Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA “ENZO FERRARI”

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria del Veicolo

ANALISI DELLE PERFORMANCE E DIMENSIONAMENTO DI UN DRIVE ELETTRICO.

Prova Finale di:

Pierre Reza Actis-Dato

Relatore:

Professor Barater Davide

Anno Accademico 2025/26

Indice

1. Introduzione 7

1.1 COMAC S.R.L. 7

1.2 Layout generale. 9

2. Scopo della tesi 10

2.1 Obiettivi specifici 11

2.2 Metodologia 11

2.3 Attese 12

3. Principi di funzionamento dell'azionamento 13

3.1 Motore asincrono trifase a corrente alternata. 13

3.1.1 Principi di funzionamento 14

3.1.2 Campo magnetico 16

3.1.3 Generazione di coppia 18

3.1.4 Circuito equivalente 20

3.1.5 Bilancio di Potenza e rendimenti 21

3.1.6 Relazione tra coppia e scorrimento 23

3.2 Inverter 25

3.2.1 Principi di funzionamento e regolazione 25

3.2.2 Struttura del convertitore 27

3.2.3 Inverter a tensione impressa. 28

3.2.4 Classificazione degli inverter 30

3.2.5 Modulazione PWM 30

3.2.6 SPWM e Space-Vector PWM 32

3.3 Riduttore 43

3.3.1 Principio di funzionamento 43

3.3.2 Tipologie di riduttore 44

3.3.3 Equazioni caratteristiche 45

3.4 Giunto di sicurezza limitatore di coppia 47
3.4.1 Giunto ball-detent 49
3.5 Giunto sensorizzato 50
3.5.1 Misura della coppia 51
3.5.2 Principio di funzionamento. 52
3.5.3 Vantaggi e limiti 53
4. Materiali e metodi 54
4.1 Obiettivi e impostazioni della campagna sperimentale. 54
4.2 Descrizione dell'impianto e dei materiali utilizzati 55
4.3 Catena di azionamento 57
4.3.1 Inverter SINAMIC G120 57
4.3.2 Motore OEMER LQ 180L 57
4.3.3 Giunto di sicurezza Autoguard F406 58
4.3.4 Riduttore Zambello 59
4.3.5 Giunto sensorizzato Melectric 60
4.4 Elaborazione dei dati 62
4.4.1 Raccolta dati 63
4.4.2 Taratura dei dati a campionamento veloce 64
4.4.3 Sincronizzazione delle misure 65
4.4.4 Stima della coppia con la corrente 66
4.5 Curve di funzionamento. 68
4.6 Metodi di analisi. 71
5. Analisi dei risultati 74
5.1 Analisi dei punti di funzionamento e individuazione del fattore di carico. 74
5.2 Densità spettrale di potenza. 77
5.3 Analisi del transitorio e della ripartizione di coppia. 86
5.4 Energia meccanica specifica. 92

6. Conclusioni 94

6.1 Dimensionamento 94

6.2 Risultati dell'analisi del transitorio e dell'energia specifica 95

6.3 Limiti e sviluppi futuri 96

Bibliografia 97

II. Appendici 100

III. Grafici 107

I. Abstract

Questo lavoro di tesi, svolto presso la COMAC S.r.l., verifica il dimensionamento dell'azionamento elettrico presente su uno degli impianti di produzione, con l'obiettivo di valutare un possibile *downsizing* o un eventuale scale-up. La catena di azionamento analizzata è composta da un inverter Siemens con controllo V/f, un motore elettrico asincrono trifase da 132 kW, un giunto limitatore di coppia *ball-detent*, un riduttore a doppia uscita e un giunto sensorizzato magnetoelastico montato sui due alberi lenti.

La campagna sperimentale, condotta sull'impianto in funzione, combina due livelli di dati: la coppia sui due alberi di uscita del riduttore, campionata a 100 Hz su finestre di 240 s, e i log di processo del PLC acquisiti tramite protocollo OPC UA sull'intero ciclo di lavoro. Le due sorgenti sono state sincronizzate confrontando le medie al secondo della coppia misurata con i valori del log, così da renderle direttamente confrontabili. Le prove includono diversi stati di funzionamento: gradino di velocità, prove a vuoto, incrementi di velocità a portata costante e incrementi di portata a velocità costante.

Dall'analisi dei punti stazionari e del fattore di carico è emerso che il motore studiato è adeguato in coppia ma che gran parte della potenza risulta inutilizzata. Ciò è dovuto principalmente al rapporto di riduzione, che obbliga il motore a lavorare a velocità ridotte. Un riduttore con un rapporto di riduzione maggiore permetterebbe l'uso di un motore anche più piccolo ed economico nel rispetto dei requisiti di lavoro.

1. Introduzione

Il motore elettrico asincrono trifase è la macchina elettrica più diffusa negli azionamenti, in particolare quelli industriali. Questo tipo di motore è caratterizzato da un'ottima robustezza, costo molto contenuto, inoltre, l'assenza di contatti striscianti riduce l'usura. Questo lo rende la soluzione di riferimento per la maggior parte delle macchine industriali.

L'introduzione dell'inverter ha inoltre permesso l'utilizzo di questa tecnologia anche per le applicazioni che richiedono una velocità variabile, prima di esclusiva competenza dei motori a corrente continua. I motori elettrici assorbono dunque la maggior parte dell'energia elettrica consumata dall'industria e dunque richiedono un'elevata efficienza per ridurre al minimo i costi.

Il rendimento di targa descrive il motore in un unico punto di funzionamento, nell'impiego reale il rendimento rimane stabile in un ampio range di carico, tuttavia, raggiunti certi limiti si degrada molto rapidamente. Un motore che lavora stabilmente a carico basso richiede quindi, a parità di potenza, più corrente di un motore adeguatamente scelto. Al costo energetico si aggiunge anche quello dell'impianto: convertitore, cavi e di tutti i componenti ad esso collegati.

Con l'introduzione del convertitore il problema ha cambiato forma, in quanto il convertitore permette di mantenere il flusso costante anche a basso carico e dunque il motore ha un range di funzionamento ottimale molto più ampio.

1.1 COMAC S.R.L.

Il lavoro di analisi è stato svolto presso la COMAC S.R.L, nella sua sede di Milano.

Si tratta di un'azienda leader nel settore industriale che dal 1978 opera nel settore della lavorazione di materie plastiche attraverso la progettazione e la realizzazione di estrusori bivite co-rotanti. L'azienda si è specializzata nelle applicazioni ad elevata complessità con un alto grado di personalizzazione per raggiungere gli obiettivi di processo richiesti dai clienti. Questa elevata specializzazione le ha permesso di essere presente in oltre 40 paesi e di fornire più di 550 linee complete di estrusione.

La tecnologia dell'estrusione bivite si basa sul processo di estrusione, ossia sul passaggio forzato di materiale, portato allo stato fuso e messo in pressione, attraverso una filiera che ne definisce la forma.

La classificazione degli estrusori si basa sul verso di rotazione delle viti e sul grado di compenetrazione: possono essere o co-rotanti o contro-rotanti e compenetranti o non compenetranti.

Le viti svolgono diversi compiti, tutti fondamentali al processo: dal trasporto alla fusione, passando attraverso la miscelazione. La presenza di una coppia di viti permette una miscelazione migliore rispetto all'utilizzo di una sola vite. Le viti sono formate da elementi modulari e possono essere composte in maniera diversa a seconda dei requisiti del processo. Gli elementi fondamentali sono:

- Elementi di trasporto: trasportano il materiale attraverso le varie sezioni.
- Elementi di masticazione: che svolgono la fase primaria di fusione per compressione del materiale.
- Elementi di miscelazione: nel caso di compound, ossia utilizzo di diversi materiali contemporaneamente, permettono l'omogeneizzazione del prodotto.

Il cilindro è a sua volta suddiviso in diverse sezioni, termoregolate, che mantengono la temperatura costante lungo tutto il processo. Lungo il cilindro si può inoltre trovare una zona adibita al degassaggio, ovvero la rimozione, tramite pompe del vuoto, dei gas emanati durante il processo per migliorare il grado di miscelazione ed evitare difetti nel prodotto finale.

Dal punto di vista geometrico, la macchina è definita da 4 parametri:

- Diametro esterno delle viti
- Rapporto tra diametro esterno e diametro interno
- Interasse tra le due viti
- Lunghezza espressa in funzione del diametro L/D

1.2 Layout generale.

La seguente figura (Figura 1.1) rappresenta la macchina sulla quale è montato l'azionamento che sarà esaminato in seguito. Le zone principali sono, in ordine:

- Dosaggio: dove il materiale precaricato viene dosato e immesso nel cilindro in maniera controllata.
- Cilindro: è la zona dove avviene tutta la lavorazione del prodotto.
- Degasaggio: zona adibita all'estrazione dei gas emanati durante la lavorazione.
- Zona dei caricatori laterali: in alcune applicazioni è necessario inserire materiali durante la lavorazione, per stabilizzare la reazione o per conferire al materiale qualità aggiuntive. Questa zona permette l'inserimento di materiale in un determinato punto della lavorazione.
- Filiera: dà la forma al prodotto finale
- Zona di post-processing: può essere composta in modi diversi a seconda delle richieste, si può passare subito al taglio oppure al raffreddamento del materiale in vasche.



Figura 1.1: Layout generale della macchina

Per quanto riguarda invece la parte di potenza e dell'azionamento abbiamo:

- Quadro elettrico che contiene tutte le apparecchiature, tra cui l'inverter che alimenta il motore.
- Il motore, asincrono trifase a gabbia, che fornisce coppia e velocità.
- Un giunto di sicurezza limitatore di coppia che disinnesta la trasmissione nel caso in cui il motore raggiunga carichi troppo elevati.
- Un riduttore, che aumenta la coppia e la distribuisce ai due alberi e alle due viti.

Nel caso in esame è stato aggiunto un elemento alla catena di potenza: un giunto sensorizzato per la misura della coppia, posizionato sui due alberi in uscita al riduttore, del quale si parlerà più nel dettaglio nei capitoli successivi.

2. Scopo della tesi

L'obiettivo principale del lavoro effettuato è verificare l'adeguatezza del dimensionamento dell'azionamento di un estrusore, in particolare del motore, attraverso una campagna di misure sull'impianto in funzione. Si vuole stabilire se la scelta del motore applicata alla macchina sia coerente con i requisiti di processo e se ci sia la possibilità di uno *scale-down*, sia in ottica di ottimizzazione dei rendimenti che in ottica di riduzione dei costi e delle emissioni.

L'azionamento esaminato comprende tutte le componenti elencate prima: inverter, motore, giunto limitatore, riduttore e giunto sensorizzato.

Tutte le prove della campagna di misurazioni sono state effettuate con un unico materiale, il polipropilene, così da poter confrontare le diverse condizioni di funzionamento indipendentemente dagli effetti legati al materiale.

2.1 Obiettivi specifici

Per raggiungere lo scopo il lavoro è stato suddiviso in una serie di obiettivi specifici:

- Ricostruzione degli andamenti di coppia e potenza in funzione della velocità e della portata, sia in regime stazionario che in regime transitorio, individuando i punti di funzionamento.
- Caratterizzazione del segnale ottenuto sia nel dominio del tempo che in quello della frequenza, individuando le componenti principali e distinguendo quelle di natura meccanica da quelle di altra natura.
- Analisi del comportamento dinamico attraverso lo studio della risposta della coppia in funzione della velocità, confrontando casi stazionari e casi transitori.
- Verifica della ripartizione della coppia tra i due alberi in uscita.
- Stima dell'energia meccanica specifica come indicatore energetico del processo.
- Valutazione del dimensionamento attraverso il fattore di carico, stimato in corrente e in potenza, confrontando i carichi misurati durante i vari cicli di lavorazione e bilanciandoli con i limiti dei singoli componenti dell'azionamento.

In sintesi, il lavoro vuole rispondere a tre domande. La prima riguarda il dimensionamento del motore, ci si chiede se il motore sia dimensionato correttamente in coppia e in potenza. La seconda riguarda quale elemento della catena limita maggiormente la coppia trasmessa e la terza quali fenomeni contribuiscono maggiormente al carico dell'azionamento e in che misura.

2.2 Metodologia

L'approccio adottato è sperimentale. La coppia all'uscita del riduttore viene misurata attraverso un giunto sensorizzato, campionato a 100 Hz per un periodo di 240 s. I dati così ottenuti vengono confrontati con quelli estratti dal PLC tramite programmi Python.

Le prove sono organizzate in tre cicli, scelti in base alle condizioni di lavoro che meglio rappresentano un ciclo di produzione. Prima si stabilisce una *baseline* per la verifica del corretto funzionamento, e solo successivamente si inserisce nel sistema il giunto sensorizzato.

Tuttavia, è necessario sottolineare che esistono dei vincoli stringenti. Le misure sono effettuate su un impianto in funzionamento e non su un banco prova, dunque non è possibile scegliere a piacere i punti di funzionamento né far variare le condizioni in maniera continua e arbitraria.

La metodologia, la raccolta dati e la suddivisione delle varie prove verranno ampiamente descritte nei capitoli successivi.

2.3 Attese

Il risultato atteso dal punto di vista meccanico è rispondere alla domanda sul dimensionamento attraverso le misure ottenute e, con le dovute cautele, definire un protocollo di misure che permetta la scelta della motrice ottimale anche per applicazioni future.

3. Principi di funzionamento dell'azionamento

In questo capitolo andremo ad analizzare nello specifico i principi di funzionamento dell'azionamento in esame, ossia le leggi e i principi fisici che ne governano i componenti esplicitandone le relazioni fondamentali.

L'ottimizzazione di un *drive* richiede la comprensione dei fenomeni meccanici ed elettrici che governano il trasferimento di potenza dal motore fino al componente che la utilizza.

Nel seguente capitolo si analizzano i componenti principali del sistema di attuazione e di controllo di un estrusore, esaminando, per ciascuno, le caratteristiche principali e i principi di funzionamento.

Il sistema di attuazione è composto da cinque elementi fondamentali: un motore asincrono trifase a corrente alternata che converte l'energia elettrica della rete in energia meccanica, un inverter di frequenza che raddrizza la corrente alternata in continua e poi la converte di nuovo in alternata a frequenza variabile, permettendo così il controllo preciso di parametri come velocità e coppia attraverso la modulazione di frequenza e tensione, un riduttore meccanico che riduce la velocità di rotazione in ingresso dal motore, aumentando la coppia in uscita e, infine, un giunto limitatore di coppia che permette il collegamento tra motore e riduttore e disaccoppia il sistema se la coppia raggiunge o supera un determinato valore limite. All'interno dell'azionamento viene anche incluso il sistema di misurazione della coppia, posizionato a valle del riduttore sui giunti di collegamento tra gli alberi in output del riduttore e le viti, permettendo di avere un riscontro in tempo reale per aumentare l'efficienza del controllo.

3.1 Motore asincrono trifase a corrente alternata.

Il primo elemento della catena cinematica che andremo ad analizzare nello specifico è il motore ad induzione. Ricopre un ruolo fondamentale in quanto fornisce interamente la potenza meccanica necessaria per il funzionamento della macchina.

La scelta di un motore elettrico e, in particolare, di un motore trifase a corrente alternata è ampiamente consolidata in ambito industriale. Questa diffusione è dovuta alla robustezza e alla semplicità costruttiva, al basso costo di acquisto e di manutenzione, alla possibilità di collegamento diretto alla rete e nell'affidabilità in servizio continuo.

Vantaggi particolarmente evidenti se confrontati con soluzioni alternative come i motori in corrente continua.

Lo sviluppo di tecniche di controllo tramite inverter ha esteso la scelta di questo tipo di motori anche per quelle applicazioni che richiedono un elevato e preciso controllo di velocità o di coppia.

La sezione seguente ha come obiettivo quello di individuare e discutere dei principi di funzionamento, modelli *steady-state* e circuiti equivalenti. [1][2]

3.1.1 Principi di funzionamento

Dal punto di vista costruttivo la macchina asincrona è costituita da due circuiti trifase, uno solidale allo statore, la parte che rimane fissa, e uno solidale al rotore, elemento che invece è mobile. Questi due circuiti rimangono separati dal punto di vista elettrico ma sono accoppiati dal punto di vista magnetico.

In base alla realizzazione del circuito rotorico si distinguono due tipologie di motore ad induzione: il motore a rotore avvolto (*wound rotor*) e il motore a gabbia (*cage rotor*).

Nel caso dei motori a gabbia la struttura principale è composta da statore e rotore. Il rotore è composto da due elementi principali: un nucleo laminato in ferro, del tutto simile a quello di uno statore e una gabbia (da cui il nome “rotore a gabbia”) composta da barre conduttrici, solitamente realizzate in alluminio o rame, cortocircuitate alle estremità tramite anelli di chiusura. Queste barre costituiscono la parte attiva dell’avvolgimento, mentre gli anelli, che possiedono una resistenza trascurabile, hanno il solo compito di chiuderle in cortocircuito consentendo la circolazione delle correnti indotte.

Le barre conduttrici inserite nelle cave del nucleo laminato non sono dritte ma leggermente angolate rispetto all’asse di quest’ultimo. Questa leggera angolazione, detta *skewing*, permette di ridurre notevolmente l’ondulazione di coppia, ossia il fenomeno per cui la coppia può essere trasmessa in maniera discontinua, noto come *cogging*, e al contempo ridurre il rumore magnetico emesso dalla macchina.

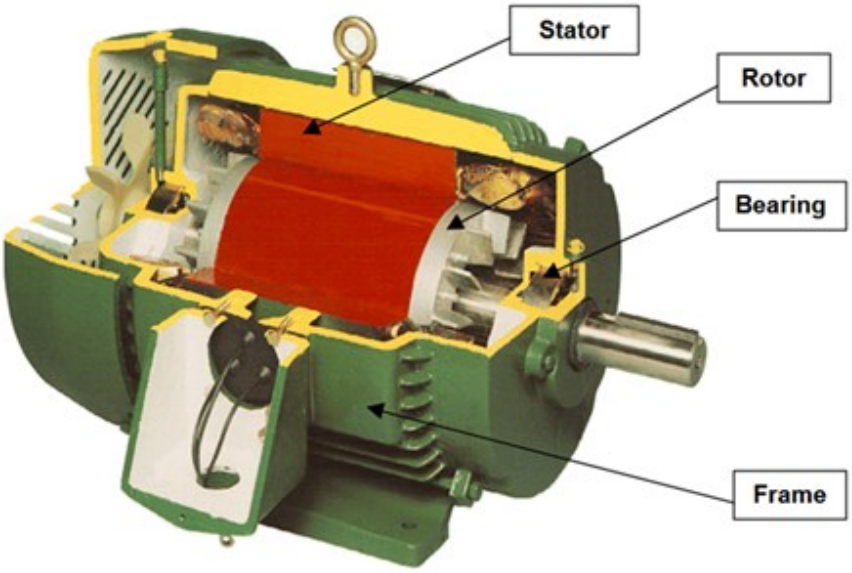


Figura 3.1: Sezione di un motore a gabbia nel quale è possibile vedere statore e rotore.

Lo statore è la parte fissa del motore: ospita gli avvolgimenti e indirizza il flusso magnetico. Il nucleo statorico viene solitamente realizzato in lamiere di acciaio con uno spessore ridotto ed isolate elettricamente l'una dall'altra per ridurre al minimo le correnti parassite. Lungo la periferia del nucleo sono ricavate le cave che contengono l'avvolgimento trifase. I tre avvolgimenti di fase sono distribuiti simmetricamente lungo lo statore ma vengono sfasati di 120° elettrici (Figura 3.2). Questo sfasamento permette la generazione di un campo magnetico rotante, con velocità angolare costante, nel traferro. [1][2]

Nello statore si manifestano due tipi di perdite: le perdite per effetto Joule negli avvolgimenti e le perdite nel ferro. Entrambe producono un aumento di temperatura che deve necessariamente essere dissipato: la dissipazione avviene principalmente attraverso il giusto dimensionamento delle superfici di scambio termico e l'utilizzo di materiali idonei. [3]

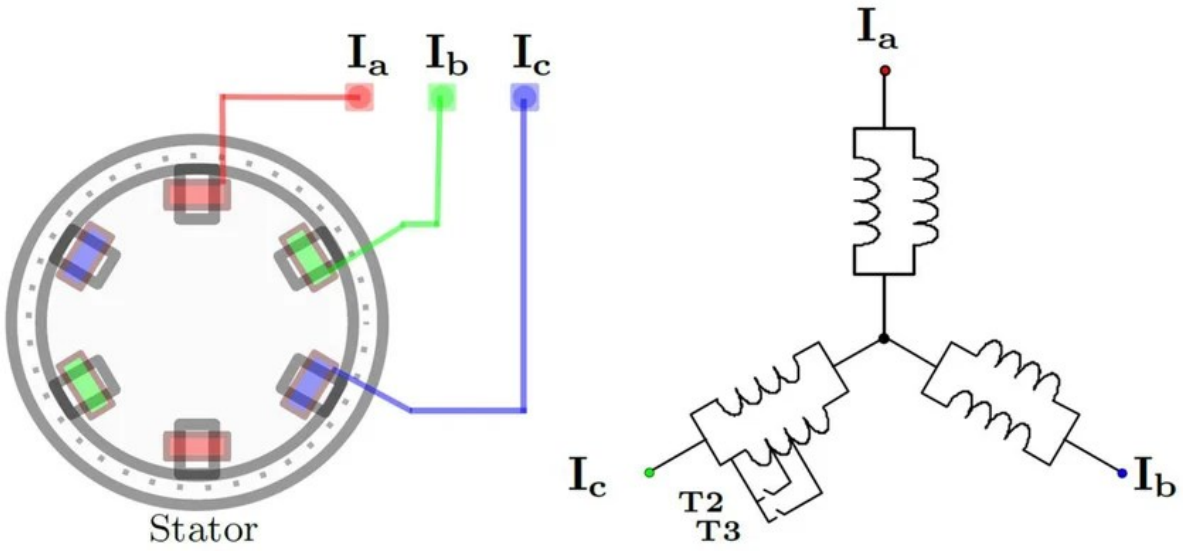


Figura 3.2: Disposizione degli avvolgimenti nello statore di un motore a induzione

3.1.2 Campo magnetico

Il meccanismo principale alla base del funzionamento del motore a induzione è la generazione di un campo magnetico rotante nel traferro. Il campo magnetico viene generato dalla combinazione delle correnti sinusoidali che percorrono i tre avvolgimenti di fase nello statore.

Considerando inizialmente una singola fase, quando una corrente ne percorre l'avvolgimento si genera nel traferro una forza magnetomotrice chiamata f.m.m. Applicando la legge di Ampère al percorso che attraversa traferro e ferro si osserva che, se il ferro non è saturo, la sua elevata permeabilità rende trascurabile la caduta di forza magnetomotrice in esso. La f.m.m. si localizza quindi, quasi interamente, nei due tratti di traferro. [1][2][3]

Per una fase concentrata in un'unica cava la distribuzione spaziale del campo risulterebbe rettangolare. Distribuendo l'avvolgimento su più cave la forma d'onda assume, invece, un andamento "a gradini" che può essere approssimato ad una sinusoide tanto più è maggiore il numero di cave per polo e per fase. Limitandosi alla componente fondamentale, la f.m.m. prodotta da ciascuna fase è pulsante nel tempo e distribuita sinusoidalmente nello spazio. È quindi il prodotto di una funzione del tempo (la corrente) per una funzione dello spazio.

Tenendo conto che le tre correnti sono sfasate di 120° nel tempo e che i tre avvolgimenti sono sfasati di 120° nello spazio, si scrive:

$$F_A(\theta, t) = 0.9 \cdot N \cdot I \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\theta t) \quad (3.1)$$

$$F_B(\theta, t) = 0.9 \cdot N \cdot I \cdot \sin(\omega t - 120°) \cdot \cos(\theta - 120°) \quad (3.2)$$

$$F_C(\theta, t) = 0.9 \cdot N \cdot I \cdot \sin(\omega t + 120°) \cdot \cos(\theta + 120°) \quad (3.3)$$

- θ è la posizione angolare lungo il traferro.
- ω = 2πf la pulsazione delle correnti di alimentazione.
- N il numero di spire per fase.
- I il valore efficace della corrente.

Il coefficiente 0,9·N·I rappresenta dunque l'ampiezza della componente fondamentale della f.m.m. di una fase. Sommando i tre contributi e applicando le formule di prostaferesi, le componenti controrotanti formano una terna simmetrica a somma nulla, mentre le componenti corotanti si sommano in fase. Ne risulta un'unica onda di f.m.m. di ampiezza pari a 3/2 di quella di una singola fase che può essere espressa come segue:

$$F(\theta, t) = F_A(\theta, t) + F_B(\theta, t) + F_C(\theta, t) \quad (3.4)$$

Che è possibile riscrivere come:

$$F(\theta, t) = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot (0.9 \cdot N \cdot I) \cdot \sin(\omega t - \theta) \approx 1.35 \cdot N \cdot I \cdot \sin(\omega t - \theta) \quad (3.5)$$

Si noti che l'argomento del seno (ωt − θ) indica che il massimo dell'onda si sposta lungo il traferro al passare del tempo: si tratta dunque di un'onda rotante che, in una macchina a due poli, ha una velocità angolare ω pari alla pulsazione di alimentazione. La velocità di rotazione del campo magnetico rotante è definita velocità di sincronismo e dipende dalla frequenza di rete e dal numero di poli della macchina.

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{(p/2)} \quad [rad/s] \quad (3.6)$$

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad [giri/min] \quad (3.7)$$

All'aumentare del numero di poli diminuisce la velocità di sincronismo, ciò permette di adattare la velocità della macchina alle specifiche esigenze, senza dover ricorrere a riduttori meccanici. [1][2][3]

3.1.3 *Generazione di coppia*

La coppia, in un motore a induzione, viene generata dall'interazione tra il campo magnetico presente nel traferro e le correnti che circolano nel rotore. Per la legge dell'induzione di Faraday il campo rotante induce nelle barre rotoriche una tensione, ed essendo le barre cortocircuitate dagli anelli, vi circolano correnti che, immerse nel campo, danno luogo a una forza e quindi a una coppia sull'albero del rotore.

Questo fenomeno richiede però un moto relativo tra il campo magnetico rotante e il rotore, cioè una differenza tra le due velocità di rotazione. Se infatti il rotore avesse la stessa velocità angolare del campo magnetico dello statore allora le barre sarebbero soggette ad un campo magnetico stazionario e quindi non genererebbero coppia. Per questo motivo il rotore non può ruotare esattamente alla velocità di sincronismo ma sarà ad una velocità leggermente inferiore. Questa velocità è quella necessaria affinché le correnti indotte siano sufficienti ad equilibrare la coppia resistente proveniente dal carico.

La differenza relativa fra le due velocità è chiamata scorrimento, o *slip*, ed è definita come:

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \qquad (3.8)$$

Dove n_s (ω_s) è la velocità di sincronismo e n_r (ω_r) la velocità di rotazione del rotore, espresse rispettivamente in giri al minuto o in radianti al secondo. Lo scorrimento è una grandezza adimensionale che spesso viene espressa in percentuale. Ha un limite superiore corrispondente a s=1 nella condizione di rotore fermo, quando $n_r = 0$, e un limite inferiore pari a s=0 quando il rotore raggiunge la velocità di sincronismo.

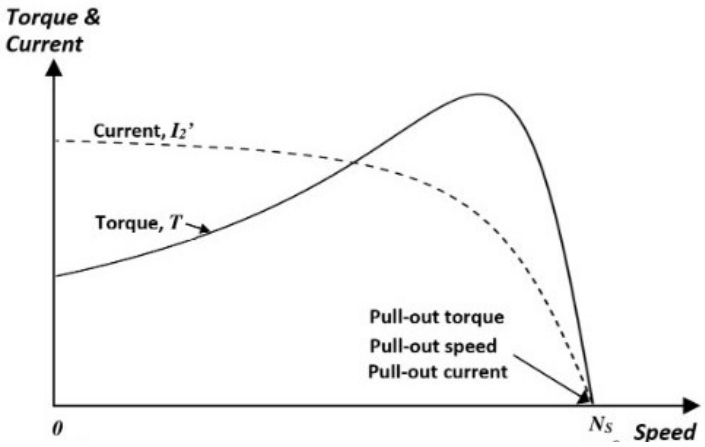


Figura 3.3: Curva coppia-scorrimento

In ambito industriale il valore dello slip oscilla solitamente tra l'1% e il 5%. Nella figura precedente si mostra l'andamento coppia-scorrimento (Figura 3.3).

Le correnti indotte nelle barre rotoriche hanno frequenza proporzionale allo scorrimento. Quando il rotore è fermo (s = 1), la frequenza delle correnti rotoriche coincide con quella di alimentazione. Man mano che il rotore accelera e lo scorrimento si riduce, la frequenza delle correnti rotoriche diminuisce proporzionalmente secondo la relazione:

$$f_2 = s \cdot f_1 \qquad (3.9)$$

Dove f_1 è la frequenza di alimentazione statorica e f_2 è la frequenza delle correnti rotoriche (anche nota come *frequenza di scorrimento*).

In regime nominale, con uno scorrimento del 3%, per una rete a 50 Hz la frequenza rotorica è appena 1,5 Hz, valore che giustifica, sul piano fisico, la modellazione del rotore in regime permanente come un circuito a frequenza quasi nulla.

La corrente indotta nelle barre rotoriche, espressa come grandezza ridotta allo statore mediante il rapporto di trasformazione tra statore e rotore, vale:

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{(R_2^2+(sX_2)^2)}} \equiv \frac{E_2}{\sqrt{((R_2/s)^2+X_2^2)}} \qquad (3.10)$$

Dove:

- E_2 è la tensione indotta nel rotore a rotore fermo.
- R_2 è la resistenza rotorica per fase.
- X_2 è la reattanza di dispersione rotorica a frequenza di statore.
- s è lo slip.

La seconda forma è particolarmente significativa perché, nel caso di rotore fermo, evidenzia che il comportamento rotorico può essere rappresentato da un circuito equivalente nel quale la resistenza rotorica R_2 è divisa per lo scorrimento s. Il termine R_2/s racchiude sia le perdite per effetto Joule nel rotore sia la potenza meccanica resa all'albero. [1][2][3]

3.1.4 Circuito equivalente

Le relazioni precedenti permettono di rappresentare il sistema tramite un circuito equivalente. Il circuito è considerato nel caso monofase: lo statore rappresenta l'avvolgimento primario mentre il rotore rappresenta quello secondario, chiuso in cortocircuito. Nel caso di rotore bloccato (s=1) il circuito coincide con quello di un trasformatore con un circuito secondario in cortocircuito. Con il rotore in movimento viene sostituita la resistenza rotorica R_2 con R_2/s.

Come nel caso di un trasformatore si possono riportare le grandezze rotoriche al circuito primario moltiplicandole per il quadrato del rapporto di spire. In questa maniera è possibile ottenere i parametri R_2' e X_2' riferiti allo statore. Il circuito equivalente è rappresentato in Figura 3.4:

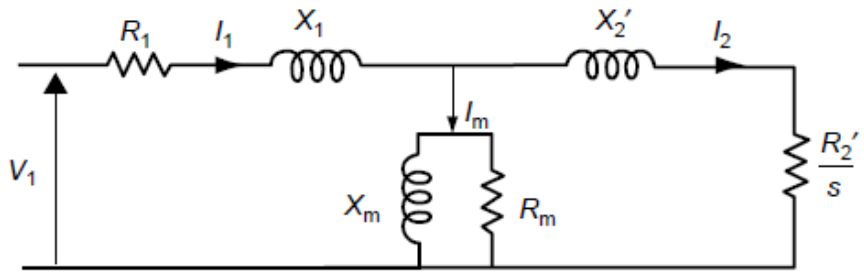


Figura 3.4: Circuito equivalente di un motore a induzione

Dove:

- R_1 resistenza dell'avvolgimento statorico per fase, è sede delle perdite Joule di statore.
- $X_1 = \omega L\sigma_1$ reattanza di dispersione statorica, associata al flusso che si richiude senza concatenarsi con il rotore.
- R_m resistenza di perdita nel nucleo, che rappresenta le perdite nel ferro per isteresi e correnti parassite, qui viene trascurata.
- X_m reattanza di magnetizzazione, determina la corrente reattiva necessaria per sostenere il flusso al traferro che, per via del traferro stesso, è molto elevata.
- R_2'/s rapporto tra la resistenza rotorica ridotta allo statore e lo scorrimento.
- X_2' reattanza di dispersione rotorica ridotta allo statore.

Il termine R_2'/s può essere ulteriormente riscritto in questa maniera:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \cdot \frac{1-s}{s} \qquad (3.11)$$

In questo modo si distinguono due contributi: la quota, dovuta unicamente a R_2' rappresenta le effettive perdite per effetto Joule negli avvolgimenti del rotore, mentre la parte $R_2' \cdot (1-s)/s$ è una resistenza fittizia che dissipa una potenza pari a quella che viene convertita in potenza meccanica. Si ricordi che questo modello è valido solo sotto determinate ipotesi. [2][3]

3.1.5 Bilancio di Potenza e rendimenti

Definito il circuito equivalente è possibile seguire con facilità il flusso di potenza attraverso la macchina.

Trascurando la resistenza R_m si può scrivere la potenza assorbita dalla rete come:

$$P_{in} = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \qquad (3.12)$$

dove V è la tensione, I la corrente e φ l'angolo di fase.

Una parte di questa potenza viene inizialmente dissipata dalla resistenza dello statore tramite l'effetto Joule oltre alle eventuali perdite nel ferro:

$$P_{js} = 3 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \qquad (3.13)$$

Di conseguenza, la potenza che attraversa il traferro e che viene trasferita al rotore è quella che viene assorbita dalla resistenza R_2'/s:

$$P_g = 3 \cdot \left(\frac{R_2'}{s}\right) \cdot \mathrm{I}_2'^2 \qquad (3.14)$$

Applicando la formula 3.11 alla formula 3.14 si possono individuare due contributi:

$$P_{jr} = 3 \cdot \left(\frac{R_2'}{\mathrm{I}_2'^2}\right) = s \cdot P_g \qquad (3.15)$$

$$P_{mecc} = 3R_2' \frac{1-s}{s} I_2'^2 = (1-s)P_g \qquad (3.16)$$

Dove la 3.15 rappresenta il termine delle perdite per effetto Joule nel rotore e la 3.16 invece è la potenza convertita in forma meccanica.

Queste due relazioni (3.15 e 3.16) mostrano che a parità di potenza di traferro la frazione dissipata nel rotore è pari allo scorrimento mentre la potenza meccanica convertita all'albero ne è il complemento. Ne consegue che minore è lo scorrimento minori saranno le perdite rotoriche e dunque maggiore sarà il rendimento del motore.

La potenza all'albero si ottiene infine sottraendo alla potenza meccanica convertita le perdite meccaniche per attrito. La coppia elettromagnetica invece si ricava dividendo la potenza per la velocità del rotore oppure dividendo la potenza di traferro per la velocità di sincronismo: [3][4]

$$T = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{3R_2' I_2'^2}{s\omega_s} \qquad (3.17)$$

La potenza utile all'albero si ottiene sottraendo a P_{mecc} tutte le perdite meccaniche. Il bilancio complessivo si può quindi scrivere come:

$$P_{in} = P_{out} + P_{js} + P_{fe} + P_{jr} + P_{av} + P_{add} \qquad (3.18)$$

Dove P_{js} e P_{jr} sono le perdite Joule di statore e rotore, P_{fe} le perdite nel ferro, P_{av} le perdite per attrito nei cuscinetti e P_{add} le perdite addizionali dovute a flussi dispersi. P_{av} è l'unica di natura meccanica mentre le altre sono di natura elettromagnetica.

Concluso il bilancio di potenza si può quindi esprimere il rendimento come il rapporto tra la potenza in uscita e quella in entrata:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum P_{perdite}} \qquad (3.19)$$

Il rendimento dipende dal punto di funzionamento della macchina. A tensione e frequenza costanti le perdite nel ferro e quelle meccaniche sono pressoché fisse mentre quelle per effetto Joule crescono con il quadrato della corrente e dunque con il carico. Il rendimento massimo si ottiene quando le perdite fisse eguagliano quelle variabili, condizione che tipicamente si verifica in prossimità del carico nominale. Sotto la metà del carico nominale rendimento e fattore di potenza diminuiscono rapidamente poiché perdite fisse e corrente di magnetizzazione restano invariate. [4][5][6]

3.1.6 Relazione tra coppia e scorrimento

Partendo dalla definizione appena fornita di coppia elettromagnetica, formula 3.17, se si esprime la corrente rotorica in funzione della tensione applicata si può riscrivere la formula 3.17 come [4]:

$$T = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{V_1^2 \left(R_2'/_s\right)}{\left(R_1 + R_2'/_s\right)^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2} \quad (3.20)$$

L'andamento della coppia in funzione dello scorrimento (Figura 3.3) presenta delle caratteristiche particolari: all'avviamento (s=1, rotore fermo) si ha la coppia di spunto, l'impedenza complessiva del sistema risulta piccola, ne consegue quindi che in fase di avviamento la corrente assorbita può essere estremamente elevata e superare anche il valore nominale.

Al contrario nel caso in cui s→0 il rapporto R_2'/s aumenta notevolmente diventando maggiore di $(X_1 + X_2')$ e l'espressione della coppia 3.20 può essere semplificata in [4]:

$$T \approx \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{sV_1^3}{R_2'} \quad (3.21)$$

Quest'ultima relazione mostra che la coppia cresce in maniera quasi lineare con lo scorrimento. [1][2][4]

Nel passaggio dal primo caso al secondo la coppia passa per un valore massimo, chiamato *breakdown torque* in corrispondenza di uno scorrimento s_{max}:

$$s_{max} = \frac{R_2'}{X_1 + X_2'} \quad (3.22)$$

e sostituendo nell'equazione della coppia 3.20 con $R_1 = 0$:

$$T_{max} = \frac{3V_2^2}{2\omega_s(X_1 + X_2')} \quad (3.23)$$

Da queste relazioni si può individuare un andamento particolare: il valore della coppia massima non dipende dalla resistenza rotorica mentre lo scorrimento al quale essa si manifesta ne è direttamente proporzionale. Aumentando allora la resistenza del rotore il picco di coppia si sposta verso scorrimenti sempre maggiori fino al caso limite s=1 in cui assume il valore della coppia di spunto, a discapito di un rendimento minore. [4]

Riformulando la coppia rispetto alla coppia massima si può arrivare ad una ulteriore relazione nota come formula di Kloss:

$$\frac{T}{T_{max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}} \qquad (3.24)$$

Questa relazione lega la coppia unicamente al rapporto fra lo scorrimento e lo scorrimento a coppia massima e permette di tracciare, noti T_{max} e s_{max}, l'intera curva caratteristica senza dover esplicitare i parametri del circuito equivalente. Si ricorda che anche in questo caso la formula è valida sotto alcune ipotesi e condizioni ben precise (resistenza statorica trascurabile).

La relazione coppia-scorrimento delineata finora ci permette inoltre di inquadrare il comportamento del motore una volta inserito nel sistema. A regime, il punto di lavoro risulta essere l'intersezione tra la coppia richiesta all'albero e la curva di coppia del motore. Questo punto dovrebbe essere situato in prossimità della velocità di sincronismo con un valore di *slip* basso per garantire il miglior rendimento possibile. [1][4][7]

Le relazioni precedenti, come già specificato, valgono per una frequenza di alimentazione assegnata. Con l'introduzione dell'inverter la frequenza diventa una grandezza di regolazione che compare sia nella velocità di sincronismo sia nelle reattanze. Riscrivendo dunque le formule 3.22 e 3.23 con l'induttanza si ottiene:

$$s_{max}\omega_s = \frac{R_2'}{p(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}')} \qquad (3.25)$$

$$T_{max} = \frac{3p}{8\pi^2(L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2}')} \cdot \left(\frac{V_1}{f}\right)^2 \qquad (3.26)$$

La coppia massima, a differenza della velocità di scorrimento, dipende dal rapporto tra tensione e frequenza. Mantenendo dunque costante il rapporto V/f al variare della frequenza la caratteristica meccanica trasla lungo l'asse della velocità mantenendo la medesima coppia massima. Questa lettura ha però due limiti: alle basse frequenze $R_1 = 0$ non è più un'approssimazione valida, inoltre superata la frequenza nominale il rapporto V/f decresce e dunque decresce anche la coppia massima. Il modo di gestione di questi limiti viene spiegato nei paragrafi successivi, dedicati all'inverter.

3.2 Inverter

Dopo aver analizzato le caratteristiche principali del motore asincrono il secondo elemento che andremo ad analizzare è l'inverter di frequenza. L'inverter ha il compito principale di permettere al motore di funzionare a velocità variabile: infatti, se si collegasse direttamente il motore alla rete questo funzionerebbe unicamente a velocità costante, quella di sincronismo. In un'applicazione come quella in esame la modulazione della velocità risulta essere fondamentale per permettere un corretto controllo del processo produttivo e garantire un'uniformità del prodotto.

La funzione principale di un convertitore è dunque quella di prelevare potenza dalla rete a tensione e frequenza costanti, raddrizzarla e successivamente convertirla in un sistema trifase a frequenza variabile che possa alimentare il motore.

3.2.1 Principi di funzionamento e regolazione

Il principio di regolazione si basa su alcune relazioni fondamentali fra velocità e ampiezza del campo magnetico. La velocità del campo magnetico varia con la frequenza di alimentazione e di conseguenza il controllo sulla velocità si basa principalmente sul controllo di questa variazione di frequenza. L'ampiezza del campo è invece direttamente proporzionale alla tensione applicata allo statore e inversamente proporzionale alla frequenza. Per mantenere il flusso al suo valore nominale occorre dunque variare la tensione in uscita all'inverter proporzionalmente alla frequenza. Questo tipo di controllo prende il nome di controllo a rapporto V/f costante.

Si può dunque derivare un'equazione per la forza elettromotrice indotta che viene bilanciata dalla tensione applicata pari al prodotto del flusso per la frequenza:

$$fem = Kf\Phi \quad [V] \qquad (3.27)$$

Dove K è una costante moltiplicativa, Φ il flusso magnetico per polo [Wb] e f la frequenza [Hz].

Di conseguenza esplicitando Φ si ottiene:

$$\Phi = \frac{\left(V/f\right)}{K} \quad [Wb] \qquad (3.28)$$

Ed è facilmente deducibile che per mantenere il flusso costante sia necessario mantenere il rapporto V/f costante.

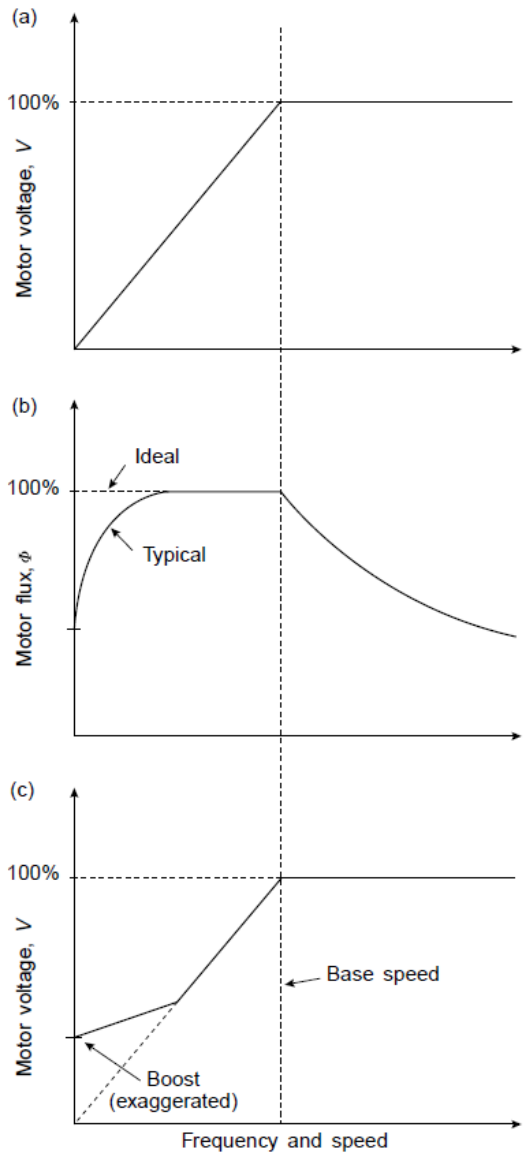


Figura 3.5: A) andamento della relazione frequenza-tensione; B) andamento della relazione flusso-frequenza; C) andamento della funzione tensione-frequenza ma con *boost* inziale.

Nella figura 3.5 si mostrano gli andamenti tipici della tensione e del flusso in funzione della frequenza e della velocità. Nel caso C viene mostrato anche il caso in cui serva un *boost*. Per mantenere il rapporto V/f costante in alcuni casi è necessario implementare delle correzioni: nel caso di frequenze basse, la caduta di tensione sulla resistenza dello statore non è più trascurabile ed è quindi necessaria un'iniezione di tensione, detta *boost*, per ripristinare il flusso e garantire una coppia allo spunto adeguata.

Nel caso in cui invece la velocità fosse maggiore di quella nominale, la frequenza aumenta ed a ciò corrisponde in maniera inversamente proporzionale una diminuzione del flusso.

Questi due comportamenti danno luogo a due regioni ben distinte di funzionamento:

- Regione a coppia costante: regione dove la velocità è minore rispetto a quella nominale, nella quale coppia e flusso rimangono pressoché costanti
- Regione a potenza costante: regione dove la velocità è maggiore di quella nominale e dunque si ha una diminuzione della coppia e del flusso inversamente proporzionale all'aumento della velocità.

L'alimentazione da inverter ha inoltre la capacità di eliminare il problema delle elevate correnti di spunto. Infatti, riducendo tensione e frequenza in avviamento si può accompagnare il motore a regime con la piena coppia nominale senza oltrepassare la corrente nominale della macchina.

Nell'applicazione in esame il motore viene mantenuto per il più possibile nella zona di coppia costante. [1][2][3]

3.2.2 Struttura del convertitore

Fino ad ora si è parlato di inverter e convertitore come se fossero la medesima cosa, tuttavia non è così. L'inverter può essere inserito in una categoria di convertitori chiamati statici.

Le tipologie di convertitori utilizzati dipendono principalmente dal tipo di conversione che realizzano e le principali sono:

- Da corrente alternata a continua.
- Da corrente continua a continua.
- Da corrente alternata ad alternata.

L'ultima risulta essere la più comune ed è quella che verrà presa in esame.

Il funzionamento di questo tipo di macchine consiste in tre passaggi: in primo luogo, la corrente di rete viene raddrizzata e portata in DC, successivamente un bus in continua (o *dc-link*) livella la tensione e disaccoppia i due stadi. Infine, l'inverter trasforma il segnale continuo proveniente dal bus in segnale trifase, a tensione e frequenze controllate per l'alimentazione della macchina.

Esistono due principali filosofie di controllo: nella prima il raddrizzatore viene controllato e produce un livello di tensione continua variabile, la cui ampiezza in uscita è determinata variando il livello del bus in continua, mentre l'inverter si limita al controllo della sola tensione in uscita. Nella seconda strategia di controllo il raddrizzatore non viene controllato essendo un semplice ponte a diodi, e fornisce un bus in continua a tensione fissa; l'inverter in questo secondo caso controlla sia la tensione che la frequenza in uscita. Questa seconda strategia è quella più utilizzata e sfrutta un inverter a tensione impressa comandato in *Pulse Width Modulation* (modulazione ad ampiezza di impulso) o PWM.

Il bus in continua è un collegamento che agisce da filtro tra lo stadio di ingresso e quello di uscita. Questo filtro è composto da un'induttanza e un condensatore, quest'ultimo ha il compito di livellare l'ondulazione proveniente dal raddrizzatore trifase. La presenza dell'induttanza sul bus aiuta ad attenuare i picchi riducendo anche le armoniche che sono caratteristiche della corrente di rete. Infatti, la corrente assorbita dalla rete si concentra sotto forma di impulsi molto stretti con elevato contenuto armonico in corrispondenza dei picchi di tensione. [1][2][3]

3.2.3 Inverter a tensione impressa.

Lo stadio di uscita che viene considerato nella trattazione è un inverter a tensione impressa o VSI. La caratteristica fondamentale, già richiamata precedentemente, è che l'inverter applica al motore una tensione e questa ne determina la corrente. Grazie ad un'impedenza bassa è dunque possibile variare la velocità molto rapidamente. Esistono anche gli inverter a corrente impressa (CSI), che verranno analizzati solo brevemente nel paragrafo successivo.

L'inverter VSI oltre ai vantaggi riguardo alla modulazione permette di:

- Alimentare più motori in parallelo.
- Alimentare diverse tipologie di motori.
- Consente il funzionamento in entrambi i sensi di rotazione del motore.

Se si considera un inverter a due livelli con 6 dispositivi di commutazione, la struttura è suddivisa in tre rami, uno per fase. Ogni ramo è a sua volta costituito da due interruttori in serie e il punto di giunzione dei due è il morsetto di uscita verso il carico. Entrambi gli interruttori sono comandati (sono dispositivi IGBT) (Figura 3.6). [8][9][10][11]

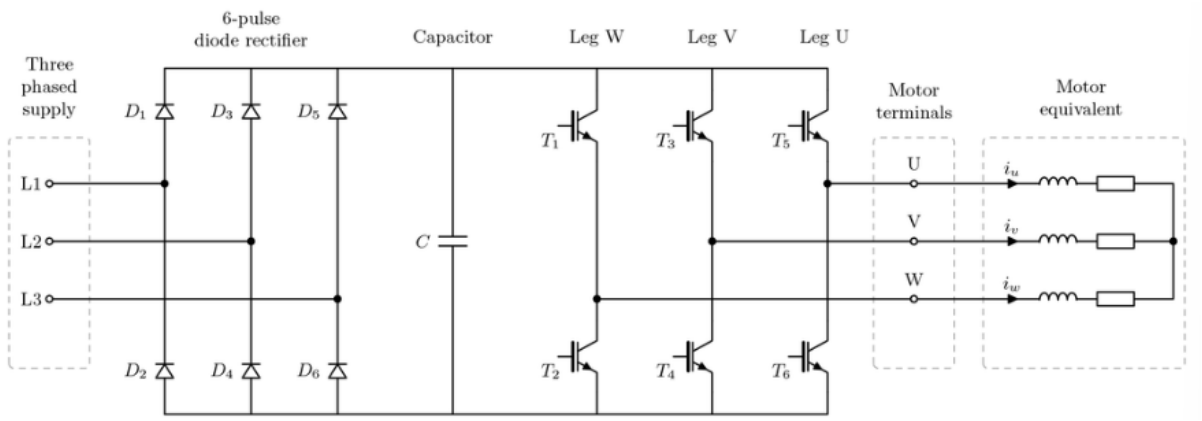


Figura 3.6: Schema di un inverter a 6 dispositivi di commutazione.

La strategia di controllo degli interruttori è solitamente quella dell'onda quasi-quadra. È inoltre la base per sviluppare strategie di controllo come la PWM. Consiste nel controllare i sei dispositivi a intervalli di 60°, questo risulta in una tensione di fase a sei gradini e una tensione concatenata a impulsi di 120°. La frequenza di uscita invece coincide con la frequenza di commutazione degli interruttori. Si può dunque controllare lo stadio di uscita considerando 180° o 120°:

- Nel caso a 180°: ciascun interruttore conduce per mezzo periodo e contemporaneamente conducono 3 interruttori.
- Nel caso a 120°: ciascun interruttore conduce per un terzo di periodo e contemporaneamente conducono 2 interruttori mentre la terza fase rimane flottante.

In entrambe le strategie l'ampiezza della tensione di uscita è determinata dal raddrizzatore a monte. [3]

Il funzionamento ad onda quadra ha quindi dei vantaggi non trascurabili: rendimenti elevati, compatibilità con un'ampia gamma di motori, range di funzionamento ampio ad alte velocità e buona affidabilità. Tuttavia, presenta delle instabilità a basse velocità. Per ovviare a questi problemi si è passati da una modulazione quadra ad una modulazione a larghezza d'impulso (PWM).

È utile ricordare che sebbene in uscita all'inverter ci sia un segnale di tensione quadro, il motore dipende essenzialmente dalla componente fondamentale e dunque, in prima approssimazione, è possibile ricondursi ad un'analisi sinusoidale. [1][8][10]

3.2.4 Classificazione degli inverter

Come già accennato precedentemente esistono diverse famiglie di inverter, la distinzione più caratteristica è tra VSI e CSI: il primo applica al motore una tensione ed è l'impedenza della macchina che determina la corrente. Nel CSI alla macchina viene imposta una corrente ed è la tensione ad essere determinata dall'impedenza della macchina. Un'altra caratteristica dei CSI è che non è possibile modulare rapidamente. Infatti, la corrente viene impressa tramite un circuito induttivo, che per natura non consente modulazioni rapide della corrente. [2][3][10]

Il secondo criterio di classificazione è il tipo di comando in uscita. Si può sfruttare un controllo in onda quadra oppure passare ad un controllo in modulazione PWM. Come già specificato, la seconda opzione nasce per evitare le instabilità a basse velocità che invece possiede l'onda quadra. [2][3][10]

All'interno della modulazione PWM si possono trovare altre suddivisioni basate questa volta sul numero di livelli. Esistono infatti inverter a due livelli e inverter multilivello. I primi hanno un range di impiego ampio (fino a 2MW di potenza) ma oltre si verificano due problemi: il primo riguarda le perdite durante la commutazione che diventano sostanziali, mentre il secondo è dovuto alla velocità della tensione in uscita che tende ad isolare il motore. Per questo sono stati sviluppati gli inverter multilivello. [6][9]

Nel seguito la trattazione si concentrerà unicamente sull'inverter a due livelli in quanto rientra ampiamente nei limiti del sistema.

3.2.5 Modulazione PWM

Stabilito dunque che spetta all'inverter modulare ampiezza e frequenza della tensione in uscita è necessario descrivere il meccanismo che permette questa modulazione.

La modulazione in larghezza d'impulso, o PWM, utilizza un segnale di controllo (modulante) confrontato con un segnale a frequenza fisso (portante) in modo tale da generare i comandi per gli interruttori. L'uscita del comparatore risulta allora essere proprio il segnale PWM che è in grado di pilotare l'interruttore. [11][12][13]

Lavorando a frequenza di commutazione costante il periodo di commutazione rimane costante:

$$T_s = t_{on} + t_{off} \qquad (3.29)$$

Dove T_s indica il periodo di commutazione pari alla somma del periodo in cui lo *switch* è acceso e il periodo in cui è spento. Da questa relazione si può arrivare ad una definizione del *Duty Cycle* come il rapporto tra il periodo di accensione e quello di commutazione:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \qquad (3.30)$$

Si può inoltre stabilire che il valore medio della tensione di uscita su un periodo di commutazione è direttamente proporzionale al *duty cycle*:

$$V_{0avg} = \frac{1}{T_s}\left[\int_0^{T_{on}} V_0(t)dt + \int_{Ton}^{T_{off}} V_0(t)dt\right] = V_d \frac{T_{on}}{T_s} = V_d D \qquad (3.31)$$

Questo avviene perché il termine nel primo integrale è pari a Vd mentre il secondo integrale è nullo.

Inoltre, è possibile definire un indice di modulazione di ampiezza, pari al rapporto tra il valore di picco del segnale di controllo e quello della portante:

$$m_a = \frac{\hat{v}_{ctrl}}{\hat{v}_{tr}} \qquad (3.32)$$

Dove le tensioni sono indicate nel loro valore di picco. È infatti il rapporto fra le ampiezze dei due segnali a determinare la larghezza degli impulsi.

Ugualmente il rapporto fra la frequenza di commutazione, f_{sw}, e quella del segnale di riferimento, f_{ctrl}, è chiamato indice di modulazione di frequenza:

$$m_f = \frac{f_{sw}}{f_{ctrl}} \qquad (3.33)$$

In questo caso il segnale di riferimento agisce come segnale campionato, mentre la commutazione come segnale di campionamento. [11][12][13]

L'uscita è dunque una forma d'onda impulsiva ottenuta da un ingresso regolare: si tratta di un'operazione non lineare perchè lo spettro di uscita contiene, oltre alla fondamentale, armoniche e prodotti di intermodulazione che devono essere filtrati.

La qualità del segnale può essere quantificata introducendo un parametro di distorsione armonica totale THD che è pari a:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \hat{v}_{0h}^2}}{\hat{v}_{01}} \qquad (3.34)$$

Dove $\hat{v}_{01}$ è l'ampiezza della fondamentale di uscita e quelle con pedice *0h* indicano le ampiezze delle armoniche di ordine h. Resta inteso che a una frequenza di commutazione più elevata corrispondono armoniche più facilmente filtrabili ma maggiori perdite. La scelta della frequenza risulta dunque essere sempre un compromesso. [2][3]

3.2.6 SPWM e Space-Vector PWM

Esistono diversi tipi di PWM che si differenziano per il modo in cui vengono generati gli impulsi e le principali categorie sono:

- Carrier Based, che a sua volta si dividono in diversi casi tra cui
    - Sinusoidal-PWM
    - Third Harmonic Injection
- Space Vector Based
    - 7 segment
    - 5 segment
    - Pre programmed
- Hysteresis control based

Le principali tuttavia sono Sinusoidal PWM, Third Harmonic Injection e la Space Vector PWM. [13][14]

- Carrier Based SPWM:

La maggior parte delle applicazioni richiede tensioni in uscita che siano sinusoidali, di conseguenza nella modulazione SPWM i tre rami dell'inverter sono controllati da tre segnali modulanti anch'essi sinusoidali, sfasati di 120°. Questi tre segnali sono successivamente confrontati con un segnale triangolare ad alta frequenza (Figura 3.7). [13][14]

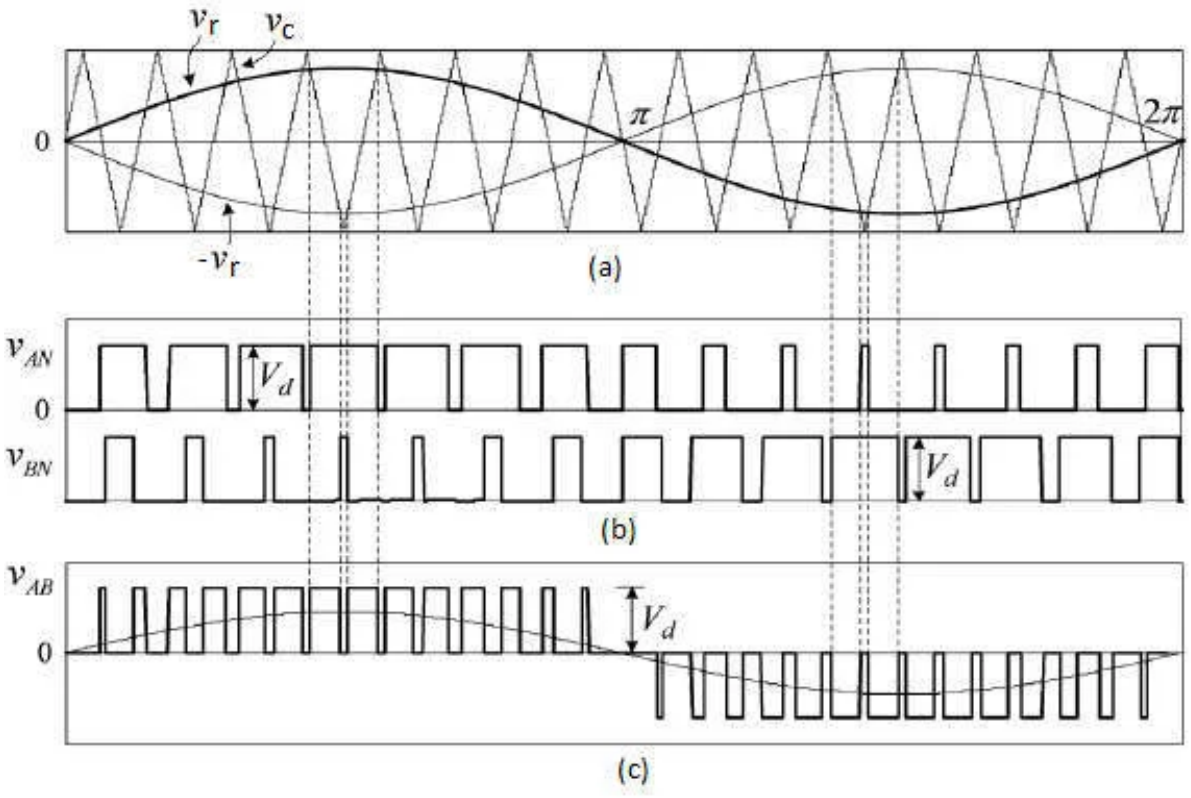


Figura 3.7: A) Confronto fra il segnale SPWM e il segnale triangolare; B) Confronto con gli switch degli interruttori; C) Confronto con la tensione in uscita

L'ampiezza della prima armonica per ogni fase, che è determinata dall'indice di modulazione e vale:

$$\hat{v}_{LN} = m_a \frac{V_d}{2} \qquad (3.35)$$

mentre l'ampiezza della tensione concatenata vale:

$$\hat{v}_{LL} = m_a V_d \frac{\sqrt{3}}{2} \qquad (3.36)$$

Dove V_d è la tensione del bus in continua.

Le relazioni appena citate hanno però validità unicamente nella regione di funzionamento lineare, ossia per m_a <=1. In corrispondenza di questo valore è possibile determinare la tensione concatenata massima pari a:

$$\hat{v}_{LL,max} = V_d \frac{\sqrt{3}}{2} \qquad (3.37)$$

Per quanto riguarda l'indice di modulazione di frequenza invece solitamente viene scelto intero e multiplo di 3. [3][12][13][14]

Se l'indice di modulazione supera l'1, l'inverter entra nella regione di sovramodulazione. In questa regione si possono distinguere due regimi:

- Regione di sovramodulazione: m_a>1, si perde la linearità tra ma e V0 e oltre alle armoniche di alta frequenza compaiono armoniche di ordine basso.
- Regione di onda quadra: quando m_a è >> di 1, si ha la saturazione completa del modulatore PWM, l'inverter perde la capacità di regolare l'ampiezza della tensione in uscita. In questo caso si ricade nella prima strategia di controllo descritta nel paragrafo 3.2.

- Iniezione di terza armonica

La SPWM, nella regione lineare restituisce uno spettro pulito e una relazione lineare fra m_a e Vo, tuttavia il limite massimo di tensione è limitato al valore di $\hat{v}_{LL,max}$.

Al contrario, la modulazione in onda quadra fornisce un valore di tensione massima maggiore, che viene però distorta dalla presenza di armoniche di basso ordine.

L'obiettivo di questa strategia è dunque quello di aumentare il valore massimo della fondamentale rimanendo però nella regione lineare. Per fare ciò si parte considerando il segnale di controllo e aggiungendoci una componente di frequenza tripla (terza armonica):

$$v_{ctrl} = V_{C1} \sin \omega_1 t + V_{C3} \sin 3\omega_1 t \qquad (3.38)$$

In questo modo è possibile ottenere un valore di $\hat{v}_{LL,max}$ maggiore mantenendo l'ampiezza del segnale di controllo inferiore a quella della curva triangolare, ossia lavorando con un indice di modulazione inferiore a uno.

Attraverso diverse relazioni si arriva alla conclusione per cui il limite $\hat{v}_{LL,max}$ è ora pari a V_d e non più $V_d \frac{\sqrt{3}}{2}$.

- Modulazione vettoriale, *Space-Vector PWM*

Entrambe le strategie di modulazione che sono state affrontate precedentemente cadono nella categoria più ampia delle strategie *carrier based*. In questa parte della trattazione si discuterà invece di un tipo di strategia diversa basata sulla rappresentazione di un vettore riferimento che viene scomposto in 8 vettori rappresentanti le 8 combinazioni degli interruttori possibili.

Questa strategia è in grado di ottenere una $\hat{v}_{LL,max}$ pari a quella ottenuta con la *Third Harmonic Injection* e inoltre sposta le armoniche a frequenze ancora più alte. [7]

La SV-PWM risulta essere la scelta più diffusa per quanto riguarda sistemi dotati di motori trifase AC con VSI poiché risulta la più robusta, affidabile e con rendimenti e coppie raggiungibili più elevate. [7]

L'output di tale strategia è un vettore di tensione sinusoidale ad ampiezza costante che ruota a frequenza costante.

Rappresentato nella Figura 3.6 si trova il tipico schema di un inverter a tre fasi. Quando uno dei due rami è accesso l'altro è per forza spento, questo fa sì che le possibili combinazioni tra gli interruttori siano 8 (2^3). Queste combinazioni vanno da v0 a v7 e possono essere scritte come: (000), (100), (110), (010), (011), (001), (101) e (111). Due di questi vettori (000) e (111) rappresentano vettori nulli. Nelle figure seguenti (Figura 3.8-3.15) vengono rappresentate le diverse combinazioni di interruttori: [7][9][11][14]

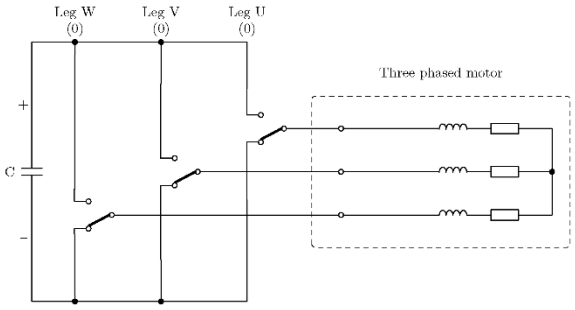


Figura 3.8: Situazione 000

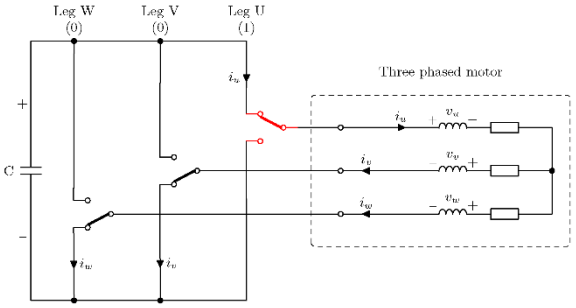


Figura 3.9: Situazione 001

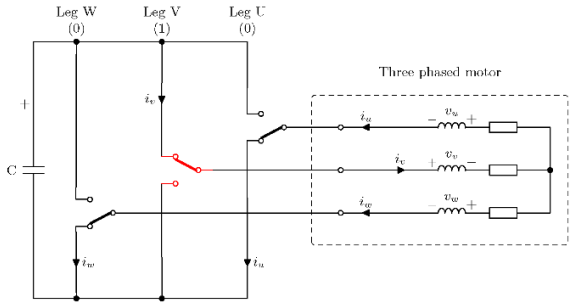


Figura 3.10: Situazione 010

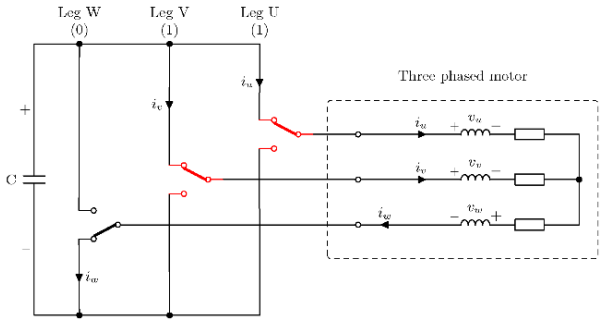


Figura 3.11: Situazione 011

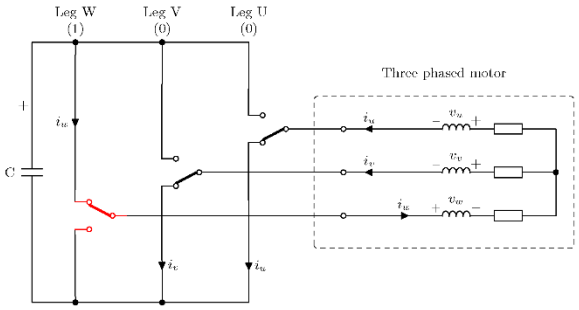


Figura 3.12: Situazione 100

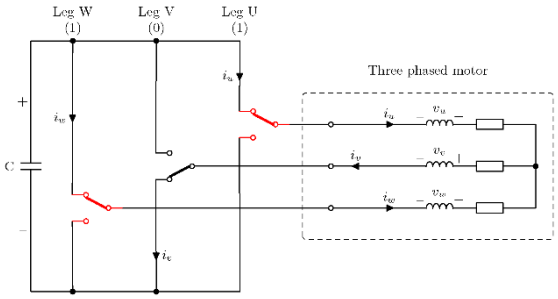


Figura 3.13: Situazione 101

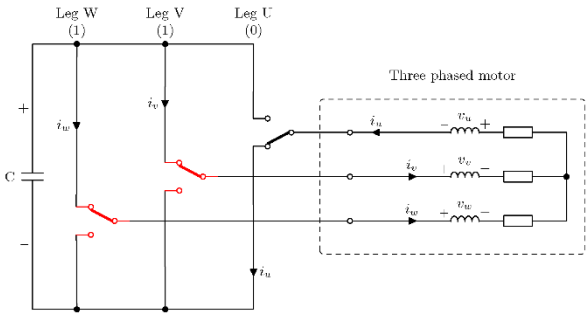


Figura 3.14: Situazione 110

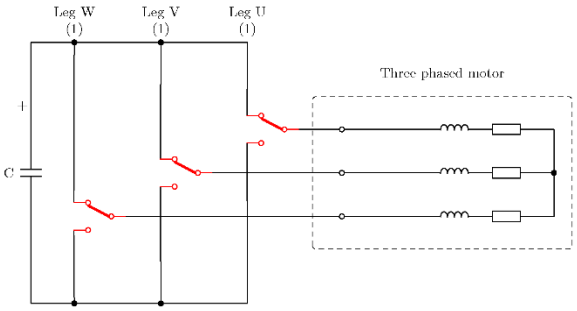


Figura 3.15: Situazione 111

Successivamente è possibile spostarsi da un sistema di riferimento abc ad uno α-β tramite la trasformata di Clarke. Si parte stabilendo che nel sistema bilanciato abc la somma di tre vettori *ua ub uc* è nulla in ogni istante, si può dunque scrivere il vettore complesso che descrive questo comportamento anche nel sistema di riferimento α-β come: [7]

$$\vec{u}(t) = C\left[u_a(t) + u_b(t)e^{j\gamma} + u_c(t)e^{j2\gamma}\right] \qquad (3.39)$$

Che a sua volta può essere riscritta in forma bidimensionale sempre nel nuovo sistema α-β:

$$\vec{v}_{\alpha\beta} = \vec{v}_\alpha + j\vec{v}_\beta = C\left[v_{AB} + v_{BC}e^{j\gamma} + v_{CA}e^{j2\gamma}\right] \qquad (3.40)$$

Dove γ è 120° e C un fattore di normalizzazione. Assumendo C pari a 2/3 si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{AB} \\ v_{BC} \\ v_{AC} \end{bmatrix} \qquad (3.41)$$

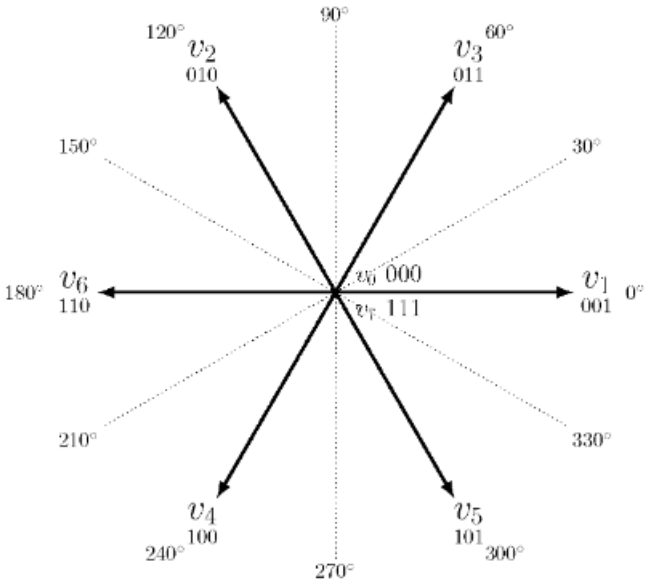


Figura 3.16: Rappresentazione su un esagono dei vari vettori

Vettore	Stato (a b c)	v_a/V_d	v_b/V_d	v_c/V_d	v_α/V_d	v_β/V_d
$\acute{v}_0$	000	0	0	0	0	0
$\acute{v}_1$	100	2/3	−1/3	−1/3	2/3	0
$\acute{v}_2$	110	1/3	1/3	−2/3	1/3	1/√3
$\acute{v}_3$	010	−1/3	2/3	−1/3	−1/3	1/√3
$\acute{v}_4$	011	−2/3	1/3	1/3	−2/3	0
$\acute{v}_5$	001	−1/3	−1/3	2/3	−1/3	−1/√3
$\acute{v}_6$	101	1/3	−2/3	1/3	1/3	−1/√3
$\acute{v}_7$	111	0	0	0	0	0

Tabella 3.1: Stati di commutazione con rispettive tensioni di fase

Dalla Tabella 3.1 si possono verificare tutte le possibili combinazioni degli interruttori, applicando ad ogni vettore la formula precedente (3.40) si ottiene il corrispettivo *space-vector*.

Una volta stabiliti gli *space-vector* attivi per il nuovo sistema di riferimento risulta necessario verificare quale sia l'uscita di questa strategia. [7][14]

Il vettore modulante viene determinato come la risultante di due vettori adiacenti, ha un'ampiezza fissa ed è un vettore rotante e la sua espressione può essere così ricavata:

$$\bar{v}_c = r_1\bar{v}_1 + r_2\bar{v}_2 \qquad (3.42)$$

Dove $\bar{v}_c$ è il vettore modulante, r_1 e r_2 sono i tempi di applicazione dei due vettori $\bar{v}_1$ e $\bar{v}_2$ normalizzati rispetto al periodo di commutazione.

Per garantire che il funzionamento lineare sia rispettato è necessario imporre che $r_1 + r_2 \leq 1$. Questo perché il tempo totale per cui vengono applicati i due vettori non può superare il periodo di commutazione.

Dalla figura 3.16 si denota che il modulo del $\bar{v}_c$ è al massimo pari al raggio della circonferenza inscritta nell'esagono. Il raggio dell'esagono può essere calcolato e dopo una serie di considerazioni si ottiene che:

$$\|\vec{v}_c\| = \hat{V}_{LL,max} = V_d \qquad (3.43)$$

Nel caso della strategia SV-PWM si ottiene un valore di $\hat{V}_{LL,max}$ più alto di un fattore 2/√3 rispetto al S-PWM mentre si ottiene la stessa ampiezza ottenuta con il metodo THI.

In generale il metodo SV-PWM genera, rispetto a quello S-PWM, un'ampiezza maggiore mantenendo basse le distorsioni. [7][10][14]

- V/f FOC e DTC

Nel seguente paragrafo si analizzano le strategie che si possono impiegare per controllare il motore e le principali sono 3:

- Controllo scalare a rapporto V/f costante.
- Controllo vettoriale a orientamento di campo (FOC).
- Controllo diretto di coppia (DTC).

Il controllo scalare a rapporto V/f costante è stato già introdotto precedentemente nel paragrafo 3.2.1. Il principio di questo controllo è il mantenimento del rapporto V/f costante, la frequenza di uscita viene fissata da un riferimento di velocità e, alle basse frequenze, la tensione viene aumentata per compensare la resistenza dello statore. Rispetto agli altri due controlli risulta il più semplice da implementare mantenendo prestazioni dinamiche accettabili.

È quindi una strategia adatta per le applicazioni a potenze medio-basse. Risulta inoltre essere l'unico tipo di controllo a poter lavorare su più motori in parallelo poiché DTC e FOC modellano il flusso della singola macchina.

Il FOC è invece decisamente più complesso dal punto di vista computazionale. Il principio è quello per cui attraverso la trasformata di Park si trasformano le grandezze elettriche in un sistema di riferimento rotante a due coordinate: d e q invariate nel tempo. Tramite la trasformata di Clarke si passa poi da un sistema trifase ad uno stazionario α-β. Successivamente grazie alla trasformata di Park si passa ad un sistema a due assi rotanti d-q (Figura 2.17).

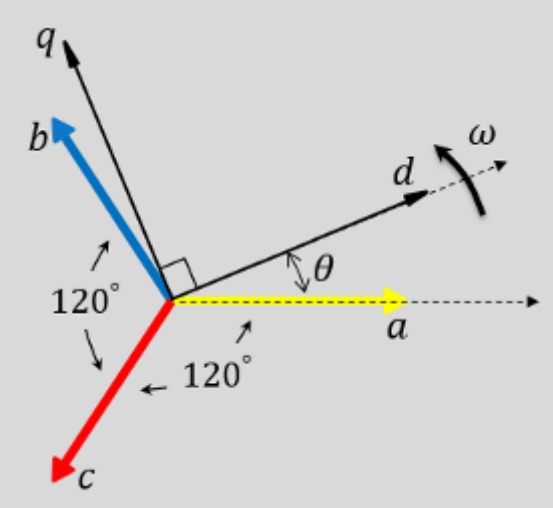


Figura 3.17: Modello basato sugli assi d-q

È importante ricordare che le equazioni dello statore e del rotore sono indipendenti dal sistema di riferimento, per un generico sistema di riferimento si può infatti scrivere:

$$\bar{\imath}_s * \bar{V}_s = R_s \bar{\imath}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\lambda}_s \qquad (3.44)$$

$$\bar{\imath}_r * \bar{0} = R_r \bar{\imath}_r + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega)\bar{\lambda}_r \quad (3.45)$$

Dove la prima riguarda lo statore e la seconda il rotore e $\bar{\lambda}_s$ e $\bar{\lambda}_r$ indicano i flussi rispettivamente statorici e rotorici.

Da queste relazioni è possibile definire la potenza meccanica:

$$P_{mech} = \bar{\imath}_r * j\omega\bar{\lambda}_r \qquad (3.46)$$

Da cui si deriva la coppia:

$$T = \frac{3}{2}P\left(\bar{\imath}_r \Lambda \bar{\lambda}_r\right) \qquad (3.47)$$

La coppia è espressa tramite quantità rotoriche che sono difficili da comandare e misurare. Dunque, è conveniente tornare a quelle statoriche sfruttando due relazioni sui flussi:

$$\begin{cases} \bar{\lambda}_s = L_s\bar{\imath}_s + M\bar{\imath}_r \\ \bar{\lambda}_r = M\bar{\imath}_s + L_r\bar{\imath}_r \end{cases} \qquad (3.48)$$

Dove M è la mutua induttanza e L_s *e* L_r indicano induttanza di statore e rotore. Ricavando $\bar{\imath}_r$ dalla seconda e sostituendo nell'espressione della coppia (3.47) si ottiene:

$$T = \frac{3}{2}PK_r\left(\lambda_{rd}i_{sq} - \lambda_{rq}i_{sd}\right) \quad (3.49)$$

Con K_r pari al rapporto tra la mutua induttanza e l'induttanza del rotore.

In questa equazione tutte le grandezze possono essere facilmente misurate o stimate, in particolare si può sostituire il valore di $\bar{\imath}_r$ ricavato dal sistema (3.48) nell'equazione del rotore ottenendo:

$$\bar{0} = \frac{(\bar{\lambda}_r - M\bar{\imath}_s)}{\tau_r} + \frac{d\bar{\lambda}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega)\bar{\lambda}_r \quad (3.50)$$

Dove τ_r è la costante di tempo del rotore.

A questo punto, tornando alla rappresentazione sul piano d-q si impone che l'asse d coincida con il flusso del rotore. In questo modo la componente λ_{rq} si annulla e si può semplificare ulteriormente la coppia come:

$$T = \frac{3}{2}PK_r\left(\lambda_{rd}i_{sq}\right) \quad (3.51)$$

Nel nuovo sistema di riferimento inoltre va inoltre specificato che ω_k diventa ω_0 ed è pari a:

$$\omega_0 = \frac{d\theta_0}{dt} \qquad (3.52)$$

La nuova equazione del flusso rotorico può essere divisa in due parti:

Una reale, associate all'asse d. Una immaginaria associata all'asse q.

$$\begin{cases} \tau_r\frac{d\lambda_r}{dt} + \lambda_r = Mi_{sd} & relativa\ all'\ asse\ d \\ (\omega_0 - \omega)\lambda_r\tau_r = Mi_{sq} & relativa\ all'asse\ q \end{cases} \qquad (3.53)$$

Applicando la trasformata di Laplace alla prima equazione del 3.53 si ottiene [33]:

$$G(s) = \frac{\lambda_r}{i_{sd}} = \frac{M}{(s\tau_r+1)} \quad (3.54)$$

Ossia che è possibile controllare il flusso del rotore tramite la componente d della corrente di statore. Mantenendo inoltre il flusso al suo valore nominale tramite i_{sd} la coppia può essere controllata in maniera molto rapida tramite i_{sq}.

Dal punto di vista realizzativo quindi, la strategia richiede:

- Regolatori di corrente.
- Le trasformazioni di coordinate tramite Clarke e Park
- Un modulatore PWM/vettoriale.

Va inoltre ricordato che il tutto dipende dall'angolo di flusso: infatti, all'interno del FOC è possibile avere un FOC diretto se la posizione del rotore può essere misurata in ogni istante. In alternativa si sfrutta un modello del motore che tramite le tensioni e le correnti misurate stima la posizione del motore, questo tipo di controllo prende il nome di FOC indiretto. Il modello indiretto, tuttavia, non è adatto alle applicazioni a basse frequenze in quanto le tensioni sono piccole.

- Controllo diretto di coppia (DTC)

È una combinazione di diverse strategie, ma si basa su quella del controllo di campo. A differenza del FOC però non richiede tutte le trasformazioni di coordinate in quanto il sistema di riferimento è quello statorico. Richiede una frequenza di commutazione decisamente più alta rispetto al caso precedente e, di conseguenza, presenta perdite più rilevanti dovute proprio a questa frequenza.

Come per il caso FOC, il DTC confronta la misura della grandezza rilevata con quella di riferimento e, in base alla grandezza dello scostamento, seleziona direttamente lo stato di commutazione dell'inverter in modo tale da mantenere l'errore entro una regione delimitata da delle bande di isteresi.

Nel caso del DTC per monitorare flusso statorico e la coppia viene utilizzato un solo vettore alla volta, invece che i due adiacenti come nel caso precedente. Dunque, la durata di applicazione di ciascun vettore, e la frequenza con cui si varia il vettore utilizzato, variano con la velocità, la cui variazione permette di raggiungere i limiti di isteresi. Ciò permette di ottenere variazioni di coppia estremamente rapide. [3][4]

Il procedimento è simile a quello del FOC, si parte dall'equazione del flusso di statore nel sistema di riferimento dello statore:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{\imath}_s + \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} \qquad (3.55)$$

Viene fatta un'ulteriore semplificazione trascurando il termine resistivo in quanto risulta molto minore della tensione ottenendo:

$$\bar{V}_s = \frac{d\bar{\lambda}_s}{dt} \qquad (3.56)$$

Si può dunque notare che, esplicitando il flusso, esso dipenda unicamente dalla tensione dello statore. Considerando allora solo intervalli di tempo molto ristretti si può riscrivere come:

$$\Delta\lambda = V_s \Delta t \qquad (3.57)$$

La tensione dello statore in questo caso risulta essere uno dei 6 vettori non nulli che erano stati introdotti precedentemente come combinazione degli *switch*. Applicando dunque un vettore alla volta si ottengono 6 variazioni di flusso con ampiezze e fasi diversi tra loro, come mostrato in figura:

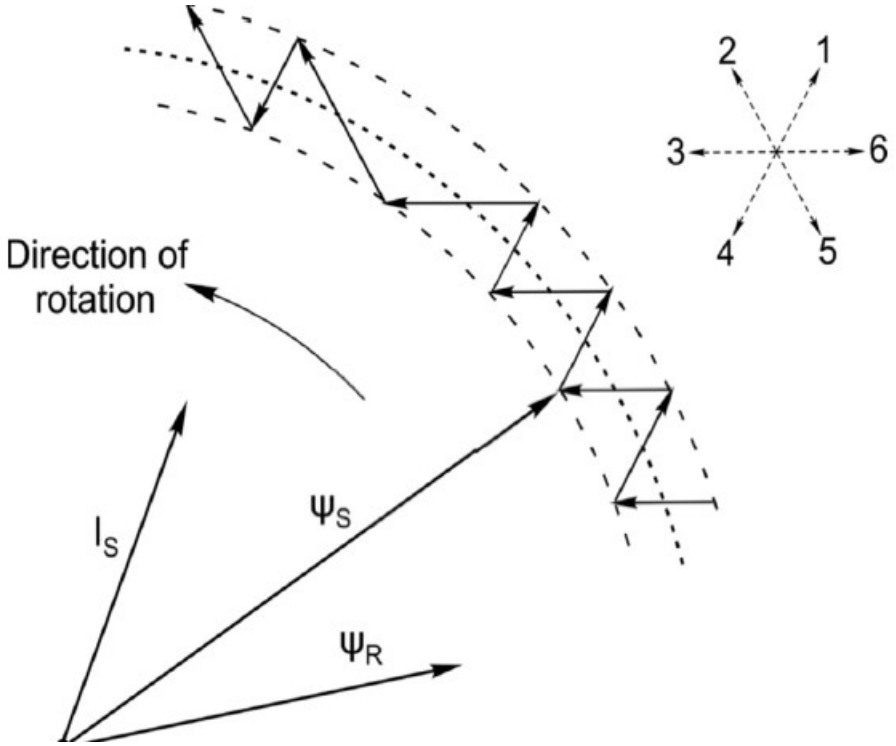


Figura 3.18: rappresentazione della scelta dei vettori con il metodo DTC e rappresentazione della banda di isteresi

Nella figura precedente (Figura 3.18) si possono inoltre notare la banda di isteresi e il fasore del flusso statorico. Idealmente, il fasore ruota con ampiezza tale da raggiungere la circonferenza centrale. Tuttavia, se questo dovesse trovarsi sul limite di isteresi inferiore si verificherebbe uno *switch* e il vettore che permetterebbe il raggiungimento del limite superiore verrebbe scelto, successivamente toccherebbe a quello che riporta dal limite superiore a quello inferiore e così per gli altri. Minore è la banda di isteresi maggiore sarà la commutazione tra i vettori. [2][3][4]

3.3 Riduttore

Il sistema analizzato fino ad ora necessita tuttavia di un componente meccanico che consenta di trasmettere coppia e velocità di rotazione alle viti dell'estrusore. Il riduttore è un elemento meccanico che trasforma potenza in entrata a bassa coppia e alta velocità in potenza in uscita ad alta coppia e bassa velocità di rotazione. È caratterizzato da una grandezza chiamata rapporto di trasmissione, che dipende dal numero di denti delle ruote e fissa la velocità di uscita una volta nota quella di entrata.

3.3.1 Principio di funzionamento

Gli ingranaggi sono il mezzo attraverso il quale la potenza in entrata viene trasferita in uscita. Nella nostra specifica applicazione il riduttore ha un albero di ingresso, uscente dal motore e due di uscita, uno per vite.

Il principio di funzionamento è quello che deriva dalla legge fondamentale dell'ingranamento secondo cui la normale comune ai profili dei denti nel punto di contatto deve passare sempre per uno stesso punto della congiungente i centri delle ruote, detto punto primitivo. Quando questo è rispettato, il valore di velocità si mantiene costante.

Nei riduttori, alla riduzione della velocità corrisponde un aumento della coppia. Nel punto di contatto tra due denti la forza tangenziale che agisce su entrambi è:

$$F_t = \frac{T}{r} \qquad (3.58)$$

Dove T è la coppia e r il raggio, se la ruota di uscita ha raggio maggiore sviluppa una coppia maggiore.

Il riduttore è un componente del sistema che possiede diversi tipi di perdite, queste si possono localizzare negli ingranaggi, nei cuscinetti, nelle guarnizioni, quelle dovute al trascinamento e, infine, quelle dovute allo sbattimento.

La caratteristica fondamentale di un riduttore è il rapporto di riduzione, questo rapporto determina la velocità di uscita avendo nota quella di ingresso, ed è a sua volta determinato dal dimensionamento delle ruote dentate poste al suo interno. [15][16]

3.3.2 Tipologie di riduttore

I riduttori possono essere classificati in base a diverse caratteristiche, la prima è il tipo di ingranaggio impiegato. Le categorie principali sono:

- Riduttori ad assi paralleli a uno, due o tre stadi: le ruote hanno denti dritti e paralleli all'asse mentre il profilo ad evolvente. Il numero di stadi è determinato dal rapporto di trasmissione che si vuole avere.
- Ad assi ortogonali: quando l'asse di uscita deve essere perpendicolare a quello di ingresso, si sfruttano ruote coniche. Queste ruote possono avere denti dritti o elicoidali a seconda della velocità di lavoro.
- Riduttori a vite senza fine o sghembi: quando una vite ingrana con una ruota a denti elicoidali, con assi sghembi. Consentono un rapporto di riduzione estremamente elevato con un solo stadio. Hanno tuttavia un rendimento più basso e una capacità termica inferiore e dunque una limitata potenza trasmissibile.
- Riduttori planetari: composti da quattro elementi, il solare, la corona a dentatura interna, i satelliti e il portatreno. Uno di questi viene fissato e gli altri due vengono usati come ingresso e uscita ottenendo così tre disposizioni. Fra queste, quella con corona fissa e portatreno che ruota nello stesso verso del solare è caratteristica dei riduttori. Solitamente si sceglie la disposizione con tre satelliti in modo tale che, disponendoli simmetricamente, i carichi radiali si bilancino e il carico risulti equi-ripartito. Hanno il vantaggio di avere ingombri decisamente ridotti rispetto agli altri mantenendo un valore di coppia trasmissibile molto elevato. Le ridotte dimensioni, tuttavia, ne riducono la capacità termica. La velocità dei tre elementi coassiali è determinata dalla formula di Willis: [17]

$$\frac{\omega_{sol}-\omega_{pt}}{\omega_{cor}-\omega_{pt}} = -\frac{z_{cor}}{z_{sol}} \qquad (3.59)$$

Dove sol., cor. e pt. indicano solare, corona e portatreno, mentre ω la velocità di rotazione e z il numero di denti.

- Riduttori a gioco ridotto: possiedono ingranaggi con gradi di precisione superiore alla norma, richiedono un elevato grado di rigidità in quanto la velocità di rotazione dell'albero in uscita deve essere proporzionale a quella dell'albero di comando.[15]

3.3.3 Equazioni caratteristiche

Il funzionamento di un riduttore viene descritto da una serie di relazioni che legano geometria delle ruote, cinematica, coppia e potenza tra di loro. Di seguito si analizzano le relazioni principali. [17]

La relazione di base è quella del rapporto di trasmissione, definito come il rapporto tra il numero di denti della ruota e quello del pignone:

$$i = \frac{z_2}{z_1} \qquad (3.60)$$

si può anche definire il rapporto di velocità come rapporto tra la velocità della ruota condotta e quella della ruota conduttrice.

Successivamente entra in gioco la geometria della ruota e del dente, nel caso di una ruota cilindrica le principali relazioni sono:

$$p = \pi \frac{d}{z} \qquad (3.61)$$

Dove p è il passo primitivo, d il diametro primitivo e z il numero di denti.

Definito il passo si può determinare il modulo, pari al rapporto tra il diametro primitivo e il numero di denti e definisce la grandezza dei denti:

$$m = \frac{d}{z} \qquad (3.62)$$

Esplicitando d nell'equazione precedente si trova il diametro primitivo, che identifica il diametro della circonferenza teorica lungo la quale avviene il contatto tra due ruote che ingranano.

Definite queste relazioni si passa poi alla definizione dell'interasse. L'interasse è definito nominale se due ruote sono accoppiate con le circonferenze primitive tangenti tra di loro ed è pari a:

$$C = \frac{1}{2}(d_1 + d_2) = \frac{1}{2}m(z_1 + z_2) \qquad (3.63)$$

L'angolo di pressione è invece pari a:

$$\tan \alpha_t = \frac{\tan \alpha}{\cos \beta} \qquad (3.64)$$

Dove β è l'angolo d'elica primitivo formato dal fianco della dentiera e la normale al piano trasversale.

Dopo aver stabilito le relazioni anche per la geometria delle ruote e dei denti si passa allo studio delle forze. Le forze per una ruota elicoidale si suddividono in tre componenti, una componente assiale, una radiale e una tangenziale. L'unica che trasmette la coppia è quella tangenziale con la relazione che abbiamo espresso in precedenza. La forza assiale e radiale hanno le seguenti espressioni:

$$F_a = F_t \tan \beta \ \ per\ la\ componente\ assiale \qquad (3.65)$$

$$F_r = F_t \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta}\ per\ la\ componente\ radiale \qquad (3.66)$$

Dove α_n è l'angolo di pressione normale.

La risultante è dunque pari a: [17]

$$F = \frac{F_t}{\cos \alpha_n \cos \beta} \qquad (3.67)$$

La coppia nel riduttore invece si calcola moltiplicando il fattore i per il rendimento e la coppia in ingresso: [17]

$$T_{out} = i\eta T_{in} \quad (3.68)$$

Per misurare il rendimento di un riduttore viene effettuata quella che si chiama prova a circuito chiuso. Si posizionano due riduttori uguali in modo che gli alberi a bassa velocità e quelli ad alta velocità siano accoppiati. Si impone una coppia fra gli alberi lenti mentre l'impianto è avviato da una seconda coppia statica agli alberi veloci. La potenza che ne deriva dipende dalla coppia statica applicata alla velocità di rotazione.

È possibile misurare così coppia trasmessa al motore e velocità. In questo modo si deriva la potenza dissipata. Si ottiene dunque un rendimento pari a:

$$\eta = 1 - \frac{P_{loss}}{P} \qquad (3.69)$$

Dove P_{loss} è la somma di tutte le perdite elencate precedentemente:

- Perdite negli ingranaggi.
- Perdite dovute allo sbattimento.
- Perdite nei cuscinetti.
- Perdite nelle guarnizioni.

Esistono altre due verifiche che determinano il dimensionamento geometrico: il rapporto di condotta e la verifica dell'interferenza.

La prima si basa sul fatto che i punti di contatto dei denti di due ruote si trovino sempre lungo una retta di pressione. Il rapporto di condotta viene definito come il rapporto fra la lunghezza di condotta, che è il segmento fra il punto di intersezione della retta di pressione e della circonferenza della ruota conduttrice e il medesimo punto considerando però la ruota condotta, e il passo base.

$$m_c = \frac{Z}{p_b} \qquad (3.70)$$

Dove il passo di base è legato al passo e all'angolo di pressione trasversale.

La seconda verifica riguarda l'interferenza: in fase preliminare si controlla che il numero di denti non scenda sotto un valore limite, calcolabile in funzione del rapporto di trasmissione e dell'angolo di pressione. Quando l'interferenza è presente, viene eliminata aumentando l'interasse oppure correggendo l'addendum delle due ruote. [15][16][17]

3.4 Giunto di sicurezza limitatore di coppia

Successivamente, nella linea di trasmissione, si incontra il giunto di sicurezza. La macchina industriale e i suoi elementi meccanici sono soggetti a carichi dinamici elevati, che incidono negativamente sulla durata e sull'affidabilità dell'intero sistema. In ambito industriale tali carichi sono variabili e caratterizzati da picchi istantanei dunque, per proteggere gli elementi del sistema si inseriscono quindi dei giunti di sicurezza, che hanno il compito di limitare questi picchi e, se necessario, di disaccoppiare il sistema evitando possibili rotture.

Nel caso in esame il giunto di sicurezza agisce come limitatore di coppia, ossia protegge l'apparato meccanico dai picchi di coppia non ammissibili che possono insorgere a seguito di imprevisti o malfunzionamenti.

Agisce come interruttore meccanico che disinnesta il lato motore dal lato trascinato quando viene rilevato un sovraccarico, cioè un picco di coppia che supera un determinata soglia. Superata tale soglia la trasmissione si interrompe, evitando che coppie eccessive raggiungano gli organi a valle. [18]

Esistono diversi tipi di giunti limitatori di coppia, riconducibili tuttavia ad alcune categorie principali. Nei giunti a frizione la coppia è trasmessa per attrito e, superato il valore di soglia preimpostato, l'elemento di trasmissione slitta continuando a trasmettere soltanto la coppia massima desiderata. Nei giunti a innesto di sfere la coppia è trasmessa da sfere alloggiate in apposite sedi e mantenute in posizione da molle, al superamento della soglia le sfere vengono espulse dalle sedi e la trasmissione si disinnesta completamente. Vi sono poi i giunti magnetici, in cui la coppia è trasmessa senza contatto e il giunto slitta al raggiungimento del valore massimo, e infine i limitatori elettromagnetici, nei quali la coppia di disinnesto è regolata per via elettromagnetica tramite la corrente di una bobina.

Nel sistema in esame viene utilizzato un giunto a sfere, detto anche *ball-detent*, che verrà analizzato più in dettaglio in seguito.

La difficoltà principale sta nel fatto che il giunto deve intervenire in modo rapido e a una soglia di coppia ben definita. Un giunto che interviene al di sotto della soglia corretta provoca danni in termini di produzione e di omogeneità del prodotto (una volta disaccoppiato il sistema occorre infatti ripartire dalla procedura di *start-up*, fortemente energivora) mentre un mancato intervento espone il sistema alla rottura dei componenti meccanici. La taratura e la manutenzione di questo componente assumono quindi un ruolo determinante. [19][20]

3.4.1 Giunto ball-detent

Il giunto ad innesto di sfere risulta essere uno tra i più diffusi in ambito industriale. Ciò è dovuto alla relativa semplicità ed al basso costo ma anche poiché risulta essere estremamente affidabile ed efficace (Figura 3.19).

Come già specificato precedentemente questo tipo di giunto, al superamento della soglia preimpostata, rilascia il carico e disinnesta il sistema. La coppia viene trasmessa da una serie di sfere posizionate in delle sedi ricavate tra una piastra motrice e una piastra scorrevole. Le sfere sono tenute in posizione da delle molle.

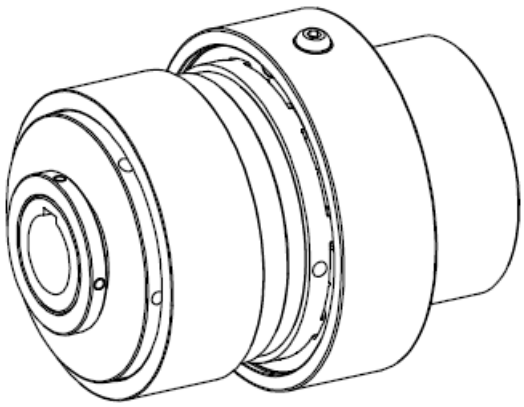


Figura 3.19: Schematizzazione del giunto *ball-detent*

Sono inoltre presenti delle gole a V inclinate, fondamentali per il funzionamento del giunto in quanto la coppia trasmessa genera sulle sfere una forza tangenziale che, per effetto dell'inclinazione della gola, si scompone in una componente assiale contrastata dal precarico della molla. L'angolo di inclinazione della gola governa sia il distacco che il reinnesto.

Questo equilibro si può esprimere quantitativamente grazie alle seguenti formule:

$$F_t = \frac{2M_t}{D} \qquad (3.71)$$

Dove F_t rappresenta la forza tangenziale sulle sfere, M_t invece è la coppia e D il diametro primitivo sul quale si trovano le sfere.

Si può allora andare ad esprimere il valore di precarico delle molle di innesto come:

$$F_s = F_t \left(\frac{(\cos\alpha - \mu\sin\alpha)}{(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)}\right) \qquad (3.72)$$

Dove F_s risulta essere il precarico delle molle, α angolo di inclinazione della gola e μ il coefficiente di attrito tra la sfera e la sua sede.

Note queste, se vengono fissate la geometria delle sfere, l'inclinazione della gola e la condizione di attrito tra sfere e sede, allora è possibile determinare la coppia corrispondente a un dato precarico delle molle.

La taratura, ossia la scelta della coppia soglia, si esegue calibrando la relativa ghiera di regolazione. Il valore di soglia va scelto con attenzione per l'avviamento in quanto in fase di *start-up* è possibile avere picchi di coppia momentanei, è dunque necessario scegliere un valore maggiore di quello di avviamento restando al di sotto di valori pericolosi.

Quando la coppia supera tale valore le sfere vengono espulse dalle sedi e spingono assialmente le piastre, disconnettendo il lato motore da quello trascinato. Il re-innesto può avvenire automaticamente quando la coppia scende sotto un altro valore soglia oppure se viene invertito il senso di rotazione, o manualmente.

Un ulteriore punto a favore risulta essere la precisione, infatti trasmettendo la coppia per accoppiamento di forma e senza gioco, il giunto interviene ad un valore ben definito, con uno scarto dell'ordine del ±5%. [18][19][20]

3.5 Giunto sensorizzato

L'ultimo elemento del sistema in esame è il giunto sensorizzato che, posto sugli alberi in uscita al riduttore misura la coppia trasmessa direttamente alle viti. La conoscenza di questa coppia è fondamentale per il controllo del processo produttivo, inoltre permette di verificare la presenza di eventuali guasti a monte.

La particolarità del caso in esame è la presenza di due alberi di uscita: ciò comporta che il sensore debba essere in grado di misurare indipendentemente le coppie su entrambi gli alberi, raddoppiando i punti di acquisizione. Per misurare tali coppie senza apportare modifiche meccaniche e di progetto agli alberi si è deciso di sfruttare un sensore basato sull'effetto magnetoelastico. Nei paragrafi seguenti si analizzeranno i principi fondamentali di funzionamento di tale sensore, il design e i vantaggi o svantaggi di questa soluzione.

3.5.1 Misura della coppia

Le misurazioni di coppia possono essere suddivise in due diverse famiglie, in base al modo in cui viene determinata la grandezza di riferimento.

Il primo metodo viene chiamato metodo diretto in quanto misura direttamente la variazione di una grandezza che varia in base alla coppia. Il secondo, chiamato indiretto, misura delle grandezze che combinate tra di loro forniscono un valore di coppia.

I trasduttori che vengono utilizzati più frequentemente per questo tipo di misura sono:

- Trasduttori estensimetrici.
- A onde acustiche di superficie
- Magnetostrittivi
- Piezoelettrici
- Ottici
- Induttivi

La soluzione più classica rimane quella estensimetrica sebbene presenti alcuni limiti operativi.

La difficoltà delle misure di coppia dinamiche è dovuta al collegamento tra sensore ed elemento rotante. A seconda del tipo di montaggio si possono ulteriormente classificare.

Un primo metodo di montaggio consiste nel montare il sensore direttamente sull'albero rotante, di modo che il segnale venga trasmesso tramite spazzole, accoppiamento induttivo o trasmettitori radio. Per queste soluzioni è dunque necessario un sistema di telemetria. La seconda architettura consiste invece in un emettitore statico che invia un segnale verso l'albero. Questo segnale viene modulato e rimandato verso un ricevitore. Questo tipo di misura evita di avere un sistema di telemetria ma è particolarmente sensibile alle condizioni ambientali, rumore elettromagnetico e vibrazioni.

A queste due architetture se ne aggiunge una particolare che sfrutta l'effetto magnetostrittivo inverso. L'elemento sensibile non è più un componente che viene montato sul sistema, ma il materiale stesso dell'organo che trasmette la coppia, reso sensibile tramite un'opportuna magnetizzazione.

Questa particolare strategia risulta essere comoda in quanto è possibile evitare di fermare l'albero per inserire il sensore. Potendo dunque evitare il fermo macchina per la misurazione, si è deciso di utilizzarla per sensorizzare il sistema in esame. Per questo motivo nel resto del capitolo si analizzerà in particolare il principio di funzionamento magnetostrittivo inverso. [21][22]

3.5.2 Principio di funzionamento.

Come appena sottolineato l'effetto alla base del sensore è l'effetto magnetostrittivo inverso, noto anche come effetto Villari. Questo fenomeno consiste nella variazione di permeabilità e magnetizzazione di un materiale ferromagnetico quando viene sottoposto a stress meccanici. [22][23]

Il punto di partenza della modellazione di questo tipo di sensori è il legame tra lo stress torsionale dell'albero e la coppia.

Una coppia quando viene applicata ad un albero genera uno sforzo che può essere suddiviso in due componenti principali, queste componenti si trovano a ±45° rispetto all'asse dell'albero. Una componente indica la trazione (quella a + 45°) mentre l'altra la compressione (- 45°).

Si può allora descrivere la coppia con la seguente equazione:

$$T = \frac{2}{d}\sigma J \qquad (3.73)$$

Dove σ è lo sforzo superficiale, J il momento polare di inerzia e d il diametro.

Esplicitando i termini si arriva dunque ad una relazione tra σ e T:

$$\sigma = \frac{16T}{\pi d^3} \qquad (3.74)$$

La proporzionalità diretta tra lo stress e la coppia è immediata, per cui, noto lo sforzo prodotto dalla coppia esterna si risale alla coppia effettivamente applicata.

Anche la permeabilità del materiale viene modificata quando è sottoposto a stress ed è proporzionale allo stress secondo la relazione, derivante dai principi di magnetoelasticità:

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = K_m\sigma \qquad (3.75)$$

Dove $\frac{\Delta\mu}{\mu}$ indica la variazione relativa di permeabilità e K_m è una costante che denota la variazione di permeabilità per unità di sforzo. [24]

La permeabilità magnetica di un materiale magnetostrittivo varia quando viene applicata una coppia: variando la permeabilità varia anche il flusso magnetico. La variazione di campo magnetico viene allora misurata, nota questa variazione del campo magnetico si può risalire allo sforzo impresso sfruttando la tensione in uscita dal sensore.

La relazione tra tensione in uscita e coppia è:

$$V_{out} = a_T T \qquad (3.76)$$

Dove a_T (V/Nm) rappresenta la sensibilità.

Bisogna tuttavia ricordare che tra campo magnetico e sforzo indotto dalla coppia la relazione è non lineare. In modo particolare la permeabilità diminuisce all'aumentare dello sforzo di compressione. Se però il comportamento del materiale è limitato a piccole variazioni attorno ad un punto di lavoro sufficientemente lontano dalla saturazione (come avviene nel nostro caso) allora le interazioni possono essere modellate attraverso relazioni costitutive accoppiate.

3.5.3 Vantaggi e limiti

Il vantaggio principale di una misurazione di questo tipo è dato dall'assenza di contatto fra sensore ed elemento rotante. La costruzione risulta essere relativamente semplice, affidabile e a basso consumo energetico. È bene specificare che per alcune casistiche non risulta necessario trattare il materiale in quanto un'ampia gamma di acciai strutturali possiede buone capacità magnetostrittive; tuttavia, nel nostro caso, i giunti di collegamento tra albero del riduttore e viti dell'estrusore sono stati modificati geometricamente e successivamente trattati e magnetizzati. [21]

I limiti principali invece, sono legati anche loro alla caratteristica *contactless* del sensore. Il traferro che c'è tra il misuratore e l'albero è fonte di incertezza in quanto risulta molto più sensibile a disturbi esterni quali vibrazioni, interferenze elettromagnetiche o anche variazioni ambientali. La distanza e l'ampiezza del traferro deve quindi essere mantenuta piccola. Inoltre, come già esplicitato, la relazione non è lineare ma dipendente dal punto di lavoro e dall'ampiezza delle variazioni di permeabilità. [25]

4. Materiali e metodi

Il presente capitolo ha l'obiettivo di illustrare le scelte e le decisioni prese durante la campagna di misurazioni condotta sull'azionamento in esame, descrivendone la struttura generale, l'hardware utilizzato per le rilevazioni, i punti di misura e l'architettura di acquisizione ed elaborazione dei dati raccolti. In particolare, si illustrerà la scelta del giunto sensorizzato e il suo montaggio, oltre ai codici sviluppati per permettere il recupero e l'elaborazione dei dati da remoto.

Infine, si sposterà l'attenzione sulla scelta delle prove effettuate, con particolare attenzione alle condizioni operative in cui sono state condotte le misurazioni per garantire una similitudine con casi reali.

4.1 Obiettivi e impostazioni della campagna sperimentale.

L'obiettivo principale della campagna di misurazione è verificare le performance del drive in esame, costituito dagli elementi descritti nel capitolo precedente, per analizzare con maggiore precisione la scelta del motore e valutare la possibilità di un *downsizing* o, al contrario, la necessità di uno *scale-up*.

Per rispondere a tale obiettivo vengono svolte diverse analisi che possono essere suddivise in questa maniera:

- Tracciamento degli andamenti di coppia e potenza assorbite in funzione della velocità e della portata, sia in regime stazionario che durante le fasi transitorie.
- Valutazione dei parametri di condizionamento come termine per il confronto con eventuali modelli numerici.
- Valutazione del fattore di carico in coppia e in potenza per verificare il corretto dimensionamento.

I dati ricavati provengono da due livelli differenti, il primo è costituito dall'acquisizione ad elevata frequenza per un tempo limitato dei valori di coppia sugli alberi in uscita al riduttore, resa possibile dall'impiego del giunto sensorizzato realizzato appositamente. Il secondo livello è costituito da un insieme di dati di processo del sistema che coprono la durata di un ciclo di lavorazione, da accensione a spegnimento, ma ad una frequenza di campionamento decisamente inferiore.

Questi dati sono archiviati e resi disponibili tramite un protocollo OPC UA.

Occorre ricordare inoltre che le misurazioni sono state effettuate su un impianto industriale in funzione e non su un banco prova. Tale circostanza impone dei vincoli non trascurabili: l'impossibilità di arrestare la produzione a piacere, la limitata libertà di scelta dei punti di lavoro e della durata delle fasi transitorie.

4.2 Descrizione dell'impianto e dei materiali utilizzati

L'impianto sul quale è montato l'azionamento in analisi è quello mostrato in figura:



Figura 4.1: Impianto utilizzato per svolgere le misurazioni.

Come già specificato nei capitoli precedenti è composto dalla parte motrice e dalla parte di processo. La parte di processo è composta a sua volta da diverse sezioni: la principale è quella del cilindro termoregolato suddiviso, a sua volta, in diverse sezioni e contenente le due viti necessarie per la lavorazione del polimero. Le viti sono a loro volta suddivise in diverse parti caratterizzate da un profilo differente e funzionale.

Completano la parte di processo:

- Una parte di dosaggio che ha lo scopo di dosare il materiale all'interno del cilindro.
- Un sistema di degasaggio che estrae, tramite una pompa a vuoto, i gas emanati durante la fusione per facilitare l'omogeneizzazione del prodotto ed evitare imperfezioni.
- Una sezione di raffreddamento tramite vasca termoregolata.
- Sono presenti anche dei dosatori laterali che servono per la l'inserimento di materiali aggiuntivi durante la lavorazione. Nel caso in esame non vengono utilizzati in quanto si lavora un unico materiale (Polipropilene).

Nei capitoli precedenti era stato anticipato che il materiale scelto fosse uno solo per l'insieme delle prove. Tale scelta dipende dalla volontà di confrontare le diverse condizioni cui è sottoposto l'azionamento indipendentemente dalle variazioni dovute al comportamento di materiali differenti. Si nota che i valori di coppia ottenuti al giunto sensorizzato non sono proprietà intrinseche del motore ma dipendono dalle caratteristiche del prodotto lavorato. È dunque possibile interpretare il materiale come un "freno" applicato al motore.

Nel nostro caso viene utilizzato il Polipropilene, un polimero termoplastico di largo impiego, con bassa densità, buona resistenza chimica, buona resistenza termica ed elevata riciclabilità. Le caratteristiche principali vengono illustrate di seguito:

PROPRIETÀ MECCANICHE	UNITÀ DI MISURA	METODO	PP
Peso specifico	g/cm3	ISO 1183	0,91
Tensione di snervamento	MPa	DIN EN ISO 527	32
Allungamento a rottura	%	DIN EN ISO 527	70
Allungamento a snervamento	%	DIN EN ISO 527	8
Modulo di elasticità	MPa	DIN EN ISO 527	1400
Durezza SHORE D		ISO 868	70
Resistenza all'urto	KJ/m2	DIN EN ISO 179	NR
Resilienza	KJ/m2	DIN EN ISO 179	7

PROPRIETÀ TERMICHE	UNITÀ DI MISURA	METODO	PP
Punto di fusione	°C		164
Temperatura di esercizio	°C		0 / + 100
Coefficente di dilatazione lineare	K^{-1}	DIN 53752	$1,6 \times 10^{-4}$
Conducibilità termica	W/m•K	DIN 52612	0,22
Comportamento alla combustione		UL 94	HB

PROPRIETÀ ELETTRICHE	UNITÀ DI MISURA	METODO	PP
Rigidità dielettrica	KV/mm	IEC 243-1	52
Resistenza superficiale	Ohm	DIN IEC 167	10^{14}

Figura 4.2: proprietà fisico-chimiche del Polipropilene

4.3 Catena di azionamento

La catena di azionamento è costituita, come già specificato in precedenza, da Inverter, motore, giunto di accoppiamento limitatore di coppia, riduttore e giunto sensorizzato posizionato sugli alberi in uscita del riduttore.

Nei paragrafi successivi vengono sintetizzate le caratteristiche principali degli strumenti utilizzati durante le prove, non si ripetono i principi di funzionamento in quanto sono stati già esposti nei capitoli precedenti.

4.3.1 Inverter SINAMIC G120

I principi di funzionamento del convertitore sono stati illustrati nel capitolo precedente, di seguito andremo ad analizzare più precisamente il convertitore in uso.

Il motore viene regolato da un convertitore Siemens SINAMIC G120 modello 6SL3210-1PE32-5AL0 trifase alimentato a 400V e 50Hz, dimensionato per 450 A con una caduta di tensione di circa il 2% su 400V. [26]

Il convertitore opera in *open-loop*, non essendoci trasduttori di posizione sull'albero motore, le grandezze di velocità e coppia sono quindi ricavate a partire dal modello del motore. La strategia di controllo è quella V/f. Si ricorda che il controllo V/f implica il mantenimento del rapporto tensione-frequenza costante. La frequenza viene fissata da un riferimento di velocità. Si rimanda al capitolo 3 per i principi di funzionamento e le leggi che lo caratterizzano.

4.3.2 Motore OEMER LQ 180L

Il componente successivo è il motore. Si tratta di un motore OEMER LQ 180L, asincrono, trifase a gabbia con 4 poli, raffreddato a liquido mediante camicia percorsa da acqua a circa 15° C. La scelta del raffreddamento a liquido deriva dal minore ingombro assiale e garantisce una migliore dissipazione di calore durante i cicli produttivi lunghi. I dati di targa del motore vengono riassunti in tabella 4.1: [27]

Grandezza	Simbolo	Valore	Grandezza	Simbolo	Valore
Potenza Nominale	P_n	132 kW	Coppia di Picco	M_{pk}	1700 Nm
Tensione Nominale	V_n	400 V	Velocità Massima	n_{max}	4300 rpm
Corrente Nominale	I_n	237 A	Numero di Poli	p	4
Corrente a Vuoto	I_0	78,8 A	Fattore di potenza	$\cos\phi$	0,85
Frequenza Nominale	f_n	50 Hz	Rendimento Nominale	η	95%
Velocità Nominale	n	1500 rpm	Resistenza fase-fase	R	0,0349 W

Tabella 4.1: Caratteristiche elettriche del motore

4.3.3 Giunto di sicurezza Autoguard F406

L'elemento successivo è il giunto limitatore di coppia tra il motore e l'albero in ingresso al riduttore. Si tratta di un giunto rigido AUTOGUARD F406W/4 di tipo "*ball-detent*" tarato a 840 Nm con una velocità massima di 2000 rpm. [18]



Figura 4.3: Giunto di sicurezza

4.3.4 Riduttore Zambello

Il penultimo elemento della catena è il riduttore, si tratta di uno Zambello TST 44.6/55 COR con un rapporto di riduzione pari a 2.5. Questo riduttore ha la particolarità di avere un albero in ingresso e due in uscita. Ha inoltre una densità di coppia che oscilla tra i 13 $e16$ Nm/cm^3, un momento torcente massimo di 1185 Nm per albero in uscita con un rendimento del 95%.

Si ricordi inoltre che la coppia massima riferita all'albero lento, quello in output, è pari a:

$$Mt_2 = \frac{9550 \cdot P_{max1}}{n_2} \cdot \eta \qquad (4.1)$$

Dove P_{max1} indica la potenza massima all'albero veloce, di input, e n_2 la velocità dell'albero lento.

Nota la coppia all'albero lento si può calcolare la densità di coppia come:

$$a = \frac{Mt_2}{I^3} \qquad (4.2)$$

Dove I è l'interasse tra i due alberi in uscita che nel nostro caso risulta essere 44,6 mm. [28]

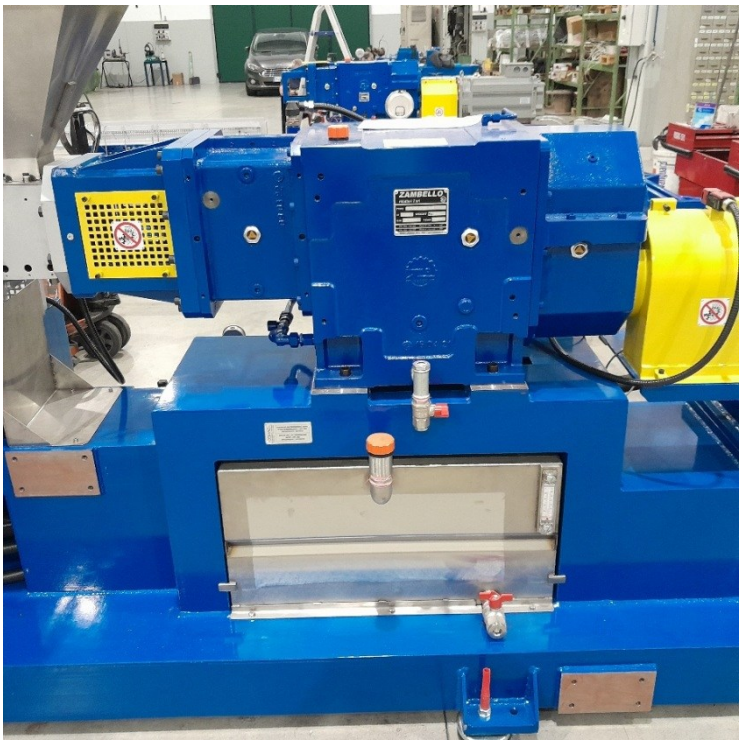


Figura 4.4: Riduttore Zambello TST

4.3.5 Giunto sensorizzato Melectric

L'elemento che chiude la catena di azionamento, posizionato tra gli alberi in uscita del riduttore e le viti, è il giunto magnetostrittivo. Nel caso in esame viene utilizzato un sensore della casa Melectric Systems della gamma Trq le cui caratteristiche vengono riportate di seguito:

- Range di Misurazione: ±1350 Nm
- Range di Calibrazione: ±1350 Nm
- Frequenza di Campionamento: fino a 100 kHz
- *Load direction*: cw&ccw
- Segnale analogico in Output: 0-10 V
- Output a 0Nm: 5 V
- Temperature di funzionamento: 0-125 °C
- Frequenza di cutoff: fino a 1 kHz
- Resistenza in output: 60-80 Ohm
- Protezione: IP56

La calibrazione del giunto è eseguita a monte dal produttore. [21]

Il sistema è composto da due elementi principali: un sensore fisso (Figura 4.6) e due giunti rotanti (Figura 4.5). I due giunti fanno da collegamento meccanico tra alberi del riduttore e le viti, trasmettendo dunque l'intera coppia. Su entrambi i giunti è stato applicato un trattamento di magnetizzazione per permettere la misura indipendente su entrambi gli alberi.

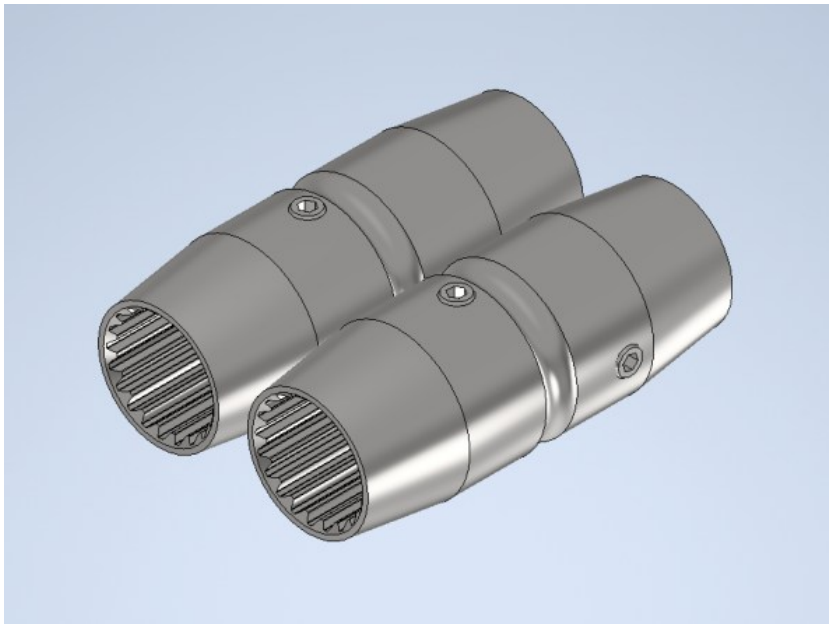
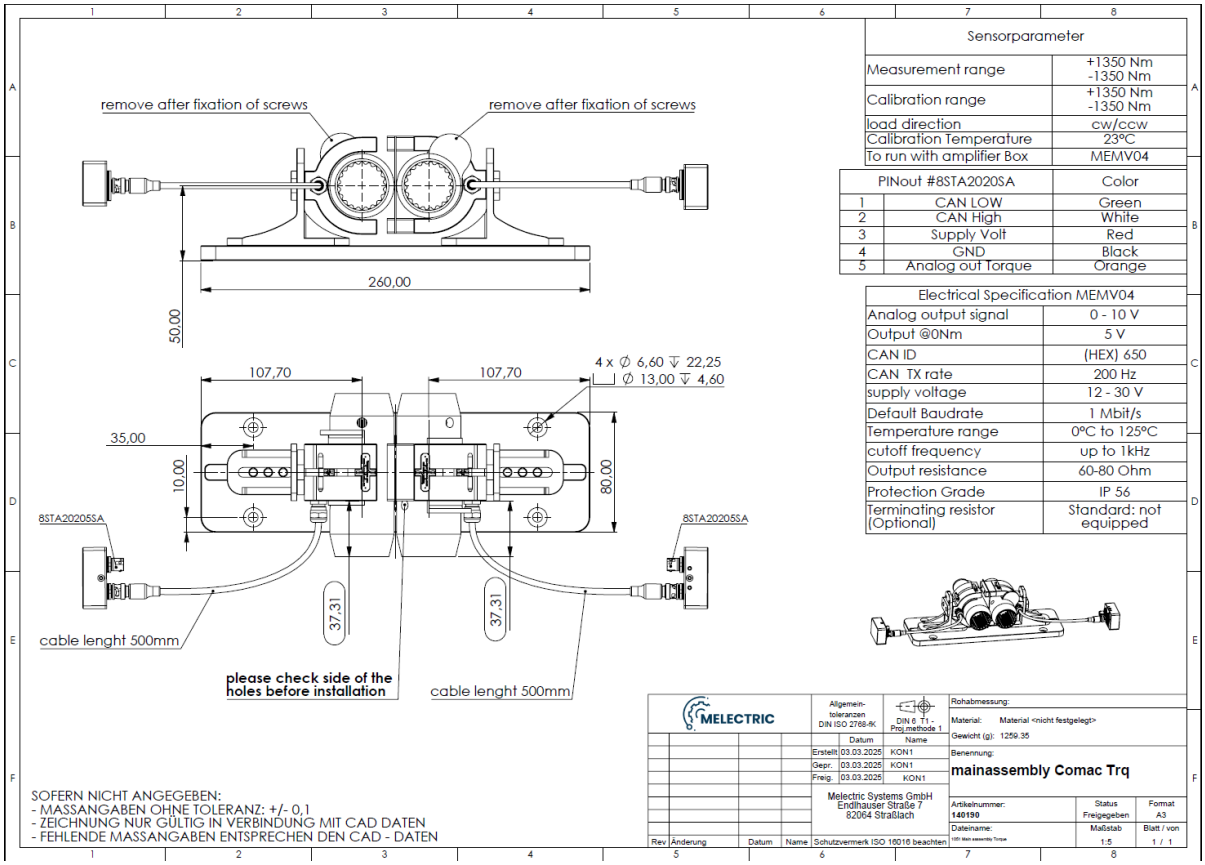


Figura 4.5: Giunto di accoppiamento riduttore-vite



Sensorparameter	
Measurement range	+1350 Nm -1350 Nm
Calibration range	+1350 Nm -1350 Nm
load direction	cw/ccw
Calibration Temperature	23°C
To run with amplifier Box	MEMV04

PINout #8STA2020SA		Color
1	CAN LOW	Green
2	CAN High	White
3	Supply Volt	Red
4	GND	Black
5	Analog out Torque	Orange

Electrical Specification MEMV04	
Analog output signal	0 - 10 V
Output @0Nm	5 V
CAN ID	(HEX) 650
CAN TX rate	200 Hz
supply voltage	12 - 30 V
Default Baudrate	1 Mbit/s
Temperature range	0°C to 125°C
cutoff frequency	up to 1kHz
Output resistance	60-80 Ohm
Protection Grade	IP 56
Terminating resistor (Optional)	Standard: not equipped

Figura 4.6: Disegno tecnico del sensore con alcune delle caratteristiche elettriche

Il punto critico di questo componente è il montaggio, l'accuratezza della misura dipende in gran parte dalla precisione del montaggio e del posizionamento del sensore rispetto ai giunti. Dal disegno tecnico si può dedurre che il sensore può traslare lateralmente. Questa scelta è stata presa per facilitare il montaggio ma rende il corretto posizionamento difficile. Infatti, il traferro tra giunto e sensore influisce sulla grandezza rilevata e se non fosse uguale tra i due giunti si avrebbe una differenza sistematica tra le due coppie. Per contenere questa differenza, che sarebbe molto difficile da individuare, si è cercato di avvicinare il più possibile tra di loro i due componenti. Il sistema è stato infine fissato all'interno della lanterna su 4 piedini, come mostrato in figura (Figura 4.7), in modo tale da garantire la rigidezza del vincolo ed evitare che vibrazioni o movimenti in esercizio possano far variare il traferro. [21]

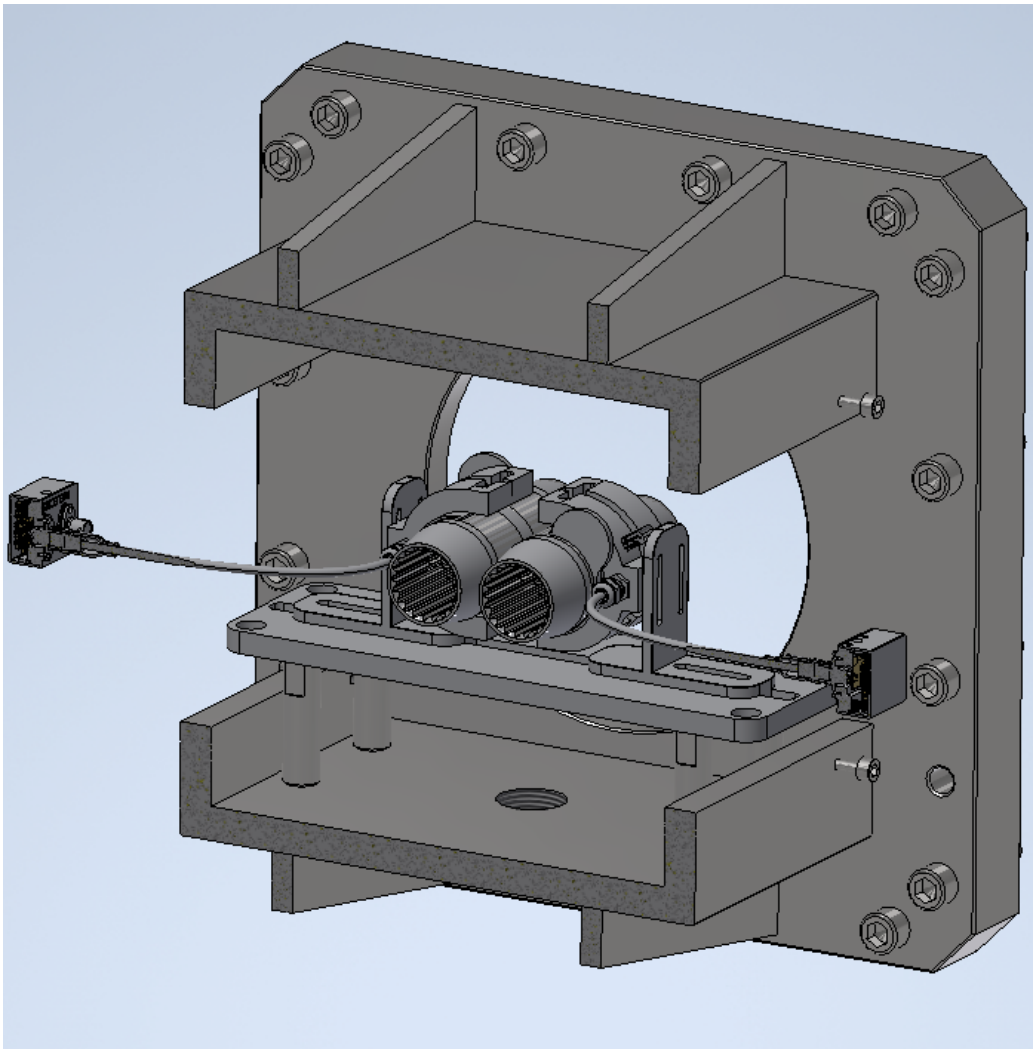


Figura 4.7: Schema di montaggio 3D del sensore e dei giunti all'interno della lanterna

4.4 Elaborazione dei dati

Dopo aver presentato più nel dettaglio le caratteristiche dei vari elementi che compongono l'azionamento è necessario soffermarsi sulla modalità utilizzate per la raccolta e l'elaborazione dei dati. Come introdotto precedentemente sono disponibili due tipi di dati che tra di loro differiscono in maniera evidente per durata e frequenza di campionamento, risulta quindi necessario elaborarli in modo tale da renderli coerenti e confrontabili tra di loro.

4.4.1 Raccolta dati

Il primo tipo di dato disponibile è estratto dal server OPC UA che, per tutta la durata di funzionamento della macchina, richiama e salva tutti i dati possibili con frequenze di campionamento basse. Queste informazioni comprendono tutti i dati trasmessi dalla macchina, a partire dai dati di corrente e pressione fino ai dati relativi alla termoregolazione del cilindro e del circuito di raffreddamento. Per ricavare questi dati e renderli leggibili è stato necessario sviluppare un programma in Python, riportato nell'appendice A. Il programma si connette automaticamente al controllore della macchina e una volta ricavate le credenziali fornite dall'utente esegue un'esplorazione ricorsiva del server. Durante la fase di esplorazione vengono esclusi automaticamente i dati relativi alle diagnostiche del server concentrandosi unicamente su variabili appartenenti al *namespace* del PLC. Ad ogni iterazione, dunque, il programma interroga tutte le variabili che ha selezionato precedentemente e ne scrive i valori su un file *.csv* salvato localmente per evitare perdite di dati dovute a interruzioni della macchina.

Il secondo tipo di dati invece corrisponde ai dati rilevati dal giunto sensorizzato che hanno una durata di registrazione limitata a 240 s, una frequenza di campionamento pari a 100 Hz e una finestra di 24.000 campioni. Il giunto misura unicamente la coppia fornita dal riduttore alle viti distinguendo tra albero destro e sinistro.

Le operazioni preliminari che sono state applicate sui dati sono:

- Pulizia e rimozione dei dati illeggibili, privi di valore ingegneristico, che sono duplicati a causa della struttura del server o delle variabili non utilizzate.
- Identificazione dei periodi di effettivo funzionamento della macchina imponendo una velocità minima delle viti pari a 10 rpm.
- Allineamento sfruttando le indicazioni temporali dei log ottenuti dal server con quelli provenienti dal giunto.

4.4.2 Taratura dei dati a campionamento veloce

Il giunto sensorizzato fornisce in uscita un valore analogico proporzionale alla coppia trasmessa per entrambi gli alberi. Il fondo scala reale del giunto è pari a ±1350 Nm. Il segnale quando viene acquisito e memorizzato restituisce un valore intero nella scala 0-27.648. Questo valore viene quindi elaborato e tarato nel seguente modo:

per prima cosa si calcola la costante k:

$$k = \frac{27648}{2700} = 10{,}24\ conteggii/Nm \qquad (4.3)$$

Dove il numeratore è il fondo scala analogico del sistema e 2700 è il range misurabile dal giunto. Si ottengono dunque 10,24 conteggi per Nm.

Fatto ciò, si può andare a stabilire lo zero del sistema che coincide alla metà del fondo scala:

$$C_0 = \frac{27648}{2} = 13824 \qquad (4.4)$$

e infine trovare la relazione che riporta in un valore leggibile la coppia agli alberi:

$$M_{new} = \frac{C_0 - M}{K} \qquad (4.5)$$

dove M è il valore ottenuto inizialmente.

È inoltre possibile determinare la sensibilità del sistema poiché nelle caratteristiche del giunto viene segnalato che l'output analogico rimane compreso fra 0 e 10 V e con un valore di 5 V a 0 Nm, ossia alla metà. Questo significa che i 10 V totali sono ripartiti su tutto il range di misurazione, da -1350 Nm a +1350 Nm e dunque la sensibilità è data dal rapporto fra il segnale analogico e il range di misurazione:

$$S = \frac{10\ V}{2700\ Nm} = 3{,}7\ {}^{mV}/_{Nm} \qquad (4.6)$$

Durante le prove, per verificare ulteriormente lo zero effettivo, sono stati confrontati i dati del giunto con quelli della macchina per verificare i valori riportati dal giunto in condizioni di fermo macchina. Nella figura di seguito (Figura 4.8) si possono osservare le curve del giunto destro e di quello sinistro di una delle prove effettuate.

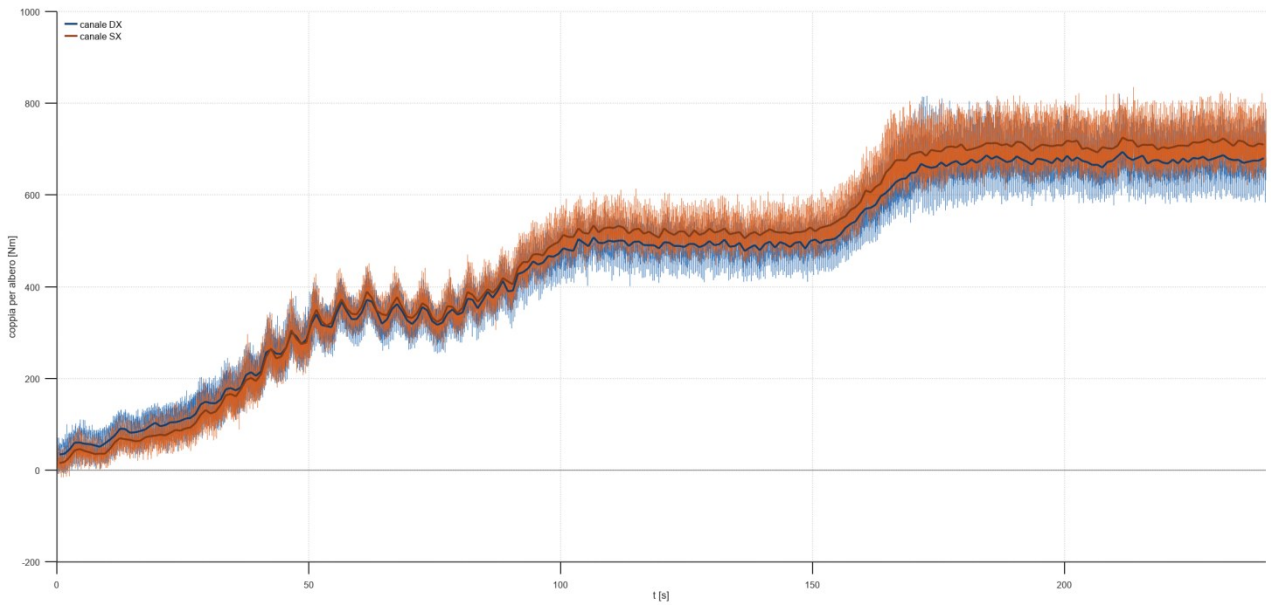


Figura 4.8: Andamento delle curve del giunto destro e sinistro nel caso di una prova a portata crescente e velocità costante

4.4.3 Sincronizzazione delle misure

Per determinare i punti di lavoro, dato che il giunto fornisce unicamente il valore della coppia, risulta necessario allineare i dati ad alta frequenza con quelli che si ottengono dal server, caratterizzati da una bassa frequenza. Per fare questo allineamento, avendo unicamente un riferimento temporale non preciso del giunto, è necessario procedere con attenzione.

In primo luogo, si nota che, pur con frequenze di campionamento e accuratezza bassa, anche i log del server tengono traccia della coppia. Dunque, riportando i valori in alta frequenza in una frequenza adatta a quella del server risulta possibile fare un confronto. Il giunto sensorizzato ha una finestra di registrazione di 240 s con un campionamento a 100 Hz, ovvero 100 misure al secondo, calcolando la media su 100 misure ottengo un campionamento a 1 s e di conseguenza 240 valori. Si preferisce la media dei valori piuttosto di uno singolo, poiché agisce da filtro passa-basso attenuando le componenti oscillatorie legate alla rotazione degli alberi. Si ottiene dunque una serie di valori che descrive il livello medio di coppia in ciascun secondo. [32]

Nella figura di seguito (Figura 4.9) si può notare come i valori ottenuti dal server OPC UA rientrino per la quasi totalità nell'inviluppo delle misurazioni effettuate con i giunti, ed inoltre venga segnalato l'orario di inizio della prova ad alta frequenza.

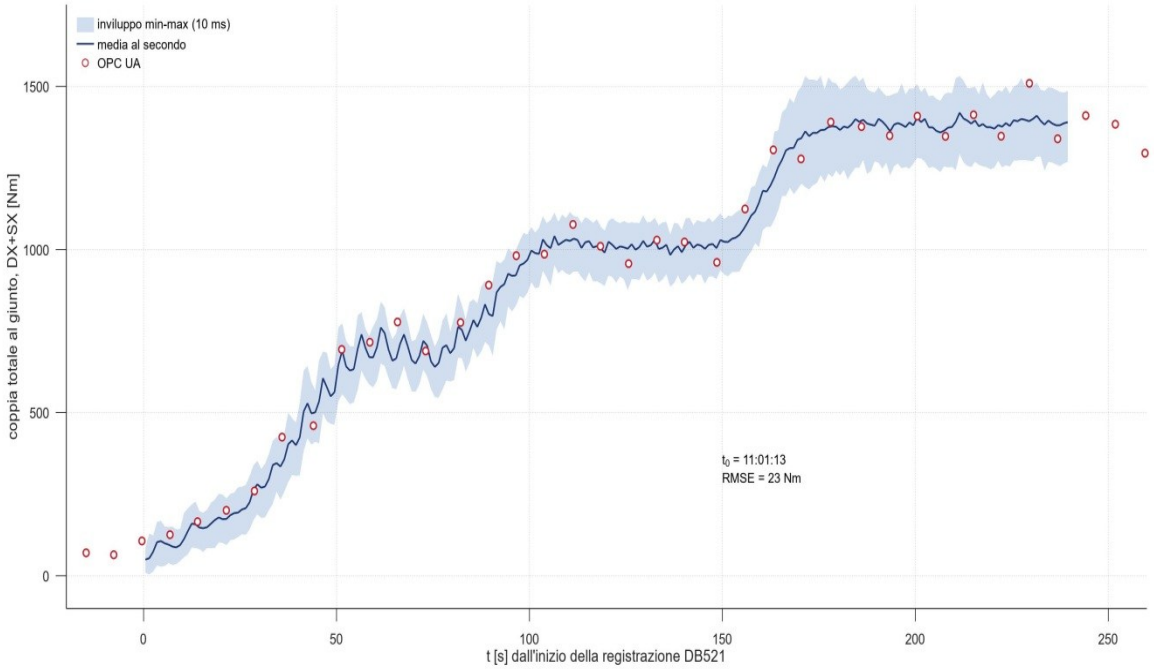


Figura 4.9: Confronto tra i dati ottenuti dal giunto sensorizzato e quelli ottenuti dal server

Oltre al tempo di inizio è inoltre possibile individuare la radice dell'errore quadratico medio (RMSE, *Root Mean Square Error*) pari a 23 Nm. Questo valore valuta l'allineamento fra due catene, quella dei valori ad alta frequenza e quelli a bassa frequenza, analizzando lo scarto quadratico medio fra le due. Risulta essere la "distanza" tipica fra due misure. In questo caso viene preso unicamente il giunto destro che rende l'analisi più esigente in quanto non viene compensato dai valori del giunto sinistro.

4.4.4 Stima della coppia con la corrente

Come già detto precedentemente il giunto sensorizzato ha una durata di campionamento pari a 240 s, la corrente del motore è invece letta continuamente sull'intero periodo di funzionamento dell'estrusore. Per la determinazione dei punti di funzionamento si può procedere effettuando una stima della coppia in funzione della corrente.

In un sistema di riferimento solidale al flusso, la corrente può essere scomposta in due componenti: una allineata al flusso e una in quadratura. Essendo le due componenti ortogonali tra di loro si può scrivere che:

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2 \qquad (4.7)$$

ammettendo inoltre che il flusso rimanga costante si può scrivere che:

$$I_q = \sqrt{(I^2 - I_0^2)} \qquad (4.8)$$

dove I_0 è la corrente assorbita a vuoto.

Si può dunque scrivere che la coppia trasmessa è pari a:

$$M = k \cdot \sqrt{(I^2 - I_0^2)} \qquad (4.9)$$

dove k è una costante riferita al riduttore.

I parametri k e I_0 sono stati identificati sperimentalmente poiché le prove sono state effettuate quasi interamente a valori molto lontani da quelli nominali. Per l'identificazione di k si può procedere attraverso due strade in quanto sono disponibili sia i dati riguardanti la coppia del log del server sia quelli campionati ad alta frequenza. Entrambe le soluzioni sono accettabili con delle accortezze: per quanto riguarda i dati ricavati dal server questi sono campionati a bassa frequenza e dunque poco accurati, al contrario i dati del giunto sono molto precisi e campionati con frequenza elevata ma con una durata estremamente limitata rispetto a quelli del server. Nel nostro caso si è scelto di utilizzare i dati ad elevata frequenza di campionamento.

Si ottengono dunque dei valori di k = 8,44 Nm/A e I_0= 64,9 A.

Il valore di k ottenuto con i soli valori di targa è pari a kt=9,40 Nm/A.

È possibile stabilire un rapporto tra il k misurato e quello teorico:

$$\frac{k}{kt} = 0{,}897 \qquad (4.10)$$

Il valore ottenuto sperimentalmente viene utilizzato solamente per ricostruire l'andamento medio della coppia e della potenza dei punti di funzionamento.

Si ricorda che, tuttavia, le ipotesi di flusso costante e di corrente a vuoto costante rimangono semplificazioni, sebbene siano valide in regimi di velocità in cui si opera, ossia inferiori a quelli di velocità nominale. Inoltre, i valori di k e I_0 sono da intendersi come parametri empirici e non come quelli di targa.

Di seguito (Figura 4.10) viene riportato il grafico che rappresenta le curve coppia-corrente prima con i parametri calcolati e poi con i parametri da targa.

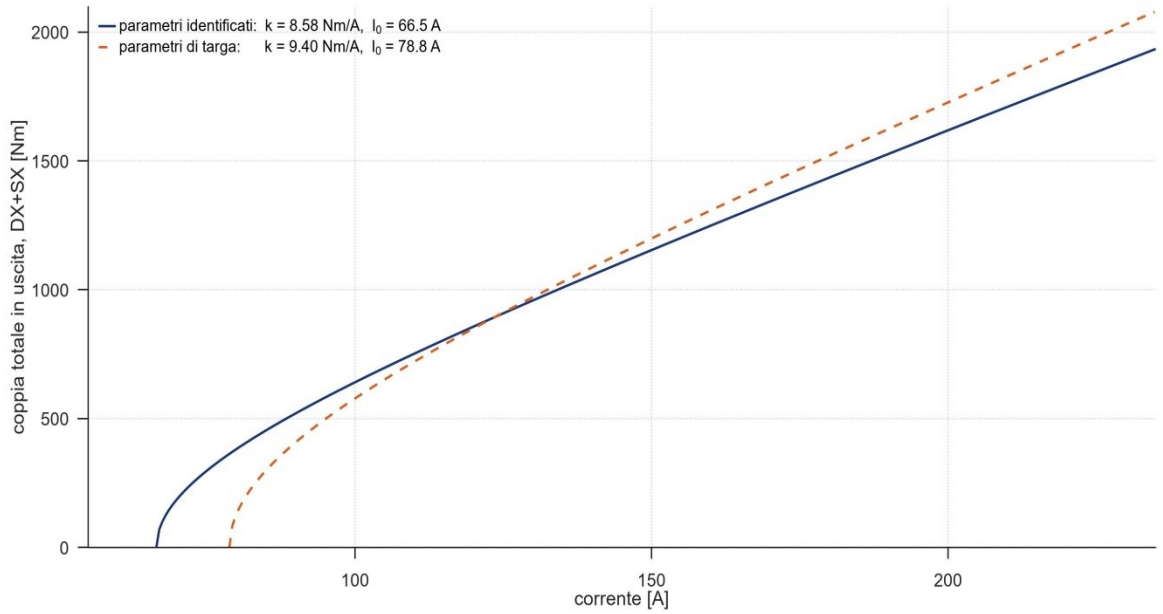


Figura 4.10: Confronto tra la curva coppia-corrente con i valori di targa, in tratteggio, e quella con i valori ricavati.

4.5 Curve di funzionamento.

Prima di procedere con l'identificazione effettiva dei punti e delle curve di funzionamento è importante riassumere l'ordine delle prove.

Le prove si sono svolte su un periodo di tempo di circa 2 mesi, tra Aprile e Giugno 2026. Inizialmente è stata stabilita una *baseline* facendo funzionare la macchina nella sua configurazione standard per verificarne il corretto funzionamento, senza l'impiego del giunto sensorizzato. Successivamente il giunto è stato inserito nel sistema e le prove sono state suddivise in diverse sezioni caratterizzate da specifici cicli operativi per permettere l'ottimizzazione di tempi e dei materiali ampliando il dominio di misurazione.

La scelta dei cicli di funzionamento deriva dall'analisi delle reali condizioni di lavoro riscontrate durante i cicli di produzione industriale. I tre cicli scelti consentono di mappare in maniera esaustiva il range di funzionamento della macchina:

- Gradino a vuoto: partendo da macchina ferma si procede ad una messa in moto in assenza di materiale. La velocità viene aumentata a gradini da 0 a 200 rpm con incrementi di 50 rpm alla volta. Tra un gradino e l'altro sono stati lasciati alcuni istanti di assestamento.
- Aumento della velocità con una portata costante: con macchina già in moto si impone un aumento della velocità di rotazione mantenendo una portata di materiale in ingresso costante.
- Aumento della portata mantenendo la velocità costante: al contrario si aumenta la portata di materiale in ingresso mantenendo costante la velocità di rotazione. In questo modo si verifica la risposta dell'azionamento ad un aumento del freno imposto dal materiale.

Con il giunto sensorizzato sono state effettuate due prove suddivise nel modo sopra indicato. Per analizzare un range più ampio i parametri sono stati incrementati tra una prova e l'altra.

La prova 1, moderata, è stata così impostata:

- Gradino di velocità a vuoto partendo da macchina ferma incrementando di 50 rpm alla volta fino a 200 rpm.
- Aumento della velocità mantenendo la portata costante: si passa da 100 a 300 rpm mantenendo la portata costante a 200kg/h.
- Aumento della portata mantenendo la velocità costante: rimanendo a 200rpm si passa da 50 a 250kg/h.

La prova 2:

- Gradino di velocità a vuoto: transizione a gradino tra i 200 e i 400 rpm a vuoto.
- Aumento della velocità mantenendo la portata costante: si passa da 300 a 500 rpm mantenendo la portata costante a 200kg/h.
- Aumento della portata mantenendo la velocità costante, rimanendo a 300rpm si passa da 100 a 300kg/h.

Di seguito vengono riportate le curve di funzionamento per le due prove:

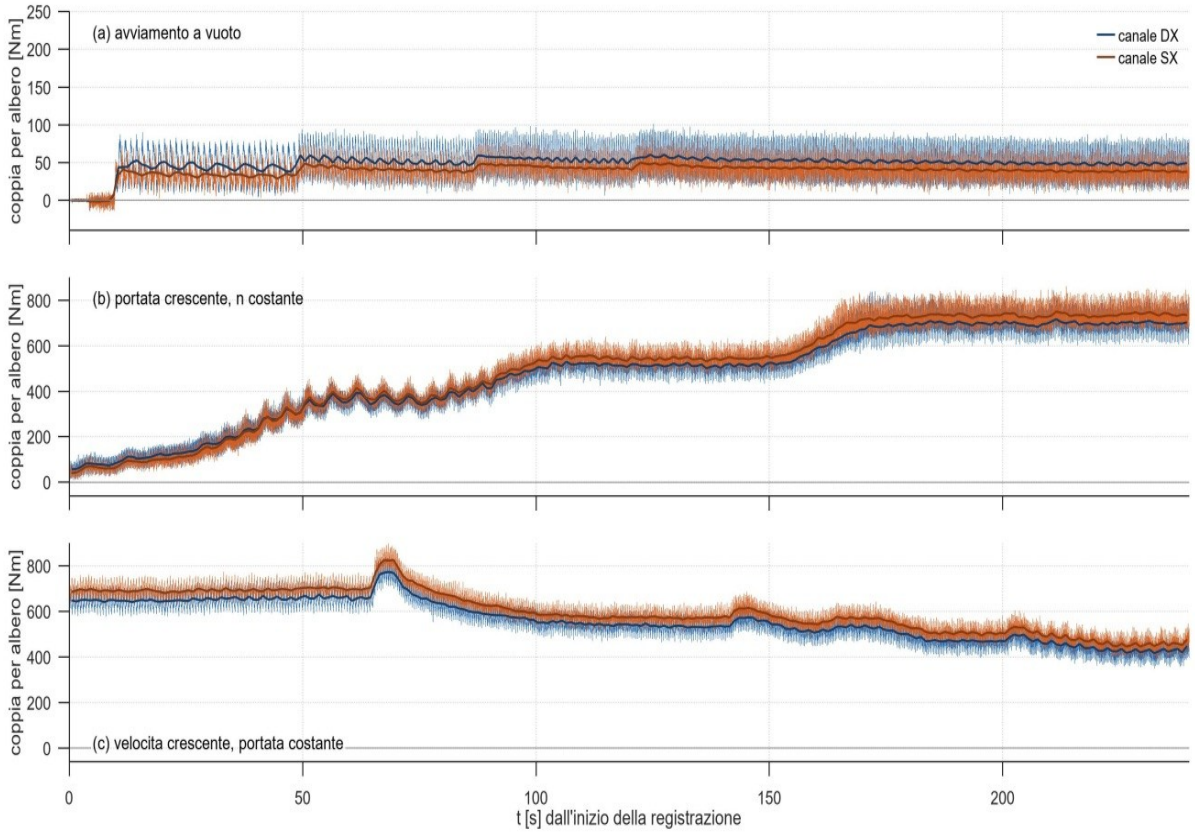


Figura 4.11: curve di funzionamento per la prova 1 nei tre casi: a) avviamento a vuoto; b) portata crescente a velocità costante; c) velocità crescente a portata costante.

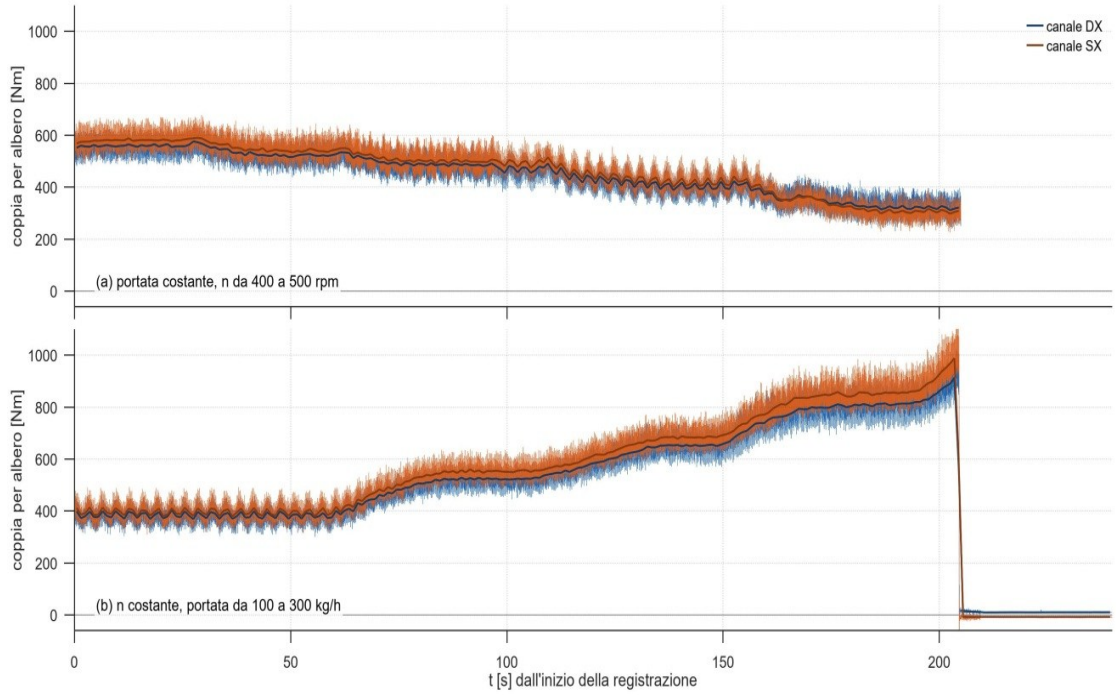


Figura 4.12: andamento delle curve di funzionamento della prova 2: a) aumento della velocità con portata costante; b) portata costante con aumento della velocità

Nella prima figura si possono osservare andamenti coerenti con quello che ci si potrebbe aspettare: nella fase (a) la macchina passa da 0 a 50 rpm con valori di coppia di circa 40 Nm per entrambi gli alberi, i successivi tre gradini per raggiungere i 200 rpm non influenzano in maniera sostanziale il valore della coppia che rimane intorno a 50 Nm. Nella seconda fase (b) la coppia parte da circa 50 Nm fino a circa 750 Nm con un andamento non continuo ma a gradini che corrisponde agli aumenti di portata graduali che sono stati eseguiti anche loro a gradini. Nell'ultima fase (c) invece si nota una diminuzione della coppia che parte da un valore di circa 700 Nm con una velocità di 100 rpm, e decresce ogni volta che la velocità viene aumentata fino ad un minimo di 400 Nm a 300 rpm.

La seconda prova invece mostra andamenti particolari. Innanzitutto, si nota la mancanza del grafico a vuoto da 200 a 400 rpm in quanto risulta essere uguale a quello ottenuto per la prova 1, l'unica differenza sta in un valore non più di 40 Nm ma di circa 60 Nm che si stabilizza verso la fine a 75 Nm. La prima fase (a) a portata costante con aumento della velocità risulta del tutto simile all'andamento (c) della prima prova con una decrescita della coppia all'aumentare dei giri, si nota che la prova si interrompe prima della fine dei 240 s in quanto i dati sono diventati illeggibili per quella sezione. L'andamento più particolare è la seconda fase (b) a velocità costante con aumento di portata. Infatti, si vede un aumento della coppia coerente con un aumento della portata fino ad un valore di circa 1000 Nm per albero, successivamente la coppia si annulla quasi istantaneamente per l'intervento del giunto di sicurezza che, raggiunta la soglia, è scattato disaccoppiando motore e riduttore.

4.6 Metodi di analisi.

Le grandezze ricavate nel paragrafo 4.4 vengono analizzate nel capitolo 5 secondo i metodi che verranno definiti in questo paragrafo.

Come già specificato in precedenza il primo punto dell'analisi è l'individuazione dei punti di funzionamento. Si distinguono dai punti di transitorio in quanto possiedono caratteristiche che rimangono invariate per un determinato intervallo di tempo. Grazie a questi punti è possibile andare a calcolare la potenza in uscita al riduttore grazie alla relazione:

$$P = M \cdot \frac{2\pi n}{60} \qquad (4.11)$$

Con M coppia totale sui due alberi e n velocità della vite. Si utilizza la somma dei contributi destro e sinistro del giunto in quanto il motore fornisce potenza ad entrambi gli alberi. I punti così ottenuti vengono prima riportati all'albero motore tramite il rapporto di riduzione e il rendimento del riduttore, poi inseriti in un grafico coppia-velocità e confrontati con i valori nominali del motore.

Il passaggio successivo consiste nel determinare il fattore di carico, ossia il rapporto fra la coppia nel punto più gravoso e la coppia nominale del motore. Il fattore di carico può essere approssimato empiricamente, per i casi in cui la corrente supera il 50% del valore nominale, alla seguente relazione:

$$LF = \frac{(2I_w - I_0)}{(2I_n - I_0)} \qquad (4.12)$$

Se questo termine è maggiore o uguale a 75% il motore si può considerare correttamente dimensionato. [5]

Oltre al fattore di carico in corrente è possibile calcolare il fattore di carico in potenza, ricavato come prodotto di coppia e velocità, che risulta essere il rapporto tra la potenza assorbita e quella nominale.

Successivamente si analizza più nel dettaglio il segnale dei giunti, si nota infatti che la coppia presenta un *ripple*, ossia a una oscillazione del valore attorno a quello medio. Se si analizza il segnale nel tempo è possibile quantificare l'ampiezza senza però determinarne l'origine. Per questo si passa al dominio della frequenza utilizzando la densità spettrale di potenza (PSD). La PSD permette l'individuazione della componente periodica, della sua frequenza e dell'ampiezza, così da rendere possibile un confronto con armoniche diverse. Nel caso in esame la frequenza di riferimento è a 3,33 Hz e le sue armoniche a 6,67 - 13,3 - 26,7 Hz. Questo ci permette di determinare, qualora lo spettro si sovrapponesse ad una delle frequenze appena citate, che la componente è sincrona alla velocità di rotazione e si distingue dunque da contributi non legati ad essa. [29][30]

La PSD può essere analizzata in diverse maniere, in questa trattazione si sfrutta il metodo di Welch, che suddivide i segnali in segmenti sovrapposti e ne media i periodogrammi riducendo la varianza e permettendo l'identificazione dei picchi. Ad ogni segnale inoltre viene applicata una finestratura di Hann che riduce il l*eakage* dovuto al troncamento.

Viene poi svolto uno studio dei vari transitori e la ripartizione della coppia sui due alberi. Lo studio della fase dinamica delle prove permette di verificare le effettive variazioni della coppia sul drive durante il processo. Lo studio della ripartizione invece permette di stabilire se tra gli alberi la coppia venga suddivisa in maniera uniforme oppure se uno dei due alberi porta di più rispetto all'altro. Infine, viene calcolata la funzione di coerenza sul segnale di entrambi gli alberi in modo tale da distinguere le componenti del *ripple* comuni ad entrambi da quelle indipendenti. [29][30]

L'ultima analisi è quella relativa all'energia meccanica specifica (SME) al fine di ottenere un'indicazione anche sull'aspetto energetico del processo. L'energia meccanica specifica è definita come il rapporto fra la potenza in uscita al riduttore e la portata massica:

$$SME = \frac{P}{\dot{m}} \qquad (4.13)$$

Il valore ottenuto viene poi confrontato con gli intervalli tipici del materiale utilizzato per verificare la plausibilità del risultato. [31]

Tutte le analisi vengono sviluppate nel capitolo successivo.

5. Analisi dei risultati

In questo capitolo ci concentreremo sull'analisi dei risultati ottenuti attraverso i metodi elencati nel capitolo precedente.

5.1 Analisi dei punti di funzionamento e individuazione del fattore di carico.

Il primo punto che viene analizzato è l'identificazione dei punti di funzionamento: come già specificato, i punti di funzionamento sono punti nei quali la macchina funziona a regime e non nei momenti di transitorio. Per individuarli ci si appoggia dunque ai dati ottenuti dal server, a bassa frequenza di campionamento. Questi punti hanno la caratteristica di possedere alcuni valori costanti per un determinato intervallo di tempo. Nel caso in esame, si è scelto che i valori relativi a velocità della vite e pressione del fuso in testa al cilindro rimangano entro il ±5% del valore medio per almeno 20 s. La scelta di questi due parametri è dovuta al fatto che la pressione del fuso è soggetta a variazioni appena vengono cambiate le condizioni operative ed è dunque un ottimo indicatore di stazionarietà del processo. La velocità della vite indica la fase non transitoria dell'azionamento.

Nelle figure seguenti (Figura 5.1 5.2) si mostrano i punti di funzionamento per le prove 1 e 2:

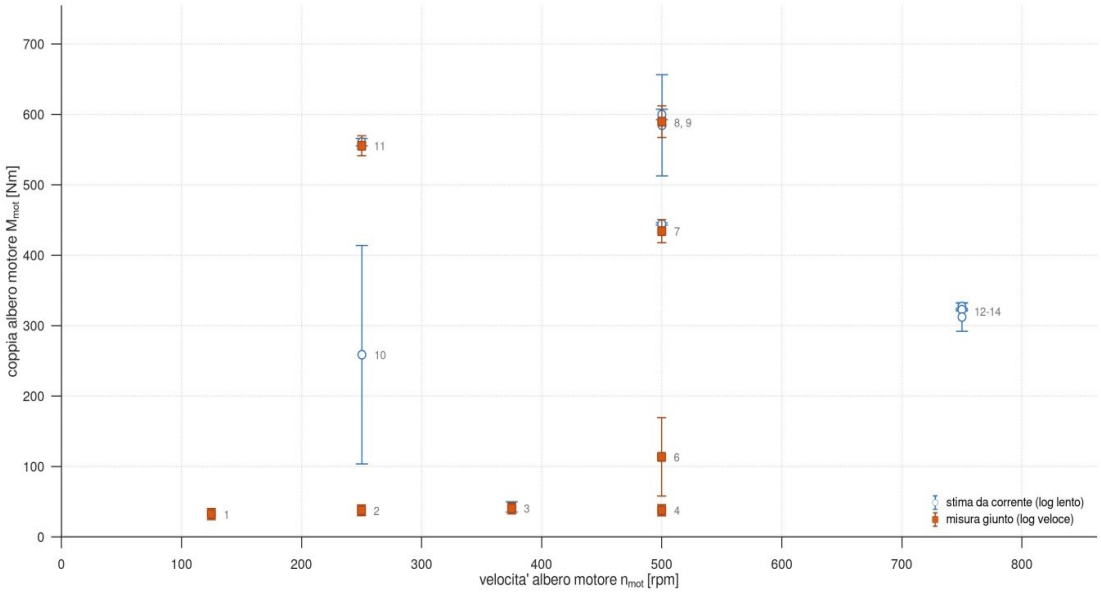


Figura 5.1: Punti di funzionamento della prova 1

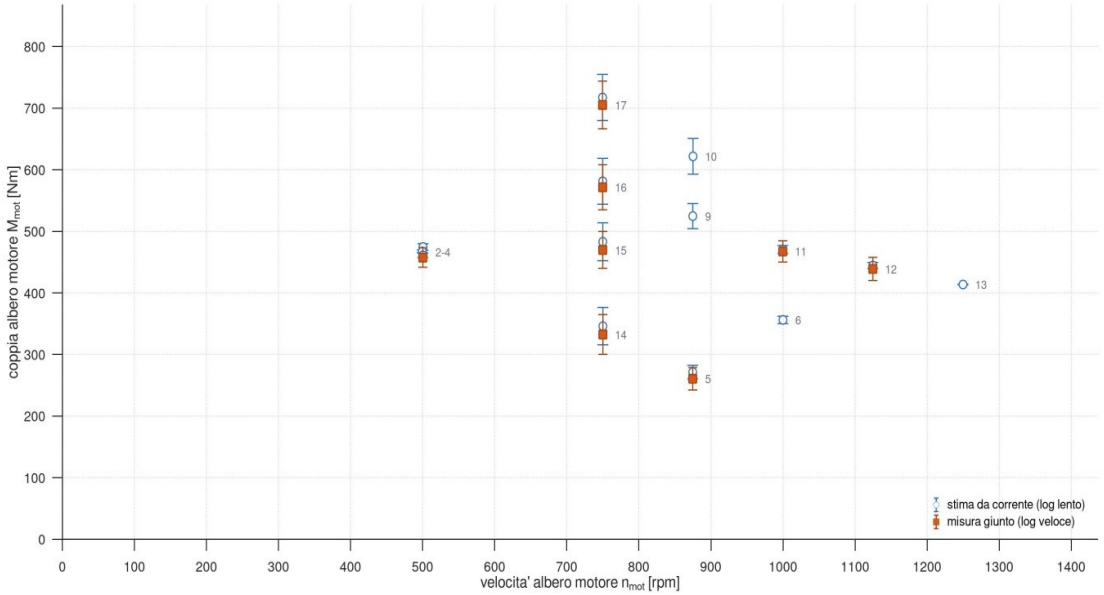


Figura 5.2: Punti di funzionamento per la prova 2

La prima cosa che si può notare, è che sugli assi cartesiani si trovano le grandezze riferite all'albero motore e non quelle relative all'uscita del riduttore. Per effettuare questa trasformazione, viene divisa la coppia in uscita agli alberi del riduttore per il rapporto di riduzione e il rendimento:

$$C_m = \frac{C_{ext\,rid}}{i \cdot \eta} \quad (5.1)$$

Dove i rappresenta il rapporto di riduzione del riduttore e η il rendimento del riduttore, pari rispettivamente a 2,5 e 0,95. La velocità invece viene semplicemente moltiplicata per il rapporto di riduzione.

La seconda cosa da notare, comune ad entrambi i grafici è la distinzione tra i punti di funzionamento che hanno una controverifica con i dati ad alta frequenza (pallini arancioni nel grafico) e quelli che invece non possiedono questa controverifica e si basano unicamente sulle stime della corrente utilizzando solo i log lenti (pallini bianchi nel grafico).

La prova 1 restituisce 14 punti di lavoro compresi fra 125 e 500 rpm all'albero motore, per un tempo totale in condizione di regime di 2290 s. Questi valori di velocità rappresentano meno del 50% della velocità nominale. La coppia massima, circa 600 Nm, si registra a 500 rpm.

La prova 2 invece si estende su 2038s e individua 17 punti. La coppia all'albero motore è compresa fra 275 e 700 Nm mentre la velocità dell'albero motore va dai 500 a 1100 rpm.

La prima analisi che si può fare riguarda la coppia. Come già specificato il rapporto tra il punto più critico e il valore nominale corrisponde al fattore di carico. Nella prova 1 il punto critico si trova in corrispondenza di 500 rpm motore, corrispondenti a 200 rpm vite, con un valore di 600 Nm. Il fattore di carico risulta pari a 72,6%, minore della soglia stabilita precedentemente pari a 75%.

$$LF = \frac{(2I_w - I_0)}{(2I_n - I_0)} = \frac{(2 \cdot 181{,}01 - 64{,}9)}{(2 \cdot 237 - 64{,}9)} = 72{,}6\% \qquad (5.2)$$

La prova 2 invece ha un punto critico a 700 Nm in corrispondenza di 300 rpm vite, 750 rpm motore, che restituisce un fattore LF pari a 86%:

$$LF = \frac{(2I_w - I_0)}{(2I_n - I_0)} = \frac{(2 \cdot 208{,}26 - 64{,}9)}{(2 \cdot 237 - 64{,}9)} = 86{,}0\% \qquad (5.3)$$

La valutazione del fattore di carico in corrente non può essere quindi considerabile come unico criterio per la valutazione del dimensionamento.

La seconda osservazione che si può fare è quella per cui nella prova 1 la velocità del motore non superi mai i 750 rpm, equivalenti al 50% della velocità nominale del motore. Mentre nella prova 2 si raggiungono velocità superiori a 1000 rpm ovvero più del 66% della velocità nominale. Questa distinzione, insieme al calcolo del fattore di carico effettuata prima, ci permette di stabilire che il motore lavora a coppie che si avvicinano a quella nominale ma a velocità molto ridotte. Questa velocità è fissata dal rapporto di riduzione del riduttore. Per verificare ulteriormente questa affermazione è possibile calcolare il fattore di carico in potenza e non in corrente. In questa maniera si può analizzare il rapporto fra la velocità nominale e quella di lavoro.

Si calcola innanzitutto la potenza in uscita al riduttore:

$$P_{usc} = M_{usc} \cdot \frac{2\pi n}{60} = 29869\ W \qquad (5.4)$$

Successivamente si trova la potenza al motore dividendo per il rendimento:

$$P_{mot} = \frac{P_{usc}}{\eta} = 31441\ W \qquad (5.5)$$

E infine si calcola il LF_p come:

$$LF_p = \frac{P_{mot}}{P_n} = 23{,}8\% \qquad (5.6)$$

Questo valore per la prova 1, per la prova 2 si ottiene: LF_p= 41,8%. Nella prova 2 dunque si trova un fattore di carico in corrente che risulta del tutto tipico per un motore dimensionato correttamente, ma un fattore di carico in potenza che è molto basso, indice di un motore sovradimensionato in potenza. Per il caso in esame, dunque, si conferma quindi che non si tratta di un motore mal dimensionato ma piuttosto di un rapporto di riduzione poco elevato che impone al motore di funzionare in regimi che lo rendono sovradimensionato. Nella tabella 5.1 vengono riassunti i valori di LF e LF_p, in rosso quelli inferiori e in verde quelli superiori al limite di 75%.

	LF	LF_p
Prova 1	72,6%	23,8%
Prova 2	86,00%	41,8%

Tabella 5.1: Valori del fattore di carico in corrente e in potenza.

5.2 Densità spettrale di potenza.

Si passa quindi all'analisi del segnale nel dominio della frequenza tramite la PSD. La PSD, come spiegato nel capitolo precedente, permette di separare e analizzare tutte quelle componenti di oscillazione che nel dominio del tempo non è possibile distinguere. Le oscillazioni possono essere di natura diversa: possono provenire dalla rotazione delle viti o dal processo e dunque essere di natura meccanica, oppure provenire dal sistema di misura stesso. L'analisi nel dominio della frequenza permette di distinguerle tra di loro: infatti, un'oscillazione periodica appare come un picco stretto mentre quelle casuali formano un fondo irregolare su tutta la banda. Nel caso in esame le PSD sono calcolate sui segnali ad alta frequenza, provenienti dal giunto, sia per i singoli alberi, destro e sinistro, sia per la coppia totale.

La PSD viene calcolata sfruttando il metodo di Welch soltanto sulle finestre stazionarie per permettere un'analisi più precisa. Questa finestratura è effettuata con un criterio simile a quello utilizzato per i punti di funzionamento. [29][32]

Si osserva la variazione di alcuni parametri su un determinato intervallo di tempo e si mantengono solo quegli intervalli in cui la variazione rientra in un determinato range. In questo caso i parametri sono velocità e coppia, il range e il tempo di analisi sono medesimi a quelli scelti prima: ±5% e 20s.

Per mostrare l'effetto della selezione si riportano di seguito gli spettrogrammi del gradino di velocità a portata costante per la prova 1 (Figura 5.3) e la prova 2 (Figura 5.4).

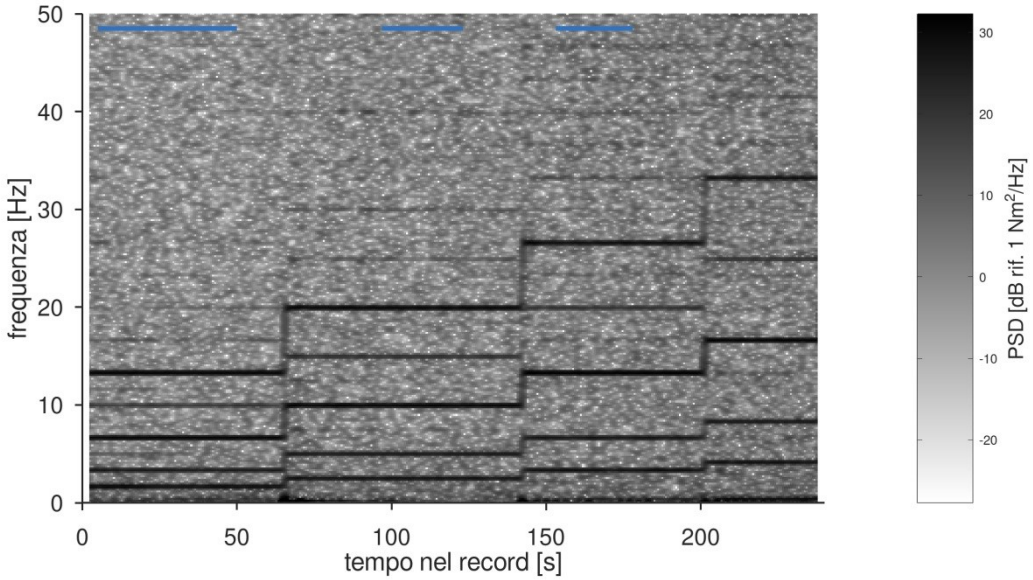


Figura 5.3: Spettrogramma del gradino di velocità a portata costante della prova 1

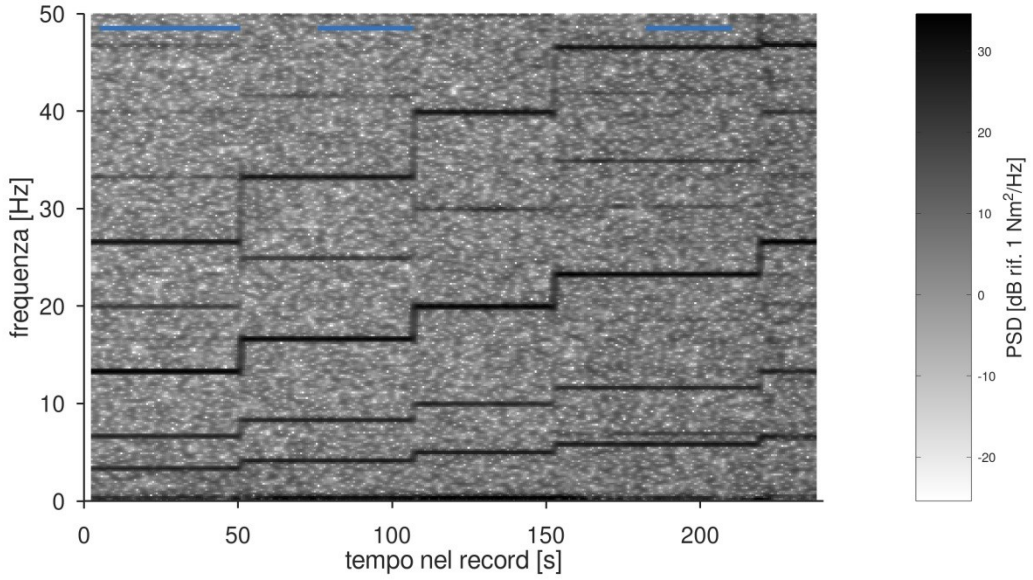


Figura 5.4: Spettrogramma del gradino di velocità a portata costante della prova 2

In entrambi i grafici si distinguono chiaramente i gradini di velocità, 0, 50, 100, 150 e 200 rpm per la prima e 200, 250, 300, 350 e 400 rpm della seconda ma anche il tempo che trascorre tra un gradino e il seguente (circa 60s). A ogni gradino tutte le righe si spostano verso l'alto in proporzione al loro ordine. Si può anche osservare la presenza di righe blu in cima ad ambo i grafici, queste individuano le finestre che cadono all'interno del range accettabile per coppia e velocità e sono dunque ritenute finestre stazionarie.

Per questi casi si individuano tre zone stazionarie. Se ne potrebbe aggiungere una quarta riducendo di poco il tempo necessario per essere considerate stazionarie, tuttavia, la scelta presa è dettata dalla volontà di non avvicinarsi troppo alle finestre transitorie.

Le figure seguenti riportano le PSD dei tre cicli di analisi per le due prove:

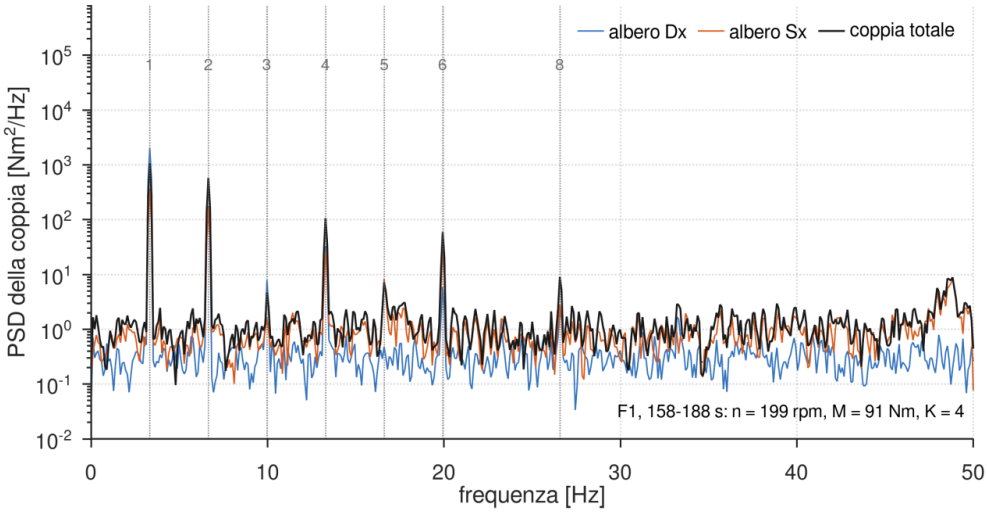


Figura 5.5: PSD ciclo a vuoto prova 1

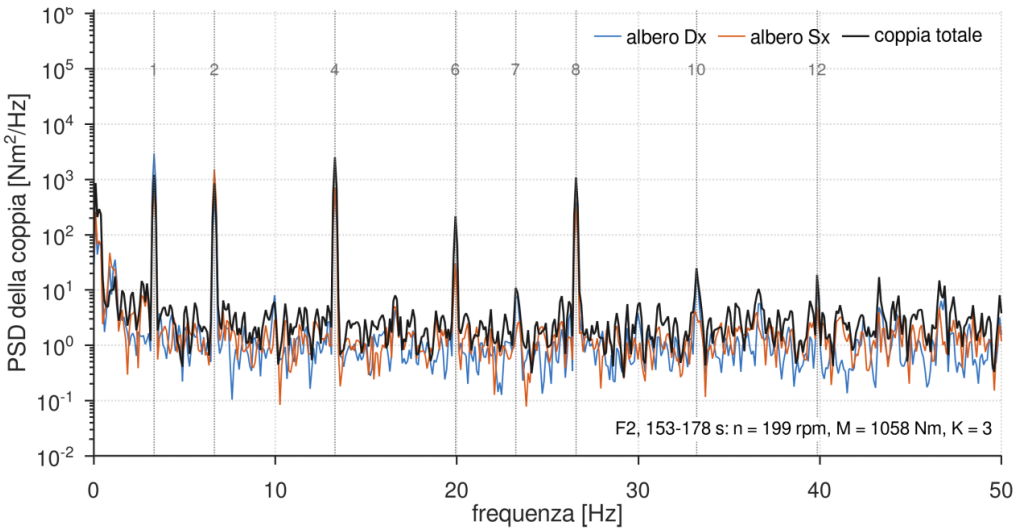


Figura 5.6: PSD del ciclo a portata costante e velocità variabile prova 1

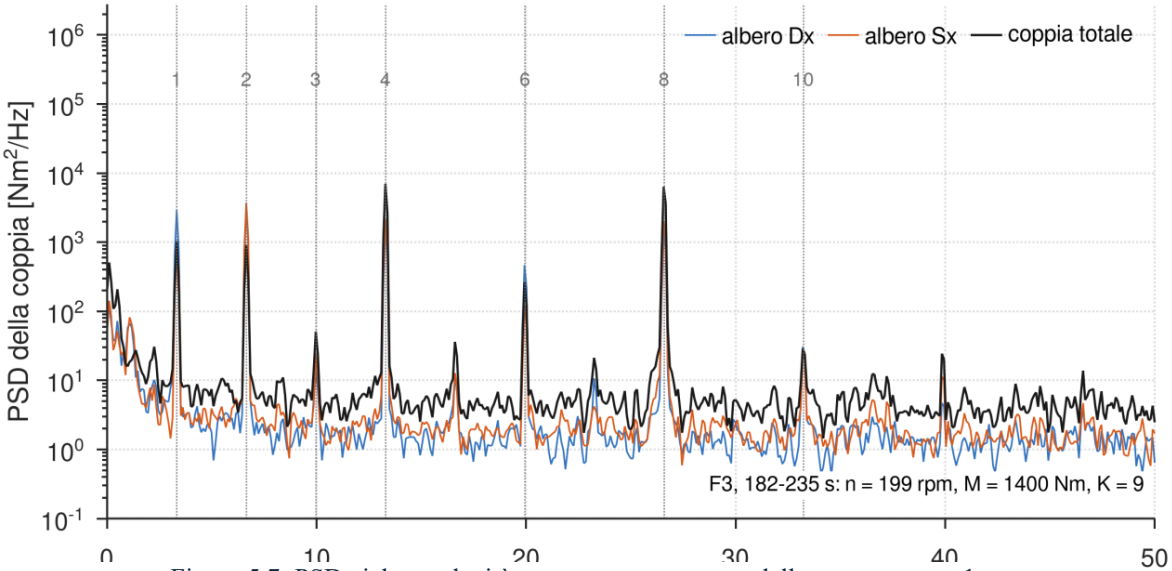


Figura 5.7: PSD ciclo a velocità costante con aumento della portata prova 1

Per la prova 2:

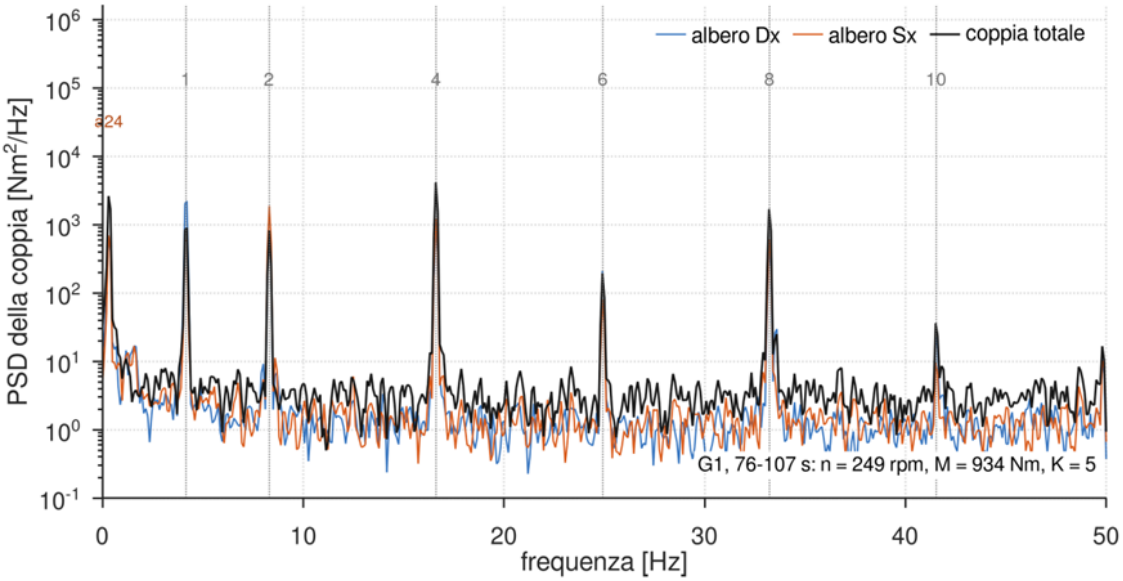


Figura 5.8: PSD ciclo a vuoto prova 2

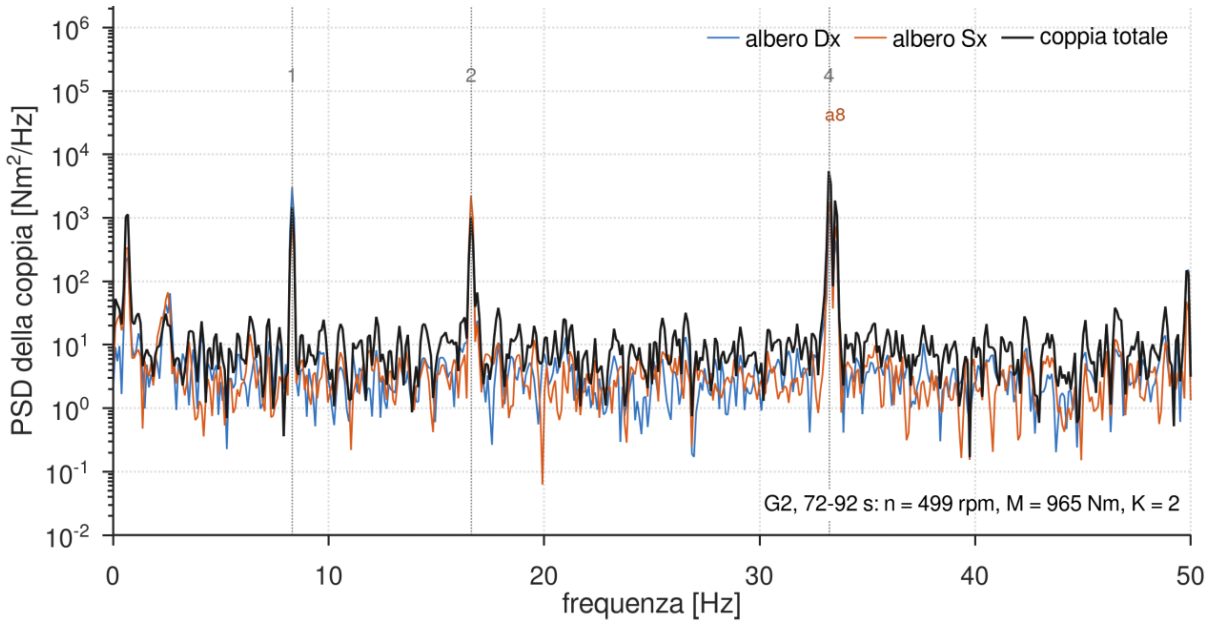


Figura 5.9: PSD ciclo a portata costante e velocità variabile prova 2

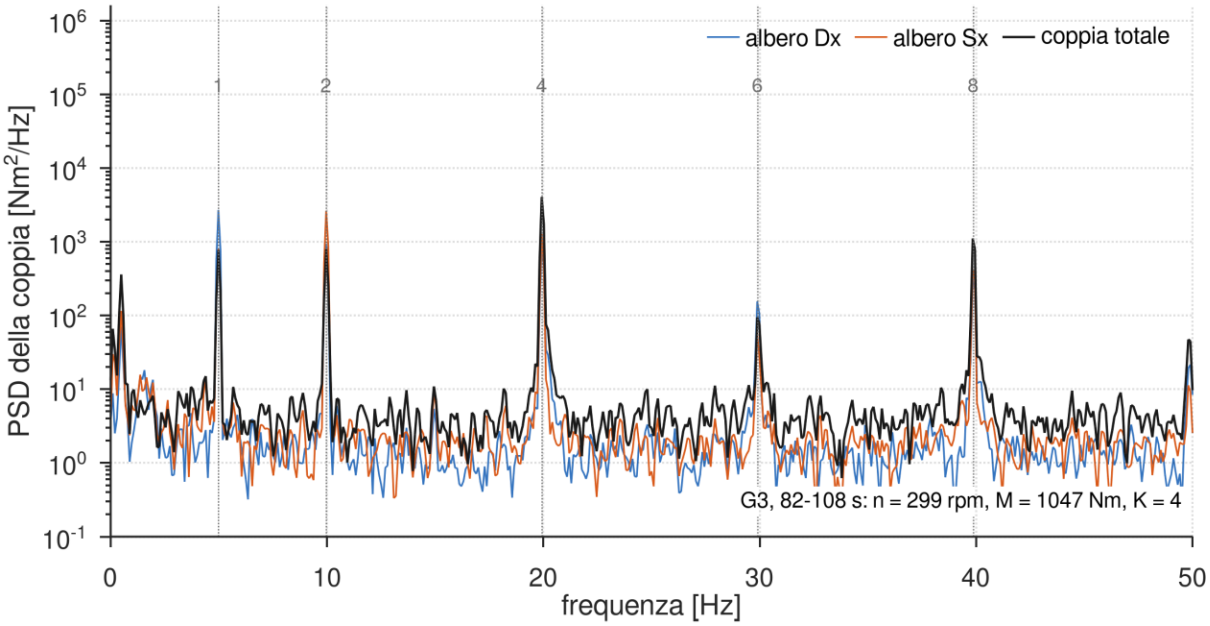


Figura 5.10: PSD ciclo a velocità costante e portata in aumento prova 2

I primi tre grafici rappresentano le tre condizioni di misura della prova 1 mentre gli ultimi tre quelle della prova 2. Si nota che i grafici qui esposti non rappresentano interamente i tre diversi cicli ma indicano una finestra stazionaria all'interno di essa alla stessa velocità. Per visualizzare le altre finestre che compongono il ciclo intero si veda negli allegati.

Per ogni grafico è riportata la curva per il giunto destro, quella per il giunto sinistro e anche quella che rappresenta la somma delle due. Per la prova 1 essendo finestre che si basano sulla stessa velocità le differenze tra le tre sono da attribuire interamente al carico.

Analizzando la prova a vuoto i può notare che i picchi decrescono regolarmente con l'ordine e i più alti sono quelli del primo e secondo ordine. Al primo ordine si vede una netta differenza tra le curve dei due alberi con valori alti sull'albero destro, mentre al secondo ordine le due curve sono pressoché identiche. Si nota inoltre una piccola anomalia tra i 48 e i 49 Hz sul canale del giunto sinistro che non coincide con multipli della frequenza di rotazione e non può dunque essere associata a perturbazioni di natura meccanica. In questo caso l'ipotesi più plausibile è quella di un disturbo sul segnale di misura.

Sotto carico invece gli ordini dominanti si spostano verso ordini più alti, il quarto e l'ottavo. La curva della coppia totale si trova sempre sopra quella dei singoli alberi e ciò indica che sono in fase tra di loro, a meno di componenti non correlate. Sul primo e sul secondo ordine invece la curva nera in alcuni casi si trova al di sotto di una delle due curve del giunto. Questo è possibile solo se le oscillazioni dei due alberi si compensano perché in opposizione di fase.

La tabella seguente mostra i valori efficaci per i diversi ordini delle tre prove:

ORDINE	Prova a vuoto			Prova a velocità costante			Prova a portata costante		
	DX	SX	TOT	DX	SX	TOT	DX	SX	TOT
1	17,3	7,2	12,5	20,8	10,2	13,4	20,5	10,0	12,4
2	5,1	4,9	9,3	8,6	15,0	11,1	21,2	23,4	11,7
4	2,2	2,0	4,0	9,9	10,3	19,0	15,5	17,8	32,3
8	0,6	0,6	1,2	7,6	6,8	12,7	15,1	18,4	32,3
Deviazione standard, coppia totale	18,3 Nm			37,3 Nm			53,9 Nm		

Tabella 5.2: valori efficaci dei principali ordini prova 1

Il quarto e l'ottavo ordine aumentano con il carico. Sulla coppia totale il valore efficace aumenta da 4 a 19 e poi a 32 Nm per l'ordine quattro e da 1,2 a 12,7 e poi 32,3 Nm per l'ordine otto. Si nota che il valore ottenuto per il totale è compreso fra l'88% e il 97% della somma dei due alberi, si tratta dunque di oscillazioni generate dal processo e trasmesse al riduttore. L'ordine 1 invece varia poco su entrambi gli alberi, mentre l'ordine due ha una variazione notevole dell'albero sinistro rispetto al destro.

Per quanto riguarda la prova 2 le finestre scelte hanno velocità diverse ma coppie medie simili, si analizza quindi l'effetto della velocità a parità di carico. Si riportano i valori efficaci nella seguente tabella:

ORDINE	Prova a vuoto			Prova a velocità costante			Prova a portata costante		
	DX	SX	TOT	DX	SX	TOT	DX	SX	TOT
1	20,8	10,9	13,3	19,8	10,8	10,6	21,1	11,2	14,6
2	10,5	16,6	11,1	11,9	19,9	11,0	12,9	18,6	12,8
4	12,3	13,7	24,8	12,1	13,8	25,0	14,1	17,3	30,6
8	8,8	9,8	16,3	7,5	8,6	14,0	/	/	7
Deviazione standard, coppia totale	43,3 Nm			37,9 Nm			47,9 Nm		

Tabella 5.3: valori efficaci dei principali ordini prova 2

Al variare della velocità gli ordini 1 e 2 rimangono pressoché invariati. L'ordine 4 risulta essere ancora quello dominante. La curva della coppia totale rimane stabilmente sopra le altre e dunque indica componenti sempre in fase.

Se si confrontano le due prove, sotto carico si può notare che gli ordini principali restano gli ordini 4 e 8 mentre a vuoto dominano i valori di ordine 1 e 2. All'ordine 1, in tutte le prove, si può vedere un divario tra i due alberi che rimane pressoché costante di circa 10 Nm. Una differenza così stabile non può essere attribuita a oscillazioni di natura meccanica o di processo ma piuttosto al segnale.

Inoltre, a velocità meno elevate sono presenti numerosi ordini, mentre le prove ad elevata velocità, come nel caso a portata costante della prova 2, si fermano al sesto ordine. Questo significa che gli ordini superiori cadono oltre il limite di 50 Hz, e in assenza di filtraggio si ripiegano a frequenze minori, perturbando il grafico e rendendo lo spettro meno affidabile.

Si può dunque stabilire che le oscillazioni prodotte su ordini 4 e 8 sono di natura meccanica o di processo mentre per le altre si preferisce l'ipotesi di interferenze sul segnale.

Un'ulteriore caratteristica del segnale che non era ancora stata commentata è il *ripple*: si tratta dell'oscillazione della coppia attorno al suo valore medio e viene solitamente descritta attraverso il valore efficace, che indica la quantità di energia oscillante, e l'escursione picco-picco che invece indica la distanza fra il valore massimo e minimo della coppia. Il valore efficace si deriva direttamente dalla densità spettrale essendola radice quadrata dell'area sottesa al grafico. I valori indicati nelle tabelle precedenti sono quindi già indice delle componenti del *ripple*.

Il passo successivo consiste nell'analisi della PSD della coppia totale in funzione dell'ordine, una per ciascuna velocità analizzata (Figura 5.11 e 5.12).

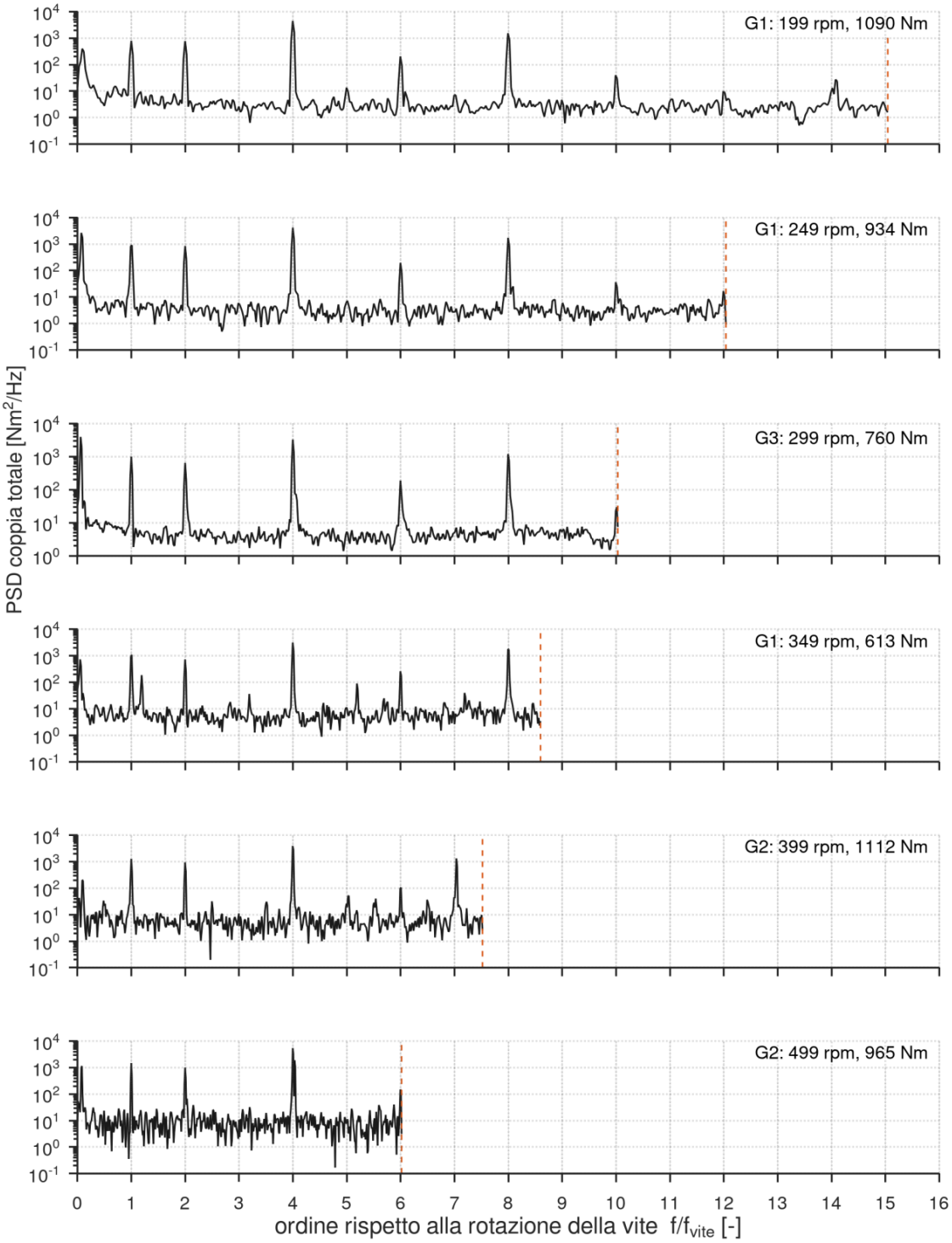


Figura 5.11: Andamento della PSD per la coppia totale a varie velocità analizzate durante la prova 2

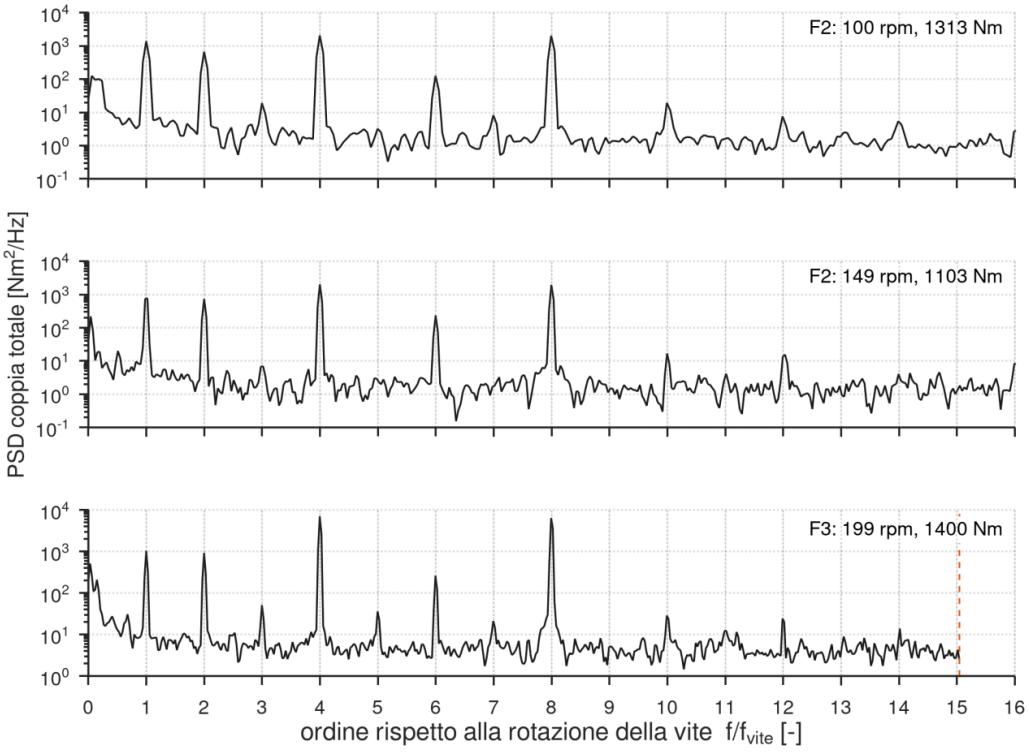


Figura 5.12: Andamento della PSD per la coppia totale a varie velocità analizzate durante la prova 1

Si può notare che le righe cadono agli stessi ordini da 100 a 500 rpm e con coppie medie da 613 a 1400 Nm; dunque, è possibile ritenere che questi ordini siano una caratteristica stabile del sistema e non una particolarità del singolo punto di misurazione.

L'analisi viene effettuata per ogni velocità disponibile, partendo da 100 rpm, in quanto a 50 rpm non è stata individuata nessuna finestra stazionaria, passando da 150 e 200 rpm della prova 1 e poi passando alla prova 2 da 200 a 500 rpm. Per questo motivo non si mostra né la prova a vuoto da 0 a 200 rpm e né quella sotto carico a 200 rpm poiché appunto rimane alla stessa velocità.

Sulla coppia totale prevalgono in entrambi i casi gli ordini 4 e 8. A 200 rpm nella prova 1 gli ordini 4 e 8 valgono entrambi 32 Nm mentre a 300 rpm gli stessi ordini valgono 22 e 14 Nm. Le oscillazioni sono complessivamente contenute e non superano il 7% del valore medio.

Si possono inoltre notare casi in cui i picchi non cadono su ordini interi, nella seconda prova per 350 rpm si ottengono ordini apparenti a 1,19 e 5,19 Hz. Questi due ordini sono dovuti al fenomeno dell'*aliasing* per cui una componente reale sopra i 50 Hz se non è eliminata prima del campionamento ricompare nello spettro a una frequenza più bassa.

5.3 Analisi del transitorio e della ripartizione di coppia.

Il passo successivo consiste nell'analisi del transitorio e della ripartizione della coppia sugli alberi. Il transitorio che viene preso in esame è quello dovuto alla variazione di velocità o di portata durante il funzionamento. I dati in nostro possesso che permettono l'identificazione dei transitori sono quelli legati al giunto sensorizzato, infatti, oltre alla misurazione a vuoto con gradino di velocità abbiamo le variazioni di velocità con portata costante e le variazioni di portata con velocità costante.

Le grandezze che vengono analizzate sono le seguenti: massimo della coppia filtrata, tempo di salita, tempo di assestamento e sovraelongazione. Il tempo di assestamento è misurato come il tempo dopo il quale la coppia rimane in un intorno di un certo valore fino alla fine della finestra stazionaria. [33]

Nelle figure seguenti si mostrano le variazioni di velocità a portata costante:

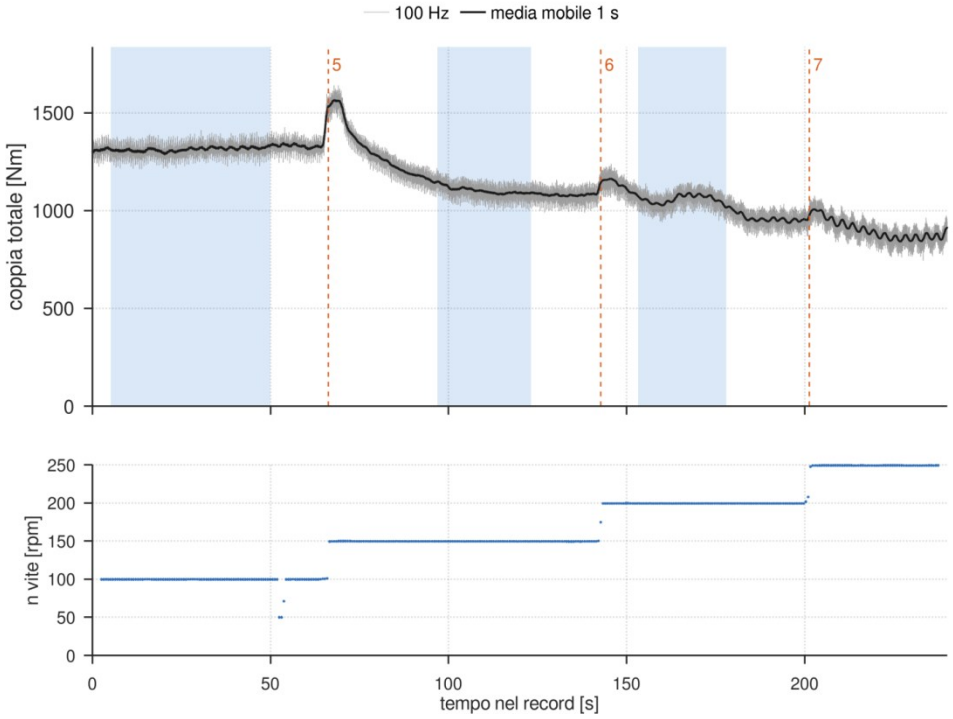


Figura 5.13: Variazione di velocità a portata costante della prova 1

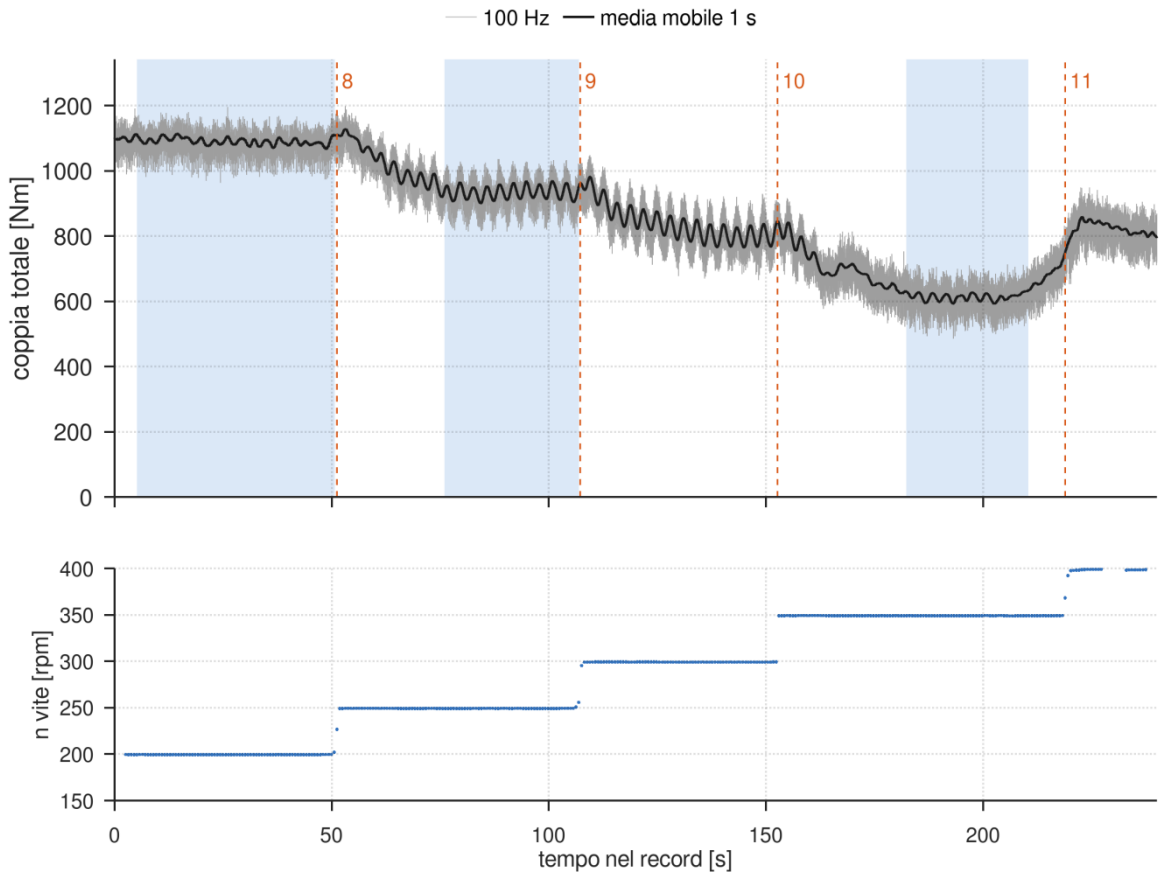


Figura 5.14: Variazione di velocità a portata costante della prova 2

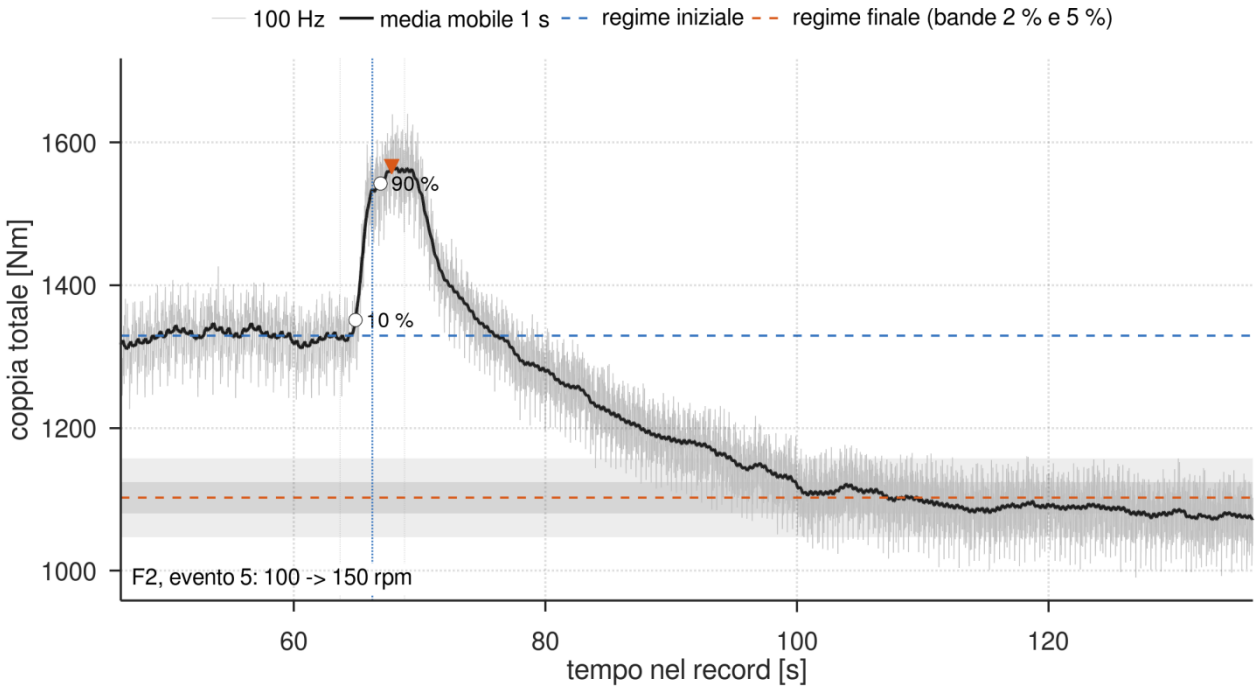


Figura 5.15: Andamento particolare del gradino relativo alla prova 1

Il pannello superiore delle prime due immagini (Figura 5.13 e 5.14) mostra l'andamento non filtrato, una media mobile a 1 s e le finestre stazionarie (evidenziate in blu). Nel pannello inferiore invece si mostrano, come per lo spettrogramma, le finestre stazionarie. La terza figura (Figura 5.15) è un ingrandimento di uno dei gradini della prova 1 (figura 5.13) nel quale vengono indicati:

- Il regime iniziale
- Il regime finale
- Il massimo
- Il tempo di salita dal 10% al 90% della coppia
- L'istante stimato del gradino

Nella maggior parte dei casi la risposta al gradino ha lo stesso andamento: in un primo momento la coppia sale e successivamente scende fino ad un regime inferiore. L'aumento più marcato si ha nel dettaglio (Figura 5.15) dove si ha il gradino da 100 a 150 rpm, la coppia aumenta con un tempo di salita di circa 2 s. Una volta che la velocità raggiunge il suo nuovo *set point* la coppia, quindi, inizia a decrescere a velocità costante fino al suo nuovo regime. La diminuzione della coppia è giustificata dal grado di riempimento delle viti che a portata costante diminuisce con l'aumentare della velocità.

Per i gradini di portata si riportano gli stessi grafici:

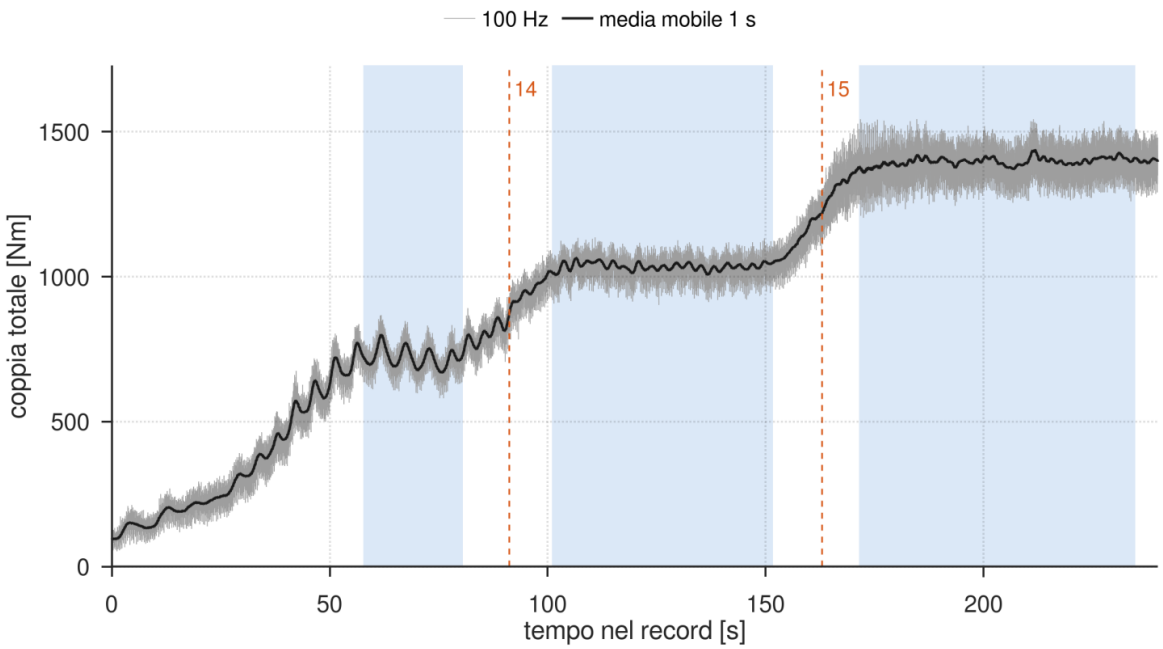


Figura 5.16: Gradino di portata a velocità costante della prova 1

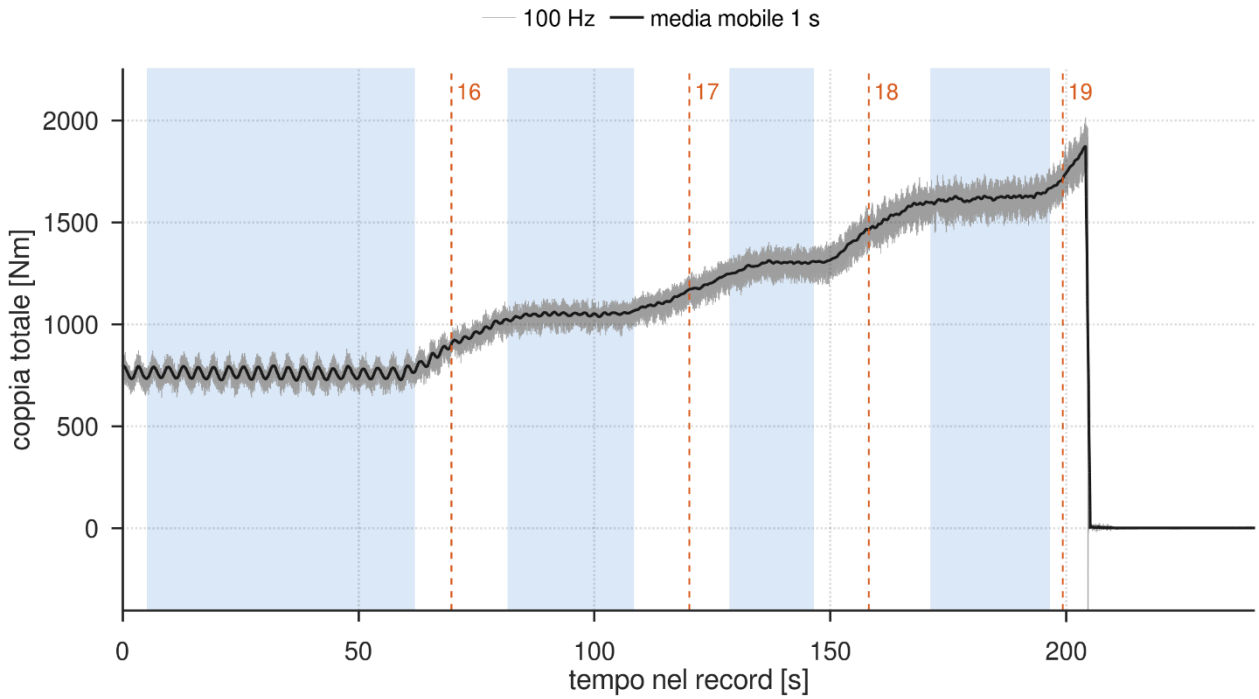


Figura 5.17: Gradino di portata a velocità costante della prova 2

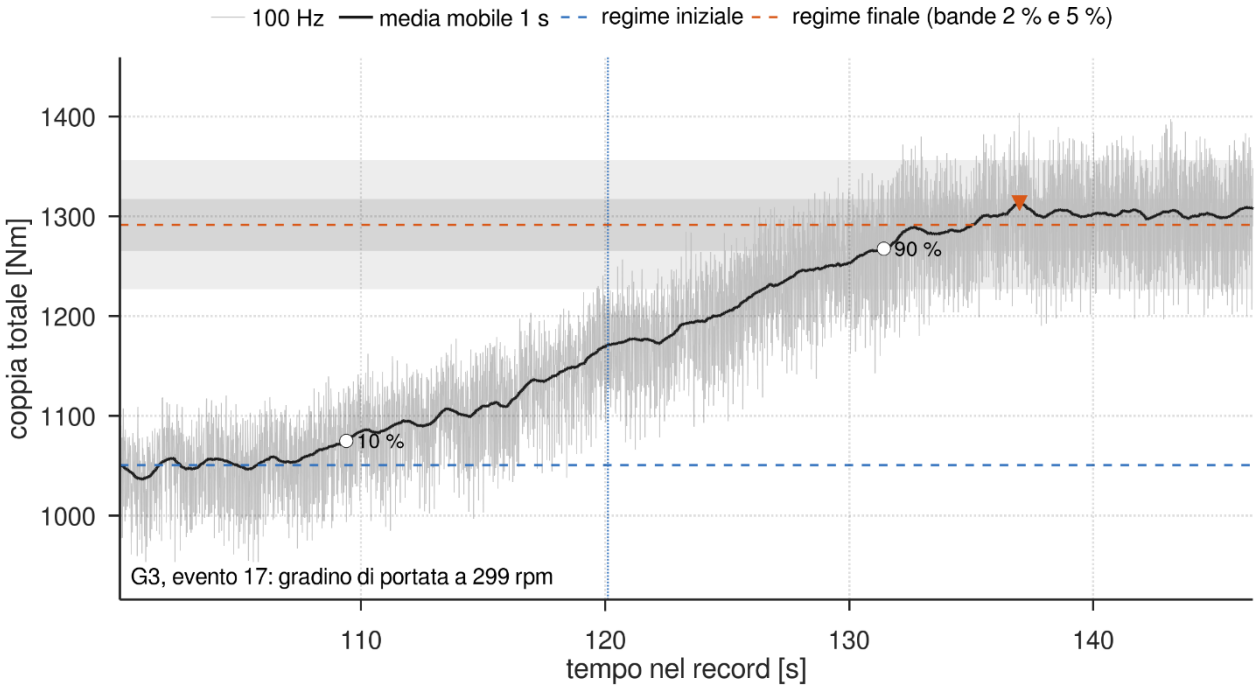


Figura 5.18: Andamento particolare del gradino relativo alla prova 2

Come era avvenuto per il gradino di velocità si mostra il gradino di portata effettuato nella prova 1 (Figura 5.16) e il gradino di portata della prova 2 (Figura 5.17). Ad essi si aggiunge anche un particolare della prova 2 (Figura 5.18).

Per entrambe le prove il tempo di salita dura circa 20/22 s. La particolarità che si mostra nel terzo grafico (Figura 5.18) è la crescita quasi lineare della coppia per l'intera durata del periodo di salita. In questo punto la portata varia da 150 a 200 kg/h con una velocità di 300 rpm. In nessuno dei transitori di portata si osserva sovraelongazione.

L'evento indicato nella Figura 5.17 con il numero 19 individua il momento in cui la portata diventa troppo elevata per la velocità di rotazione. In questo punto si rilevano i picchi di misura di tutta la campagna, pari a circa 1632 Nm, che provocano l'intervento del giunto di sicurezza che disaccoppia motore e riduttore.

Nella tabella di seguito vengono inseriti i valori di picco:

Registrazione	Massimo a 100 Hz totale [Nm]	Massimo albero Dx [Nm] (fondo scala)	Massimo albero Sx [Nm] (fondo scala)	Massimo media 1 s [Nm]	Riportato all'albero motore [Nm]	Rispetto a M_n
F1	149	99 (7,4 %)	84 (6,3 %)	107	45	5,4 %
F2	1640	823 (61,0 %)	877 (65,0 %)	1566	659	78,5 %
F3	1543	823 (61,0 %)	840 (62,2 %)	1439	606	72,1 %
G1	1198	602 (44,6 %)	670 (49,6 %)	1129	475	56,5 %
G2	1224	640 (47,4 %)	669 (49,5 %)	1143	481	57,3 %
G3	2013	992 (73,5 %)	1105 (81,9 %)	1874	789	93,9 %

Tabella 5.4: valori di picco del segnale

Nella prova 1 il carico più gravoso si registra in regime transitorio durante il gradino di velocità da 100 a 150 rpm a 200 kg/h (prove indicate con la lettera F). Per la prova 2 il picco si trova proprio nell'istante prima dell'interruzione (prove indicate con la lettera G).

Si può dunque concludere che i gradini di velocità a portata costante producono un aumento con sovraelongazione in quanto il picco di coppia è seguito da un regime finale che è minore rispetto a quello iniziale. L'aumento della portata non provoca invece nessuna sovraelongazione.

L'analisi dei transitori può essere accompagnata da un'analisi sulla ripartizione della coppia sui due alberi. Analizzare tale ripartizione permette di determinare se i due giunti lavorano correttamente e se lavorano con un carico di lavoro simile. Ritornando alle tabelle riferite ai valori efficaci misurati precedentemente (Tabella 5.4) si era notato uno scarto tra l'albero destro e quello sinistro di circa 10 Nm. Nella tabella successiva si indicano i valori principali della ripartizione.

Finestra	Velocità [rpm]	Coppia totale [Nm]	Dx [Nm]	Sx [Nm]	Dx/Sx	Quota Dx
F1_1	199	95	53	42	1,253	55,6 %
F1_2	199	91	51	40	1,260	55,8 %
F1_3	199	87	49	38	1,263	55,8 %
F2_1	100	1313	637	676	0,942	48,5 %
F2_2	149	1103	536	567	0,945	48,6 %
F2_3	199	1058	511	547	0,933	48,3 %
F3_1	199	720	354	366	0,968	49,2 %
F3_2	199	1035	503	532	0,946	48,6 %
F3_3	199	1400	683	717	0,952	48,8 %
G1_1	199	1090	518	572	0,904	47,5 %
G1_2	249	934	447	487	0,917	47,8 %
G1_3	349	613	305	308	0,988	49,7 %
G2_1	399	1112	537	575	0,933	48,3 %
G2_2	499	965	467	498	0,939	48,4 %
G3_1	299	760	365	395	0,926	48,1 %
G3_2	299	1047	501	547	0,916	47,8 %

Tabella 5.5: valori di picco del segnale

È possibile osservare che l'albero destro porta la maggior parte del carico unicamente nel ciclo a vuoto della prima prova, mentre per tutte le altre prove è l'albero sinistro che porta la maggior parte del carico, 51,2-52,5%. Il termine di differenza di 10 Nm all'albero destro pesa, dunque, solo nei casi a basso carico e meno nei casi ad alto carico. È plausibile che l'errore sia dovuto alla non completa simmetria nel montaggio dei giunti e che dunque il segnale che attraversa il traferro sia diverso tra albero sinistro e destro. Tuttavia, non è possibile escludere che questa variazione derivi dal processo o da componenti meccaniche. Insieme alla relazione tra i due alberi è possibile andare a determinare la coerenza fra i segnali ricavati dal giunto con lo scopo di osservare se le oscillazioni dei singoli alberi siano legate fra di loro. La coerenza è stata misurata su tutte e 6 le prove con valori compresi fra 0,966-0,998. Un valore così elevato indica che le componenti periodiche del segnale sono comuni ad entrambi gli alberi e, dunque, che il rapporto fra ampiezza e fase rimane costante.

5.4 Energia meccanica specifica.

Infine, si è analizzato anche l'aspetto energetico del processo calcolando l'energia meccanica specifica.

Questa grandezza è stata definita precedentemente come rapporto fra potenza in uscita al riduttore e portata massica:

$$SME = \frac{P}{\dot{m}} \qquad (4.13)$$

Dove P è la potenza fornita alla vite ricavata dalla coppia.

Per calcolare l'energia è necessario analizzare il ciclo di lavoro completo e dunque utilizzare i log lenti. Nei log lenti, tuttavia, non viene campionata la coppia e dunque va ricostruita a partire dalla corrente come era stato fatto precedentemente. Nei periodi che si sovrappongono al campionamento della coppia con il giunto si utilizzano invece i valori misurati. La differenza tra il valore calcolato e quello misurato varia dallo 0,7% al 4%; valori che si ritengono accettabili. Oltre alla potenza è necessario conoscere anche la portata massica. Il calcolo esclude quindi le prove a vuoto come, ad esempio, il primo ciclo della prova 1.

Nel grafico seguente si mostrano gli andamenti della SME per la prova a portata costante:

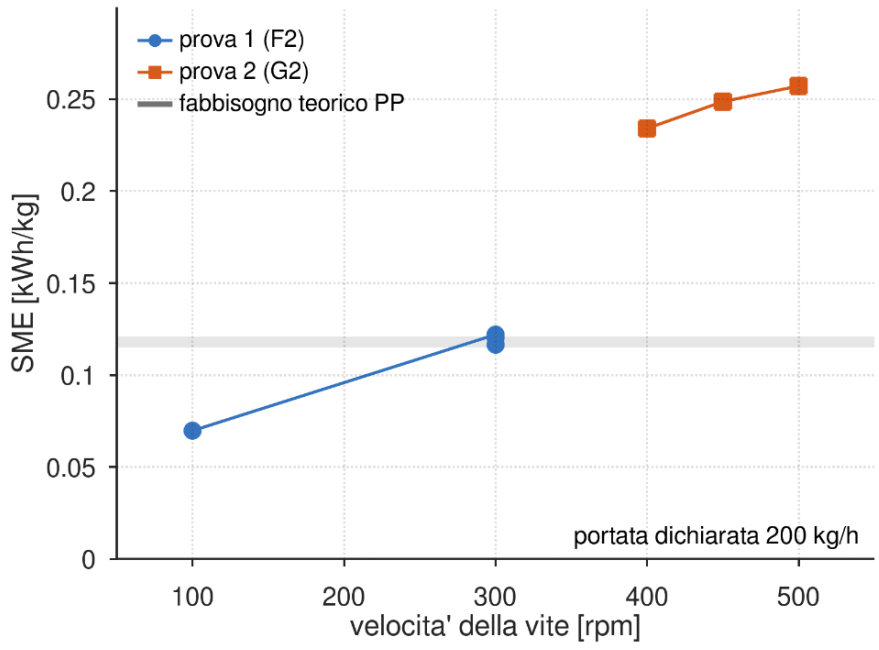


Figura 5.19: Andamento della SME per la prova a portata costante

La prova a portata costante con un aumento della velocità delle viti restituisce un andamento della SME che è coerente con le aspettative, ossia crescente con l'aumentare della velocità. Lo scarto tra SME ed entalpia del fuso è molto basso, compreso tra 0 e 0,008 kWh/kg o il 7%.

Per verificare la correttezza del bilancio, se viene fatto inversamente, si ottengono valori di portata coerenti con quelli di partenza: 199-214 kg/h contro 200 kg/h e 255-260kg/h contro 250 kg/h. Il valore viene poi comparato a quello che si dovrebbe ottenere teoricamente per il PP indicato con la banda grigia.

Tuttavia, a velocità costante il grafico che si ottiene non è soddisfacente, riportato nella figura sottostante (Figura 5.20). A velocità costante, se la coppia cresce in maniera lineare alla portata, come viene mostrato nel grafico precedente (Figura 5.18), ci si aspetta un andamento decrescente della SME. Si ottiene invece un andamento, sebbene di molto poco, crescente. Questo può essere giustificato tenendo conto del fatto che il dosaggio della portata non è preciso e ha un margine di errore. Se dunque la portata non era quella effettivamente settata allora è possibile che il risultato dell'andamento sia questo. I risultati ottenuti da questo tipo di analisi, dunque, vengono mostrati ma non vengono ritenuti accettabili.

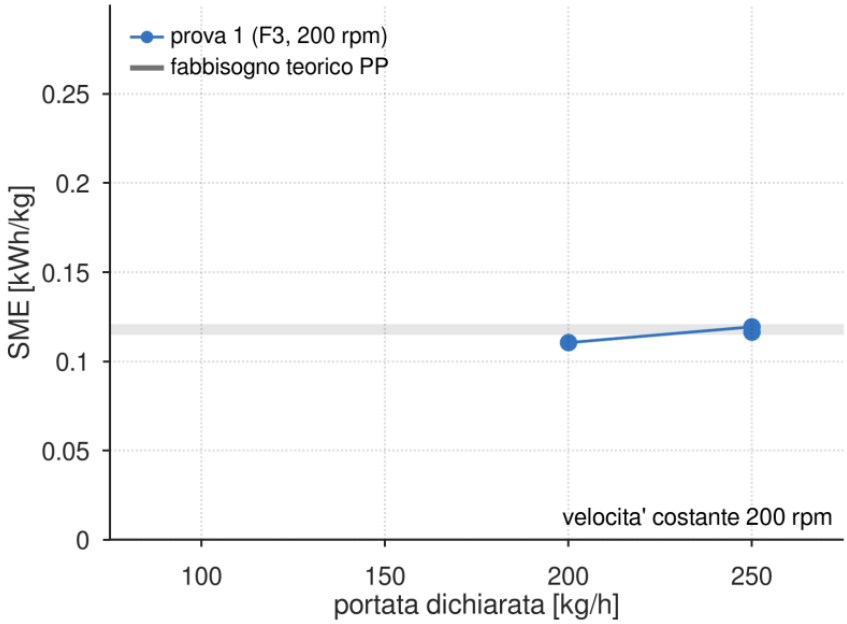


Figura 5.20: Andamento della SME nel caso di velocità costante e portata in aumento.

6. Conclusioni

Questo lavoro ha avuto come obiettivo la caratterizzazione dell'azionamento elettrico di una macchina industriale in esercizio. L'obiettivo principale è stato quello di verificare il corretto dimensionamento dell'azionamento e valutarne un possibile ridimensionamento. La campagna ha sfruttato e combinato tra di loro due livelli di dati: una registrazione della coppia in uscita al riduttore su due alberi, campionata a 100 Hz per 240 s, e i log di processo del PLC acquisiti via OPC UA per l'intera durata di funzionamento. L'allineamento tra le due sorgenti è stato fatto confrontando la media al secondo ricavata dalla coppia con quella ottenuta nei log, estendendo in maniera empirica il confronto anche in quei momenti in cui il giunto sensorizzato non era in funzione.

6.1 Dimensionamento

Il risultato principale riguarda il rapporto tra coppia e potenza richieste dal processo. Il parametro che risulta dunque più importante per valutare il dimensionamento è il fattore di carico. Dalle analisi si sono ottenuti due valori per prova relativi al fattore di carico in corrente e potenza, che vengono riportati di seguito per semplicità:

	LF	LF_p
Prova 1	72,6%	23,8%
Prova 2	86,00%	41,8%

In tre dei quattro casi ottenuti il fattore di carico non raggiunge il limite imposto a 75%. Il caso critico potrebbe sembrare quello in potenza, tuttavia, bisogna ricordare che la potenza è il prodotto tra coppia e velocità e nel nostro caso la velocità non ha mai superato l'80% circa del valore nominale.

Nel caso del fattore di carico misurato in corrente invece, lavorando con coppie che si avvicinano ai riferimenti nominali otteniamo un valore che per la prova 2 è più che accettabile e per la prova 1 si trova molto vicino al limite.

Si potrebbe concludere dunque che il motore non risulta essere sovradimensionato in coppia ma bensì che la gran parte della potenza installata non viene sfruttata.

Per rendere dunque il processo più efficace una valida alternativa potrebbe essere quella di scegliere un riduttore con rapporto di riduzione più alto rispetto a quello montato. Aumentando infatti il rapporto si consentirebbe l'uso di un motore con coppia nominale minore, conseguentemente più piccolo ed economico, che possa sfruttare gran parte della sua potenza totale.

6.2 Risultati dell'analisi del transitorio e dell'energia specifica

L'analisi dei transitori ha evidenziato dei risultati diversi in base alla variazione imposta. A portata costante con il gradino di velocità si raggiunge il picco di coppia in pochi secondi (2 s, Figura 5.15), per poi scendere verso un livello inferiore rispetto a quello di partenza. Questo fenomeno, come indicato precedentemente, dipende dal grado di riempimento delle viti che diminuisce con l'aumentare della velocità. L'aumento della portata a velocità costante produce invece un andamento con tempi di salita 10 volte maggiori rispetto al caso precedente (20-22 s Figura 5.18). Questi valori non influenzano direttamente il dimensionamento del motore ma quello del limitatore di sicurezza. L'analisi del *ripple* ci segnala che le oscillazioni sono in fase e legate al carico di processo. Agli ordini bassi, 1 e 2, si può notare una differenza di circa 10 Nm tra albero destro e sinistro, compatibile con una variazione del traferro e dunque un montaggio non simmetrico.

L'analisi della ripartizione invece individua una prevalenza dell'albero sinistro sotto carico e di quello destro a vuoto.

La valutazione dell'energia specifica ha invece restituito dei risultati utilizzabili solo in minima parte. L'andamento atteso si è verificato solo nel caso a portata costante con un aumento del valore della SME. Nel caso a velocità costante invece, i risultati non rispettano gli andamenti attesi: un comportamento di questo tipo è riconducibile alla non precisa misurazione della portata durante le fasi di transitorio.

6.3 Limiti e sviluppi futuri

I risultati devono comunque essere letti alla luce di alcuni limiti. Innanzitutto, i vincoli legati ad un impianto in produzione che hanno impedito la scelta ottimale dei punti di lavoro e la possibilità di spingersi verso velocità più alte.

Pesano inoltre l'uso di un solo materiale e l'incertezza sulle portate effettive. Infine, anche il montaggio non perfetto del giunto sensorizzato ha influito sulle misure in modo non trascurabile.

Oltre a questi limiti facilmente superabili troviamo poi limiti sul segnale. È infatti necessario trovare il modo di utilizzare i dati del giunto sensorizzato durante tutto l'arco di produzione; tuttavia, a 100 Hz la quantità di dati raccolti sarebbe estremamente elevata. Ulteriore problema risulta essere nel campionamento dei log del server che risultano troppo lenti e presentano imperfezioni.

Gli sviluppi futuri partono quindi da questi limiti. Si potrebbe ripartire da una nuova campagna di misurazioni effettuata su un periodo più lungo con la possibilità di studiare il comportamento, anche variando il materiale lavorato ed effettuando prove che sfruttino velocità maggiori. Inoltre ci si potrebbe accertare del corretto posizionamento del giunto sensorizzato e trovare il modo di aumentare la frequenza di campionamento dei log da server. Infine, si potrebbe idealmente confrontare l'azionamento misurato ad uno che, in condizioni di lavoro simili, presenti un rapporto di riduzione maggiore con un drive di dimensioni minori.

Bibliografia

[1] NUZZO Stefano, *Appunti del corso di Azionamenti Elettrici*, Ingegneria del Veicolo, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, a.a. 2024/2025.

[2] DRURY, Bill. *Control techniques drives and controls handbook*. IET, 2001.

[3] A HUGHES, Austin; DRURY, Bill. *Electric motors and drives*. London: Newnes, 2013.

[4] VAS, Peter. *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford University press, 1998.

[5] DA COSTA BORTONI, Edson. *Are my motors oversized?* Energy Conversion and Management, 2009, 50.9: 2282-2287.

[6] SAIDEL, M. A.; RAMOS, M. C. E. S.; ALVES, S. S. *Assessment and optimization of induction electric motors aiming energy efficiency in industrial applications.* In: The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010. IEEE, 2010. p. 1-6.

[7] VAS, Peter. *Electrical machines and drives: a space-vector theory approach*. Oxford university press, 1993.

[8] AMANDUS, Derian Endo; RIYADI, Slamet; PRATOMO, Leonardus Heru. *Design and Implementation of a Three-Phase Asynchronous Motor Drive Based on a Single Chip Three-Phase Bridge Driver IR 2132.* International Journal of Engineering and Applied Physics, 2023, 4.1: 891-900.

[9] RAHMAN, Tawfikur; MOTAKABBER, S. M. A.; IBRAHIMY, M. I. *Design of a three phase inverter.* In: 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE). IEEE, 2016. p. 155-160.

[10] HART, Daniel W. *Power electronics*. McGraw-Hill Education, 2011.

[11] KHARJULE, Saurabh. *Voltage source inverter.* In: 2015 International Conference on Energy Systems and Applications. IEEE, 2015. p. 537-542.

[12] BUJA, Giuseppe S.; KAZMIERKOWSKI, Marian P. *Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey.* IEEE Transactions on industrial electronics, 2004, 51.4: 744-757.

[13] RASHID, Muhammad H. (ed.). *Power electronics handbook*. Butterworth-heinemann, 2017.

[14] BATKHISHIG, Battur, et al. *PWM techniques for two-level voltage source inverters: A comparative study.* IEEE Access, 2025, 13: 86235-86255.

[15] VU, Duc Binh, et al. *Optimal Design of a Two-Stage Helical Gear Reducer with Split Output Stage: A Multi-Objective Approach Based on NSGA-II and TOPSIS.* Engineering, Technology & Applied Science Research, 2025, 15.4: 25993-26000.

[16] LITVIN, Faydor L. *Development of gear technology and theory of gearing*. National Aeronautics and Space Administration, Cleveland, OH. Lewis Research Center, 1997.

[17] MICHALEC, George, et al. *Elements of metric gear technology.* Stock Drive Products & Sterling Instrument, 2009.

[18] REXNORD AUTOGARD, *F400 Series Torque Limiter Metric and imperial review*, Catalogo, 2022.

[19] WANG, Shuangyi, et al. *Analysis of a customized clutch joint designed for the safety management of an ultrasound robot.* Applied Sciences, 2019, 9.9: 1900.

[20] CRISTACHE, Cristian, et al. *Aeronautical magnetic torque limiter for passive protection against overloads.* Machines, 2016, 4.3: 17.

[21] Melectric Systems, *Magnetoelastic torque sensors,* schema Tecnico.

[22] GARSHELIS, Ivan J. *Circularly magnetized non-contact torque sensor and method for measuring torque using same*. U.S. Patent No 5,520,059, 1996.

[23] CALKINS, Frederick T.; FLATAU, Alison B.; DAPINO, Marcelo J. *Overview of magnetostrictive sensor technology.* Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18.10: 1057-1066.

[24] CHEN, Y., et al. *Metal-bonded Co-ferrite composites for magnetostrictive torque sensor applications.* IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35.5: 3652-3654.

[25] LEE, Seong-Jae. *Magnetoelastic torque sensor with ambient field rejection*. U.S. Patent No 8,087,304, 2012.

[26] Siemens AG, *SINAMIC G120,* Catalogo, 2016.

[27] Oemer, *4.7 L-Q water cooled AC motors,* Catalogo GC01, 2024.

[28] Zambello Riduttori, *Catalogo Riduttori TST,* Catalogo G4, 2022.

[29] LUISE, Marco, et al. *Teoria dei segnali*. McGraw-Hill Education (Italy) srl, 2025.

[30] BARBIERI Marco, *Appunti del corso di Meccanica delle Vibrazioni*, Ingegneria del Veicolo, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, a.a. 2024/2025

[31] GODAVARTI, S.; KARWE, M. V. *Determination of specific mechanical energy distribution on a twin-screw extruder.* Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 67.4: 277-287.

[32] OPPENHEIM, Alan V., et al. *Signals and systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 1997.

[33] BOLZERN, Paolo Giuseppe Emilio, et al. *Fondamenti di controlli automatici*. McGraw-Hill, 2008.

II. Appendici

Programma sviluppato per la raccolta dei dati da Server tramite protocollo OPC-UA.

```
import argparse
import csv
import logging
import signal
import sys
import time
from datetime import datetime
from pathlib import Path
from typing import Any, Optional

try:
    from opcua import Client, ua
except ImportError:
    print(
        "\n[ERROR] Required dependency not found.\n"
        "Please install the OPC UA library:\n\n"
        "    pip install opcua\n"
    )
    sys.exit(1)

# Logging configuration
# ---------------------------------------------------------------------------
logging.basicConfig(
    level=logging.INFO,
    format="%(asctime)s [%(levelname)s] %(message)s",
    datefmt="%Y-%m-%d %H:%M:%S",
)
logger = logging.getLogger(__name__)

# Suppress verbose logs from the OPC UA library
logging.getLogger("opcua").setLevel(logging.WARNING)
DATA_NS = 3

# shutdown handler
# ---------------------------------------------------------------------------
class ShutdownHandler:
    """Handles SIGINT / SIGTERM to allow a clean exit."""

    def __init__(self) -> None:
        self._running = True
        signal.signal(signal.SIGINT, self._handle)
        signal.signal(signal.SIGTERM, self._handle)

    def _handle(self, signum: int, frame: Any) -> None:
        logger.info("Shutdown signal received (signal %d). Stopping acquisition...",
signum)
        self._running = False

    @property
    def is_running(self) -> bool:
        return self._running

# OPC UA variable discovery
# ---------------------------------------------------------------------------
def discover_variables(
    node: Any,
    max_depth: int = 10,
    skip_server_variables: bool = True,
    _current_depth: int = 0,
    _results: Optional[list] = None,
) -> list:
    """
```

```
    Parameters
    ----------
    node : opcua.Node
        Starting node for the recursive exploration.
    max_depth : int
        Maximum recursion depth to prevent infinite loops.
    skip_server_variables : bool
        If True, excludes OPC UA server internal variables (namespace index < 2)
        and returns only process/machine variables.
    _current_depth : int
        Internal counter for recursion depth (do not set manually).
    _results : list or None
        Internal accumulator (do not set manually).

    Returns
    -------
    list[opcua.Node]
        List of discovered, readable Variable nodes.
    """
    if _results is None:
        _results = []

    if _current_depth > max_depth:
        return _results

    try:
        children = node.get_children()
    except Exception:
        return _results

    for child in children:
        try:
            node_class = child.get_node_class()

            if node_class == ua.NodeClass.Variable:
                # Tieni solo le variabili del namespace dei dati (i DB del PLC)
                if child.nodeid.NamespaceIndex != DATA_NS:
                    continue

                # Verifica che sia leggibile e leggi il valore
                try:
                    val = child.get_value()
                except Exception:
                    logger.debug("Variabile non leggibile: %s", child.nodeid)
                    continue

                #   Scarta   icone/blob   (bytes)   e   strutture   UDT/telegrammi
(ExtensionObject)
                if isinstance(val, (bytes, bytearray, ua.ExtensionObject)):
                    continue

                _results.append(child)

            elif node_class == ua.NodeClass.Object:
                discover_variables(
                    child,
                    max_depth=max_depth,
                    skip_server_variables=skip_server_variables,
                    _current_depth=_current_depth + 1,
                    _results=_results,
                )
        except Exception:
            continue

    return _results
# Node metadata helpers
```

```
# ------------------------------------------------------------------------
def get_display_name(node: Any) -> str:
    """Returns the human-readable display name of an OPC UA node."""
    try:
        return node.get_display_name().Text
    except Exception:
        return str(node.nodeid)


def get_node_path(node: Any) -> str:
    """
    Builds the full hierarchical path of a node by traversing parent nodes.
    Example output: 'Objects/Machine/Sensors/Temperature'
    """
    try:
        segments = []
        current = node
        for _ in range(20):
            segments.append(current.get_display_name().Text)
            parent = current.get_parent()
            if parent is None:
                break
            current = parent
        segments.reverse()
        return "/".join(segments)
    except Exception:
        return get_display_name(node)


def build_unique_headers(variables: list, use_full_path: bool = False) -> list[str]:
    """
    Generates unique column headers from a list of OPC UA variable nodes.
    Appends a numeric suffix in case of duplicate names.

    Parameters
    ----------
    variables : list[opcua.Node]
        List of discovered variable nodes.
    use_full_path : bool
        If True, uses the full node path as column header instead of the display
name.

    Returns
    -------
    list[str]
        List of unique header strings.
    """
    raw_names = [get_node_path(v) if use_full_path else get_display_name(v) for v in
variables]

    seen: dict[str, int] = {}
    unique: list[str] = []
    for name in raw_names:
        if name in seen:
            seen[name] += 1
            unique.append(f"{name}_{seen[name]}")
        else:
            seen[name] = 0
            unique.append(name)

    return unique
# Data acquisition
# ------------------------------------------------------------------------
def read_all_variables(variables: list) -> list[Any]:
    """
    Reads the current value of each variable node.
    Returns None for variables that cannot be read at the time of sampling.
    """
```

```
    values: list[Any] = []
    for var in variables:
        try:
            val = var.get_value()
            # Convert complex types to string for CSV compatibility
            if isinstance(val, (list, tuple, bytearray, bytes)):
                val = str(val)
            values.append(val)
        except Exception:
            values.append(None)
    return values


# ------------------------------------------------------------------------------
# CSV writer
# ------------------------------------------------------------------------------
class CSVWriter:
    """
    Manages the CSV output file with proper resource handling.

    Parameters
    ----------
    filepath : str
        Path to the output CSV file.
    headers : list[str]
        Column headers (variable names).
    append : bool
        If True, appends to an existing file without rewriting headers.
    delimiter : str
        CSV column delimiter (default: ';' for European Excel compatibility).
    """

    def __init__(
        self,
        filepath: str,
        headers: list[str],
        append: bool = False,
        delimiter: str = ";",
    ) -> None:
        self.filepath = filepath
        self.delimiter = delimiter
        self._row_count = 0

        file_exists = append and Path(filepath).exists()
        mode = "a" if append else "w"

        self._file = open(filepath, mode, newline="", encoding="utf-8")
        self._writer = csv.writer(self._file, delimiter=delimiter)

        # Write header row only for new files
        if not file_exists:
            self._writer.writerow(["timestamp"] + headers)
            self._file.flush()

    def write_sample(self, timestamp: str, values: list[Any]) -> None:
        """Writes a single sample (one row) to the CSV file."""
        self._writer.writerow([timestamp] + values)
        self._file.flush()
        self._row_count += 1

    @property
    def row_count(self) -> int:
        return self._row_count

    def close(self) -> None:
        """Closes the underlying file handle."""
        try:
            self._file.close()
```

```
        except Exception:
            pass

# Main acquisition loop
# ------------------------------------------------------------------------------
def run_acquisition(args: argparse.Namespace) -> None:
    """
    Main function: connects to the OPC UA server, discovers variables,
    and runs the periodic data acquisition loop.
    """
    # --- Output file path ---
    if args.output is None:
        timestamp_str = datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S")
        args.output = f"opcua_data_{timestamp_str}.csv"

    # --- OPC UA client setup ---
    client = Client(args.url)

    if args.user and args.password:
        client.set_user(args.user)
        client.set_password(args.password)
        logger.info("Authentication credentials configured.")

    logger.info("Connecting to %s ...", args.url)

    try:
        client.connect()
    except Exception as exc:
        logger.error("Connection failed: %s", exc)
        sys.exit(1)

    logger.info("Connection established successfully.")

    shutdown = ShutdownHandler()
    csv_writer = None
    variables = []

    try:
        # --- Variable discovery ---
        if args.root:
            root_node = client.get_node(args.root)
            logger.info("Browsing from custom root node: %s", args.root)
        else:
            root_node = client.get_objects_node()
            logger.info("Browsing from default Objects node.")

        include_server_vars = args.all
        variables = discover_variables(
            root_node,
            max_depth=args.max_depth,
            skip_server_variables=not include_server_vars,
        )

        if not variables:
            if not include_server_vars:
                logger.warning(
                    "No process variables found. "
                    "Try --all to include server variables, "
                    "or specify a different --root node."
                )
            else:
                logger.warning(
                    "No variables found. "
                    "Try a different --root node or increase --max-depth."
                )
            return

        # --- Build column headers ---
```

```
    headers = build_unique_headers(variables, use_full_path=args.use_path)

    logger.info("Discovered %d variables:", len(variables))
    for i, (var, name) in enumerate(zip(variables, headers), 1):
        logger.info("  %3d. %-40s [%s]", i, name, var.nodeid)

    logger.info("Output file:          %s", args.output)
    logger.info("Sample interval:      %.2f s", args.interval)
    if args.duration:
        logger.info("Acquisition duration: %.1f s", args.duration)
    else:
        logger.info("Acquisition duration: unlimited (press Ctrl+C to stop)")

    # --- Initialize CSV ---
    csv_writer = CSVWriter(
        filepath=args.output,
        headers=headers,
        append=args.append,
    )

    # --- Acquisition loop ---
    start_time = time.time()

    while shutdown.is_running:
        # Check duration limit
        elapsed = time.time() - start_time
        if args.duration and elapsed >= args.duration:
            logger.info("Configured duration (%.1f s) reached.", args.duration)
            break

        # Sample all variables
        ts = datetime.now().isoformat(timespec="milliseconds")
        values = read_all_variables(variables)
        csv_writer.write_sample(ts, values)

        # Progress feedback
        count = csv_writer.row_count
        if count <= 3:
            preview = ", ".join(
                f"{headers[i]}={values[i]}"
                for i in range(min(3, len(values)))
            )
            if len(values) > 3:
                preview += " ..."
            logger.info("Sample #%d: %s", count, preview)
        elif count % 10 == 0:
            logger.info(
                "Progress: %d samples collected (%.1f s elapsed)",
                count, elapsed,
            )

        time.sleep(args.interval)

except Exception as exc:
    logger.error("Error during acquisition: %s", exc)
    raise

finally:
    # --- Cleanup ---
    total_samples = csv_writer.row_count if csv_writer else 0

    if csv_writer:
        csv_writer.close()

    try:
        client.disconnect()
        logger.info("Disconnected from server.")
    except Exception:
```

```
            pass

        logger.info("=" * 60)
        logger.info("ACQUISITION SUMMARY")
        logger.info("  Samples collected : %d", total_samples)
        logger.info("  Variables tracked : %d", len(variables))
        logger.info("  Output file       : %s", args.output)
        logger.info("=" * 60)


# ---------------------------------------------------------------------------
# CLI argument parser
# ---------------------------------------------------------------------------
def parse_arguments() -> argparse.Namespace:
    """Parses and validates command-line arguments."""

    parser = argparse.ArgumentParser(
        description="OPC UA Data Acquisition Tool - reads process variables and
exports to CSV.",
        formatter_class=argparse.RawDescriptionHelpFormatter,
        epilog="""
Examples:
  %(prog)s --url opc.tcp://192.168.1.50:4840
  %(prog)s --url opc.tcp://192.168.1.50:4840 --interval 0.5 --duration 300
  %(prog)s --url opc.tcp://192.168.1.50:4840 --root "ns=2;s=Line1" -o line1_data.csv
  %(prog)s --url opc.tcp://192.168.1.50:4840 -u operator -p mypassword
        """,
    )

    # Connection
    conn_group = parser.add_argument_group("Connection")
    conn_group.add_argument(
        "--url", required=True,
        help="OPC UA server endpoint (e.g., opc.tcp://192.168.1.50:4840)",
    )
    conn_group.add_argument(
        "-u", "--user", default=None,
        help="Username for authentication (optional)",
    )
    conn_group.add_argument(
        "-p", "--password", default=None,
        help="Password for authentication (optional)",
    )

    # Acquisition
    acq_group = parser.add_argument_group("Acquisition")
    acq_group.add_argument(
        "-i", "--interval", type=float, default=1.0,
        help="Sampling interval in seconds (default: 1.0)",
    )
    acq_group.add_argument(
        "-d", "--duration", type=float, default=None,
        help="Acquisition duration in seconds (default: unlimited, stop with
Ctrl+C)",
    )

    # Browsing
    browse_group = parser.add_argument_group("Address Space Browsing")
    browse_group.add_argument(
        "-r", "--root", default=None,
        help='Root node for browsing (e.g., "ns=2;s=MyDevice"). Default: Objects
node.',
    )
    browse_group.add_argument(
        "--max-depth", type=int, default=10,
        help="Maximum browsing depth (default: 10)",
    )
    browse_group.add_argument(
```

```
        "--all", action="store_true",
        help="Include OPC UA server internal variables (excluded by default)",
    )

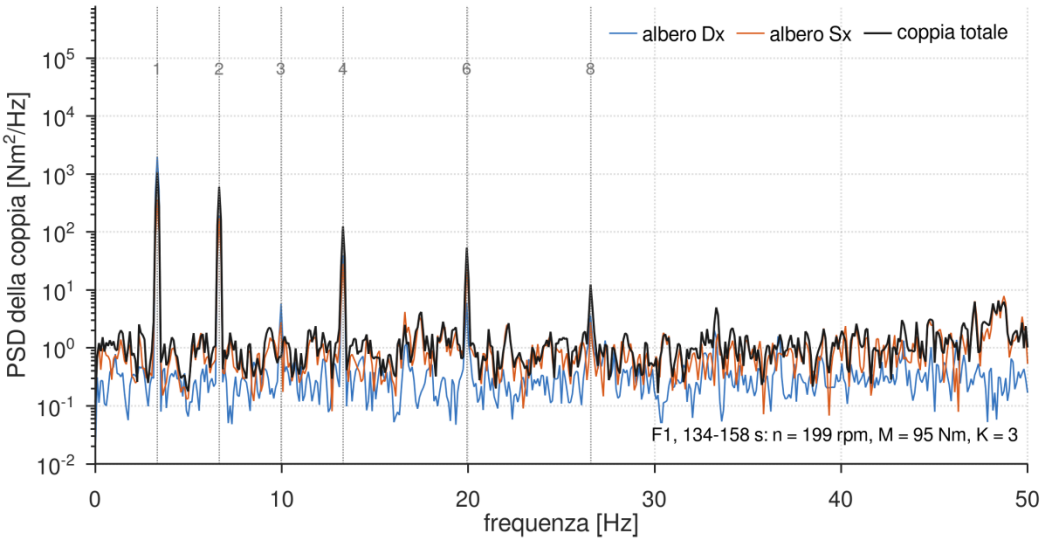
    # Output
    out_group = parser.add_argument_group("Output")
    out_group.add_argument(
        "-o", "--output", default=None,
        help="Output CSV file path (default: opcua_data_YYYYMMDD_HHMMSS.csv)",
    )
    out_group.add_argument(
        "--append", action="store_true",
        help="Append to an existing CSV file instead of overwriting",
    )
    out_group.add_argument(
        "--use-path", action="store_true",
        help="Use full node path as column header instead of display name",
    )

    return parser.parse_args()

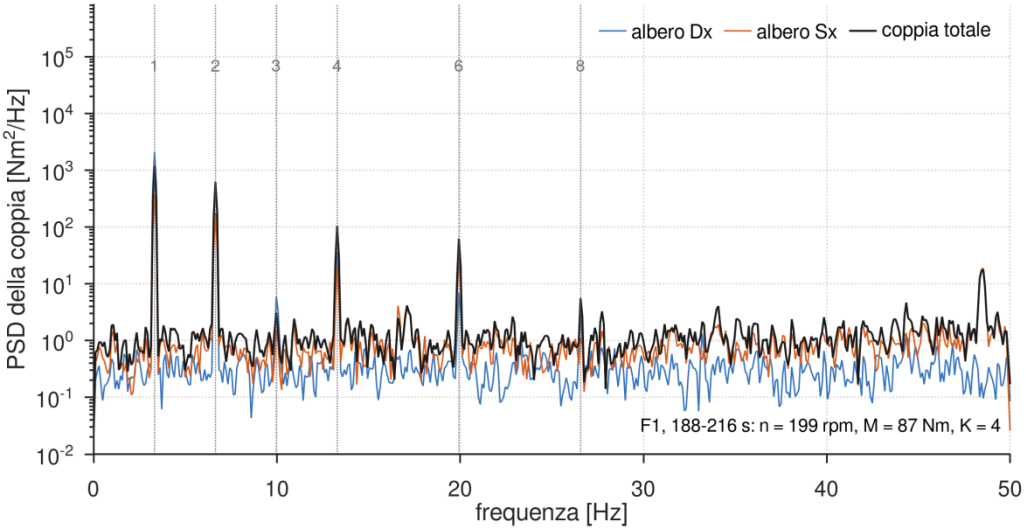
# Entry point
# ------------------------------------------------------------------------------
if __name__ == "__main__":
    args = parse_arguments()
    run_acquisition(args)
```

III. Grafici

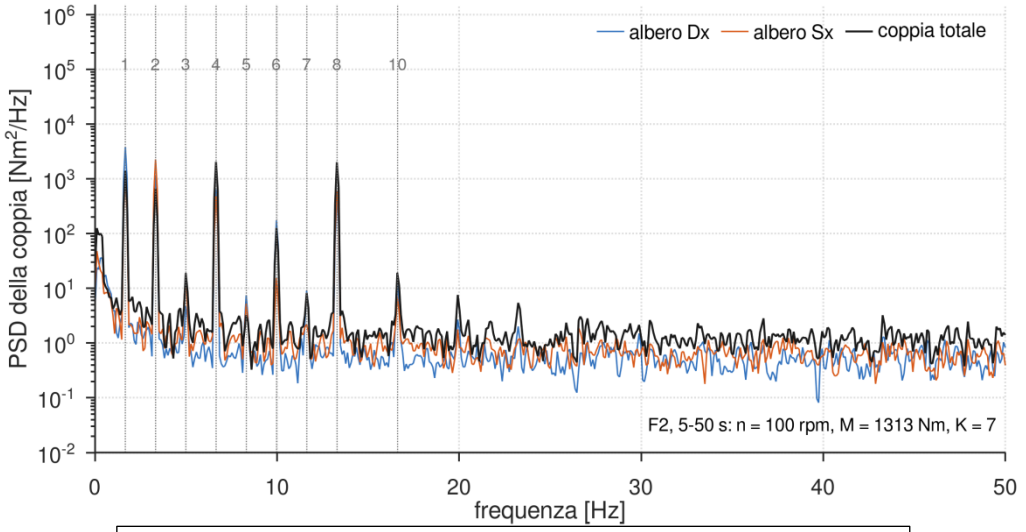
Per la prova 1:



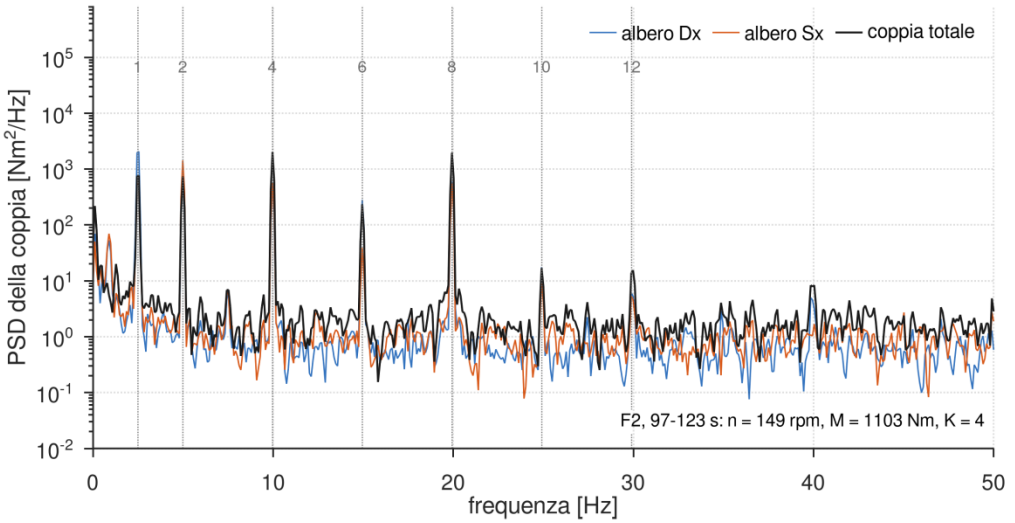
A


albero Dx
albero Sx
coppia totale
1
2
3
4
6
8
PSD della coppia [Nm²/Hz]
F1, 188-216 s: n = 199 rpm, M = 87 Nm, K = 4
frequenza [Hz]

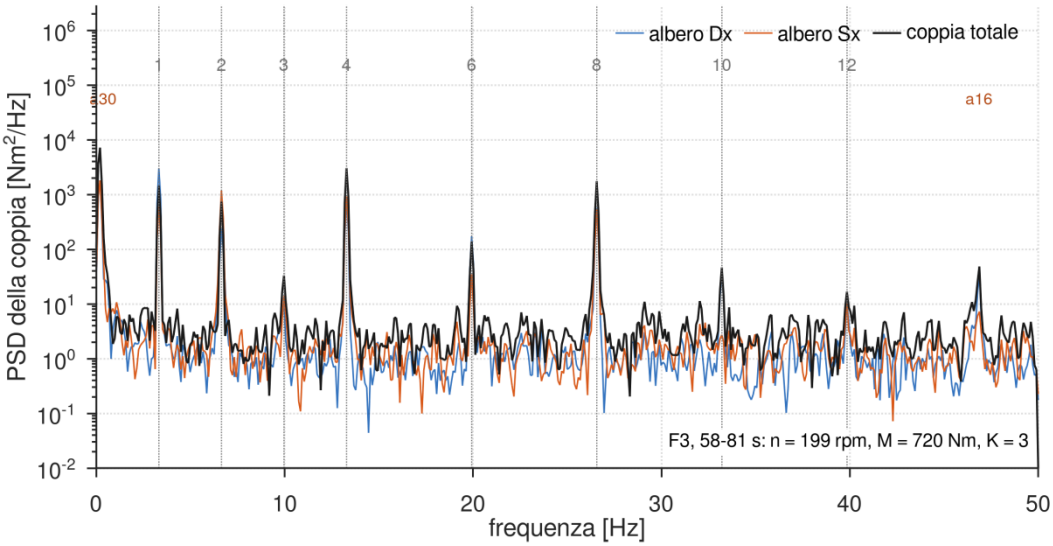
B


albero Dx
albero Sx
coppia totale
1
2
3
4
5
6
7
8
10
PSD della coppia [Nm²/Hz]
F2, 5-50 s: n = 100 rpm, M = 1313 Nm, K = 7
frequenza [Hz]

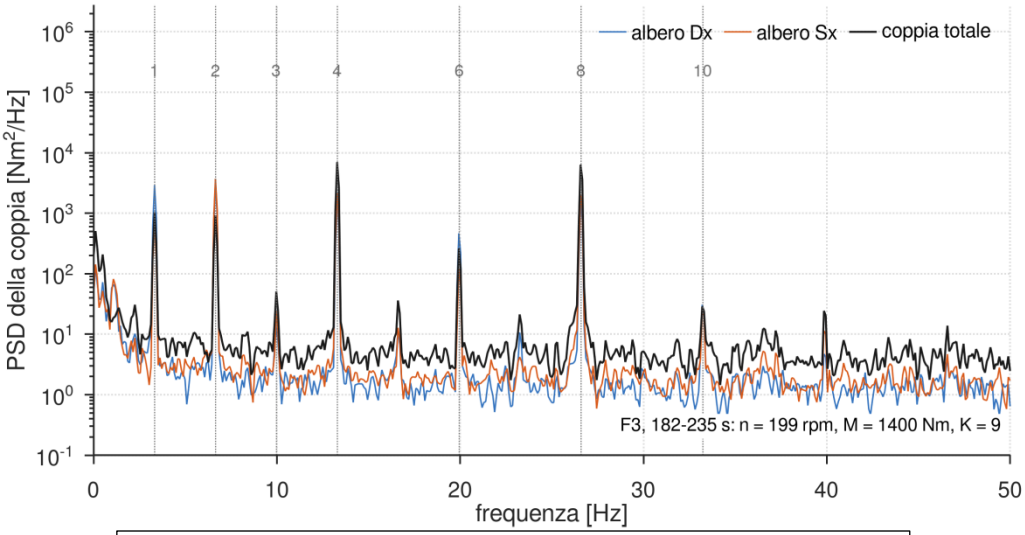
C


albero Dx
albero Sx
coppia totale
1
2
4
6
8
10
12
PSD della coppia [Nm²/Hz]
F2, 97-123 s: n = 149 rpm, M = 1103 Nm, K = 4
frequenza [Hz]

D



E

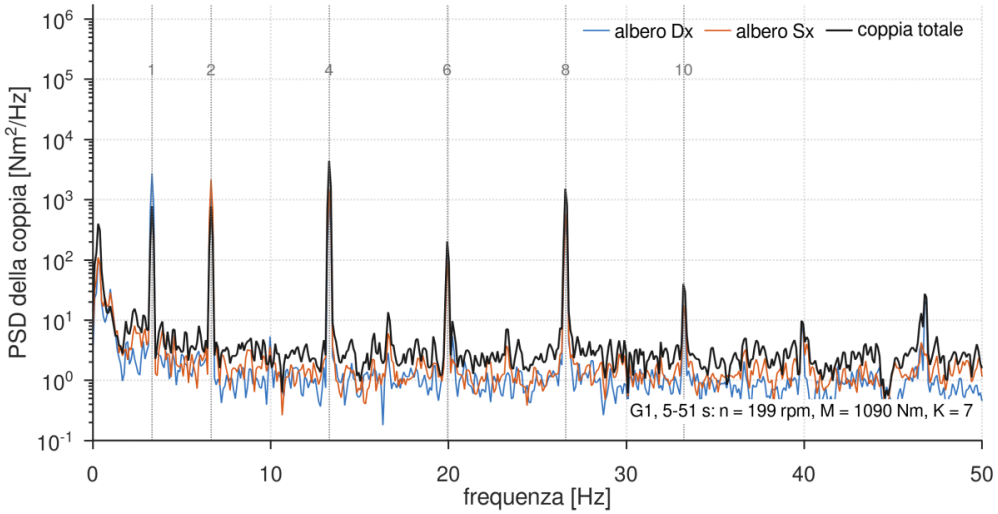


F

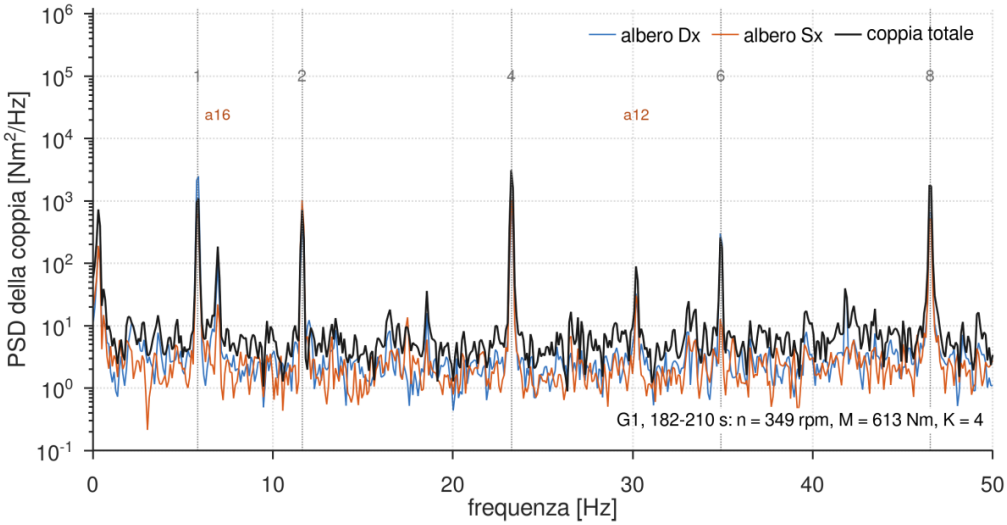
Dove:

- A e B indicano la prova a vuoto.
- C e D indicano la prova a portata costante.
- E e F indicano la prova a velocità costante.

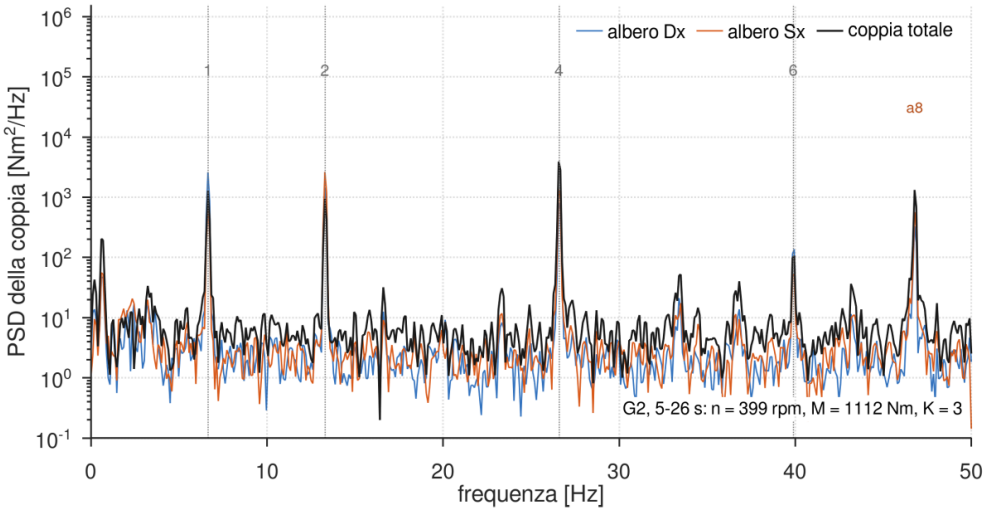
Per la prova 2:


albero Dx
albero Sx
coppia totale
1
2
4
6
8
10
PSD della coppia [Nm²/Hz]
G1, 5-51 s: n = 199 rpm, M = 1090 Nm, K = 7
frequenza [Hz]

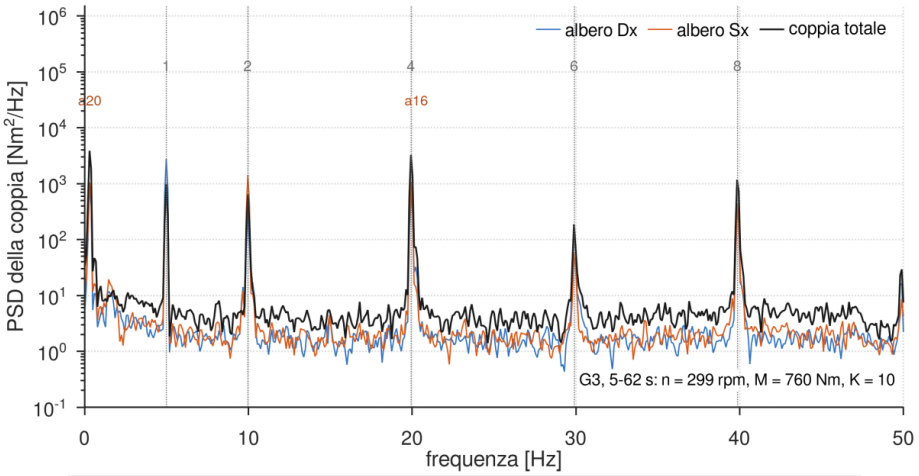
G


albero Dx
albero Sx
coppia totale
1
2
4
6
8
a16
a12
PSD della coppia [Nm²/Hz]
G1, 182-210 s: n = 349 rpm, M = 613 Nm, K = 4
frequenza [Hz]

H


albero Dx
albero Sx
coppia totale
1
2
4
6
a8
PSD della coppia [Nm²/Hz]
G2, 5-26 s: n = 399 rpm, M = 1112 Nm, K = 3
frequenza [Hz]

I



L

Dove:

- G e H indicano la prova a vuoto.
- I indica la prova a portata costante.
- L indica la prova a velocità costante.