



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

**Caratterizzazione elettrica di inverter per compressori  
frigoriferi**

Tutor: Prof. RENATO GOBBO

Laureando: ANDREA BERTAGGIA, 1242000

Anno Accademico 2021/2022



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Richiami di termodinamica</b>	<b>7</b>
2.1	Cicli frigoriferi	7
2.2	Pompa di calore	8
2.3	Chiller	9
2.4	Compressori	9
<b>3</b>	<b>Convertitore di frequenza</b>	<b>13</b>
3.1	Introduzione	13
3.2	Configurazione con raddrizzatore	14
3.3	Principio di funzionamento e contenuto armonico	15
3.4	Controllo scalare e vettoriale	17
3.5	Direct Torque Control	18
<b>4</b>	<b>Motori</b>	<b>21</b>
4.1	Premessa	21
4.2	Motore asincrono	21
4.3	Motore sincrono	22
4.4	Motore Brushless in DC a magneti permanenti	23
<b>5</b>	<b>Descrizione dello studio</b>	<b>27</b>
5.1	Misure wattmetriche	27
5.2	Allarmi di sovracorrente	28
5.3	Macchine esaminate	29
<b>6</b>	<b>Misure</b>	<b>33</b>
6.1	Datatech 100,4	33
6.1.1	Caratteristica della macchina e del circuito di misura	33
6.1.2	Influenza delle ventole	34
6.1.3	Forme d'onda e rendimenti	35
6.1.4	Secondo compressore	38
6.1.5	Misure di tensione a monte della bobina	38
6.1.6	Sovracorrenti	40
6.2	Datatech 12.1	41
6.2.1	Caratteristiche della macchina e del circuito di misura	41
6.2.2	Misure	41
6.2.3	Risultati	41
6.2.4	Rendimento frigorifero	43
6.3	Titan Sky 5.1	45

6.3.1	Descrizione del sistema	45
6.3.2	Misure per il rendimento	45
6.3.3	Fattori di distorsione di tensioni e correnti, problematiche sulla pressione di mandata	45
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Ringraziamenti</b>	<b>51</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Lo studio in questione si pone come obiettivo quello di andare ad eseguire la valutazione dei rendimenti e della power quality dell'alimentazione su di alcuni motori alimentati da inverter HVAC ABB, specifici per applicazioni di condizionamento e refrigerazione, in modo da poterli, poi, confrontare con quelli dichiarati sia dal fornitore dei motori, sia con quelli del sistema motore-inverter-compressore che vengono dichiarati dall'azienda in questione che si occupa di assemblare il prodotto finale. Le misurazioni verranno eseguite su varie macchine differenti tra loro per tipologia e motore che aziona il compressore: una pompa di calore con compressore semiermetico dotato di motore asincrono, una pompa di calore con compressore mosso da motore sincrono, entrambe aria-aria e un close control aria-aria con due circuiti frigoriferi e altrettanti compressori alimentati da motore sincrono brushless. Si indagherà, poi, su alcuni allarmi dell'inverter che segnalano sporadicamente la presenza di sovracorrenti in entrata al motore e, infine, verranno eseguite determinate valutazioni e considerazioni sull'emissione elettromagnetica delle macchine, in particolare modo della terza, la cui applicazione è molto sensibile in quanto destinata ad essere collocata nelle sale server, quindi sono richieste emissioni e disturbi elettromagnetici molto bassi oltre che grande precisione nel raffreddamento.

Cardine dello studio proposto è l'inverter, dispositivo che in questo genere di applicazioni ha visto un grande uso negli ultimi anni data la sua versatilità nel poter controllare i motori elettrici, sia asincroni che sincroni, rispettivamente andando a modificare la velocità base per i primi e la velocità vera e propria per i secondi, andando a fornire in uscita una tensione modulabile sia in ampiezza che in frequenza.

L'importanza di questo convertitore statico, che comunque presenta un rendimento prossimo all'unità, viene messa in risalto da un esempio molto pertinente riguardante il campo di applicazione proposto: basti pensare ad un condizionatore disposto in un ambiente generico all'interno del quale verrà immessa dell'aria, calda o fredda che sia; in passato per andare a regolare la temperatura si utilizzava un'accensione intermittente del motore, mentre per l'avviamento si ricorre ad una variazione dei collegamenti del tipo stella-triangolo, tale per cui il compressore mosso dal motore elettrico veniva attivato in maniera intermittente, piuttosto che essere controllato in maniera continua. Tali tecniche, tuttavia, implicavano degli effetti collaterali non di poco conto, che l'introduzione degli inverter, dovuta ad un loro sempre più basso costo, sono stati arginati in maniera notevole, se non del tutto eliminati; gli svantaggi in questione sono tutti riconducibili all'accensione e spegnimento intermittenti, che, per un motore elettrico, implicano la frequente circolazione della corrente di avviamento, detta anche di spunto, all'interno degli avvolgimenti del motore, in genere sette volte superiore alla corrente nominale: ciò implica un progressivo danneggiamento degli avvolgimenti che si ripercuote nel tempo con una diminuzione della vita del motore, al termine della quale dovrà essere sostituito; inoltre, l'accensione di una macchina di questo tipo ha effetti negativi soprattutto dal punto di vista del risparmio energetico, dato che verrà assorbita ad ogni accensione più potenza di quella necessaria per mantenere a regime la macchina, con un aumento dei costi di gestione della macchina. Inoltre, un'ulteriore problematica che si riscontra è quella dell'al-

lontanamento da quella che è la visione di efficienza energetica che si sta cercando di portare avanti in Europa, mercato principale sul quale opera l'azienda che ha reso possibile tale studio.

Infine, per quanto riguarda l'obiettivo finale di queste macchine, ovvero raffreddare o riscaldare con la precisione più alta possibile uno specifico sistema, che sia un edificio commerciale, residenziale o una sala server, l'utilizzo di un inverter è fortemente consigliato dal momento che la temperatura di riferimento viene prima raggiunta e poi controllata con una precisione nettamente più elevata delle due tecniche precedentemente enunciate, oltre ad essere diventato obbligatorio per alcune fasce di prodotto che si vuol fare rientrare nella direttiva ERP Ecodesign (prodotti utilizzatori di energia) ; a livello di ambienti usufruiti da persone questo si manifesta in un aumento del comfort abitativo, mentre per altre applicazioni, come quella del Close control destinato a sale server, in una maggiore sicurezza nel sapere che a controllare dei dispositivi così importanti e delicati, vi è una macchina molto precisa.

## Capitolo 2

# Richiami di termodinamica

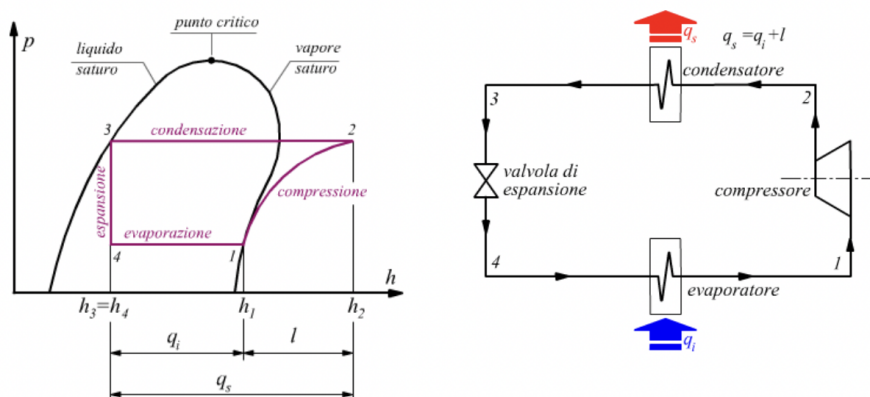
Prima di affrontare la componente elettrica dello studio, verranno ripresi alcuni concetti fondamentali sui circuiti frigoriferi, necessari per andare poi a comprendere come andare a controllare efficacemente il motore pilotando l'inverter.

In primis, data la natura termomeccanica delle grandezze in questione, va chiarito il concetto di potenza frigorifera, ovvero la quantità di calore che il compressore è in grado di trasferire in un determinato tempo, attraverso il refrigerante che pompa nell'impianto.

### 2.1 Cicli frigoriferi

A questo punto enunciamo brevemente in cosa consiste un ciclo frigorifero, ovvero il processo attraverso il quale una macchina operatrice riesce a trasferire calore da una sorgente a temperatura superiore ad una a temperatura inferiore: da qui si deduce immediatamente come l'utilizzo di un ciclo di questo tipo possa essere duale, ovvero operare da pompa di calore a macchina frigorifera. Il ciclo frigorifero può essere eseguito secondo tre modalità, che vediamo in seguito.

1. Ciclo di Kelvin, in cui viene eseguito un lavoro di compressione del fluido per farlo passare da vapore saturo a vapore surriscaldato, che viene mandato nel condensatore, dove cede il calore passando a liquido; poi il liquido viene fatto espandere nella valvola di laminazione che provoca una parziale evaporazione del liquido e un raffreddamento della valvola stessa; dopodiché il liquido passa nell'evaporatore, parte conclusiva del ciclo. Per funzionare, questo tipo di ciclo necessita di un gas refrigerante;



2. Ciclo ad assorbimento (o di Carre) usato prevalentemente nelle applicazioni industriali, in cui si usa il calore di dissoluzione di un soluto all'interno di un solvente costantemente concentrato e diluito. Si utilizza l'ammoniaca come soluto e l'acqua come solvente e, nonostante il rendimento sia basso, viene usato in quanto le temperature raggiungibili sono molto basse. Da notare come il ciclo possa essere ad assorbimento, quindi gas-liquido o assorbimento del tipo gas-solido.
3. Ciclo di Stirling, il quale si basa sul mantenimento stabile di un'oscillazione ciclica del fluido di ciclo, il cui cambiamento di stato non agisce sul ciclo frigorifero, che ha lo stesso rendimento a tutte le temperature.

## 2.2 Pompa di calore

Le macchine in questione seguiranno tutte il ciclo di Kelvin, con refrigeranti improntati ad avere una ripercussione il più bassa possibile sull'effetto serra, parametro qualificato del coefficiente adimensionale GWP (Global Warming Potential). Il refrigerante in questione, viene pompato all'interno di un compressore, che come vedremo può essere di varie tipologie, il cui scopo è quello di andare ad aumentare la temperatura e la pressione del fluido andando a comprimerlo per farne aumentare la densità di energia interna dato che, al termine del processo di compressione, vi saranno in uno spazio più ristretto lo stesso numero di molecole di quando si è iniziato tale processo. Quando, poi, il refrigerante in forma di vapore surriscaldato in alta pressione e alta temperatura entra nel condensatore, viene raffreddato, mantenendo comunque una pressione elevata ma una temperatura minore rispetto all'ingresso, tale per cui in uscita dal condensatore si troverà allo stato liquido; dopodiché troviamo un dispositivo detto valvola di espansione, controllata elettronicamente, che permette di andare ad abbassare anche la pressione attraverso la regolazione della sezione attraverso la quale il fluido scorre, per poi passare dentro un evaporatore che andrà, posto all'interno dell'ambiente in questione, a raffreddarne la temperatura data la presenza al suo interno del fluido a bassa temperatura e bassa pressione; infine, il fluido viene riportato in aspirazione al compressore che, come detto in fase di presentazione dello studio, è mosso da un motore elettrico controllato dall'inverter, a monte e a valle del quale verranno eseguite le misure elettriche. Il processo appena descritto viene rappresentato solitamente da un diagramma da cui diventa più facile comprendere le quattro fasi del ciclo: in ordinata viene rappresentata la pressione del fluido mentre in ascissa l'entalpia, che è la somma dell'energia interna del fluido a cui viene sommato il prodotto tra pressione e volume.

Nel momento in cui, invece, si volesse andare ad immettere aria non più fredda, bensì calda all'interno di un ambiente, allora in quel caso il fluido all'uscita dal compressore, ad alta temperatura e pressio-



ne viene mandato in ingresso allo scambiatore all'interno dell'ambiente da condizionare, cede calore e, poi, viene riportato da uno scambiatore esterno alle condizioni tali per cui il ciclo può ricominciare. Fondamentale è, nelle pompe di calore come quelle che verranno studiate, in grado sia di erogare aria calda che aria fredda, la valvola a 4 vie, che permette l'inversione della direzione del fluido e, quindi, il passaggio da aria calda a fredda e viceversa.

## 2.3 Chiller

Il funzionamento complementare a quello della pompa di calore è il chiller: infatti, andando una macchina che lavora con un ciclo termodinamico a compressione di vapore a trasferire potenza termica da una sorgente a temperatura inferiore ad una che si trova a temperatura superiore, può essere, a seconda dell'effetto desiderato essere definita pompa di calore o chiller.

In ambito industriale si usano per la termoregolazione in cui è necessario raggiungere temperature molto basse; dato che verrà inserito all'interno di una sala server con l'unico scopo di apportare un abbassamento della temperatura, tali macchine vengono progettate solo per lavorare con una direzione del fluido, non contemplando la possibilità di andare a produrre calore.

Come accennato, i chiller possono eseguire un raffreddamento sia verso l'aria che verso l'acqua: nei chiller raffreddati ad acqua, la componente fondamentale è lo scambiatore d'acqua che garantirà la condensazione ideale del gas frigogeno, assente nella controparte ad aria. Il discriminante principale nella scelta della tipologia di macchina è di natura ambientale: non ha senso, infatti, andare a collocare un chiller ad acqua in un luogo ove l'approvvigionamento di tale risorsa è complicato. I vantaggi riscontrabili nell'andare a scegliere per la propria applicazione un chiller a d'acqua sono:

- Maggiore efficienza rispetto quelli ad aria;
- Sfruttamento dell'evaporazione dell'acqua per andare a dissipare calore;
- Maggiore potenzialità frigorifera;
- Longevità della macchina più elevata.

Gli svantaggi, invece, sono:

- Necessità di avere un approvvigionamento continuo di acqua;
- Cura richiesta nella locazione, dato che sono causa di rumori e vibrazioni
- Costi di installazione e mantenimento più elevati;
- Ingombri dovuti agli spazi richiesti per strumentazioni di backup e di trattamento dell'acqua.

I chiller, indipendentemente dal fatto che siano ad aria o ad acqua, si distinguono per le applicazioni in base al compressore presente nel ciclo, di cui ora andremo a parlare nel dettaglio.

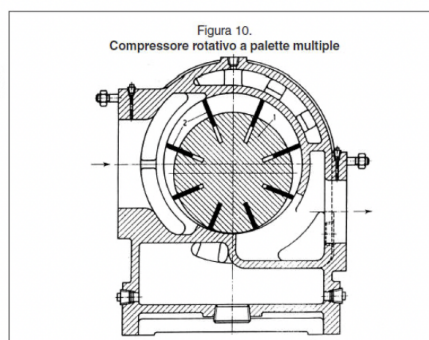
## 2.4 Compressori

Il compressore è una macchina operatrice pneumofora, quindi atta ad innalzare la pressione di un aeriforme, andandone ad aumentare l'energia potenziale per mezzo dell'energia meccanica, fornita a sua volta dalla rete elettrica e convertita dal motore, che può essere sia asincrono che sincrono. Va notato come tale macchina sia diversa dalla pompa in quanto quest'ultima va ad agire su di un fluido non comprimibile, come l'acqua.

I compressori si suddividono in due famiglie:

Compressori volumetrici, caratterizzati dal fatto di andare ad aspirare il gas indipendentemente dalle condizioni di aspirazione e di mandata, con una portata che, generalmente, è proporzionale al numero di giri al minuto con cui viene mosso; questa informazione è fondamentale per comprendere come mai l'inverter sarà, per i motori asincroni, esercito con controllo vettoriale, in modo da poter realizzare il DTC (Direct Torque Control) ed avere un'ottima dinamica e precisione sul parametro della velocità in uscita. Di seguito vengono elencate le varie tipologie:

- Compressore a pistone, in cui tale componente meccanica si muove all'interno di un cilindro seguendo un moto rotoalternativo; viene usato per portare piccoli volumi di fluido ad alte pressioni; presente in Titan SKY, la pompa di calore aria-acqua caratterizzata dal motore asincrono;
- Compressori rotativo e ad anello liquido, caratterizzati entrambi da un rotore all'interno di una cavità che va a creare camere a volume variabile, massimo in aspirazione e minimo in mandata che, per la legge  $pV=nRT$ , fa sì che in aspirazione la pressione sia minima e in mandata sia massima; tra i due cambia il sistema di tenuta;



- Compressore a lobi, che presenta un rotore opportunamente sagomato ad assi paralleli che ruotano sincroni ma in senso opposto, creando camere progressive dalla bocca di aspirazione a quella di mandata; sono caratterizzati dall'assenza di olio;
- Compressore a vite, dove due viti a passo inverso e diametro differente si imboccano a vicenda al fine di creare una cavità che si sposta dall'aspirazione alla mandata, calando il volume e comprimendo il gas; si distinguono per le basse sollecitazioni meccaniche e per la possibilità di adottare soluzioni multistadio, dato che singolarmente il rapporto di compressione non è così elevato; sono, generalmente, azionati da motori asincroni;
- Compressore scroll, in cui due componenti, dette chicciole o equipaggi a spirale, una fissa e l'altra che segue un movimento rotatorio detto planetario dovuto al fatto che i centri delle due spirali non coincidono; si distinguono per l'alto rendimento volumetrico, ovvero il rapporto tra la massa di gas effettivamente aspirato e il volume che occuperebbe in realtà nelle condizioni di aspirazione. Si trova in unità che gestiscono carichi di media entità, come Datatech, che nel primo caso in esame ne presenta quattro unità suddivise in due circuiti frigo, ognuno caratterizzato da un solo inverter, in modo tale da poter disporre di una completa modulabilità all'interno del campo di lavoro della potenza frigorifera, con specifici limiti legati alla lubrificazione.

I compressori dinamici, detti anche turbocompressori, che comprimono il fluido con l'energia cinetica impressa al gas da specifici meccanismi; si usano per portare ad alte pressioni grandi portate di fluido;

si suddividono in:

- Compressore centrifugo, che può sostituire un compressore volumetrico negli impianti di refrigerazione/condizionamento per portate elevate; hanno un buon rendimento ed emettono poco rumore;
- Compressore assiale, caratterizzato da una direzione assiale, piuttosto che radiale, del moto del gas; si presta bene a soluzioni multistadio perché singolarmente va ad alzare di poco la pressione.

Per quanto riguarda un'ulteriore distinzione che si può eseguire per i compressori, troviamo quella costruttiva, che li divide in:

- Ermetici, compressore e motore si trovano all'interno dello stesso involucro, che non è accessibile in nessun modo che non implichi andare ad intaccare l'integrità della macchina;
- Semiermetici, in cui compressore e motore si trovano all'interno della stessa struttura ma, a differenza del caso precedente, sono accessibili andando ad allentare dei bulloni, che consentono di separare l'involucro in due parti; su questi compressori è difficile una valutazione di tipo torsionometrica all'albero in quanto comunque vi è la presenza del gas refrigerante;
- Aperti, quindi con il compressore separato dal motore, il cui albero è a vista e accessibile direttamente dall'esterno: consentono misurazioni di coppia mediante torsionometro; nessuno dei compressori analizzati sarà di questa tipologia.



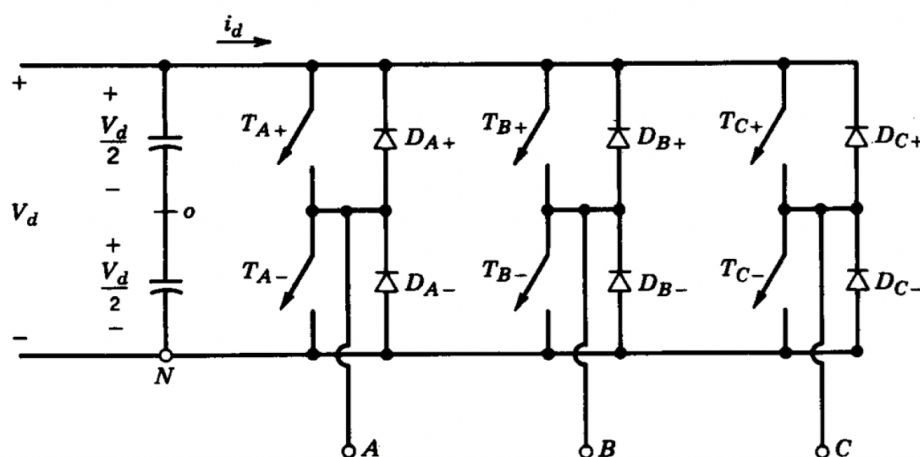
## Capitolo 3

# Convertitore di frequenza

### 3.1 Introduzione

Il convertitore in questione è un inverter, che realizza la conversione da corrente continua a corrente alternata, in modo da poter generare le forme d'onda di tensione attraverso le quali si può verificare la legge di Lenz all'interno del motore, convertendo l'energia elettrica all'ingresso in energia meccanica da fornire al compressore.

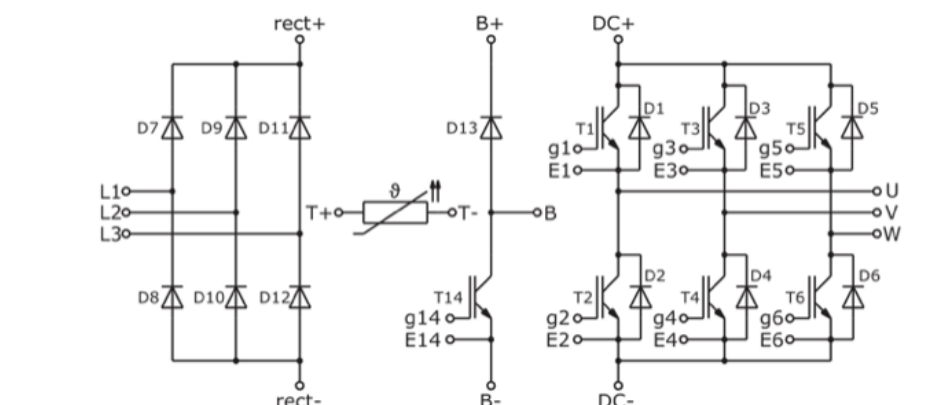
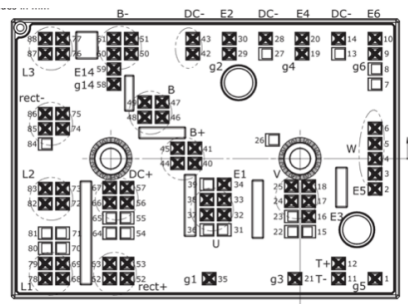
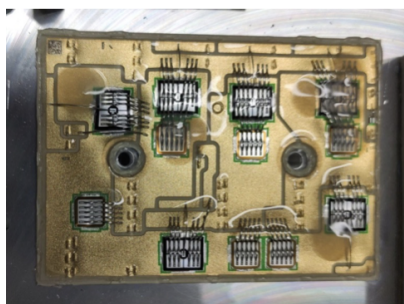
La conversione che viene messa in atto è dovuta all'azionamento comandato sia in apertura che in chiusura di interruttori denominati switch, che generalmente si trovano in numero 6 per i convertitori trifase, che genereranno tre forme d'onda di tensione sfasate di  $2\pi/3$  l'una rispetto all'altra, a due livelli, tale per cui la tensione concatenata in uscita sarà un'onda semiquadra; come accenneremo in seguito, sono possibili anche delle soluzioni multilivello, che non trovano particolare riscontro nell'ambito del condizionamento, ma che permettono di avere in uscita una forma d'onda con un minore contenuto armonico.



Lo studio in questione sarà focalizzato sugli inverter a tensione impressa, in quanto quelli a corrente impressa si utilizzano solo per gli azionamenti di grossi motori e questo non sarà il caso.

Va precisato, innanzitutto, che i convertitori montati su queste macchine non sono degli inverter puri, quindi che ricevono in ingresso una tensione continua che poi viene alternata attraverso le aperture e chiusure degli switch, bensì la tensione continua viene direttamente ricavata da quella di rete, formando una cosiddetta configurazione che prevede la cascata, partendo dalla trifase alternata a 50 Hz del fornitore, di un raddrizzatore trifase a diodi, un banco di condensatori per il livellamento del ripple di tensione e l'inverter vero e proprio a tensione impressa, in uscita dal quale avremo una tensione di ampiezza e

frequenza modulata entro determinati intervalli che sono comunque molto ampi: smontando un inverter ABB ACS 355 da 15 kW, che permette di ottenere in uscita delle frequenze che vanno da 0 a 600 Hz a passo di 0.01 Hz, è stato possibile individuare il circuito di potenza vero e proprio, delle dimensioni di circa 8x5 cm<sup>2</sup>. Tale circuito è posto a contatto con un dissipatore di dimensioni nettamente maggiori (circa 4 volte tanto), che deve consentire di asportare l'ingente quantità di calore che viene prodotta dalla commutazione degli interruttori, che sono gli IGBT: questi interruttori permettono di commutare il loro stato in un microsecondo, gestendo comunque un buon quantitativo di potenza (seppur inferiore a quello dei BJT, per esempio), e ciò fa sì che debbano essere raffreddati di continuo. Di seguito si riporta lo schema del costruttore in cui sono individuati i semiconduttori con cui sono realizzati sia il ponte di Gretz che l'inverter.



### 3.2 Configurazione con raddrizzatore

Vediamo ora il principio di funzionamento di entrambi i componenti del back to back, seguendo quello che è il flusso di energia una volta arrivata dalla rete. La tensione di rete arriva in ingresso al ponte a diodi trifase, caratterizzato da tre diodi superiori, dei quali chiuderà ciclicamente quello con la tensione anodica più alta, e tre diodi inferiori dei quali, in maniera complementare, dei quali andrà a chiudere ciclicamente quello con la tensione catodica più bassa: questo permette di far sì che, per ciascun periodo elettrico, ci saranno sei coppie di diodi che andranno a condurre, selezionando tra le tre tensioni trifase il livello di tensione più alto: ciò mi renderà in uscita una forma d'onda pressoché costante, eccezion fatta per un ripple di tensione di frequenza sei volte superiore a quella di alimentazione, dovuto al fatto che sono proprio sei le coppie di diodi che entrano in conduzione a turno. Si otterrà in questo modo, data una terna di tensioni di rete dal valore concatenato  $V_L$  e frequenza  $f$ , una tensione dal valore  $V_D = 1,35 \cdot V_L - 6f \cdot L_s \cdot I_D$  dove  $L_s$  è il valore associato alle induttanze di collegamento,  $I_D$  è la corrente con cui si rappresenta il carico e 6 è un coefficiente caratteristico dovuto al fatto che i diodi sono proprio 6 (nel caso monofase in cui sono 4 il parametro equivalente nell'equazione è proprio il numero

4).

Di seguito, proseguendo solidali al flusso di potenza, si trova un banco di condensatori ad elevata capacità, collegati in modo tale che sia realizzata la serie tra due condensatori equivalenti uguale che, grazie alla loro caratteristica intrinseca di essere attraversati da una corrente

$$i_C = C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt}$$

a questo punto, a parità di corrente, maggiore è la capacità, minore sarà l'escursione di tensione sui condensatori, e quindi sull'inverter dato che sono messi in parallelo. Nello specifico, nell'inverter dimostrativo smontato, erano presenti otto condensatori ciascuno dalla capacità di  $72\mu\text{ F}$ .



Condensatori di livellamento della tensione di ACS 355

### 3.3 Principio di funzionamento e contenuto armonico

L'inverter vero e proprio, che andrà a realizzare la conversione da tensione continua a tensione alternata, è costituito da tre strutture (una per fase) in parallelo dette gambe composte dalla serie di due IGBT, ognuno dei quali a sua volta composto da un interruttore commendabile sia in apertura che in chiusura attraverso una porta di segnale denominata gate, e un diodo in parallelo atto al ricircolo della corrente in senso opposto a quello dell'interruttore che è pur sempre unidirezionale, detto diodo di freewheeling. Analizzando una singola gamba, corrispondente alla fase a, per esempio, ci rendiamo conto che la tensione di fase  $v_{a0}$ , dove 0 è il punto individuato dai due condensatori che ripartisce la tensione continua in ingresso in due parti uguali, quando lo switch superiore detto  $T_{a+}$  sarà chiuso, sarà di  $V_d/2$ , viceversa, durante la chiusura di  $T_{a-}$  sarà  $-V_d/2$ , dando luogo ad un'onda quadra; a questo punto, pilotando gli interruttori delle tre gambe in maniera sfasata l'una rispetto all'altra di 120 angoli elettrici, otterremo tre tensioni concatenate, con cui verranno alimentati i motori, il cui andamento sarà di tipo semiquadro, con un terzo di periodo elettrico dal valore di  $V_d$ , un terzo  $V_d$ , separati da due sesti distinti durante i quali la concatenata avrà valore nullo: ecco ottenuta una tensione alternata partendo da una continua. Chiaramente, la situazione ideale sarebbe avere in uscita una terna di tensioni perfettamente sinusoidali, ma questo non è possibile trattandosi di una forma d'onda a gradini, che avrà un suo contenuto armonico.

Per quanto riguarda il contenuto armonico, esso è un concetto derivante dalla Serie di Fourier, strumento matematico che permette di rappresentare un qualsiasi segnale periodico come la somma di una serie di sinusoidi di ampiezza e frequenza diversa, rispettivamente inversamente e direttamente proporzionale all'ordine dell'armonica, quindi, dato un segnale periodico  $f(t)$ , esso può essere rappresentato

come

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t)$$

ove l'argomento della serie sono proprio le sinusoidi; in particolare modo, dato che si avrà a che fare con delle forme d'onda dispari, avremmo solamente armoniche dispari, come da apposito postulato della serie di Fourier. Per quanto riguarda le armoniche, è di interesse pratico solamente la prima, detta fondamentale, in quanto è l'unica che all'interno di un motore elettrico corrisponde allo scambio di potenza attiva, mentre le altre, tendenzialmente, portano solo problemi quali:

- Scatto intempestivo degli interruttori;
- Intervento dei fusibili;
- Surriscaldamento causa effetto Joule, che come noto è dipendente dal quadrato del valore efficace della corrente che attraversa un conduttore;
- Rumore
- Esplosione dei condensatori;
- Problemi all'elettronica sensibile.

Per questo motivo, in generale si cerca di risolvere il problema delle armoniche con i seguenti provvedimenti:

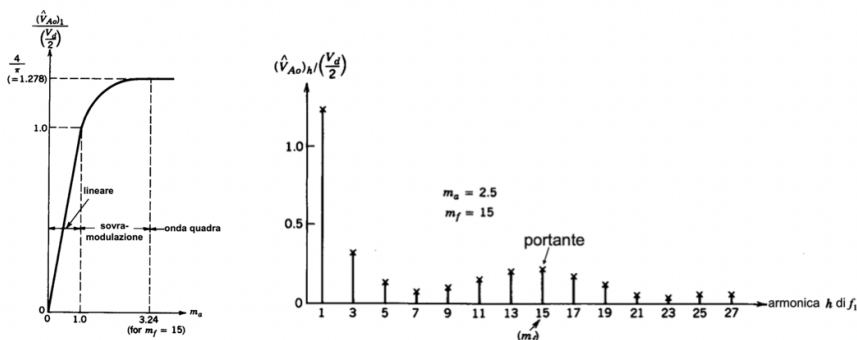
- In applicazioni HVAC, quindi quelle considerate, si applica un'induttanza di livellamento del ripple di corrente a valle del raddrizzatore nella struttura back to back;
- Utilizzo di filtri accordati (passivi), che sfruttano il principio della risonanza tra un'induttanza e una capacità in serie, opportunamente dimensionate in sede di progetto per diventare un cortocircuito ad una certa frequenza e scaricare a terra la corrente di tale frequenza senza farla proseguire oltre; è ovviamente presente all'interno del circuito una resistenza per non bruciare il filtro che, altrimenti, sarebbe un mero cortocircuito;
- Filtri passa-alto (anch'essi passivi), composti da resistenze, induttanze e capacità tali per cui vengono notevolmente attenuate tutte le armoniche al di sotto di un certo ordine, in quanto attenuare quelle di frequenza più elevata non una priorità tanto quanto togliere quelle a bassa frequenza che hanno ampiezza maggiore; infatti, detto  $n$  l'ordine dell'armonica, ciascuna sinusoide avrà ampiezza scalata di  $1/n$  e frequenza  $n$  volte superiore a quella della fondamentale;
- Filtri attivi, costosi ed ingombranti (di solito se ne usa uno solo per più macchine o addirittura per un edificio), ma molto precisi in quanto si basano sulla continua misura della forma d'onda di tensione di interesse al fine di poter produrre un'onda di tensione uguale e contraria al contenuto armonico: così facendo il coefficiente di distorsione della tensione, detto THDV raggiunge valori molto bassi, il che è una situazione desiderabile;
- Utilizzo di inverter multilivello per poter usufruire di una forma d'onda di tensione non più semiquadra, ma composta da molti gradini che permettono di assimilare tale forma d'onda ad una sinusoide; attualmente non utilizzata in ambito di refrigerazione e condizionamento a causa degli ingombri di questi convertitori, soprattutto a causa del volume occupato dai condensatori.



### 3.4 Controllo scalare e vettoriale

Dopo aver descritto brevemente il principio di funzionamento di questi convertitori, ci concentriamo sul controllo, ovvero il meccanismo attraverso il quale si va ad aprire un interruttore piuttosto che un altro. Si può decidere di controllare un inverter per via scalare, quindi impostando il valore della tensione e della frequenza che si vogliono avere in uscita dal convertitore; il controllo vettoriale invece, si pone come obiettivo non tanto quello di controllare i parametri delle sinusoidi, piuttosto di impostare il modulo e la fase del vettore rotante che si avrà in uscita dal convertitore: la trasformata di Steinmetz mi permette, infatti, di passare da una sinusoidale ad un vettore rotante, detto fasore, che, attraverso il controllo del convertitore, cercheremo di far aderire il più possibile al fasore vero e proprio.

Quando si va ad operare scalarmente, quindi con la Pulse Width Modulation, o semplicemente PWM, si vanno a confrontare tre forme d'onda sinusoidali, dette di controllo, e sfasate sempre di 120 gradi elettrici (che sono le forme d'onda ideali che vogliamo in uscita dal convertitore) con tre segnali triangolari simmetrici in alta frequenza, denominati carrier; in base a quando il Carrier è più grande o piccolo della modulante di controllo, verranno inviati al gate dell' IGBT rispettivamente i segnali di apertura e chiusura degli switch delle singole fasi. Sotto questo punto di vista diventano fondamentali i coefficienti adimensionali  $m_a$  ed  $m_f$ , rispettivamente rapporto tra la frequenza del Carrier e della modulante (solitamente abbastanza elevato e dispari per non avere le armoniche più elevate sulla concatenata) e rapporto tra le due ampiezze. La tensione concatenata nella sua prima armonica in questo caso avrà un'ampiezza di  $0,612 \cdot m_a \cdot V_d$ . Nel caso si dovesse necessitare di un valore della tensione in uscita maggiore di quello appena proposto si può, andando ad aumentare il valore di  $m_a$ , andare a lavorare in due maniere alternative che sono il funzionamento in sovrarmodulazione e quello in onda quadra, con l'effetto collaterale di andare ad aumentare in maniera sempre più importante il contenuto armonico; va notato come, con il funzionamento in onda quadra gli switch vadano a cambiare il loro stato il minor numero di volte rispetto agli altri due funzionamenti.

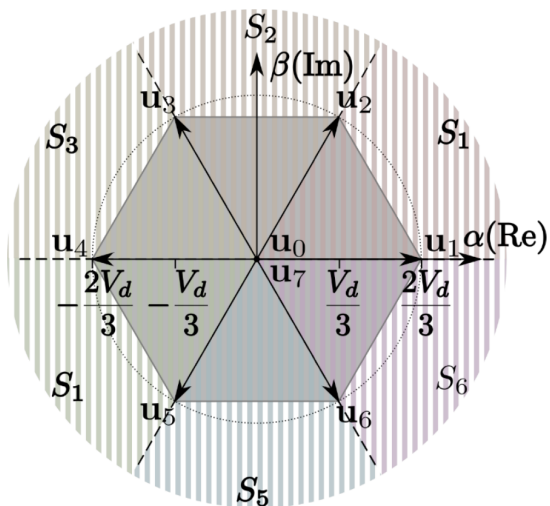


Tecniche di controllo scalare

Contenuto armonico per il controllo scalare

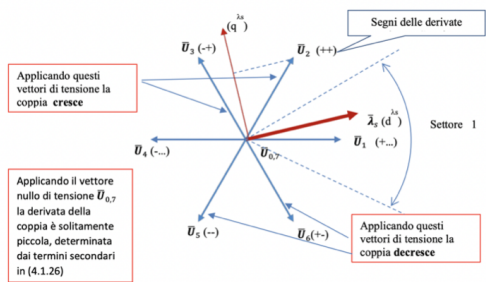
Come detto, l'alternativa alla SPWM per il controllo dell'inverter è la Space Vector Modulation, che consiste nella sintesi del vettore rotante ad una certa velocità angolare, strettamente legata alla frequenza della forma d'onda, facendo assumere una precisa combinazione degli stati degli switch all'inverter, con anche in questo caso la possibilità di poter andare a lavorare in sovrarmodulazione o in onda quadra, oltre che all'implementazione di altre tecniche più versatili come, per esempio, la modulazione a due gambe che permette di limitare le perdite di commutazione di  $1/3$ , ma aumentando il THD.

Il vantaggio fondamentale della SVM rispetto alla PWM è che, rispetto a quest'ultima permette di ottenere una fondamentale della concatenata più elevata di un fattore  $2/\sqrt{3}$  a causa di una terza armonica che va a scomparire.

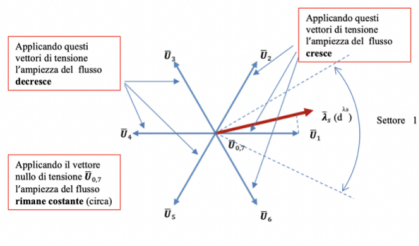


### 3.5 Direct Torque Control

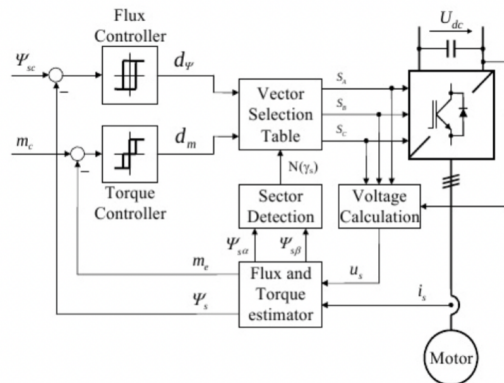
Il controllo in modalità vettoriale del motore, che offre già una migliore dinamica e stabilità rispetto alla controparte scalare, permette di poter implementare il controllo in DTC per i motori asincroni, presenti in alcune delle applicazioni esaminate in questo studio. Il DTC è un azionamento, ovvero un circuito che permette di controllare i parametri meccanici del motore attraverso quelli elettrici dell'inverter (gli stati delle gambe), per cui ABB ha sviluppato un proprio algoritmo che permette di poter controllare la coppia e la velocità in uscita dal motore con grande precisione e ad elevata dinamica, il tutto in totale assenza di sensori all'interno del motore, che, altrimenti, implicherebbero problematiche di ingombro, costo e deterioramento delle prestazioni con l'aumento della temperatura, situazione facilmente presentabile. L'azionamento in questione si pone come obiettivo quello di mantenere la coppia ed il flusso statico all'interno delle rispettive bande di tolleranza attraverso la selezione dello stato migliore dell'inverter, in modo tale che, una volta che uno una delle due grandezze fuoriesce dai limiti, si possa andare a riportarla entro i valori considerati accettabili. Tale tecnica risulta molto efficace, gli unici difetti sono il ripple di coppia in uscita dal motore e la frequenza di commutazione che non è costante: quest'ultima problematica è stata risolta implementando una variante di natura predittiva che va a calcolare anticipatamente il valore delle due grandezze in modo da imprimere a priori il giusto valore di tensione al motore.



Controllo di coppia nel DTC



Controllo di flusso statorico nel DTC



Schema a blocchi DTC



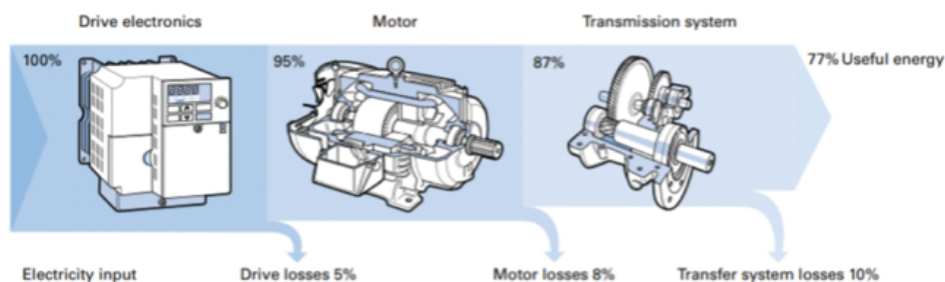
## Capitolo 4

# Motori

### 4.1 Premessa

I motori oggetto dello studio sono, come noto da paragrafo precedente, alimentati da inverter, i cosiddetti convertitori fed motors, sia sincroni che asincroni: nello specifico verranno esaminate delle casistiche caratterizzate da motori sincroni brushless a magneti permanenti e da motori asincroni a gabbia di scoiattolo.

Il motore elettrico ha lo scopo di convertire potenza elettrica in potenza meccanica, che si manifesta in uscita dal sistema attraverso la rotazione di un albero con una velocità angolare proporzionale alla tipologia della potenza in ingresso. Fondamentale, sotto questo punto di vista è azionamento con controllo in velocità, di cui poi vedremo alcune casistiche ed il principio di funzionamento, che ha lo scopo di regolare la velocità in risposta ad un segnale esterno: questo aspetto si mostra particolarmente utile nelle applicazioni oggetto dello studio, in quanto nelle pompe e nei compressori la velocità di rotazione deve essere variabile ed un controllo della velocità attraverso un motore sincrono alimentato da un inverter che riesce a modulare sia la frequenza che la tensione è l'ideale.



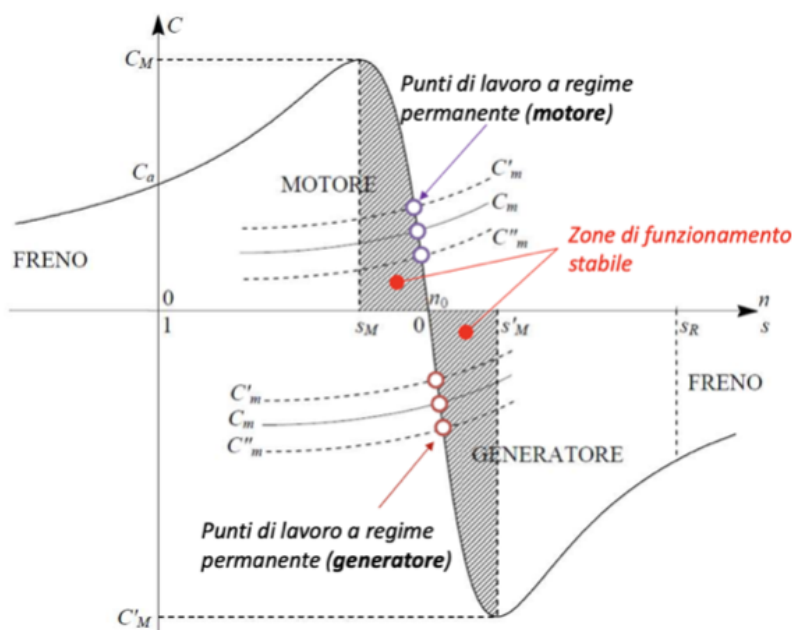
I motori in questione sono, come detto in fase di presentazione sia sincroni che asincroni, per ciascuno dei quali di seguito eseguiremo un ripasso sulle caratteristiche costruttive, le principali tipologie e gli strumenti analitici più efficaci per descriverne lo stato.

### 4.2 Motore asincrono

Nel Titan SKY invece il compressore a pistone è mosso da un motore asincrono con rotore a gabbia di scoiattolo, che per natura non presenta una velocità di rotazione dipendente dalla frequenza dell'alimentazione, ma piuttosto dal carico, tanto è che nel suo circuito equivalente il secondario riferito al primario la parte reale dell'impedenza viene rappresentata come un reostato il cui valore dipende dallo scorrimento  $s$ , ovvero la differenza di velocità di rotazione tra il campo magnetico rotante dello statore

e il rotore. La caratteristica fondamentale di questo tipo di macchina è avere gli avvolgimenti del rotore, costituiti dalle sbarre, cortocircuitati alle due estremità da degli anelli metallici, rendendo impossibile l'accesso ai morsetti del circuito rotorico; è il tipo di motore più diffuso, ed è soprattutto apprezzabile la sua robustezza meccanica. Fondamentale per andare a ottimizzare il funzionamento di una qualsiasi macchina mossa da un motore asincrono è lo strumento della caratteristica meccanica, un diagramma che esprime la coppia all'albero del motore in funzione del numero di giri e dello scorrimento per una specifica velocità base, dando luogo alla curva riportata di seguito che evidenzia l'attitudine della macchina a poter eventualmente lavorare come generatore, anche se questo non sarà il caso.

A questo punto, dipendendo lo scorrimento dalla velocità base  $n_0 = \frac{60 \cdot f}{p}$ , che a sua volta dipende dalla frequenza di alimentazione secondo la ove  $f$  è la frequenza di alimentazione e  $p$  il numero di coppie polari di statore, con l'inverter è possibile andare a traslare la caratteristica del motore in modo tale da poter seguire al meglio la curva di carico del compressore.



Caratteristica meccanica di un motore asincrono

### 4.3 Motore sincrono

Le macchine sincrone si basano sull'interazione a regime di un campo magnetico induttore e gli avvolgimenti di indotto, dando luogo ad una velocità di rotazione legata strettamente alla frequenza dell'alimentazione. Per quanto riguarda lo statore, esso è alimentato in continua attraverso delle spazzole o una macchina eccitatrice e può essere distribuito di tipo aperto o di tipo concentrato; l'avvolgimento di indotto è invece in alternata trifase aperto e viene collegato direttamente alla rete; troviamo, infine per quanto riguarda le caratteristiche costruttive, un avvolgimento smorzatore a gabbia posto sul rotore, le cui sbarre si trovano localizzate nella zona polare se l'avvolgimento è distribuito altrimenti, se è concentrato, in corrispondenza delle espansioni polari: lo scopo di tale avvolgimento è quello, come suggerisce il nome, di andare a smorzare le oscillazioni di velocità in corrispondenza dei transitori meccanici o

elettrici.

Per quanto riguarda l'eccitazione in DC, essa può essere fatta in vari modi, ovvero:

- Batterie
- Convertitore statico di natura raddrizzante, generalmente a tiristori piuttosto che a diodi
- Avvolgimento di eccitazione realizzato attraverso spazzole o contatti striscianti calettati sull'albero
- Macchina eccitatrice con generatore coassiale montato sull'albero della macchina sincrona per evitare i contatti striscianti
- Induttore sullo statore e indotto sul rotore
- Induttore sullo statore e indotto sul rotore
- Generatore brushless in alternata, con un generatore sincrono o asincrono alimentanti un raddrizzatore in uscita dall'indotto, collegato a sua volta all'eccitazione della macchina principale
- Sostituzione del campo induttore con dei magneti permanenti invece dell'avvolgimento di eccitazione allo scopo di eliminare alcune perdite e i contatti striscianti; tuttavia, oltre ad essere costosi e di difficile reperibilità, tali oggetti fanno perdere la capacità di andare a regolare il flusso e hanno delle prestazioni che peggiorano con l'aumentare della temperatura.

Gli strumenti più utili per conoscere e rappresentare lo stato di questi macchine, che andremo ovviamente a studiare nel caso di funzionamento da motore sono:

- Caratteristica di magnetizzazione, che evidenzia il legame tra f.m.m. dell'avvolgimento e il flusso per polo
- Caratteristica a vuoto, derivante dalla precedente e che evidenzia il legame tra tensione a vuoto e f.m.m. dell'avvolgimento
- Diagramma di Potier per macchine a rotore liscio e in condizione di circuito magnetico saturo
- Diagramma di Behn-Eschenburg per macchine a rotore liscio in condizione di non saturazione
- Diagramma di Blondel, per macchine anisotrope in condizione di saturazione
- Diagramma delle due reattanze, per macchine anisotrope in condizione di saturazione
- Diagramma polare, che esprime come cambiano le prestazioni della macchina in parallelo alla rete in funzione dell'angolo che si forma tra i favori di corrente e tensione e/o della f.e.m., il tutto a velocità di sincronismo.

#### **4.4 Motore Brushless in DC a magneti permanenti**

Questa tipologia di motore sincrono si distingue dalle altre per la sua fem al traferro, il cui andamento è triangolare, piuttosto che sinusoidale come in un qualsiasi motore sincrono a magneti permanenti.

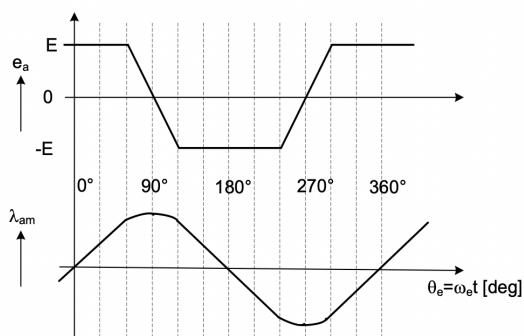
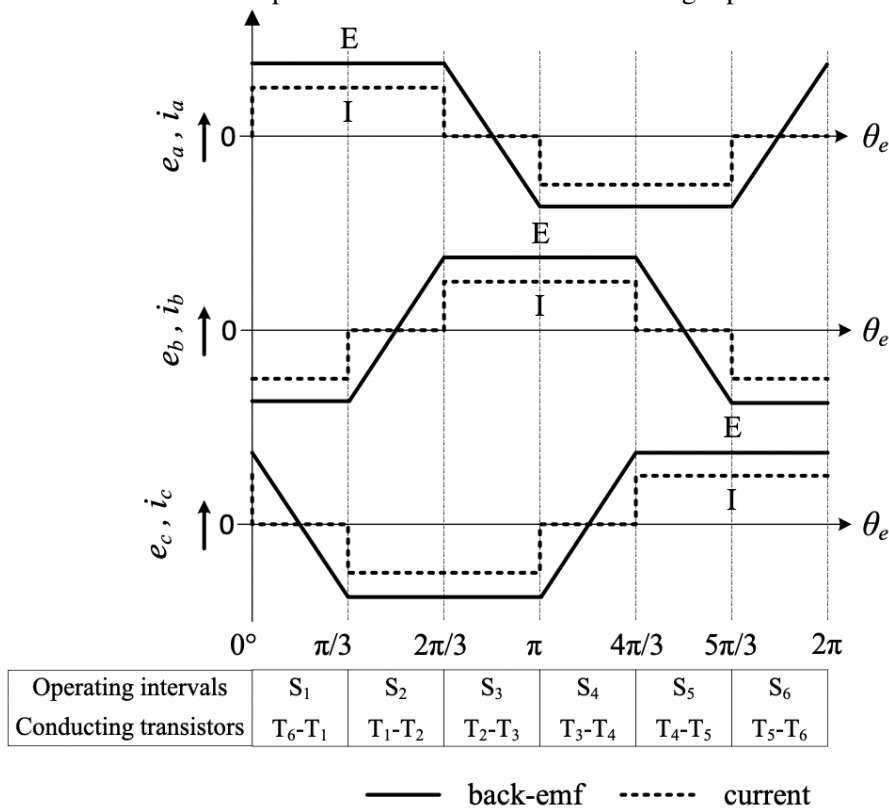
I vantaggi principali di questa macchina sono:

- Alta coppia;
- Alta densità di potenza;
- Alta coppia iniziale;

- Ampio range di funzionamento, 3/4 volte la velocità nominale;
- Elevato rendimento lungo tutto il funzionamento;
- Possibilità di lavorare in sovraccarico a intermittenza, anche con carichi pari al doppio della coppia nominale;
- Affidabile, robusto, economico, eccezion fatta per il costo dei magneti permanenti.

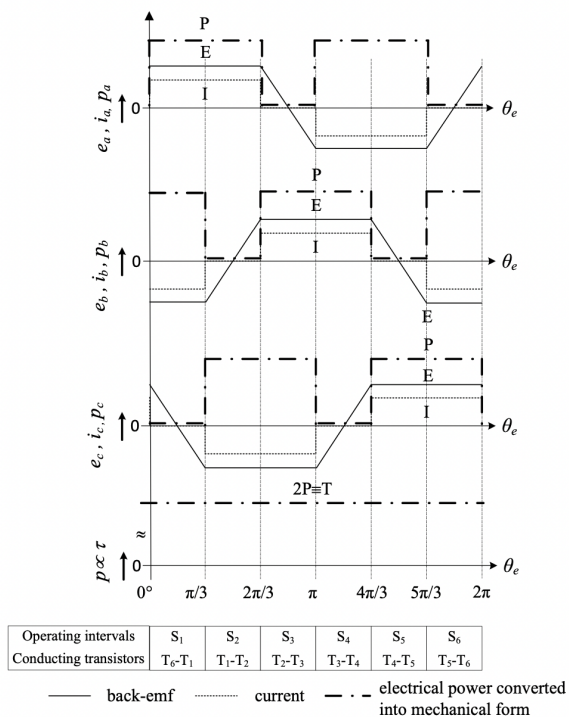
Da un punto di vista costruttivo, questi motori presentano uno statore esterno, lungo cui la superficie esterna si trova l'avvolgimento trifase, concentrato o distribuito, mentre sul rotore sono disposti i magneti permanenti.

Data una fem con questo tipo di andamento, in virtù della legge di Lenz con convenzione da motore, il flusso al traferro sarà di tipo pseudo-triangolare, con delle punte più "smussate" dato che la costruzione fisica della macchina impone la derivabilità della curva in ogni punto del dominio.



Anche la potenza, e quindi la coppia, saranno costanti





Oltre all'andamento della fem, un'altra differenza fondamentale rispetto al motore sincrono è il numero di commutazioni sul periodo che l'inverter va ad eseguire: se in un normale motore vengono eseguite un numero di commutazioni dell'ordine di qualche migliaio, in questo caso il convertitore andrà ad eseguirne 6, conducendo con due interruttori diversi per ogni intervallo di 60° elettrici. Se non comandato opportunamente, la frequenza di alimentazione di questo convertitore non risulterà bloccata, ma soprattutto alle basse velocità di rotazione presenterà dei valori molto oscillanti; tale fenomeno diminuisce con l'aumento di tale grandezza.



## Capitolo 5

# Descrizione dello studio

### 5.1 Misure wattmetriche

Obiettivo dello studio sarà andare ad eseguire delle misure di potenza a monte e a valle dei convertitori per determinare quanta energia venga dissipata in questo stadio, con l'inverter controllato in modalità vettoriale per il caso dei close control, in quanto il motore è un sincro BLPMD, e in scalare per la situazione di TITAN SKY, che presenta invece un compressore mosso da motore asincro (soluzione alla quale si ricorre anche per le pompe): queste decisioni sono state prese in seguito a quanto suggerito dalla casa costruttrice dell'inverter.

Seguiranno poi, per ciascuna macchina, delle considerazioni sulla distorsione armonica sia in uscita dal convertitore che sulla rete, dato che, come noto, l'inverter è un carico di natura elettronica e quindi non lineare; dopodiché, le differenti situazioni verranno confrontate tra di loro.

Il rendimento e la distorsione armonica della macchina verranno definiti in funzione della velocità di rotazione del compressore che, durante le prove, verrà bloccata attraverso il software proprietario dell'azienda.

Per la prima macchina, Datatech 100.4, verranno eseguite anche delle prove di verifica dell'invarianza del THD nel caso in cui venga acceso il secondo compressore del circuito frigo, un asincro di tipo ON/OFF, oltre che delle misure specifiche a monte dell'induttanza di livellamento e considerazioni sulla distorsione armonica delle tre ventole alimentate ciascuna da un inverter trifase.

Per Datatech 12.1 è stato, inoltre, calcolato EER, il coefficiente che indica quanti kW frigoriferi sono prodotti per ciascun kW elettrico in ingresso, con ottenimento al calcolatore della zona operativa del compressore tramite software di SIAM, casa costruttrice.

Per quanto riguarda le misurazioni vere e proprie, verranno eseguite andando a collegare un analizzatore di rete trifase della Fluke, il 1738, a monte dell'inverter, che permetterà di valutare il disturbo immesso dal convertitore in rete, mentre a valle verrà collocato un wattmetro trifase, lo Yokogawa WT 5000, con i quali sarà possibile andare ad esaminare la forma d'onda di tensione in uscita dall'inverter e in ingresso al motore, le potenze attive in gioco e la distorsione della tensione e della corrente: chiaramente questo tipo di misurazione riguarderà forme d'onda fortemente distorte, per cui si renderà necessario uno studio dello spettro armonico; entrambi presentano 4 canali, le 3 fasi e il neutro e possono essere utilizzati come oscilloscopio. Nello specifico, l'analizzatore di rete sarà collegato all'inverter attraverso dei morsetti magnetici per le misure voltmetriche mentre si useranno delle sonde toroidali per le amperometriche, mentre per quanto riguarda il wattmetro, che deve essere collegato al compressore, soggetto a vibrazioni, tale inserzione non è possibile: per questo motivo sono state collegate le amperometriche per mezzo di un morsetto a vite; le voltmetriche invece sono collegate attraverso una calamita

sufficientemente potente da non staccarsi durante il funzionamento del compressore.



## 5.2 Allarmi di sovracorrente

Verrà, poi, affrontato un problema di allarmi di sovracorrenti che sporadicamente Datatech, la macchina con compressore mosso da motore sincrono brushless, va a manifestare: una problematica di questo tipo si può verificare sia per problemi legati al ciclo frigorifero, che per motivi di taratura del sistema elettrico, che andiamo a vedere brevemente.

Per quanto riguarda le problematiche dovute al circuito frigo, che sono state tutte controllate e validate, gli allarmi di sovracorrente possono insorgere per problemi quali:

1. Malfunzionamento delle valvole di regolazione del flusso, rimediabile
  - Controllando il corretto posizionamento e senso di attraversamento delle valvole e verificando il montaggio delle valvole di non ritorno allo scarico del compressore e all'uscita del condensatore;
  - Controllando il corretto funzionamento della valvola a 4 vie, assente in questo caso;
  - Controllando il funzionamento delle valvole di intercettazione ad eccitazione magnetica, dette anche valvole a solenoide;
2. Compressore soggetto ad un rapporto di compressione troppo elevato o comunque a valori assoluti delle pressioni di aspirazione e mandata al di fuori degli envelope del compressore, problematiche risolvibili diminuendo la pressione di start-up attivando a macchina ferma i ventilatori o le pompe di circolazione del fluido secondario;
3. Presenza del liquido in aspirazione al compressore, di cui ci si rende conto soprattutto a causa del rumore e delle vibrazioni, a cui correr rimedio attraverso
  - Un avvio forzato del compressore, esclusivamente nel caso in cui sia consentito;
  - Attivando la funzione del compressore Crank-case Heater, che ne alza la temperatura interna per poter far vaporizzare il liquido;
4. L'olio ritorna male o non ritorna proprio al compressore, allora si deve
  - Controllare, se c'è, che il circuito separatore dell'olio sia stato precaricato;
  - Controllare che l'inclinazione non ecceda i limiti consentiti, dato che, altrimenti, si verificano problemi di lubrificazione che implicano le suddette sovracorrenti;
  - Controllando la migrazione dei fluidi durante il trasporto;
5. Malfunzionamento del compressore, va direttamente sostituito.

Per ovviare ai problemi di taratura dell'inverter, sono stati esaminati i manuali sia di ACS 380, ovvero l'inverter di prova che è stato disassemblato, che di ACS 580, sua variante più recente, e sono emerse le seguenti possibili cause di allarmi di sovracorrente:

- Errato settaggio dei tempi di accelerazione dei parametri speed reference ramp e/o frequency reference ramp;
- Cablaggio non corretto, in genere coincide con un errato collegamento delle tre fasi, dato che non tutte le case costruttrici dispongono i collegamenti delle fasi nello stesso modo;
- Parametri nominale del motore non inseriti in maniera pertinente alla realtà;
- Presenza di condensatori di rifasamento;
- Non corrispondenza del valore della corrente nominale (parametro 30.40) con quello dell'azionamento;
- Errato valore della corrente massima in uscita dal motore;
- Tempo di run-up troppo basso, modificabile sia dal punto di vista degli rpm che della frequenza;
- Controllare il segno della velocità minima, cambiarlo di segno o azzerarlo e verificare che tale problema si presenti ancora.

### 5.3 Macchine esaminate

Nel corso di questo studio le macchine soggette alle misurazioni sono state:

1. Datatech 100.4, una macchina aria-aria del tipo datacooling, che raffredda l'aria delle sale server bilanciando il carico termico prodotto dai banchi di calcolo.  
Per quanto riguarda la modalità con cui queste macchine vanno a raffreddare tali ambienti, le configurazioni più utilizzate sono la "Over", con cui si espelle l'aria raffreddata dall'alto o la "Under", condizione in cui si è deciso di testare la macchina, in quanto molto spesso le sale server sono dotate di un pavimento sopraelevato che permette la circolazione di aria fredda.  
Le macchine in questione saranno disposte perimetralmente alla sala server. Tale macchina presenta un compressore scroll da 25 kW frigoriferi e 3,8 kW elettrici, mosso da un motore PMSBLDC a sei poli alimentato alla tensione nominale di 260 V e frequenza nominale di 360 Hz. La macchina è dotata di due circuiti frigoriferi, uno caratterizzato da due compressori asincroni ON/OFF a frequenza di rete, che non è stato azionato durante le prove, e uno con un compressore sotto inverter



ed uno a frequenza di rete asincrono;

2. Datatech 12.1, un close control sempre destinato alla refrigerazione di ambienti quali le sale server, di dimensioni molto più contenute rispetto alla prima macchina. Il circuito frigorifero presenta un singolo compressore rotativo da 12 kW frigoriferi e 1,3 kW elettrici, mosso da un motore PMBLDC a 4 poli alimentato a 260 V e 360 Hz. Anche in questo caso il fluido refrigerante è



R410A;

3. Titan SKY, pompa di calore aria-acqua, che viene prodotta sia nella versione reversibile (Titan Sky HP) che nella versione solo chiller, quella esaminata, utilizza un fluido refrigerante naturale, nella fattispecie R290 (propano); il compressore è di tipo a pistoni, data la sua affidabilità, ed è mosso da un motore asincrono controllato in modalità scalare per implementare il DTC, alimentato alla frequenza nominale di 65Hz e di potenza elettrica nominale 18,3 kW; la taglia della macchina è di 50 kW frigoriferi e presenta un ventilatore assiale di potenza nominale pari a 1,25kW.



Per ciascuna di esse la parametrizzazione dell'inverter viene fatta all'avviamento eseguendo il protocollo di IDrun dell'inverter (solo nel caso vettoriale), che permette di selezionare al meglio i valori più importanti; nel caso di situazioni critiche la casa costruttrice interviene sul posto eseguendo studi specifici.



# Capitolo 6

## Misure

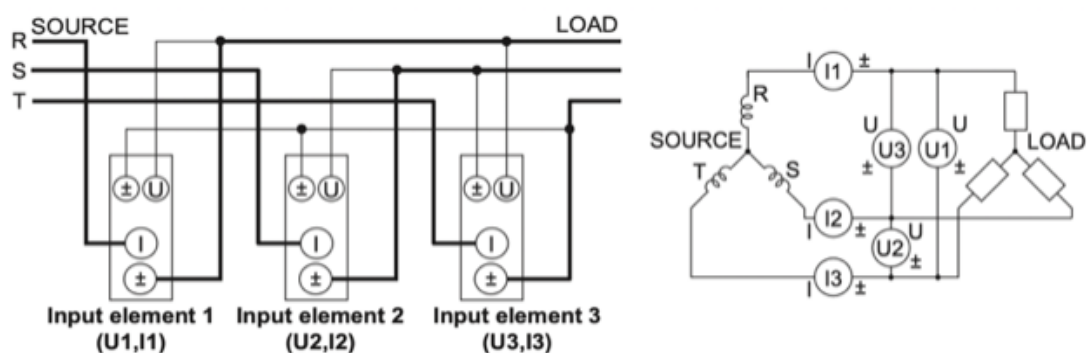
### 6.1 Datatech 100,4

#### 6.1.1 Caratteristica della macchina e del circuito di misura

In questa prima situazione l'inverter in questione è lo stesso modello di quello esaminato e smontato al fine di poter analizzare al meglio la struttura interna del convertitore, quindi ABB ACS380 da 15kW. Come descritto in precedenza sono state eseguite varie prove, ovvero:

- Valutazione del rendimento del convertitore;
- Analisi sulla distorsione armonica di corrente e tensione a monte e a valle dell'inverter con voltmetriche dell'analizzatore di rete collegate dopop l'induttanza di livellamento (ci si aspetterà una tensione distorta a monte);
- Distorsione della tensione con voltmetriche dell'analizzatore di rete collegate direttamente sull'alimentazione;
- Verifica dell'invarianza del THD di tensione a monte nel caso dell'accesione del compressore ON/OFF.

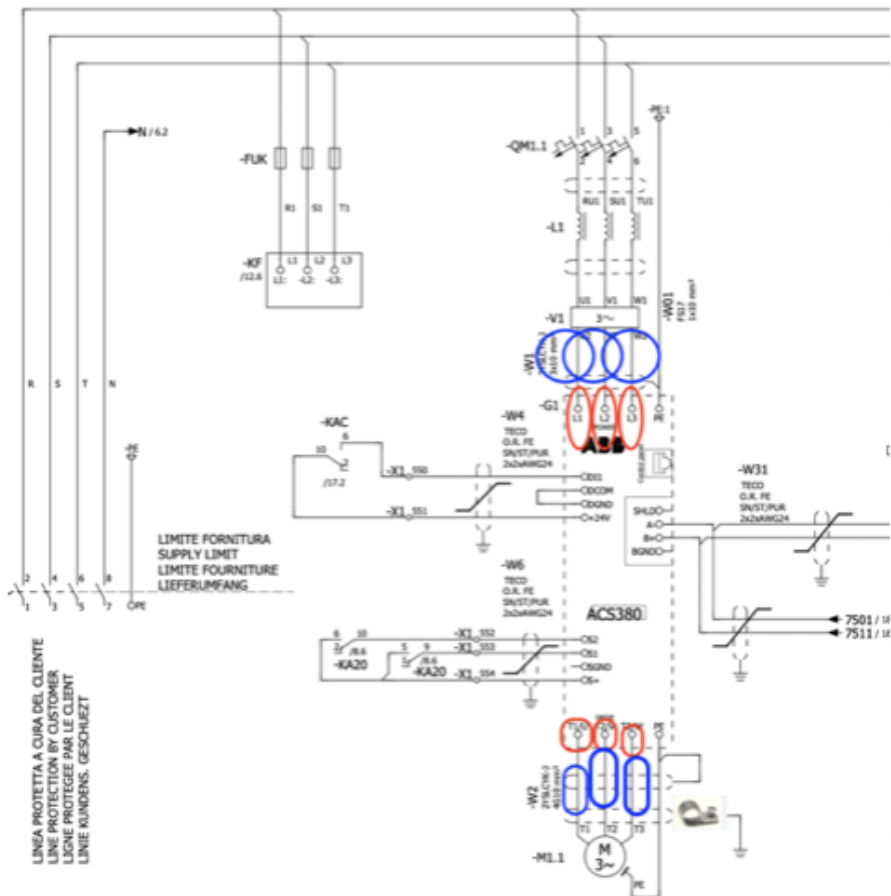
Il compressore non ha il neutro accessibile, quindi si è resa necessaria per il wattmetro trifase l'inserzione Aron, quindi tre fili con tre voltmetriche tre amperometriche: la potenza attiva assorbita da perte del compressore sarà data dalla somma delle due potenze P1 e P2 mostrate dallo strumento, la terza va ignorata, idem per le reattive.



Si riporta anche lo schema elettrico della macchina, dove si sono indicati:

- Con dei cerchi rossi gli ingressi ai canali voltmetrici del Fluke 1738;

- Con dei cerchi blu gli ingressi ai canali amperometrici del Fluke 1738;
- Con dei rettangoli rossi gli ingressi voltmetrici del wattmetro trifase Yokogawa WT 5000;
- Con i rettangoli blu le sonde di corrente del wattmetro.

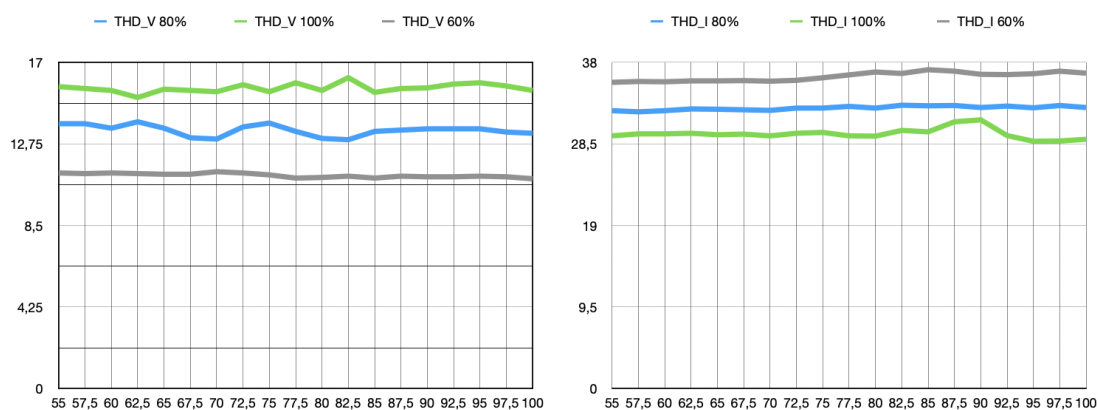


Data la diffusa attitudine delle sale server a lavorare con temperature maggiori rispetto al passato, visto che non interessa allungare la vita media dei processori mantenendoli a basse temperature, bensì a sfruttarli al massimo perché tanto poi verranno cambiati per aggiornare i banchi con tecnologie sempre più performanti, si è deciso di eseguire le prove di rendimento e di distorsione a monte e a valle per il setpoint di 22°C, trend seguito in passato, e di 30°C, temperatura verso la quale si è spostato il mantenimento delle sale; sono state eseguite le stesse misure pure per la temperatura in uscita dell'aria di 26°C, per dare ulteriore conferma ai trend di tali grandezze.

### 6.1.2 Influenza delle ventole

Bloccando la velocità del compressore al 60%, 80% e 100% per il setpoint di 22°C e aumentando a passo 2,5% la velocità del gruppo ventole, in numero 3 e ciascuna alimentata da un proprio inverter, è apparso come, con l'aumentare della velocità del compressore, il THD di tensione a monte vada ad aumentare, dato che aumenta la richiesta di potenza da parte dell'inverter, che immette a sua volta armoniche distorcenti in rete, mentre quello di corrente, viceversa, cala. Tale studio preliminare è stato condotto in virtù di una migliore comprensione del fenomeno della distorsione armonica, dato che, rispetto allo studio subito successivo, in cui le ventole ruoteranno a bassa velocità, entra in gioco una

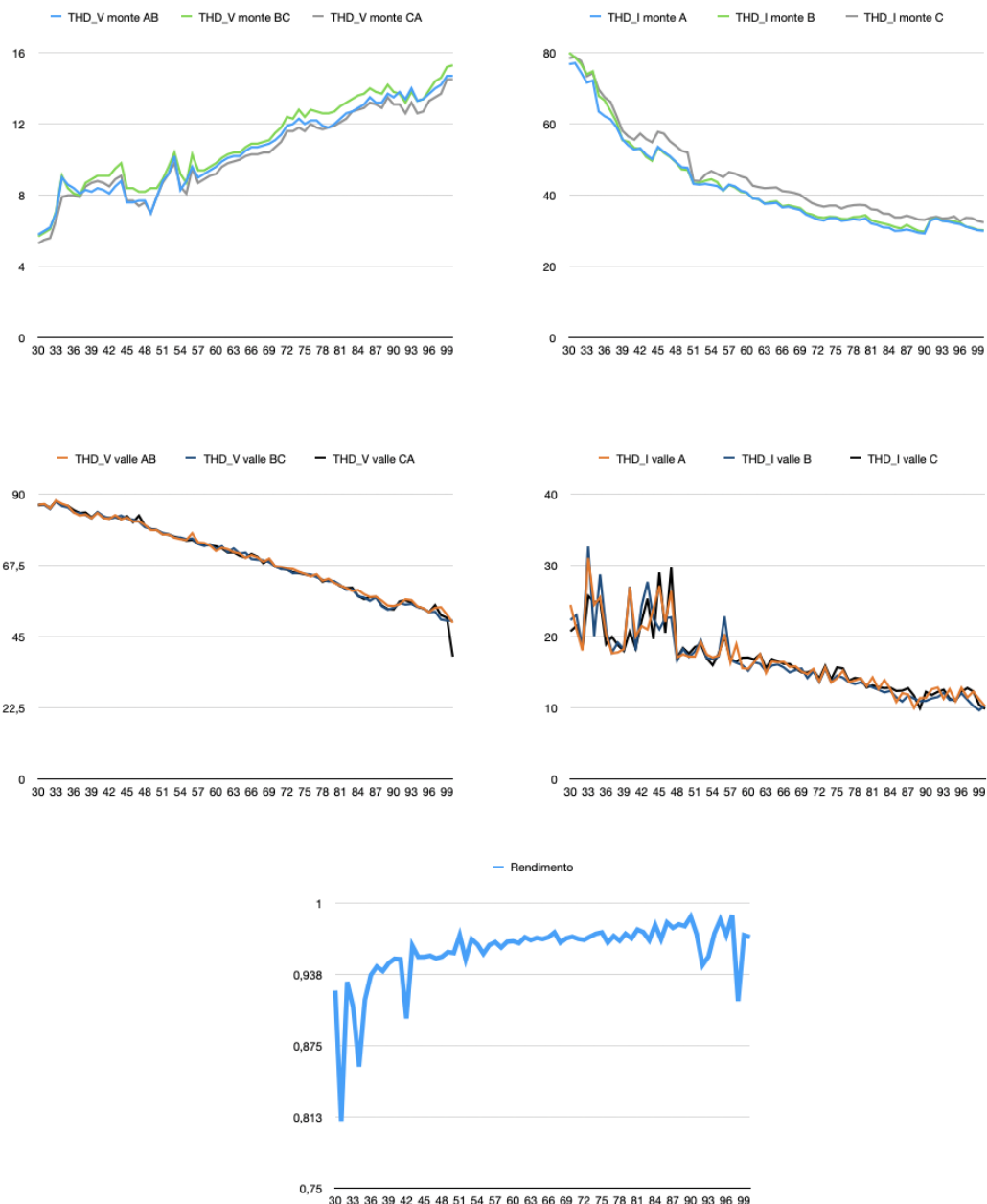
potenza distortante nettamente maggiore.



### 6.1.3 Forme d'onda e rendimenti

Nella fase cruciale dello studio, si è proceduto alla valutazione dei rendimenti lungo il range di velocità del compressore; come noto, tale parametro adimensionale è dato dal rapporto tra la potenza a valle dell'inverter e quella fornita dalla rete, grandezze ottenute rispettivamente attraverso le potenze P1 e P2 dello Yokogawa WT5000 dato che si sta utilizzando l'inserzione Aron, e l'analizzatore di rete, per poi mappare l'andamento dei rendimenti con la velocità percentuale del compressore.

Per quanto riguarda il setpoint dei 22°C, ovvero la temperatura dell'aria in uscita che andrà a raffreddare la sala server, si riportano i valori di distorsione di corrente a monte e a valle per lo stesso range di velocità del compressore per cui è stata eseguita la valutazione del rendimento.



Si può evincere, dalla valutazione dei grafici in questione che, analogamente a quanto constatato nel primo studio, indipendentemente dalla velocità delle ventole, a monte la distorsione della tensione sale con la velocità mentre quella di corrente cala; a valle, invece, si riscontra una distorsione calante con la velocità del compressore sia per quanto riguarda la tensione, che per la corrente, che presenta, tuttavia, delle oscillazioni considerevoli nel range di velocità [32%; 49%].

Come descritto in fase di presentazione della macchina, sono state eseguite le misure di rendimento e di distorsione armonica di tensione a monte e a valle dell'inverter anche per il setpoint di 30°C; si riportano gli stessi parametri analizzati per il setpoint di 22°C e, sotto, un confronto con un ulteriore setpoint intermedio, ovvero quello dei 26°C e le annesse considerazioni, ovvero che, dal punto di vista della distorsione armonica gli andamenti del THD di tensione e corrente non cambiano se non di qualche

punto percentuale al massimo, mentre il rendimento si mostra molto alto e crescente con la velocità del compressore.



Va notato come, indipendentemente dalla temperatura, il THD di tensione a monte segua sempre il seguente ordine decrescente per ciascuna velocità del compressore, BC AB e CA, mentre ovviamente, data la parità della potenza, il THD di corrente a monte abbia trend opposto, quindi segue l'ordine decrescente C, B, A. Dopo i confronti tra le tre prove si riporta un esempio di forme d'onda di corrente e tensione visualizzate dallo Yokogawa WT5000, oltre che l'aumento della frequenza e la potenza assorbita dalla rete.

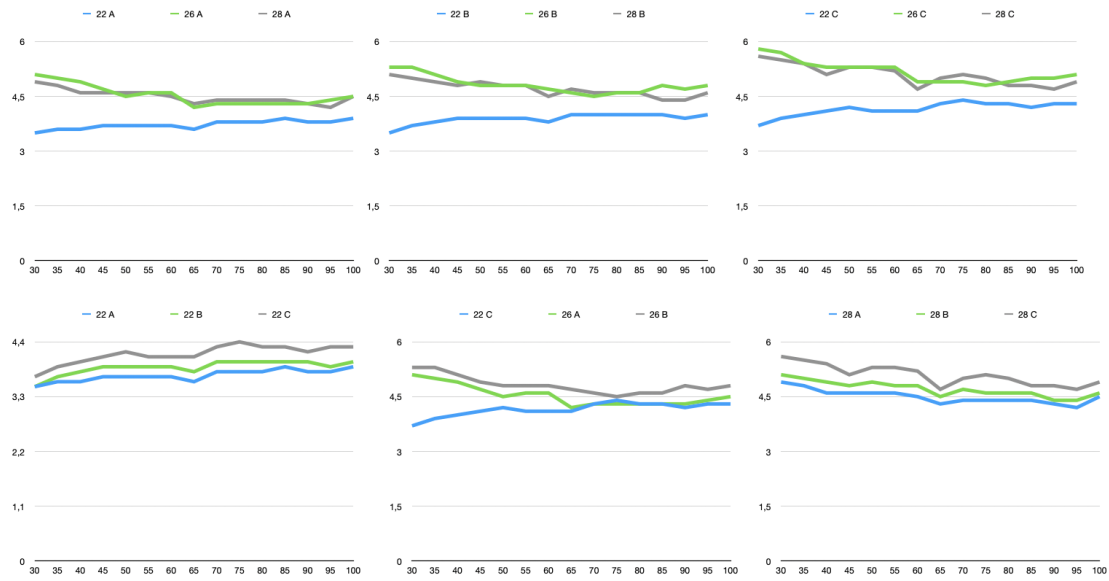
### 6.1.4 Secondo compressore

Procedendo nello studio, dato che si è andati a lavorare su di un circuito frigorifero con due compressori che, come noto, sono mossi rispettivamente da un motore sincrono alimentato da inverter, quindi distorcente, e da un motore asincrono on-off collegato direttamente alla rete, si è verificata l'invarianza del THD di tensione nel passaggio dal funzionamento con un solo compressore a quello con due compressori; il THD di corrente cala leggermente a causa dell'introduzione nel circuito equivalente delle induttanze associate al collegamento e agli avvolgimenti stessi di statore; il THD di tensione, invece rimane costante, ed era ciò che si voleva verificare, in virtù della natura non distorcente del motore asincrono che viene collegato direttamente alla rete.

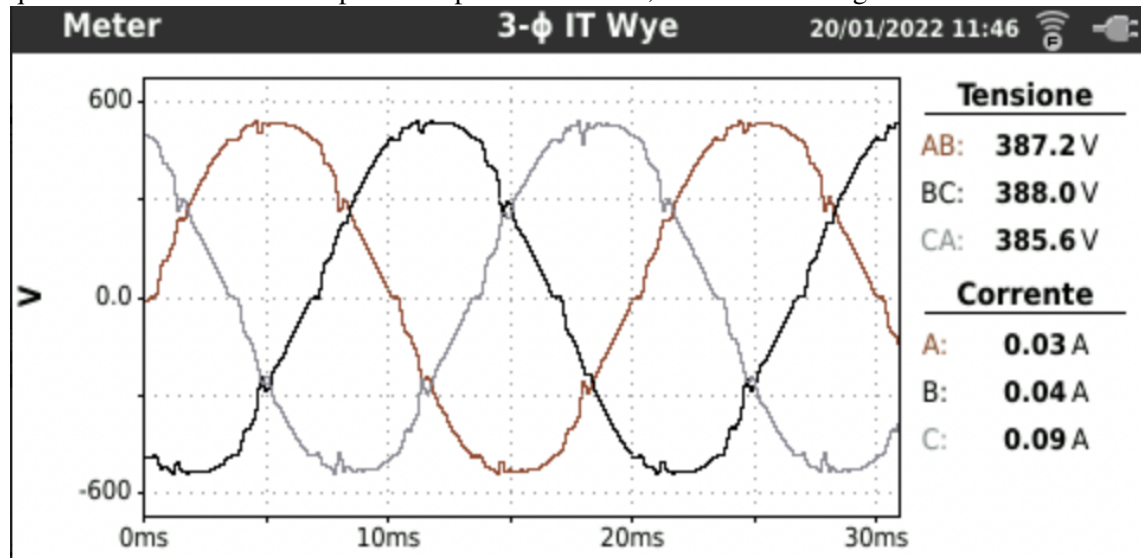
PERCENTUALE	THD_VA_PRI MA	THD_VB_PRI MA	THD_VC_PRI MA	THD_IPRIMA	THD_IPRIMA	THD_IPRIMA	THD_IVDOPO	THD_IVDOPO	THD_IVDOPO	THD_IDOPO	THD_IDOPO	THD_IDOPO	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
50	9,1	9,5	9,0	45,6	46,5	51,3	9,0	9,4	9,0	43,3	43,4	48,9	0,1	0,1	0,0	2,3	3,1	2,4
60	10,1	10,4	9,9	38,3	39,6	45,2	10,0	10,4	9,9	38,2	38,5	42,6	0,1	0	0	0,1	1,1	2,6
70	11,6	12,0	11,4	34,5	34,7	38,2	11,7	12,0	11,3	34,6	34,9	38,2	-0,1	0,0	0,1	-0,1	-0,2	0
80	12,8	13,1	12,4	32,6	33,0	36,1	12,9	13,1	12,4	32,6	33,2	36,0	-0,1	0	0	0	-0,2	0,1
90	13,8	14,4	13,5	30,6	31,4	34,5	13,8	14,1	13,5	30,7	31,3	33,7	0	0	0	-0,1	0,1	0,8
100	15,1	15,7	15,2	28,9	29,3	31,4	15,1	15,7	15,2	28,6	29,0	31,5	0	0	0	0,3	0,3	-0,1

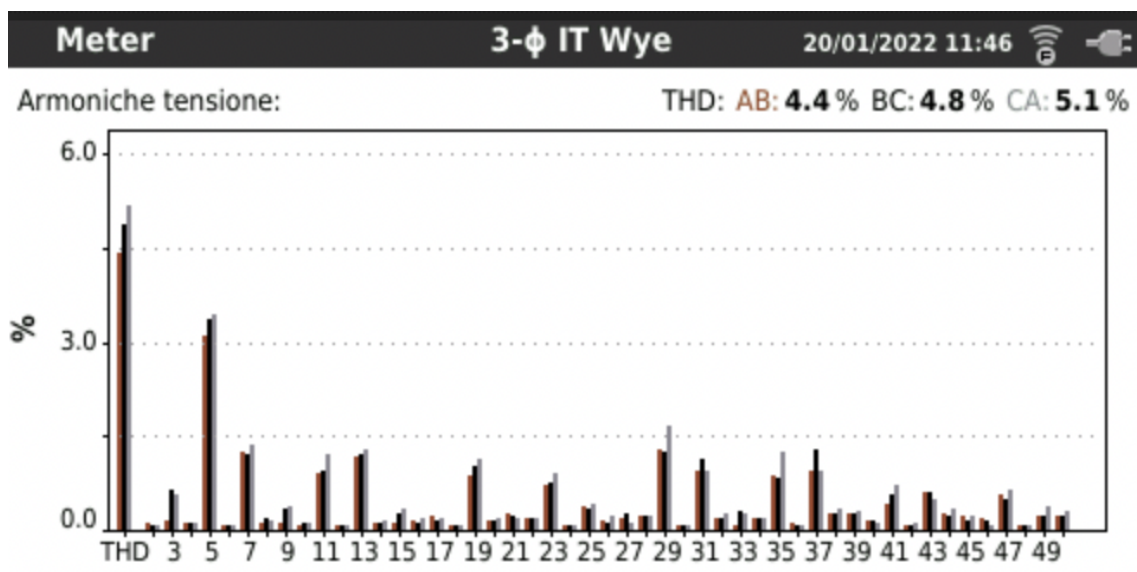
### 6.1.5 Misure di tensione a monte della bobina

Come mostrato dallo schema elettrico della macchina, le misure fino a questo punto sono state eseguite a monte della bobina di livellamento delle armoniche di tensione, che ha come conseguenza quello di aumentare notevolmente il THD a monte dell'inverter, detto "filtro" o "induttanza". Per queste ragioni sono state eseguite delle misure aggiuntive ponendosi direttamente con le voltmetriche dell'analizzatore di rete, il Fluke 1738, a monte della bobina, più precisamente sull'interruttore del compressore 1, quello sotto inverter, sul quadro elettrico, per poi eseguire le valutazioni inerenti la distorsione per le tre temperature (22°C, 26°C e 28°C), per un range di velocità del compressore dal 30% al 100% a passo 5%; emerge, fin da subito, una distorsione notevolmente ridotta, che non eccede praticamente mai il 5%, come mostrato nei grafici sottostanti, raggruppati sia per THD della singola fase, che per i gruppi delle tre temperature



Si riportano la forma d'onda e lo spettro armonico della tensione per una situazione intermedia, com'è quella della velocità al 30% per la temperatura di 26°C, oltre che l'immagine dell'induttanza da 2.2mH.





### 6.1.6 Sovracorrenti

Durante le prime accensioni si sono manifestati degli allarmi di sovracorrente, quindi, escludendo problematiche associate al circuito frigorifero, sono stati misurati i parametri di controllo dell'inverter come detto in precedenza ed è emerso che, il tempo di run up e run down della velocità di rotazione e della frequenza era impostato su un valore di 60 secondi, valore che di sicuro procurava questo tipo di al-



larme, soprattutto perché impediva alla tensione di salire velocemente, che assumeva il valore di 12 V nel momento in cui la corrente raggiungeva il valore limite di 33A, contro i 270 V ai quali andrebbe alimentato il compressore. Andando ad abbassare questi parametri da 60 a 6 secondi, il problema è stato risolto ma, questi allarmi non hanno nulla a che vedere con quelli sporadici di cui si è parlato in fase di presentazione dello studio, in quanto con tali condizioni la macchina si sarebbe bloccata sempre e non sporadicamente.

## 6.2 Datatech 12.1

### 6.2.1 Caratteristiche della macchina e del circuito di misura

La macchina in questione che, come detto già in precedenza, è un Close control presenta un singolo circuito frigo con un unico compressore rotativo mosso da motore sincrono BLDC, alimentato da un inverter di ABB, ACS 380 da 15kW, che è lo stesso del caso precedentemente analizzato; anche in questo caso i valori di tensione e di corrente sono tali per cui non si rende necessario l'utilizzo di trasformatori amperometrici e voltmetrici per eseguire le misurazioni con l'analizzatore trifase Fluke 1738 a monte e lo Yokogawa WT5000 a valle, collegato al circuito con l'inserzione Aron, necessaria per questo tipo di circuiti, caratterizzato dall'assenza del neutro. Oltre alla determinazione del THD delle forme d'onda e il controllo del rendimento, anche in questo caso verrà valutata l'incidenza sulla distorsione armonica del ventilatore da 1kW.

### 6.2.2 Misure

Il close control in questione, a differenza di quello precedentemente esaminato, non necessita della connessione ad un circuito ad aria che ne imponga la temperatura in uscita, bensì tale parametro dipenderà direttamente dalla velocità del compressore: come nel caso precedente, si andrà a bloccare il compressore ad una percentuale di velocità tra 30 e 100% a passo 1% e si graficheranno gli andamenti dei THD di tensione e di corrente, sia a monte che a valle, e del rendimento, in modo da potere eseguire un confronto del rendimento dell'inverter che è lo stesso, ovvero ABB ACS 380 da 7,5kW. La macchina viene collegata direttamente all'alimentazione trifase in un quadro da 32A.

### 6.2.3 Risultati

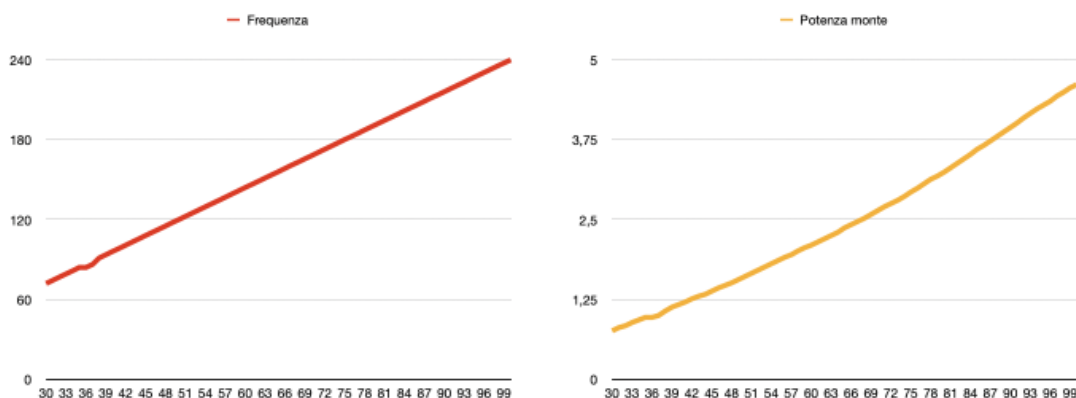
Dai grafici sottostanti si può evincere che il rendimento assume lungo tutto il funzionamento della macchina dei valori molto alti e comunque crescenti con la velocità, mentre per i fattori di distorsione, analogamente a quanto emerso dalla prova sull'altro close control, si verificano rispettivamente:

- Aumento del THD di tensione a monte con la velocità, il tutto con valori più elevati rispetto al 100.4, in virtù del collegamento delle voltmetriche dell'analizzatore di rete a valle della bobina di livellamento delle armoniche della corrente;
- Diminuzione del THD di corrente a monte, con valori più alti in partenza di circa il 20% ma uguali valori di arrivo;
- Diminuzione del THD di tensione a valle con la velocità;
- Aumento del THD di corrente a valle, ma in questo caso l'aumento di tale parametro da un punto percentuale di velocità all'altro è molto contenuta.

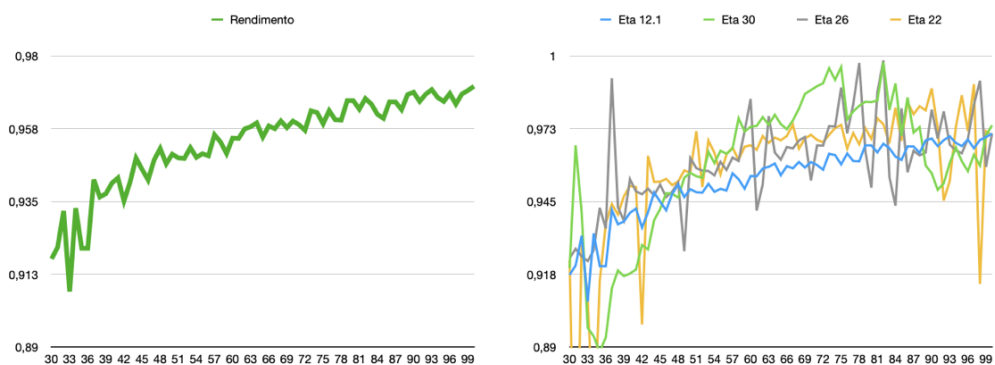


La potenza assorbita e la frequenza elettrica aumentano in maniera graduale e a passo pressoché costante, rispettivamente di 54W e 2,36Hz, rispetto alla macchina precedente, in cui alle basse frequenze, si rendeva indispensabile un hold sullo Yokogawa, tale grandezza si mostra, ora, stabile per ogni velocità

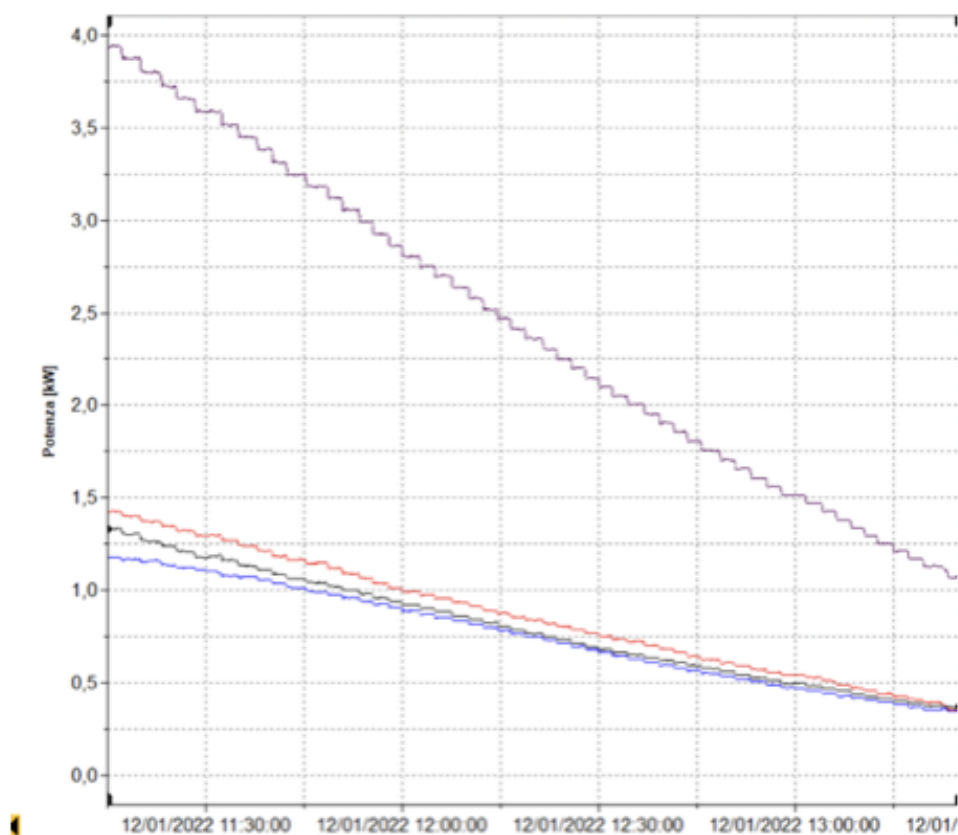
del compressore, con escursioni molto contenute.



Il rendimento di cui si parlava in fase iniziale viene riportato graficamente sia singolarmente che confrontato con i tre casi precedenti, che dimostra come sia ottimale la prestazione dell'inverter che mantiene lo stesso rendimento, crescente e di valore elevato, in linea con la gamma 380.



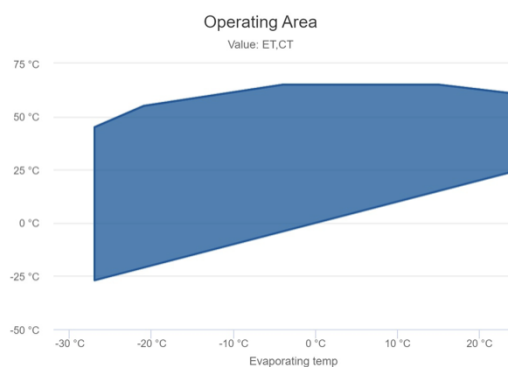
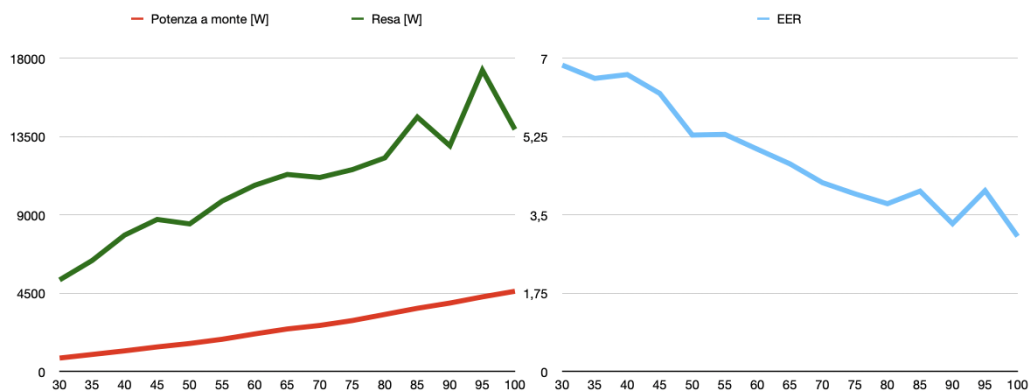
Anche in questo caso, delle tre fasi ce n'è una che eroga più potenza a monte, come si verificava anche per il compressore sotto inverter del Datatech 100.4, ed è la fase A; sostanzialmente ciò è dovuto al fatto che è sulle altre due fasi che si va ad assorbire la potenza necessaria ad alimentare la scheda di controllo, il display, i led e tutte le altre componenti in bassa tensione della macchina, a 230V o 24V, livelli di tensione ricavati per mezzo di un trasformatore con un primario e due secondari.



#### 6.2.4 Rendimento frigorifero

Per la macchina in questione, a partire dalle rilevazioni di temperatura di evaporazione, temperatura di condensazione, sottoraffreddamento e surriscaldamento, è stato ricavato, attraverso il software della casa costruttrice del compressore, il coefficiente adimensionale EER, indicativo di quanti kW frigoriferi la macchina fornisca in uscita per ciascun kW elettrico fornito al compressore; quest'ultima grandezza, misurata con il Fluke 1738 per calcolare il rendimento dell'inverter, viene calcolata pure dal software proprietario, fornendo valori molto aderenti a quelli ricavati dall'analizzatore di rete. Si riporta, oltre ai valori misurati, le potenze e gli EER, la curva operativa del compressore calcolata dal programma.

Perce ntuale	Pe	Pc	Te	Tc	Sottora ffredda mento	Surris calda mento	Potenz a monte [kW]	Potenz a a monte [W]	Resa [W]	EER
30	9,83	18,70	10,0	31,6	3,8	7,8	0,76	768	5258	6,84
35	8,69	18,79	6,4	31,7	3,2	7,6	0,97	973	6373	6,55
40	9,03	19,59	7,5	33,7	3,5	7,1	1,17	1181	7836	6,663
45	8,88	19,74	7,0	33,7	2,2	7,5	1,38	1406	8734	6,21
50	8,24	20,18	4,2	34,3	3,3	11,1	1,61	1605	8479	5,28
55	8,40	20,31	5,3	34,8	1,4	5,4	1,86	1848	9792	5,30
60	7,98	20,33	3,9	34,8	2,1	9,0	2,10	2154	10698	4,97
65	8,00	20,77	3,9	35,7	1,3	6,8	2,37	2440	11320	4,64
70	7,50	20,63	2,1	35,3	1,9	9,8	2,64	2642	11146	4,22
75	7,56	21,03	2,2	36,1	0,4	7,8	2,93	2922	11597	3,97
80	7,22	20,87	1,0	36,0	1,5	10,6	3,24	3274	12273	3,75
85	7,75	20,65	2,4	34,0	2,3	10,1	3,60	3628	14619	4,03
90	6,82	21,33	-0,5	36,7	1,4	11,9	3,94	3928	12970	3,30
95	7,81	20,60	2,7	34,0	0,7	10,9	4,29	4285	17311	4,04
100	6,48	21,67	-1,5	37,3	0,5	13,8	4,61	4606	13910	3,02



## 6.3 Titan Sky 5.1

### 6.3.1 Descrizione del sistema

La macchina esaminata in questo terzo studio è un chiller, dalla potenza di 50kW frigoriferi, che viene testato in ambiente controllato con aria a 34°C e umidità del 50%, per fornire in uscita acqua a 15°C, condizione tipica per la refrigerazione in Paesi europei d'estate.

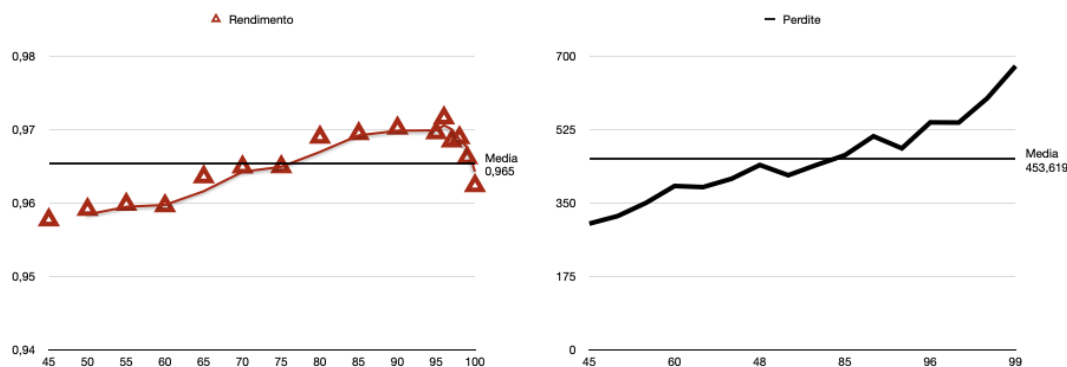
L'inverter è prodotto da ABB ed è il modello ACH580, specifico per applicazioni refrigerative e di condizionamento, da una potenza elettrica di 22kW: la differenza fondamentale rispetto ad ACS380 è che questo convertitore include al suo interno la bobina di livellamento delle armoniche di corrente, quindi non è necessario montarne una esterna come invece viene fatto sui due Datatech.

Gli strumenti utilizzati per le misure elettriche sono Fluke 1738 come analizzatore di rete, collegato direttamente a monte dell'inverter sull'alimentazione, senza problematiche legate alla presenza della bobina di livellamento delle armoniche di tensione, in quanto assente in questa macchina, mentre a valle si è utilizzato sempre Yokogawa WT5000 in inserzione Aron data l'assenza del neutro sul compressore: per quanto riguarda quest'ultimo, esso è un compressore a pistoni a 2 cilindri e 4 pistoni, inclinati di 28°, mosso da un motore asincrono, comandato con controllo scalare, in quanto la casa costruttrice, Frascold, impone un controllo con rapporto Volt/Hertz costante pari a 8.

### 6.3.2 Misure per il rendimento

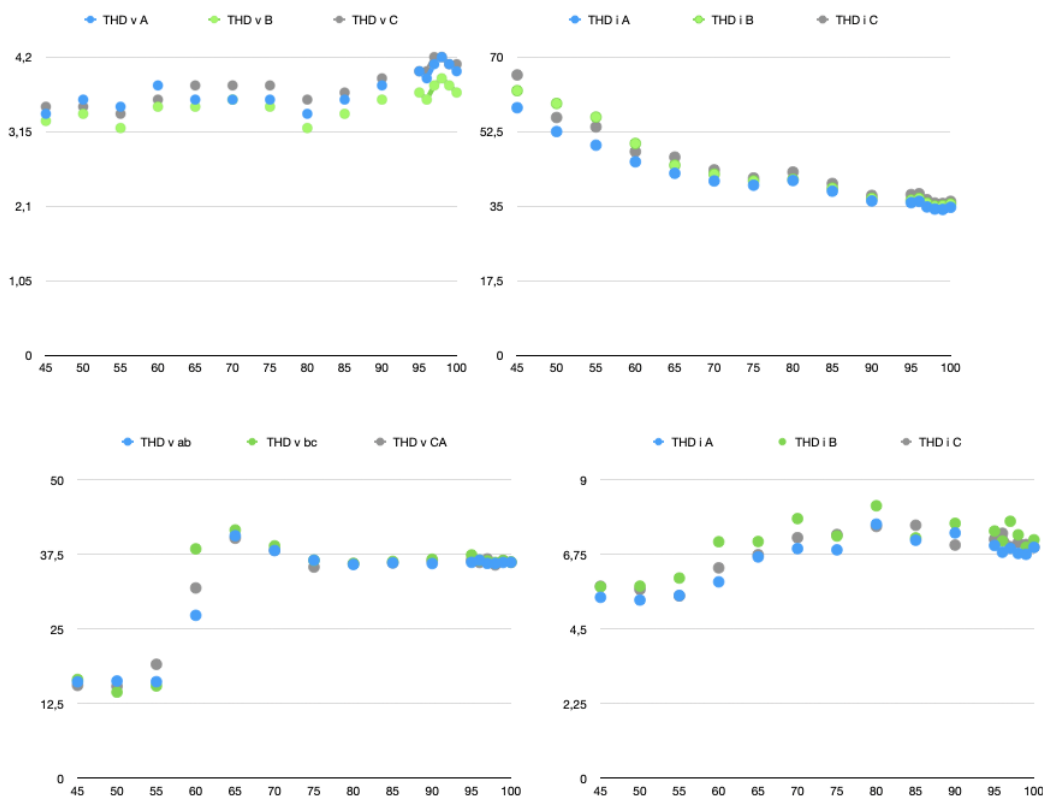
Analogamente a quanto fatto in precedenza, per la determinazione di questo parametro è stato eseguito il rapporto tra la somma di  $P_1$  e  $P_2$  misurate dal wattmetro trifase e  $P_m$ , potenza a monte rilevata dall'analizzatore di rete.

Si riportano nei grafici sottostanti la curva del rendimento e delle perdite, con annessi valori medi: appare evidente come, il rendimento sia sempre molto alto, per poi calare in prossimità delle velocità più alte.



### 6.3.3 Fattori di distorsione di tensioni e correnti, problematiche sulla pressione di mandata

Andando a bloccare con la funzione hold del wattmetro e registrando i valori del THD di tensione e di corrente con l'analizzatore di rete rispettivamente, è stato possibile riportare i trend di tali parametri con la velocità del compressore, mostrando un diverso andamento di tali parametri rispetto ai due casi precedenti in cui il motore era, invece, un sincro PMBLDC.

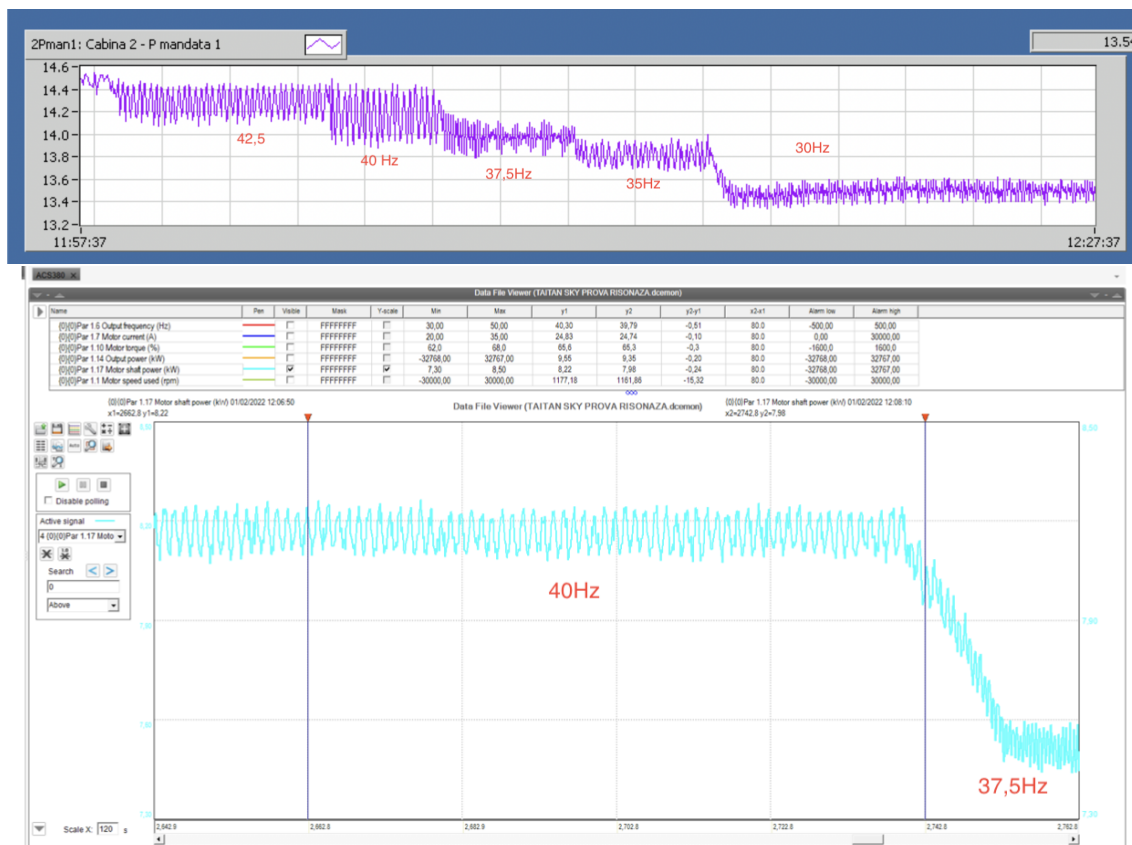


Per quanto riguarda le considerazioni su tali parametri si nota come il THD della tensione a monte sia piuttosto contenuto, in quanto all'interno dell'intervallo 3%-4%, mentre il THD della tensione in uscita dall'inverter, mostra un gradino significativo, pari a 20 punti percentuali, in prossimità dei 40Hz, a cui corrisponde la velocità massima raggiungibile dal compressore del 60%.

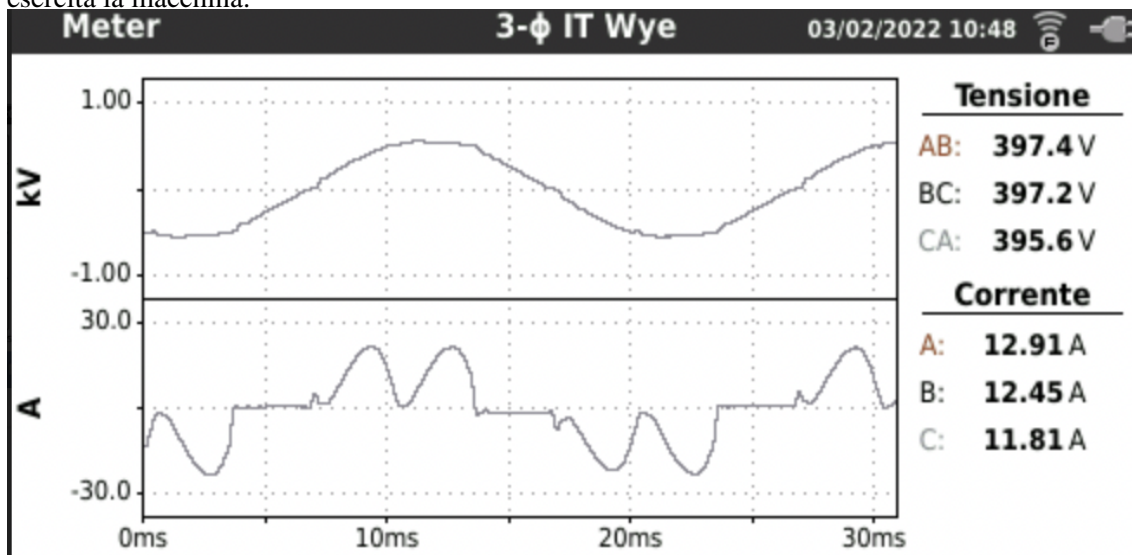
Alimentando il compressore alla frequenza di 40Hz, in prossimità della quale si manifesta un gradino del THD di tensione così significativo, si congiunge ad un'ulteriore problematica rilevata durante le prove, ovvero il manifestarsi di un ripple sulla pressione di mandata del compressore considerevole, di circa 0,5bar; si è deciso di indagare su un comportamento così anomalo della macchina pneumofora andando ad analizzare la pressione in questione per una serie di frequenze di alimentazione ed è emerso che tale ripple va a crescere più ci si avvicina ai 40Hz, senza calare ulteriormente al di sotto, smentendo, quindi, l'ipotesi iniziale che il motore non riuscisse a vincere la coppia resistente all'albero. Di conseguenza si ipotizza che, alla frequenza di 40Hz, per cui si manifesta un contenuto elevato di terza e quinta armonica, vi sia un quantitativo considerevole di coppia armonica, che si traduce con una pressione di mandata caratterizzata da un forte ripple, il tutto con una pressione di aspirazione pressoché costante; il fatto che ciò si manifesti a tale frequenza dipende dai parametri costruttivi del compressore stesso, come il numero dei pistoni e l'inclinazione tra di essi, infatti, è noto come la configurazione a sei pistoni sia quella che più va a minimizzare tale fenomeno, ragion per cui l'azienda ipotizza eventuali prove con compressori a un numero diverso di pistoni per verificare l'eventuale protrarsi del fenomeno, o comunque uno spostamento a velocità differenti.

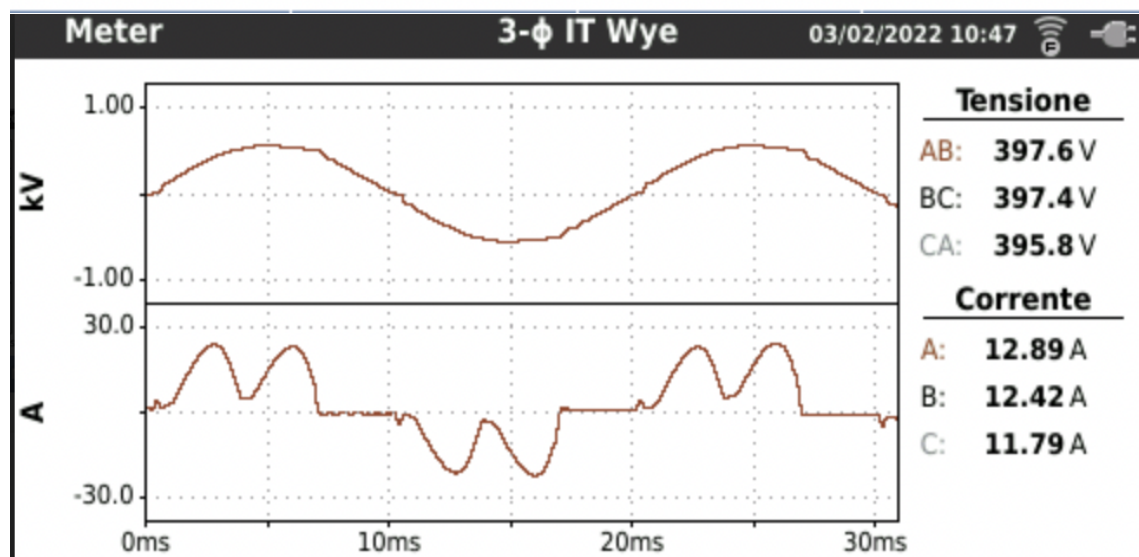
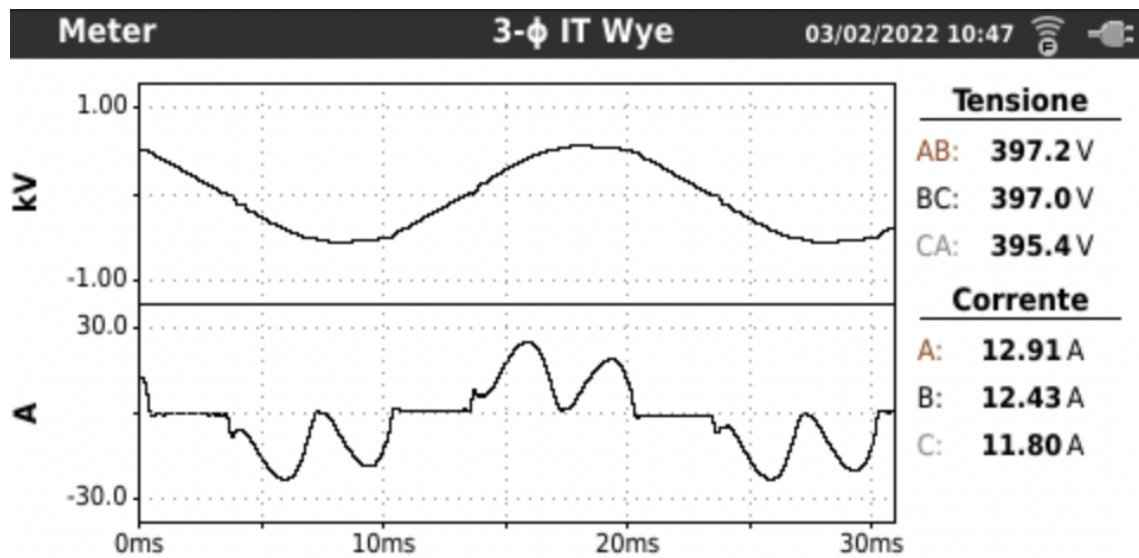
Si fa presente come sia da escludere qualsiasi ipotesi su disturbi elettromagnetici che possono aver influito sulla misura della pressione di mandata, mostrando un fenomeno inesistente, in quanto chiudendo il rubinetto di mandata il ripple di pressione rilevato sparisce.

Si riportano gli andamenti della pressione di mandata, registrata da apposite sonde e della potenza all'albero del compressore misurata tramite il software ABB drive composer: allo stesso orario (le 12:06 del giorno 2/2/2022) l'oscillazione della pressione di mandata e della potenza all'albero sono, infatti, massime.



Per completezza si riportano le forme d'onda di tensione e corrente a monte dell'inverter rilevate dall'analizzatore di rete, rilevate alla velocità minima del compressore, ovvero 30Hz, a cui di solito viene esercita la macchina.







## Capitolo 7

# Conclusioni

Nel lavoro di tesi proposto sono state esaminate tre macchine, due close control e un chiller, caratterizzate da due differenti famiglie di inverter ma, soprattutto, da due tipologie di motori che vanno ad azionare il compressore del ciclo frigorifero.

Dopo le misure è emerso come, per quanto riguarda il rendimento dell'inverter, tale parametro si mostra sempre elevato, con valori medi di circa il 97%, che verificano come, in favore di poche perdite, sia possibile andare a realizzare una climatizzazione precisa ed efficace negli ambienti che si desidera refrigerare. Particolarmente significativo è stato il risultato ottenuto su Datatech 100.4 tale per cui il rendimento dell'inverter non va a calare quando si abbassa la temperatura dell'aria in uscita dalla macchina. Un interrogativo che sarebbe interessante approfondire è quello del controllo dei motori PMBLDC, dato che, una volta impostata la velocità del compressore (soprattutto per bassi valori percentuali) la frequenza ha presentato forti oscillazioni, che poi sono diminuite avvicinandosi al 100% della velocità; l'idea è quella che un controllo vettoriale non sia quello ideale, ma che, parametrizzando l'inverter per avere in uscita una forma d'onda trapezoidale (che implica 6 switch per ciclo anziché circa 5000), la frequenza sia molto più stabile.

Il fattore di distorsione di tensione a monte dell'inverter in funzione della velocità del compressore si mostra crescente, in quanto comunque aumentare tale grandezza significa assorbire più potenza, con conseguente immissione in rete di un quantitativo maggiore di armoniche: tale risultato era ciò che ci si aspettava, ma positivo è stato poter verificare che nessuna delle tre macchine non ha mai ecceduto i 5-6 punti percentuali di tale parametro.

Le sovracorrenti rilevate dall'inverter sono una tematica a cui l'azienda tiene molto, soprattutto per quanto riguarda la comprensione delle cause di tale fenomeno: in questo senso è stata redatta una linea guida su come andare ad agire nel caso si verifichi un fenomeno di questo tipo, con l'occasione di poter testare nella pratica una di queste soluzioni su Datatech 100.4, ovvero andare ad abbassare il tempo di run up del compressore.

Infine, la possibilità di andare ad analizzare il contenuto armonico della tensione prodotta dall'inverter attraverso uno strumento sofisticato come lo Yokogawa WT5000 ha permesso di poter rilevare, o comunque definire un'associazione tra i due fenomeni, come un importante aumento del contenuto armonico della tensione in uscita dall'inverter possa essere legato ad un forte ripple della pressione di mandata del compressore. Questo risultato apre degli interrogativi riguardanti la tipologia e la geometria del compressore a pistoni utilizzato, ovvero se possa essere quello ideale alla frequenza di 40Hz, o se provare alternative differenti possa andare a migliorare il comportamento del compressore, stabilizzando la pressione di mandata.

Chiaramente, uno studio di questo tipo può essere esteso ad altre tipologie e taglie di compressori.



## Capitolo 8

# Ringraziamenti

Sono molte le persone che mi sento di ringraziare per essermi state vicine durante la redazione di questa tesi, conclusiva di una fase fondamentale della mia vita quale il percorso universitario.

Ringrazio, prima di tutti, Swegon, nello specifico Antonio Veronese che mi ha introdotto in questa realtà, Stefano Bernardinello che ha dimostrato la massima professionalità e passione nello starmi vicino nella scrittura della tesi e, infine, i ragazzi della sala prove accanto ai quali ho passato le giornate in azienda: Alessandro, Daniele, Enrico, Roberto, Fabiano e Giancarlo.

Ringrazio anche il mio relatore, il Professor Gobbo, per aver dedicato il suo tempo per rendere possibile questa esperienza e, soprattutto, per aver tenuto i suoi corsi con zelo e coinvolgimento.

“Product of my environment” sono delle parole che sentì in un’intervista qualche tempo fa e in cui mi sono riconosciuto immediatamente, per questo mi sento di fare dei ringraziamenti specifici ad alcune persone in particolare.

Ringrazio in modo particolare, mia mamma, il mio riferimento a cui dedico questo lavoro di tesi, per essermi stata vicina ogni istante a partire dal 22 gennaio 1997, senza mai farmi dubitare del bene che mi vuoi: questo successo è per buona parte merito tuo e non smetterò mai di ripeterlo, non è da tutti dedicare così tante energie ad una persona e spero che da queste poche righe si sia capito quanto sei speciale per me.

Un ringraziamento sentito anche al resto della mia famiglia, in particolar modo allo zio Alberto, che si è sempre interessato a quello che faccio e mi ha sostenuto durante l’inezienza di questo percorso: come la mamma, è palese che siete stati cresciuti da due persone fantastiche che vi hanno resi tali.

Un pensiero speciale va anche a chi non ha potuto assistere a questo evento: la nonna Gabriella, i miei nonni Angelo ed Emanuele e soprattutto ad Anna.

Un grazie va pure ad Anna, una ragazza fantastica che ho potuto conoscere grazie ad una mia grande passione e che si è rivelata, oltre che un’ottima allenatrice, anche una delle persone più speciali che ho. Quindi di nuovo un grazie speciale da Decidueye a Blaziken, oppure da Zeraora a Lucario, vedi un po’ te.

Ringrazio anche te, il mio quadrifoglio, so che sicuramente sei fiera di me, per il resto sai già ogni cosa.

Gli amici sono stati una chiave fondamentale in questo percorso, quindi ci tengo a ringraziare:

- I ragazzi dell’università: accanto a voi è stato ancora più facile e bello appassionarmi alla scienza e alla tecnica, tra pasti esagerati e viaggi indimenticabili;

- Gli amici e amiche di una vita, Gianluca, Davide, Enrico, Giacomo e Margherita soprattutto, che non mi hanno mai lasciato indietro considerandomi sempre un loro fratello, nei momenti belli ma, soprattutto, in quelli difficili; ovviamente un abbraccio va anche a tutti gli altri, che non cito perché diventerebbe troppo lungo e alla fine di sicuro mi dimenticherei di qualcuno;
- Gli amici del mare, su tutti Niccolò, Matteo e Margherita, ma senza dimenticarmi di tutte le altre persone che, non solo per un mese all'anno, posso sentire di poter chiamare famiglia;
- Tutti gli amici che ho avuto la fortuna di incontrare nelle mie avventure calcistiche alla Juvenilia, all'Olimpia e al BDPT, che mi hanno permesso di crescere come giocatore, ma soprattutto come uomo;
- Tutti gli altri ragazzi e ragazze che ogni giorno mi fanno sentire fortunato di conoscere persone così.

Spero di non essermi dimenticato nessuno perché tanta è l'emozione mentre scrivo queste righe. Spero anche di aver reso tutti felici almeno la metà di quello che conoscere tutti voi rende felice me ogni giorno, quindi, un'altra volta vi ripeto: grazie, vi voglio bene.

Andrea