



INFRA-P TEST-eDRIVE

Politecnico di Torino

**Specifiche tecniche per un banco prova per motori elettrici
TEST-eDRIVE**



Indice

Sommario

INDICE	2
1. INTRODUZIONE.....	3
1.1. DESCRIZIONE DEL BANCO	3
1.2. TAGLIA E PRESTAZIONI NOMINALI MINIME (REQUISITO MINIMO)	3
2. STRUTTURA MECCANICA E COMPARTIMENTAZIONE	4
2.1. TELAIO E SQUADRE	5
2.2. STRUTTURA DI COMPARTIMENTAZIONE	6
3. AZIONAMENTO FRENO DM	6
4. SISTEMA DI SUPERVISIONE E CONTROLLO	7
4.1. INTERFACCIA UTENTE.....	7
4.2. I/O ACCESSORI	7
4.3. MODALITÀ SINGOLO SET POINT O MAPPATURA	8
4.4. TIPI DI CONTROLLO PREVISTI	8
4.4.1. <i>Controllo di coppia open loop</i>	8
4.4.2. <i>Controllo di coppia closed loop</i>	9
4.4.3. <i>Controllo di velocità</i>	10
4.4.4. <i>Controllo di coppia in modalità virtual load (opzionale)</i>	10
4.4.5. <i>Controllo di velocità con feedforward di coppia (opzionale)</i>	12
5. SISTEMA DI CONDIZIONAMENTO TERMICO	13
5.1. SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO DELLA MACCHINA FRENO DM.....	13
5.2. SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO/RISCALDAMENTO DELLA MACCHINA IN TEST MUT.....	14
6. SENSORI E TRASDUTTORI	14
6.1. TORSIOMETRO.....	14
6.2. ACCELEROMETRO ANGOLARE (OPZIONALE).....	14
7. RIASSUNTO DEI REQUISITI MINIMI ED OPZIONALI.....	16



1. Introduzione.

Il banco TEST-eDRIVE, è un sistema per il test per macchine elettriche rotanti. Questo documento descrive il sistema e le sue parti, le modalità dei test che il banco deve essere in grado di eseguire, ed i requisiti minimi di prestazione del banco.

1.1. Descrizione del Banco

La macchina in prova è indicata con la sigla **MUT (machine under test)**, non fa parte della fornitura, e non è identificata univocamente in questa fase. Il banco deve essere in grado di testare MUT di taglia e dimensioni diverse.

I componenti hardware e software del banco sono:

- Struttura meccanica per il sostegno della macchina in test e della macchina freno
- Involucro di compartimentazione del banco
- Macchina ed Azionamento freno (indicati con l'acronimo **DM: Driving Machine**)
- Sistema di supervisione e controllo del banco prova
- Sistema di condizionamento termico
- Sistema di misura

1.2. Taglia e Prestazioni nominali minime (requisito minimo)

Le prestazioni **nominali continuative** richieste della DM sono indicate in Tabella 1, le curve nominali corrispondenti sono rappresentate in Figura 1. L'azionamento DM presenta una zona di funzionamento a coppia costante fino alla velocità base (N_b) ed una a potenza costante dalla velocità base fino alla massima velocità (N_{max}).

La descrizione delle modalità di funzionamento, sistemi di misura, struttura meccanica, ecc. è demandata ai successivi capitoli.

Tabella 1. Prestazioni nominali continuative

T_n	Coppia Nominale	≥ 200	Nm
P_n	Potenza nominale (da 6000 a 20000 rpm)	≥ 125	kW
N_b	Velocità base	≥ 5968	RPM
N_{max}	Velocità massima operativa	≥ 20000	RPM
$N_{max OS}$	Overspeed	$= 22.000$	RPM

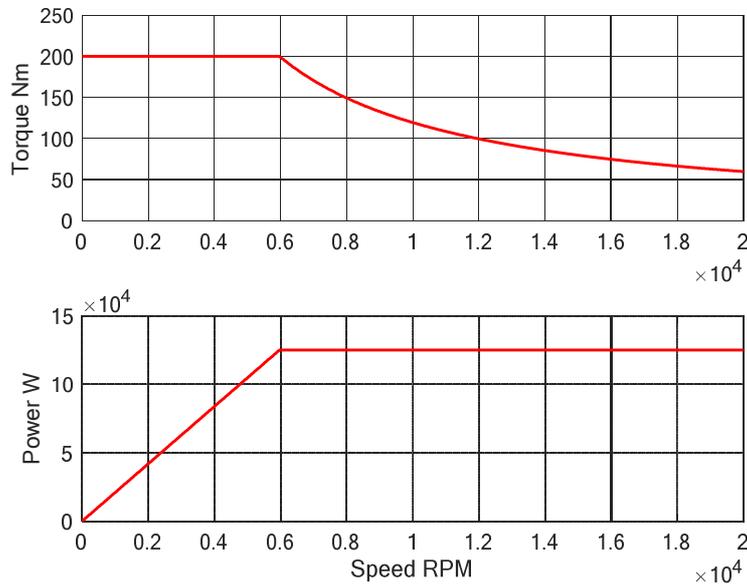


Figura 1 Curve limite di funzionamento della DM.

2. Struttura meccanica e compartimentazione

Il banco sarà installato in una cella di prova con un involucro di compartimentazione che funge da riparo di sicurezza. L'involucro è parte della fornitura. La cella sarà posta nel laboratorio aperto la cui pianta è riportata in Figura 2, nell'area indicata con un quadrato blu. La dimensione del laboratorio è di 416 m², mentre l'area indicata in blu è di 25 m².

Il banco test è montato a pavimento e provvisto di un sistema di smorzamento delle vibrazioni. La macchina freno DM e la macchina in test MUT sono montate su squadre. A tal scopo si è pensato di suddividere il banco in due parti distinte:

- Struttura di acciaio da vincolare al pavimento
- Telaio e Squadre
- Struttura di compartimentazione

Il Telaio o la struttura-basamento devono prevedere elementi antivibranti in modo da mitigare la propagazione delle vibrazioni al pavimento della sala prove.

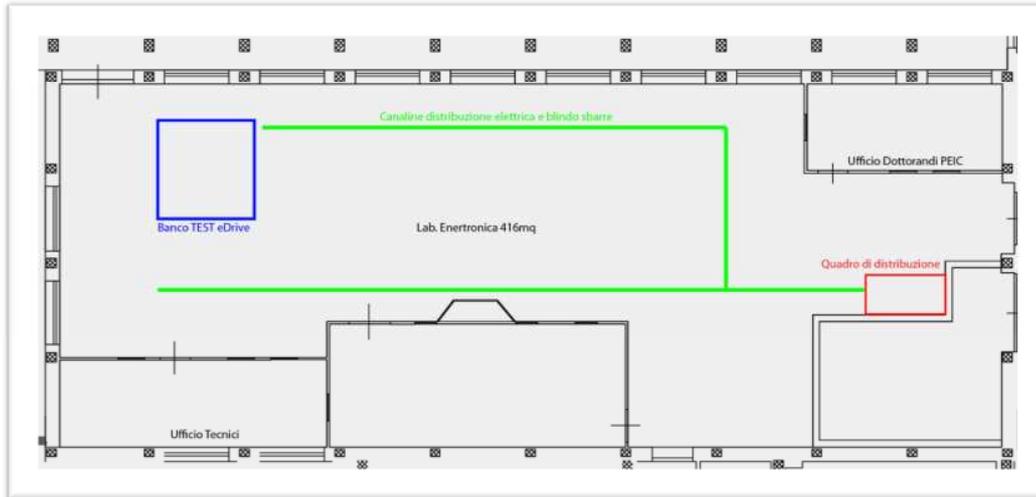


Figura 2 Pianta del Laboratorio di Enertronica del Politecnico di Torino ed arc prevista per il banco TEST eDrive

2.1. Telaio e Squadre

Considerata la velocità massima di 20.000 rpm (**22.000 rpm overspeed**), le macchine oggetto di test saranno tipologia per l'installazione flangiata. In questo modo viene garantito per costruzione l'allineamento tra il sistema di fissaggio e l'asse dell'albero motore. La struttura meccanica del banco deve quindi garantire l'allineamento degli assi delle macchine rotanti DM e MUT, per tolleranza di costruzione. Inoltre, deve essere in grado di resistere le sollecitazioni che vengono a crearsi durante i test, senza deformarsi in modo significativo.

Considerando la taglia in coppia dell'azionamento DM si richiede che il diametro di riscontro per la MUT sia pari a **250 mm**, quindi la squadra che supporta il MUT deve disporre di un buco di riscontro di diametro 250mm.

La squadra del MUT deve poter scorrere orizzontalmente sul telaio per permettere la facile installazione del MUT ed il successivo impegno dell'albero MUT nel sistema di trasmissione e trasduzione di coppia. Il sistema di traslazione orizzontale deve garantire per tolleranza di costruzione l'allineamento degli assi rotanti. Una volta in posizione, la squadra deve potere essere fissata al telaio, per esempio tramite viti. In Figura 3 è riportata un'immagine indicativa della squadra lato MUT.

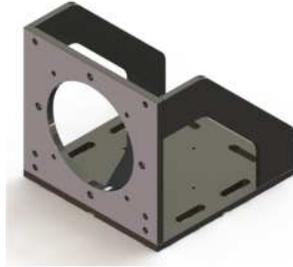


Figura 3 Squadra porta MUT

2.2. Struttura di compartimentazione

Il banco di test inteso come la struttura meccanica che supporta la MUT e la DM deve essere interamente contenuto all'interno di un contenitore atto a confinare le parti rotanti. Il drive di controllo della MUT (che non fa parte della fornitura) è posto all'esterno del sistema di compartimentazione, come anche il sistema di acquisizione e misura.

Il sistema di compartimentazione deve essere però facilmente rimovibile o apribile per permettere la facile installazione della MUT sul banco, utilizzando sistemi di sollevamento opportuni (non inclusi).

La struttura di compartimentazione deve prevedere fori passacavo opportunamente posizionati e disponibili all'utente, per il passaggio dei cavi di alimentazione e misura della MUT e dei tubi del sistema di raffreddamento a liquido.

Inoltre, devono essere presente delle aperture per il sistema di ventilazione vedi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

3. Azionamento freno DM

In Figura 4 è riportato lo schema di principio dell'azionamento del DM. La rete di alimentazione disponibile per l'azionamento DM è trifase con tensione nominale concatenata 400 VRMS, trifase con neutro e conduttore di terra.

Le prestazioni nominali minime dell'azionamento della macchina freno DM sono riportate in Tabella 1 ed esplicitate in Figura 1. L'azionamento DM deve presentare funzionamento sui quattro quadranti, ovvero con velocità e coppia sia positive che negative. È richiesto quindi che lo stadio di alimentazione della DM deve essere di tipo **active front end (AFE)**, in modo da garantire flussi di potenza bidirezionali da e verso la rete trifase di alimentazione. Per sicurezza, è richiesto che **l'azionamento DM disponga di una gamba freno o modulo di frenatura elettrica.**

La tipologia di controllo implementata a bordo del drive di controllo della DM deve essere tale da garantire un buon controllo di coppia senza feedback da torsionmetro (modalità nel seguito indicata come **open-loop di coppia**) su tutto il range di funzionamento di coppia e di velocità. Si richiede che l'errore di coppia sia contenuto entro il 4%.



Opzionalmente, il DC-Link del drive DM deve essere accessibile per poter eventualmente alimentare il drive della MUT direttamente in DC, se compatibile con la tensione di alimentazione dell'azionamento DM.

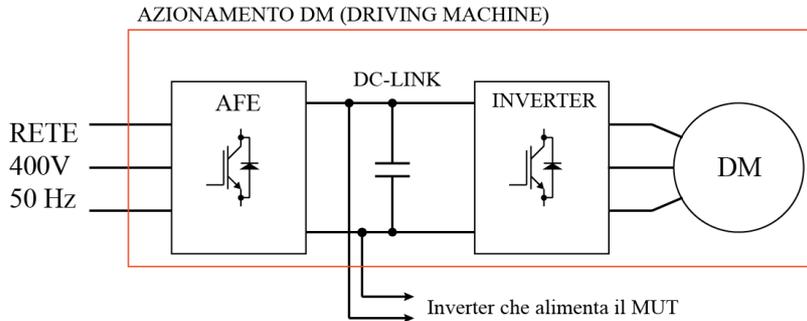


Figura 4 Descrizione dell'azionamento della DM.

4. Sistema di supervisione e controllo

Il sistema di supervisione e controllo del banco permette di controllare la macchina freno DM ed il chiller della MUT tramite PC. Il sistema di acquisizione dati (nel seguito DAQ) non è incluso nella fornitura.

4.1. Interfaccia utente

Il PC comunica con in banco via LAN (es. ethernet). Il banco deve essere configurabile e comandabile tramite un'interfaccia utente, parte della fornitura. Dall'interfaccia utente si accede a:

- i parametri di funzionamento, i set point, la tipologia di controllo della macchina DM (coppia, velocità, singolo set-point o mappatura etc ...)
- i feedback dei sensori di diagnostica previsti nella fornitura.
- Il set-point del chiller della MUT

4.2. I/O Accessori

Con la stessa interfaccia si possono parametrizzare ed abilitare un certo numero di I/O accessori, analogici e digitali. Elenco degli I/O accessori:

- speed reference (analog input)
- torque reference (analog input)
- 10 GPIO configurabili (es. fault in, fault out)
- Interfaccia CAN o EtherCAT o protocollo analogo (sarà richiesto il dbc d'interfaccia)



4.3. Modalità Singolo set point o Mappatura

La modalità *singolo set point* prevede di portare la DM in un punto di funzionamento di regime utilizzando uno dei controlli prestabiliti. Il set point di funzionamento può essere inserito direttamente nel sistema di supervisione controllo (interfaccia PC), impostato tramite ingresso analogico, oppure tramite comunicazione CAN.

La modalità *mappatura* è una modalità in automazione dove il banco prova, seguendo un file (formato da concordare) o una parametrizzazione da concordare, cambia con continuità i set point di funzionamento della DM per esplorare diversi punti di lavoro della MUT. Un esempio di questa modalità di funzionamento è la mappatura di efficienza, dove si esplora tutto il piano coppia velocità della MUT.

4.4. Tipi di controllo previsti

Le modalità di controllo standard della DM, da pannello di controllo, sono:

- Controllo open loop di coppia
- Controllo di velocità

Entrambe le modalità possono essere comandate anche tramite i rispettivi “analog input”.

Inoltre, il sistema di controllo e supervisione del banco deve poter essere configurato per gestire i seguenti tipi di controllo avanzato:

- Controllo closed loop di coppia
- Controllo di coppia con simulazione di carico, modalità virtual load (opzionale)
- Controllo di velocità con feedforward di coppia (opzionale)

È preferibile, ma non vincolante, che il ciclo di calcolo per queste tipologie di algoritmi sia compreso tra 500us e 1ms. È preferibile, ma non vincolante, che sia possibile impostare un filtro passabasso configurabile sugli “analog input” di riferimento di coppia e velocità.

4.4.1. Controllo di coppia open loop

La coppia richiesta viene direttamente imposta sul drive che pilota la DM, lo schema di principio è riportato in Figura 5, i parametri a disposizione dell'utente sono

- Slew rate limiter, impostazione dT/dt



- Saturatore alla coppia massima, con limiti anche non simmetrici impostazione di T_{MAX} e T_{MIN} rispettivamente coppia massima e minima

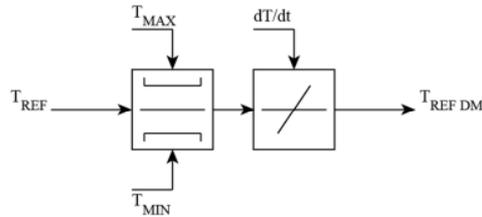


Figura 5 Struttura controllo di coppia open loop

4.4.2. Controllo di coppia closed loop

Il controllo di coppia closed loop riportato in Figura 6, rispetto a quello open loop richiede l'utilizzo del segnale proveniente dal torsionometro per stabilire in modo preciso la coppia di carico all'albero della MUT è pertanto necessario realizzare un anello chiuso su tale segnale.

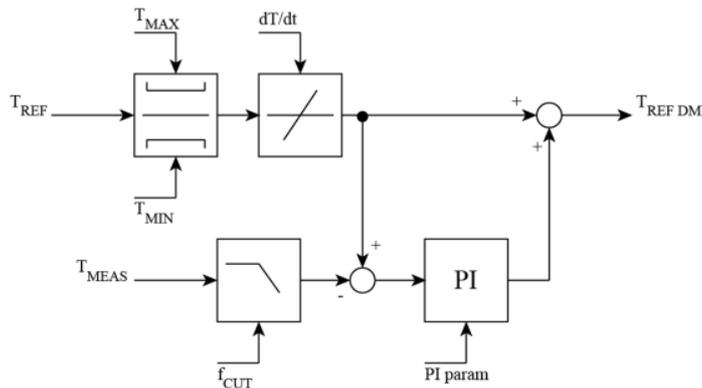


Figura 6 Schema di controllo di coppia in closed loop

I parametri utente per questo tipo di controllo sono:

- Slew rate limiter, impostazione dT/dt
- Saturatore alla coppia massima, con limiti anche non simmetrici impostazione di T_{MAX} e T_{MIN} rispettivamente coppia massima e minima
- Filtro passa basso sul segnale di coppia misurato, impostazione frequenza di taglio f_{CUT}
- Regolatore PI di coppia, parametri utente sono il guadagno proporzionale k_p , guadagno integrativo k_i , limiti di saturazione dell'uscita del blocco Out_{MAX} e Out_{MIN}



4.4.3. Controllo di velocità

Controllo di velocità in anello chiuso della macchina DM.

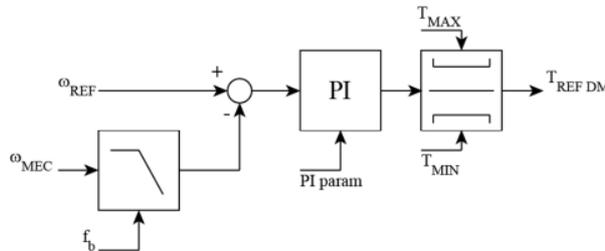


Figura 7 Controllo di velocità

Parametri impostabili dall'utente sono:

- La frequenza di taglio del filtro passa basso sulla velocità di feedback
- Il guadagno proporzionale $k_{p\omega}$ e quello integrale $k_{I\omega}$
- Limitazione della uscita del regolatore con anti windup (T_{MAX}, T_{MIN})

4.4.4. Controllo di coppia in modalità virtual load (opzionale)

Questa tipologia di controllo mira a far funzionare il banco come un carico virtuale che simula un carico reale sia in stazionario che in transitorio. La coppia di riferimento per la DM è generata a partire da un modello di carico. Devono essere previste due modalità per la generazione della coppia di carico:

- Puramente matematica
- Mista con lookup table

La modalità **puramente matematica** prevede l'utilizzo di un'equazione che descriva la coppia di carico in funzione della velocità e della accelerazione con un'espressione del tipo:

$$T_{REF} = k \cdot ist(\omega_{MEC}, \omega_{ist}) + k_1 \cdot \omega_{MEC} + k_2 \cdot \omega_{MEC}^2 \cdot sgn(\omega_{MEC}) + k_3 \cdot \omega_{MEC}^3 + J_{VIR} \cdot \frac{d\omega_{MEC}}{dt}$$

Dove:

- Il termine $k \cdot ist(\omega_{MEC})$ rappresenta un termine di coppia costante con la velocità meccanica la funzione $ist(\omega_{MEC}, \omega_{ist})$ è una funzione ad isteresi per evitare la presenza di coppia a velocità nulla. La grandezza ω_{ist} determina la banda morta della funzione isteresi vedi Figura 8.
- Il termine $k_1 \cdot \omega_{MEC}$ introduce una coppia frenante proporzionale alla velocità
- Il termine $k_2 \cdot \omega_{MEC}^2 \cdot sgn(\omega_{MEC})$ introduce una coppia frenate proporzionale al quadrato della velocità è necessario il recupero del segno per l'attuazione nel verso corretto
- Il termine $k_3 \cdot \omega_{MEC}^3$ introduce un termine di coppia resistente con il cubo della velocità



- Il termine $J_{VIR} \cdot \frac{d\omega_{MEC}}{dt}$ introduce il concetto di inerzia virtuale. L'accelerazione può essere calcolata a partire dal segnale di posizione, oppure (opzionalmente) misurata per mezzo di un accelerometro angolare installato sulla macchina DM.

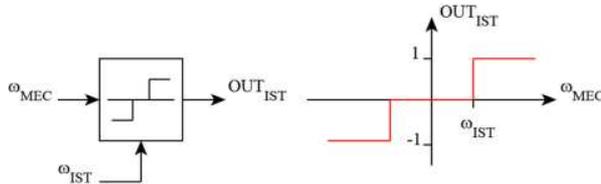


Figura 8 Funzione isteresi per il termine a coppia costante.

Per i due ingressi, velocità ω_{MEC} e accelerazione $\frac{d\omega_{MEC}}{dt}$ devono essere presenti dei filtri con frequenza di taglio regolabile dall'utente in maniera indipendente uno dall'altro, inoltre ogni singolo contributo come anche l'uscita totale è saturato a valori massimi e minimi impostabili dall'utente.

La modalità di funzionamento *mista lookup table* prevede l'utilizzo di una lookup table per descrivere la funzione della coppia resistente al variare della velocità, è definita mista perché il termine di coppia resistente costante con la velocità è realizzata sempre con il blocco ad isteresi visto nella modalità di funzionamento *puramente matematico*.

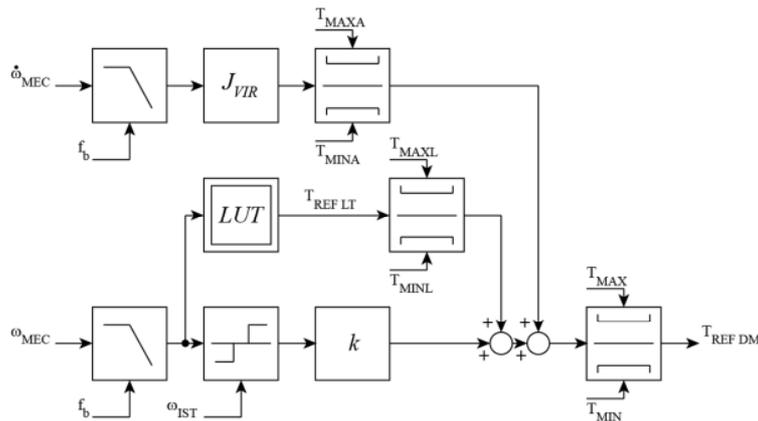


Figura 9 Virtual load con lookuptable

Per i due ingressi, velocità ω_{MEC} e accelerazione $\frac{d\omega_{MEC}}{dt}$ devono essere presenti dei filtri con frequenza di taglio regolabile dall'utente in maniera indipendente uno dall'altro, inoltre ogni singolo contributo come anche l'uscita totale è saturato a valori massimi e minimi impostabili dall'utente.



Il formato della lookup table è un file caricabile nel sistema di supervisione e controllo (formato è da definire) deve essere implementata nella lettura della lookup table una funzione di interpolazione lineare vedi esempio di Figura 10.

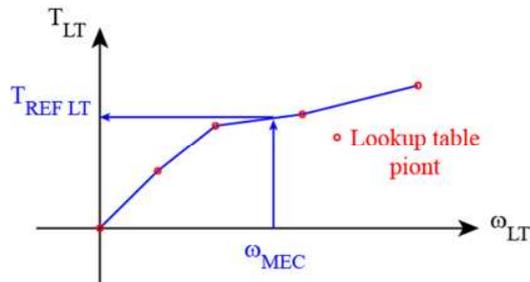


Figura 10 Interpolazione lineare Lookup table

4.4.5. Controllo di velocità con feedforward di coppia (opzionale)

Controllo di velocità con feedforward della coppia di carico misurata dal sensore di coppia oppure aggiunta di un termine derivativo tramite la misura dell'accelerometro secondo lo schema proposto in Figura 11.

Parametri impostabili dall'utente sono:

- Le frequenze di taglio dei filtri passa basso presenti sui segnali in ingresso al controllo: il segnale di feedback velocità e i due possibili segnali per il feedforward. Le bande passanti possono essere modificate dall'utente in modo indipendente una dall'altra.
- Il massimo contributo di ciascun ramo del controllo impostando le coppie di saturazione degli appositi blocchi, inoltre anche la coppia totale è limitata ad un massimo valore settabile dall'utente
- Sono inoltre resi disponibili come parametri utente i guadagni dei blocchi di feedforward k_T e k_A come anche il guadagno proporzionale ed integrativo del regolatore dell'anello di controllo realizzato con antiwindup (sono disponibili come parametri i limiti di saturazione)

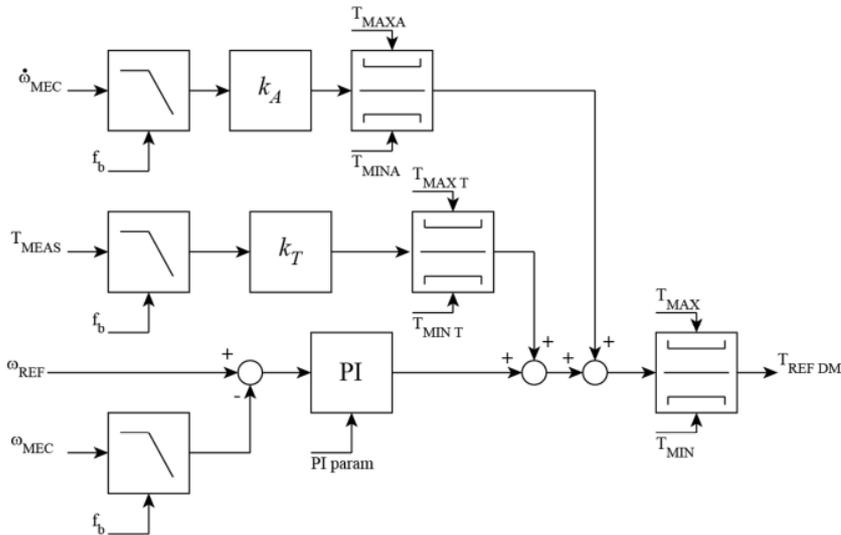


Figura 11 Controllo di velocità con feedforward

5. Sistema di condizionamento termico

Il sistema di condizionamento termico, parte della fornitura, richiede due sotto-sistemi **indipendenti tra di loro**, uno per la macchina DM ed uno per la MUT. Di conseguenza si giunge ad individuare tre distinti sistemi di condizionamento termico.

- Sistema di raffreddamento della macchina freno DM
- Sistema di condizionamento termico (raffreddamento o riscaldamento) della macchina in test MUT

Il banco deve essere compatibile con MUT raffreddate ad aria. Per questo è necessario che la struttura di compartimentazione preveda delle forature che permettano il collegamento ad un sistema di ventilazione, non incluso nella fornitura. Posizione e dimensioni delle forature saranno concordate con il fornitore.

5.1. Sistema di raffreddamento della macchina freno DM

Per esigenze di compattezza la DM deve essere raffreddata a liquido. Non si esclude che sullo stesso circuito di raffreddamento sia inserito il raffreddamento del drive che pilota la DM, ma questo non è vincolante. La tipologia di chiller da utilizzare è di tipo standard, non prevede di funzionare con range di temperatura particolari e deve semplicemente garantire la funzionalità della macchina DM in funzionamento nominale continuativo ed in sovraccarico transitorio.

Il sistema di supervisione del banco deve monitorare le temperature di input e output del fluido ed attivare il chiller.



5.2. Sistema di raffreddamento/riscaldamento della macchina in test MUT

Il sistema di condizionamento termico della MUT è di tipologia più complessa rispetto a quello della DM perché è volto a mantenere e portare la macchina in prova in differenti condizioni termiche con temperature del fluido refrigerante in ingresso da $\leq 0^{\circ}\text{C}$ a $\geq 80^{\circ}\text{C}$

Si prospetta quindi un chiller/riscaldatore sia in grado sia refrigerare che riscaldare il fluido di raffreddamento. A titolo indicativo, il salto termico tra liquido in ingresso e in uscita deve essere nell'ordine dei 5°C , e la potenza termica di riferimento dell'apparato è 10 kW, ipotizzando un MUT da 100kW con rendimento 90%.

Il sistema di supervisione del banco deve gestire il set point del chiller ed il monitoraggio delle temperature di input e output del refrigerante.

6. Sensori e Trasduttori

I sensori principali, parte integrante del banco, sono:

- Un torsionmetro (HBM T40B o T12), incluso nella fornitura
- Un accelerometro angolare (opzionale)

A complemento, è richiesta la presenza di sensori di protezione e diagnostica quali:

- Sensoristica termica sulla DM
- Sensoristica termica sul Drive della DM
- Un accelerometro sulla struttura del banco valutazione vibrazioni.

6.1. Torsionmetro

All'uscita dell'albero motore della DM deve essere installato un torsionmetro per la misura della coppia scambiata tra la MUT e la DM. Il sensore deve inoltre misurare **velocità e posizione dell'albero**.

Il DAQ (non fornito) deve ricevere il segnale di coppia trasdotto in frequenza ed i segnali dell'encoder angolare integrato nel torsionmetro. Vista la necessità della misura di posizione è necessario che sia presente il reference pulse (index o tacca di zero) nell'interfaccia encoder.

Anche l'uscita analogica di coppia è rimandata al banco per gli usi previsti a seconda del controllo utilizzato. Non è escluso di utilizzare moduli di sdoppiamento dei segnali in frequenza al posto dell'utilizzo del segnale analogico.

6.2. Accelerometro angolare (opzionale)

L'accelerometro angolare è montato sull'asse della DM. L'uscita di questo sensore è utilizzata dal banco per la simulazione di un carico inerziale virtuale. Il segnale deve essere acquisito dal sistema di supervisione e controllo del banco ma al tempo stesso essere reso disponibile all'esterno in formato analogico con amplificatore di disaccoppiamento e uscita differenziale, Figura 12.

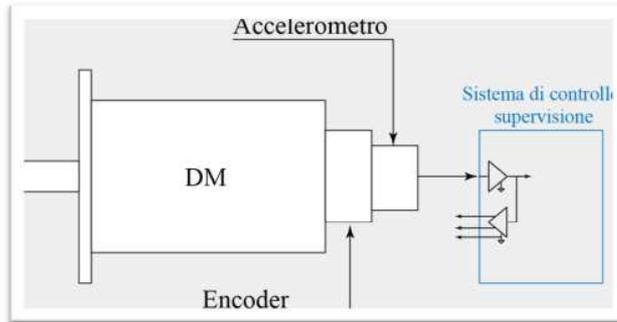


Figura 12 Schema di massima sistema condizionamento accelerometro.



7. Riassunto dei requisiti minimi ed opzionali

Il requisiti minimi della fornitura sono riassunti in Tabella 2.

Tabella 2. Requisiti minimi ed opzionali

Prestazione nominale (continuativa) dell'azionamento DM		
Coppia Nominale	≥ 200	Nm
Potenza nominale (da 6000 a 20000 rpm)	≥ 125	kW
Velocità base	≥ 6000	RPM
Velocità massima operativa	≥ 20000	RPM
Overspeed	$= 22.000$	RPM
Struttura Meccanica e Compartimentazione		
Struttura rigida + telaio + squadre	Sì	
Sistema antivibrazione incluso	Sì	
Squadra MUT scorrevole, per montaggio MUT	Sì	
Sistema di fissaggio della squadra MUT, a MUT montata	Sì	
Alesaggio squadra MUT fi 250 mm	Sì	
Squadre MUT e DM allineate per tolleranza di costruzione	Sì	
Compartimentazione che preveda l'accesso alla squadra MUT di un operatore con sistema di sollevamento MUT (non incluso)	Sì	
Azionamento DM (Driving Machine)		
Alimentazione trifase, 50 Hz	400	V rms
Active Front End rigenerativo	Sì	
DC link accessibile (opzionale)	Opzionale	
Modulo di frenatura elettrica	Sì	
Controllo open loop di coppia	Sì	
Precisione di coppia	$\leq 4\%$	
Controllo di velocità	Sì	
Sistema di supervisione e controllo		
Controllo da PC del banco DM + chiller MUT	Sì	
Interfaccia utente HMI	Sì	
I/O accessori		
Riferimento analogico di velocità (analog input)	Sì	
Riferimento analogico di coppia (analog input)	Sì	
10 GPIO configurabili	Sì	
interfaccia CAN o EtherCAT	Sì	
Tipi di controllo previsti		
Open loop coppia	Sì	
Closed loop coppia	Sì	
Velocità	Sì	



INFRA-P TEST-eDRIVE

Politecnico di Torino

Virtual load matematico	Opzionale
Virtual load lookup table	Opzionale
Controllo di velocità con feedforward di coppia	Opzionale
Chiller DM	
Raffreddamento a liquido	Sì
Dimensionato per funzionamento continuativo ai valori nominali della DM	Sì
Chiller/Riscaldatore MUT	
Raffreddamento a liquido	Sì
Dimensionato per funzionamento continuativo di una MUT da 100kW con efficienza 90% (10 kW termici)	Indicativo, dettagli da concordare con il fornitore
Temperatura minima refrigerante (ingresso circuito)	$\leq 0^{\circ}\text{C}$
Temperatura minima refrigerante (ingresso circuito)	$\geq 80^{\circ}\text{C}$
Salto di temperatura	5°C
Set point impostati da interfaccia utente HMI centrale	
Trasduttori di misura	
Torsionometro HBM T40B o T12	Sì
Accelerometro angolare	Opzionale
Trasduttori di monitoraggio	
Sensore/sensori termici su DM	Sì
Sensore/sensori termici su MUT	Sì
Accelerometro/accelerometri per valutazione vibrazioni	Sì