo: infatti, nessun margine di tolleranza nell'alimentazione deve essere portato in conto, dal momento che il sistema considerato è immune alle variazioni di resistenza, tensione di alimentazione e temperatura.

Infine, il costo del sistema è ottimizzato: mediante infatti un accurato controllo dell'energia necessaria a tale azionamento, anche un dispositivo leggermente sottodimensionato può essere comunque sfruttato per avere comunque prestazioni accettabili, dal momento che l'attuazione avviene soltanto nelle fasi emergenziali e, pertanto, per brevi durate di tempo.

6.2.2 Pilotaggio dell'azionamento

Il pilotaggio dell'azionamento è stato realizzato mediante il dispositivo DRV110, prodotto dalla Texas Instruments®, le cui specifiche sono riportate nell'Appendice C, mentre di seguito si riporta lo schematico:

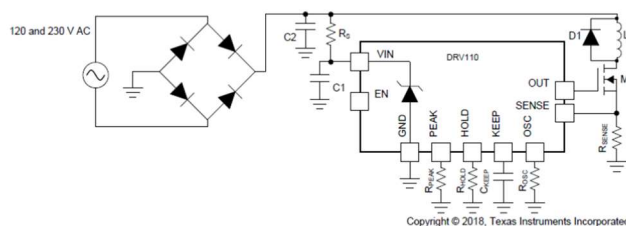


Figura 6-4 Schematico del dispositivo TI DRV110

6.3 Illustrazioni del prototipo

Di seguito verranno riportate una serie di illustrazioni, atte a visualizzare la fase di realizzazione del prototipo del dispositivo attuatore per la gestione e risoluzione di eventi catastrofici.

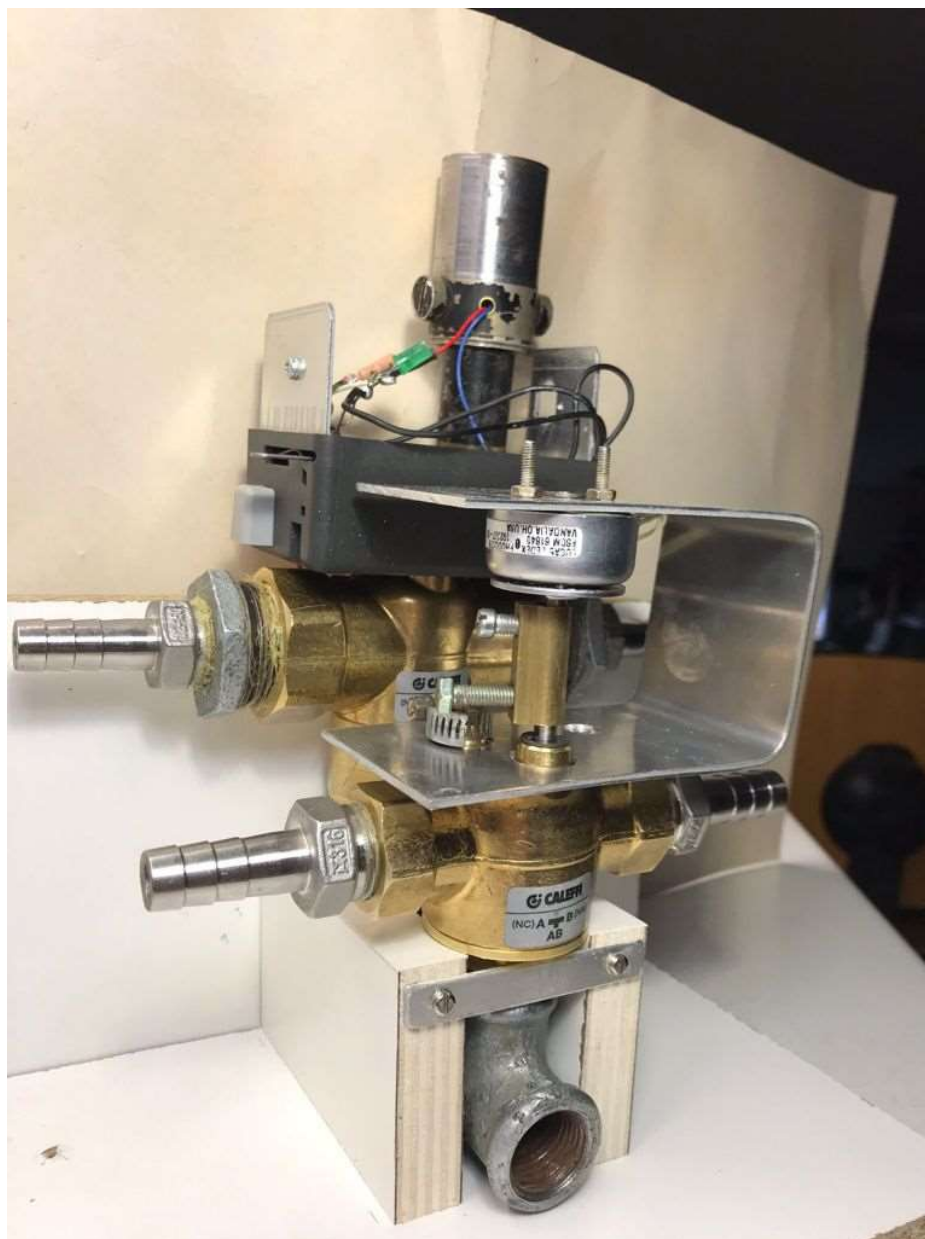


Figura 6-5 Vista laterale SX del prototipo

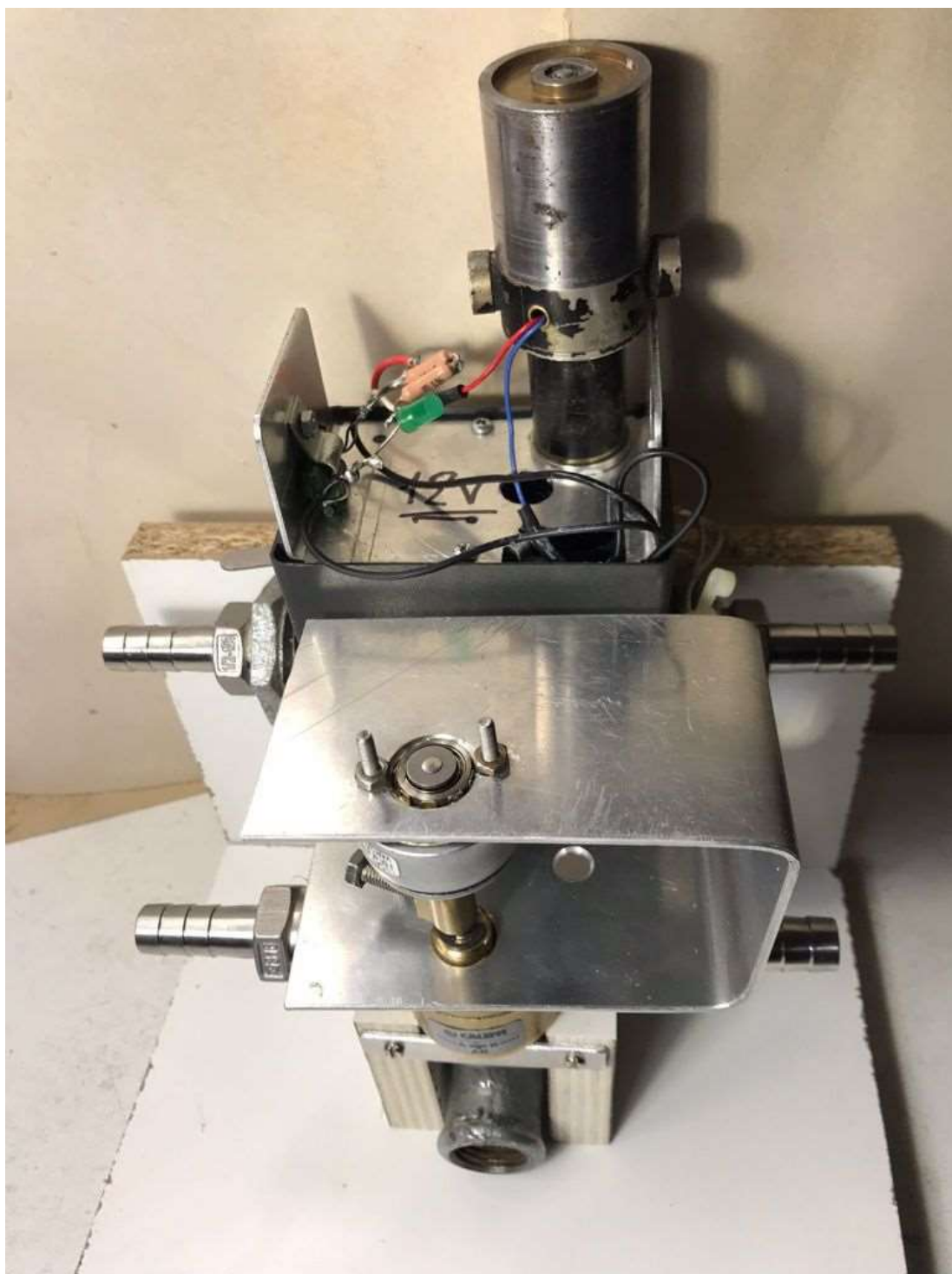


Figura 6-6 Vista frontale superiore del prototipo



Figura 6-7 Vista laterale DX del prototipo



Figura 6-8 Vista frontale del prototipo



Figura 6-9 Dettaglio di installazione del prototipo

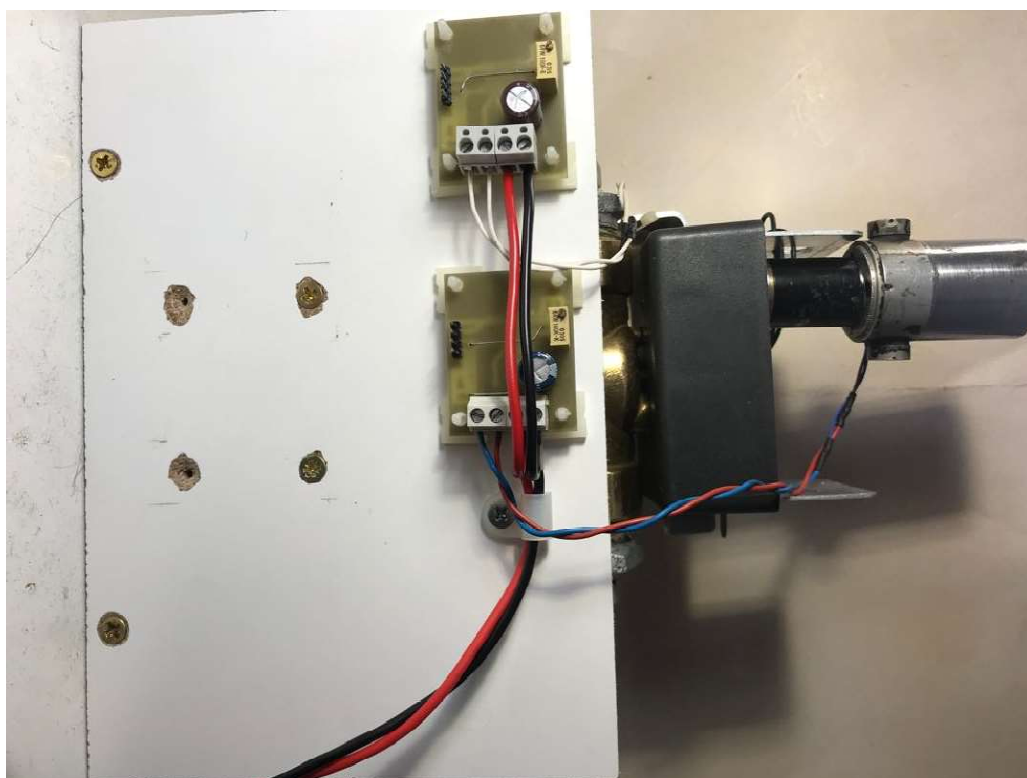


Figura 6-10 Dettaglio di installazione delle schede di alimentazione

6.4 Set up del banco di prova e collaudo

Il dispositivo viene installato su un banco di collaudo appositamente allestito, al fine di poter essere testato mediante l'effettiva erogazione di flussi di acqua che attraversano le valvole da cui esso è costituito.

Nella foto seguente viene raffigurato il dispositivo appena installato sul banco prova.

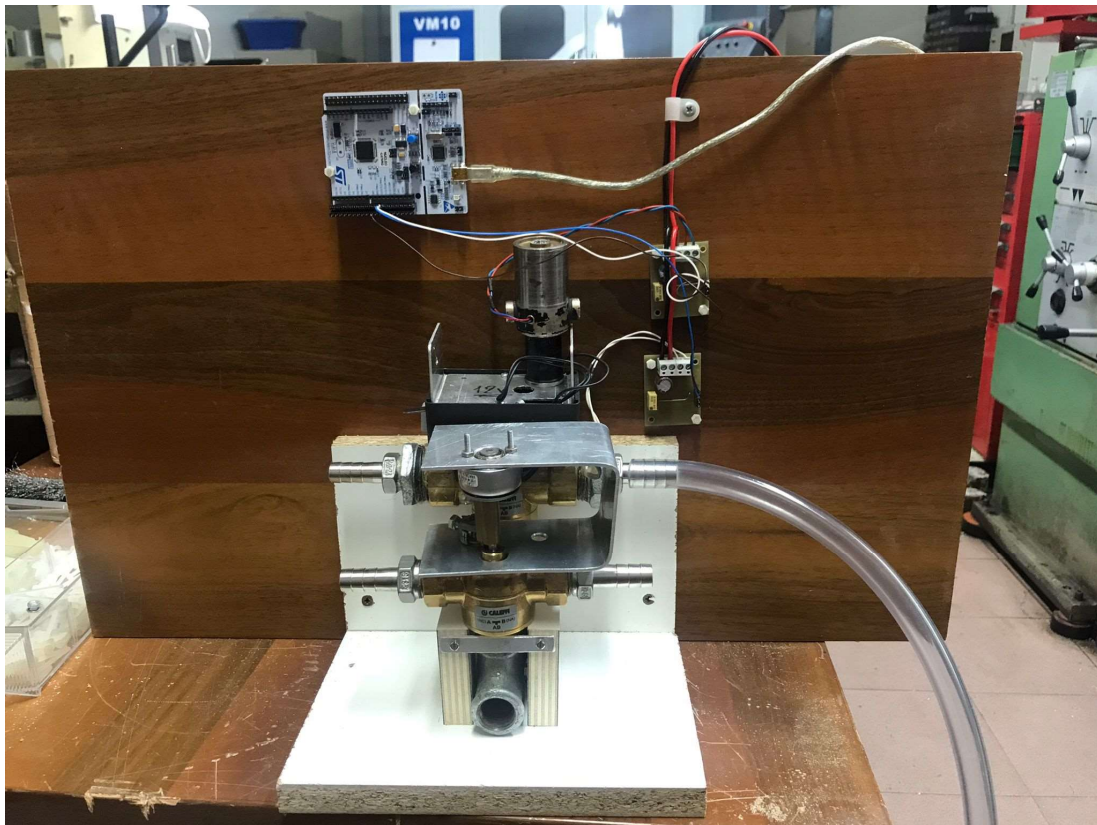


Figura 6-11 Prima installazione del dispositivo sul banco di prova

CAPITOLO 6

Viene riportata di seguito un'ulteriore immagine relativa al completamento della collocazione del prototipo sul banco prova.

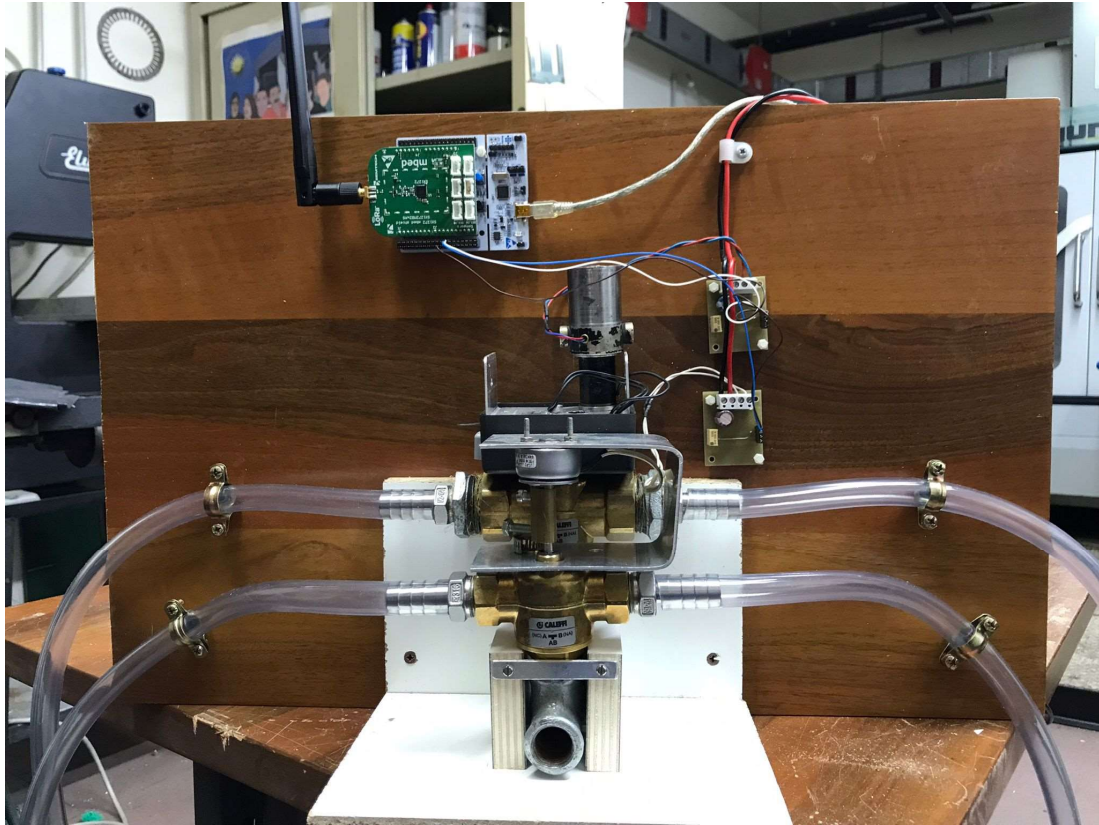


Figura 6-12 Installazione del prototipo sul banco di prova

6.5 Prove finali di collaudo

Per effettuare le prove finali di collaudo del dispositivo, occorre innanzi tutto precisare che le misure sono state effettuate con la seguente strumentazione e sonde:

- LeCroy WaveRunner 44MXi-A (400Mhz – 5 GS/s)
- Sonda di tensione differenziale isolata ADP305
- Sonda di corrente AP015

Il test plant per il collaudo del dispositivo è suddiviso in due setup, di seguito elencati:

1. Board ST NUCLEO + SHIELD LORA + SHIELD TEMPERATURA;
2. Board ST NUCLEO + SHIELD LORA + (2) BOARD POTENZA PER VALVOLA.

Il setup di cui al n° 1 si occupa di leggere la temperatura ambientale e inviare il valore al setup n° 2; la temperatura ricevuta da quest'ultimo viene confrontata con un valore di soglia preimpostato (attualmente settato a 31°C). Se il valore inviato dal primo setup supera il livello poc'anzi stabilito, l'elettronica di controllo alza il pin "D7" e abbassa il pin "D8".

Ogni board di potenza è connessa in corrispondenza alla rispettiva valvola e provvede autonomamente all'alimentazione richiesta dal dispositivo per la sua movimentazione. Quando il pin digitale è alto, essa fornisce l'energia sufficiente all'attuatore, regolando la corrente erogata ad un valore preimpostato, al fine di evitare surriscaldamenti che ne comprometterebbero l'efficacia di azione.

6.5.1 Valvola con motore DC senza magneti permanenti

Il test è stato effettuato leggendo con l'oscilloscopio la corrente e la tensione alla valvola durante la sua movimentazione dallo stato di riposo. Da notare C1 (valore tensione), ha un transitorio circa di 500 ms, dovuto essenzialmente al motoriduttore che non riesce ad aprire o chiudere la valvola in tempi sufficientemente brevi.

Quando il motoriduttore arriva al fine corsa, la corrente della valvola sale fino ad un livello di circa 600 mA; tale valore (compreso in una fascia di isteresi) è limitato dalla scheda di potenza, al fine di prevenire il surriscaldamento del motore.

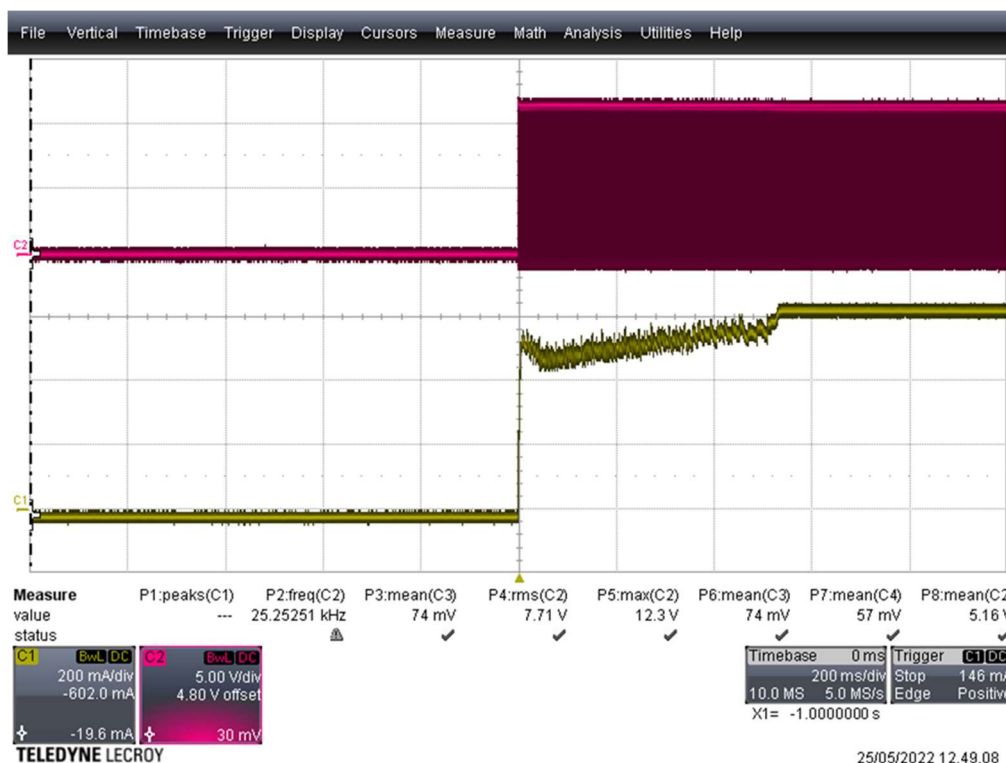


Figura 6-13 Test valvola con motore DC senza magneti permanenti

Essendo:

- C1: Sonda di tensione in ingresso motore DC (senza magneti permanenti);
- C2: Sonda di corrente.

6.5.2 Valvola azionata dal solenoide rotante

Il test è stato effettuato leggendo con l'oscilloscopio la corrente e la tensione al dispositivo azionato dal "Rotary Solenoid" durante la sua movimentazione dallo stato di riposo.

Il solenoide rotante non dispone di demoltiplica (contrariamente al motore DC utilizzato nel caso precedente), ma è connesso direttamente alla valvola. Il transitorio, in questo caso, è molto breve (meno di 40 ms), e la corrente finale è stata limitata dalla sezione di elettronica di potenza ad un livello pari a 420 mA (inferiore al caso precedente).

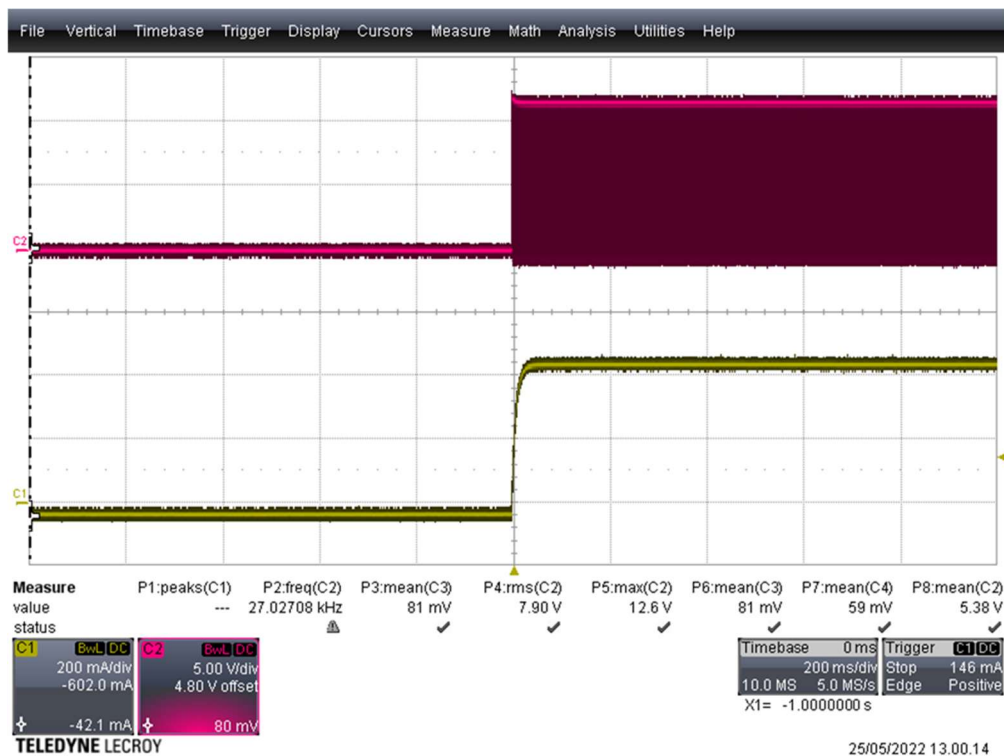


Figura 6-14 Test valvola con solenoide rotante

Essendo:

- C1: Sonda di tensione in ingresso al “Rotary Solenoid”;
- C2: Sonda di corrente.

6.5.3 Test LoRa per la fase di chiusura della valvola

Nel seguente test, sono stati confrontati i segnali inviati alle due board di potenza (vedi C2 e C3). Si noti sempre che la traccia C1 è la corrente del “Rotary Solenoid” in fase di chiusura della valvola.

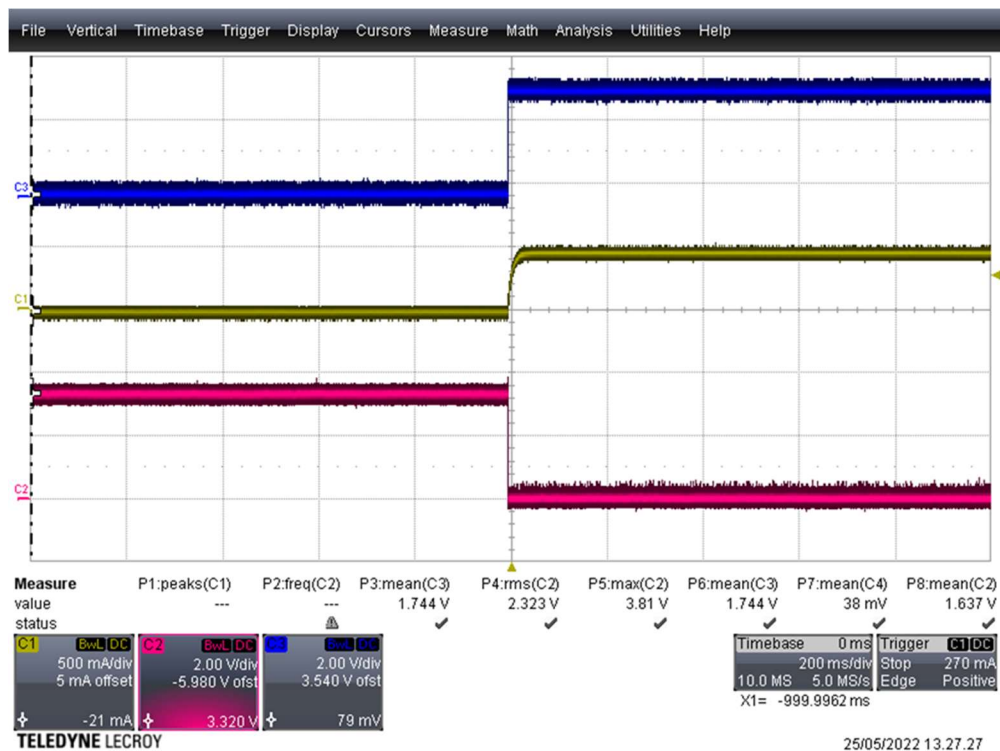


Figura 6-15 Test LoRa (fase di chiusura della valvola)

Essendo:

- C1: Sonda di corrente del “Rotary Solenoid”;
- C2: Segnale digitale al Motore DC (senza magneti permanenti);
- C3: Segnale digitale al “Rotary Solenoid”.

6.5.4 Test LoRa per la fase di apertura della valvola

Nel seguente test, sono stati confrontati i segnali inviati alle due board di potenza (vedi C2 e C3). Si noti anche in questo caso che C1 è la corrente del “Rotary Solenoid”, questa volta però in fase di apertura della valvola.

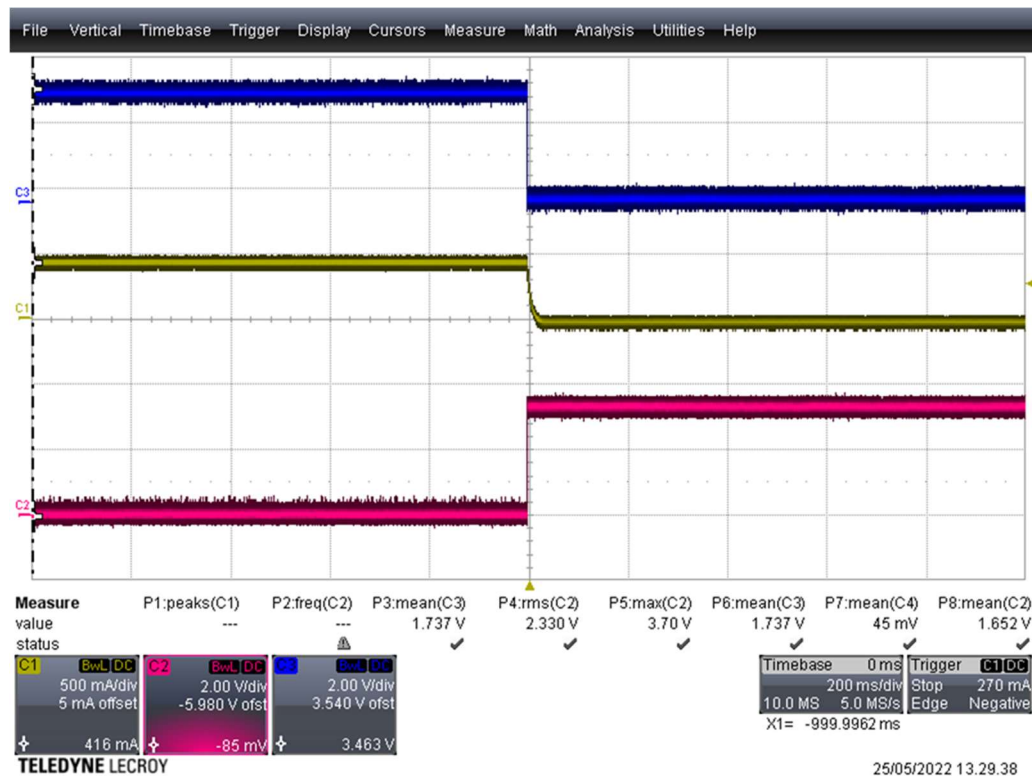


Figura 6-16 Test LoRa (fase di apertura della valvola)

Essendo:

- C1: Sonda di corrente del “Rotary Solenoid”;
- C2: Segnale digitale al Motore DC (senza magneti permanenti);
- C3: Segnale digitale al “Rotary Solenoid”.

Si noti infine che questi ultimi due test sono stati condotti utilizzando la soluzione implementativa del “Rotary Solenoid”, in quanto migliorativa rispetto all’impiego del motore DC privo di magneti permanenti, sia in termini di corrente assorbita dal dispositivo, sia – e soprattutto – per la rapidità della manovra di attuazione in emergenza.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro costituisce la sintesi ultima dell'attività di ricerca svolta nel corso del dottorato. Esso ha avuto, come felice conclusione, non solo la realizzazione del prototipo, ma anche il suo collaudo finale con la sua successiva messa in opera.

L'apparato è stato installato nel laboratorio di Elettronica Industriale "G. D'Angelo", sotto la responsabilità scientifica del prof. Roberto Luigi Di Stefano. La piena operatività, nella completa rispondenza dei requisiti richiesti in fase di azionamento di emergenza, è stata puntualmente verificata e collaudata.

L'azionamento proposto è pertanto la sintesi di molteplici aspetti della ricerca; dalle emissioni acustiche ambientali ai protocolli di comunicazioni ad ampio raggio e bassa potenza; dalle macchine sincrone auto-eccitate a quelle caratterizzati da poli ad artiglio; infine al pilotaggio da remoto di motori DC di piccola taglia privi di magneti permanenti e di solenoidi rotanti, attraverso l'impiego di circuiti elettronici integrati con i più recenti sistemi di radiocomunicazione (LoRa).

Auspichiamo che il dispositivo realizzato possa trovare largo impiego in tutti quei casi in cui è necessaria una elevata affidabilità nell'operare in condizioni critiche di emergenza, in particolar modo quando le manovre da compiere in maniera tempestiva si rendano necessarie non solo per la salvaguardia di beni materiali e di consumo, nonché di servizi erogati alla persona e alla collettività, ma anche, e soprattutto, per la tutela della vita umana.

APPENDICE A ATTREZZATURA DI LABORATORIO UTILIZZATA

Di seguito l'elenco dell'attrezzatura di laboratorio ed i macchinari già disponibili utilizzati per il progetto di ricerca:

- Instek GPT-9800 (test di isolamento);
- FLUKE PM6306 (misure di impedenza);
- SIEMENS 3 Permanent Magnet Motor (mod. FT5072-1AC71-3AA0) (motore per i test);
- SIEMENS SIMODRIVE 611 (inverter di azionamento del motore di test);
- LeCroy Wave Runner 44MXi-A 400MHz 5GS/s 4CH (oscilloscopio digitale per l'acquisizione delle forme d'onda delle grandezze elettriche di interesse);
- BELOTTI – T-40NC/3 (variante trifase da 380V 22,7A);
- FLUKE 336 (pinza amperometrica).

APPENDICE B STRUMENTAZIONE

SOFTWARE UTILIZZATA

Uno dei software utilizzati per le simulazioni elettromagnetiche del motore elettrico è Motor-CAD®, prodotto dalla MotorDesign Ltd., il quale è tra i principali pacchetti software dedicati al progetto ed alla simulazione di macchine elettriche a livello mondiale; esso consente simulazioni multi fisiche in tutto il dominio di regolazione della coppia e della velocità. Motor-CAD® consente agli ingegneri progettisti di valutare le topologie dei vari motori elettrici, al fine di realizzare soluzioni ottimizzate per le performances richieste, per l'efficienza e per l'ingombro di spazio; inoltre, i moduli integrati in esso abilitano calcoli multi fisici che il calcolatore può eseguire velocemente e con un numero finito di iterazione, cosicché l'utente può ottenere i risultati in tempi contenuti.

Altro software impiegato per le simulazioni è il software cross-piattaforma COMSOL Multiphysics®, basato sull'analisi agli elementi finiti, il quale consente di risolvere complessi problemi fisici descritti da PDEs (equazioni differenziali alle derivate parziali); la piattaforma multi fisica di tale programma fornisce un ambiente di sviluppo integrato per applicazioni di tipo elettrico, meccanico, fluidodinamico, acustico e chimico.

Per il rendering 3D della macchina “claw-pole”, è stato utilizzato il programma di grafica vettoriale SolidWorks®, che consente in maniera efficace la visualizzazione della macchina progettata non solo su PC, ma anche su dispositivi mobili quali smartphone e laptop mediante semplici applet / utility di lettura di PDF tridimensionali.

Per la simulazione dei circuiti elettrici, è stato impiegato il software Eagle Cad®; esso è ottimizzato per la progettazione dei circuiti elettrici ed elettronici, sia di segnale che di potenza, ma può essere usato in maniera versatile per qualsiasi tipologia di circuito e di rete elettrica.

APPENDICE C CONTROLLORE DI CORRENTE PER SOLENOIDI, RELÈ E VALVOLE

DRV110 alimentato dalla linea di tensione

- Internal Zener Diode on Supply Pin for HighVoltage Operation
 - 120- and 230-V AC Supply Through Rectifier and RS Resistor
 - 24-V, 48-V, and Higher DC Supply Through RS Resistor
- Drives an External MOSFET With PWM to Control Solenoid Current
 - External Sense Resistor for Regulating Solenoid Current
- Fast Ramp-Up of Solenoid Current to Ensure Activation
- Solenoid Current is Reduced in Hold Mode for Lower Power and Thermal Dissipation
- Ramp Peak Current, Keep Time at Peak Current, Hold Current, and PWM Clock Frequency Can Be Set Externally. They Can Also Be Operated at Nominal Values Without External Components.
- Protection
 - Thermal Shutdown
 - Undervoltage Lockout (UVLO)
- Optional STATUS Output
- Operating Temperature Range: -40°C to $+125^{\circ}\text{C}$
- 8-Pin and 14-Pin TSSOP Package Options

APPENDICE D SPECIFICHE TECNICHE DEL MICROFONO E DELL'ACCELEROMETRO

ICP® ELECTRET ARRAY MICROPHONE

PCB Piezotronics, Inc.

Model Number **130E20**

Performance ENGLISH SI

Nominal Microphone Diameter 1/4" 1/4"

Frequency Response Characteristic(at 0° incidence) Free-Field Free-Field

Frequency Response(± 2 dB) 20 to 10,000 Hz 20 to 10,000 Hz

Frequency Response(± 5 dB) 20 to 20,000 Hz 20 to 20,000 Hz

Phase Match(100 Hz to 5 kHz) $\pm 5^\circ \pm 5^\circ$ [2]

Sensitivity(@ 250 Hz) 45 mV/Pa 45 mV/Pa

Sensitivity(± 3 dB)(@ 250 Hz) -26.9 dB re 1 V/Pa -26.9 dB re 1 V/Pa

Inherent Noise(A Weighted) <30 dB <30 dB

Dynamic Range(3% Distortion Limit) >122 dB >122 dB

TEDS Compliant Yes Yes [3]

Environmental

Temperature Range(Operating) +14 to +122 °F -10 to +50 °C

Temperature Effect on Output(-10 to +50 °C) <0.7 dB <0.7 dB [1]

Electrical

Excitation Voltage 18 to 30 VDC 18 to 30 VDC

Constant Current Excitation 2 to 20 mA 2 to 20 mA

Output Bias Voltage 5.5 to 14 VDC 5.5 to 14 VDC

Output Impedance <150 Ohm <150 Ohm

Physical

Housing Material Stainless Steel Stainless Steel

Electrical Connector(Output) BNC Jack BNC Jack

Size (Diameter x Length)(overall) 0.5 in x 2.62 in 12.7 mm x 66.6 mm

Size (Diameter x Length)(head) 0.28 in x 1.10 in 7 mm x 28 mm

Weight 0.91 oz 25.7 gm [1]

NOTES:

[1] Typical.

[2] $\pm 3^\circ$ from 100 Hz to 3 kHz typical

[3] TEDS Capable Digital Memory and Communication, compliant with IEEE 1451.4

TRIAxIAL ICP® ACCELEROMETER

PCB Piezotronics, Inc.

Model Number **356A33****Performance ENGLISH SI**

Sensitivity($\pm 10\%$) 10 mV/g 1.02 mV/(m/s²)
 Measurement Range ± 500 g pk ± 4905 m/s² pk
 Frequency Range($\pm 5\%$)(y or z axis) 2 to 10,000 Hz 2 to 10,000 Hz
 Frequency Range($\pm 5\%$)(x axis) 2 to 7000 Hz 2 to 7000 Hz
 Resonant Frequency ≥ 55 kHz ≥ 55 kHz
 Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz) 0.004 g rms 0.04 m/s² rms [1]
 Non-Linearity $\leq 1\%$ $\leq 1\%$ [3]
 Transverse Sensitivity $\leq 5\%$ $\leq 5\%$

Environmental

Overload Limit(Shock) $\pm 10,000$ g pk $\pm 98,100$ m/s² pk
 Temperature Range(Operating) -65 to +250 °F -54 to +121 °C [2]
 Temperature Response See Graph See Graph [1][2]

Electrical

Excitation Voltage 18 to 30 VDC 18 to 30 VDC
 Constant Current Excitation 2 to 20 mA 2 to 20 mA
 Output Impedance ≤ 200 Ohm ≤ 200 Ohm
 Output Bias Voltage 7 to 12 VDC 7 to 12 VDC
 Discharge Time Constant 0.3 to 1.0 sec 0.3 to 1.0 sec
 Settling Time(within 10% of bias) <3 sec <3 sec
 Spectral Noise(1 Hz) 1000 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 9810 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ [1]
 Spectral Noise(10 Hz) 300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 2943 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ [1]
 Spectral Noise(100 Hz) 100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 981 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ [1]
 Spectral Noise(1 kHz) 50 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 490 ($\mu\text{m}/\text{sec}^2$)/ $\sqrt{\text{Hz}}$ [1]

Physical

Sensing Element Ceramic Ceramic
 Sensing Geometry Shear Shear
 Housing Material Titanium Titanium
 Sealing Hermetic Hermetic
 Size (Height x Length x Width) 0.4 in x 0.77 in x 0.4 in 10.2 mm x 19.6 mm x 10.2 mm
 Weight 0.19 oz 5.3 gm [1]
 Electrical Connector 1/4-28 4-Pin 1/4-28 4-Pin
 Electrical Connection Position Side Side
 Mounting Thread 5-40 Female 5-40 Female
 Mounting Torque 4 to 5 in-lb 45 to 56 N-cm

NOTES:

[1] Typical.
 [2] 250° F to 325° F data valid with HT option only.
 [3] Zero-based, least-squares, straight line method.

BIBLIOGRAFIA

- Bai, H., Zhang, F., Gruenberger, H. P., & Nolle, E. (2007). Study on Novel Claw Pole Automobile Generator with Outer PM Rotor. In *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* (p. 632-635). Harbin.
- Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2017). Mathematical model of lorawan channel access. In *18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks* (p. 1–3). WoWMoM.
- Bate, G. H. (2007). *Vibration diagnostics for industrial electric motor drives*. Brel & Kjr.
- Bohn, G., & Steinmetz, G. (1984). The electromagnetic levitation and guidance technology of the ‘transrapid’ test facility Emsland. In *IEEE Trans. Magn. vol. 20* (p. 1666–1671).
- Bor, M., & Roedig, U. (2017). Lora transmission parameter selection. In *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems* (p. 27–34). DCOSS.
- Boukadida, Y., Marignetti, F., Fiengo, V., Stefano, R. D., & Ungaro, C. (2019). Labview fpga-based space vector modulation control of 3-phase voltage source inverter. In *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (p. 1–7).
- Cai, W., Gu, L., Yi, F., & Fahimi, B. (2014). An integrated multi-port power converter with small capacitance requirement for switched reluctance machine. In *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (p. 3183-3189). Dallas: IECON.
- Cattani, C. A., & Rmer, K. (2017). An experimental evaluation of the reliability of lora long-range low-power wireless communication. In *Journal of Sensors and Actuator Networks*. Online: Available: <https://doi.org/10.3390/jsan6020007>.
- Cuomo, F., Campo, M., Caponi, A., Bianchi, G., Rossini, G., & Pisani, P. (2017). Explora: Extending the performance of lora by suitable spreading factor allocations. In *13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications* (p. 1–8). WiMob.

- Di Stefano, R., & Marignetti, F. (2019). Multicast Routing Protocol for LoRa Mesh Networks in Safety Critical Communications. In *ELECTRIMACS 2019 Volume I* (p. 727–738). Cham: Springer.
- Dickhart, W. (1987). Transrapid MagLev Update. In *IEEE Aeros. Electron. Syst. Mag.* vol. 2 (p. 5–8).
- Dickhart, W. (1991). Status Of Transrapid Maglev. In *Proceedings of the Electro International* (p. 613–617). New York.
- F. Jurca, C. M. (2011). Claw-pole machine design and tests for small scale direct driven applications. In *2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)* (p. 237-242). Ischia: ICCEP.
- Fodorean, D., Popp, A., Birte, O., Martis, C., Sarrazin, M., & Auweraer, H. V. (2015). Noise and vibration behavior and analysis conditions of a 45kw induction motor. In *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (p. 2147–2152).
- Georgiou, O., & Raza, U. (2017). Low power wide area network analysis: Can lora scale? In *Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2. (p. 162–165). IEEE.
- Guo, Y., Zhu, J., Watterson, P. A., & Wu, W. (2003). Comparative study of 3-D flux electrical machines with soft magnetic composite cores. In *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 6 (p. 1696-1703).
- Hirotsuka, I., Niwa, Y., Tsuboi, K., & Kawakami, M. (2008). Experimental study of radial distributions of electromagnetic vibration and noise in three-phase squirrel-cage induction motor at no-load. In *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems* (p. 64–68).
- Iorgulescu, M., & Beloiu, R. (2008). Vibration and current monitoring for fault's diagnosis of induction motors. In *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*, vol. 57.
- Leitner, S., Gruebler, H., & Muetze, A. (2018). Low-cost sub-fractional horsepower brushless direct current clawpole machine topology for fan applications. In *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. APEC.
- Lim, J., & Han, Y. (2018). Spreading factor allocation for massive conconnectivity in lora systems. In *IEEE Communications Letters* vol. 22 no. 4 (p. 800–803). IEEE.
- Lu, G., Chong, H., He, W., Zhang, J., & Pan, G. (2003). Harmonic analysis of the PWM inverter fed LSM drive system in the TRANSRAPID Shanghai. In *Proceedings of the 2003 Sixth International Conference on Advances in Power*

- System Control, Operation and Management, Volume 2* (p. 547–557). Hong Kong: ASDCOM.
- Luguang, Y. (2006). Progress of the Maglev Transportation in China. In *IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 16* (p. 1138–1141).
- Lundmark, S. (2005). Application of 3-D computation of magnetic fields to the design of claw-pole motors. Chalmers University of Technology.
- Lundmark, S. K., & Hamdi, E. S. (2006). Designs of claw-pole motors for industrial applications. In *The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives* (p. 111-115).
- Maliti, K. C. (2000). Modeling and analysis of magnetic noise in squirrel-cage. In K. C. Maliti, *Kungliga Tekniska Hgskolan*.
- Marignetti, F., D'Aguanno, D., & Di Stefano, R. (2015). Design and optimization of self-excited synchronous machines with fractional slots. In *Proceedings of the 2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (p. 1–5). Monte Carlo: EVER.
- Mecrow, B. C., Jack, A. G., Atkinson, D. J., Dickinson, P. G., & Swaddle, S. (2002). High torque machines for power hand tool applications. In *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (Conf. Publ. No. 487)* (p. 644-649).
- Meins, J., Miller, L., & Mayer, W. (1988). The high speed Maglev transport system TRANSRAPID. In J. Meins, L. Miller, & W. Mayer, *IEEE Trans. Magn. vol. 24* (p. 808–811). IEEE .
- Min, C., Xiuhe, W., & Changqing, Z. (2016). The basic research of novel hybrid excitation brushless claw pole alternator. In *11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (p. 1479-1483). Hefei: IEEE.
- Mönnich, O., Daweke, R. D., & Lehr, H. (2014). Miniaturized claw-pole generators and motors with high power density. In *2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* (p. 445-449). Bran.
- Naik, V., & Singh, S. (2014). Improved torque and flux performance of type-2 fuzzy-based direct torque control induction motor using space vector pulse-width modulation. In *Electric Power Components and Systems, vol. 42*.
- Pindoriya, R. M., Mishra, A. K., Rajpurohit, B. S., & Kumar, R. (2018). An analysis of vibration and acoustic noise of bldc motor drive. In *2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)* (p. 1–5).

- Pop, A., Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Does bidirectional traffic do more harm than good in lorawan based lpwa networks? In *GLOBECOM 2017 - IEEE Global Communications Conference* (p. 1–6). GLOBECOM.
- Qin, Z., & McCann, J. A. (2017). Resource efficiency in low-power wide-area networks for iot applications. In *GLOBECOM 2017 IEEE Global Communications Conference* (p. 1–7). GLOBECOM.
- Radha, V., & Ripin, Z. M. (2014). Correlation between pwm modulation of an induction motor inverter and radiated electromagnetic acoustic noise. In *2014 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE 2014)* (p. 267–272).
- Rahman, K. A., & Tepe, K. E. (2014). Towards a cross-layer based mac for smooth v2v and v2i communications for safety applications in dsrc/wave based systems. In *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings* (p. 969–973). IEEE.
- Rebhi, R., Ibal, A., & Masmoudi, A. (2014). Hybrid excited claw pole alternators: Attempt to satisfy the increasing power need on board. In *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (p. 3510-3514). ICEMS.
- Reynders, B., & Pollin, S. (2016). Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. In *Symposium on Communications and Vehicular Technologies* (p. 1–5). SCVT.
- Riley, C. M., Lin, B. K., Habetler, T. G., & Kliman, G. B. (1999). Stator current harmonics and their causal vibrations: a preliminary investigation. In *IEEE Transactions on Industry Applications* vol. 35, no. 1 (p. 94–99).
- Saito, A., Kuroishi, M., & Nakai, H. (2016). Vibration prediction method of electric machines by using experimental transfer function and magnetostatic finite element analysis. In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 744 (p. 012088).
- Semtech. (2015). Lora (tm) modulation basics application note. In *Wireless Sensing and Timing Products Division, Tech. Rep.* (p. Online). <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>.
- Wang, C., & Lai, J. (1999). Vibration analysis of an induction motor. In *Journal of Sound and Vibration - vol. 224* (p. 733–756). J SOUND VIB.

- Yu, F., Zhu, Z., & Fan, Z. (2017). Study on the feasibility of lorawan for smart city applications. In *13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications* (p. 334–340). WiMob.
- Zhang, F., Wang, S., Liu, G., & Du, G. (2015). Electromagnetic design and temperature field analysis of a high speed permanent magnet claw motor with outer rotor. In *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (p. 1459-1462). Pattaya: ICEMS.
- Zhang, F., Zhang, H., & Liu, G. (2010). 3D Finite element analysis and experiment for axial sectional claw pole machine with permanent magnet outer rotor. In *2010 International Conference on Electrical Machines and Systems* (p. 1083-1087). Incheon.