

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
Anno accademico 2021-2022



**Politecnico
di Torino**

**Validazione del banco prove automatico per il collaudo
funzionale delle unità idrauliche di potenza dell'impianto di
attuazione degli ipersostentatori di bordo d'attacco
di un velivolo multiruolo**

Studente:

Giuseppe Micele

Relatori:

Prof. Massimo Sorli

Prof. Andrea De Martin

Tutor aziendale:

Ing. Dario Savino

Indice

ABSTRACT	1
ABSTRACT	2
Capitolo 1. INTRODUZIONE	3
1.1. INTRODUZIONE ALL'AZIENDA.....	3
1.1. SCOPO DELL'ATTIVITA'	3
1.2. DESCRIZIONE DELL'ATTIVITA'	4
1.3. DESCRIZIONE DELL'APPLICAZIONE	6
1.4. DIRECT DRIVE VALVE.....	7
1.5 MOTORE IDRAULICO	15
1.6 GENERATORE RAMPA	17
1.7 MODELLO COMPLESSIVO E BODE	18
1.8 VALVOLE SOLENOIDI E VALVOLE SHUT-OFF	19
Capitolo 2. SETUP SPERIMENTALE E MODIFICHE AGGIUNTIVE AL BANCO.....	21
2.1. AMBIENTE DI SVILUPPO	21
2.2 MODELLI .DLL	23
2.3 ENCODER PER ACQUISIZIONE DELLA VELOCITA'	24
2.4 LVDT E RVDT	27
2.5 MODELLI DI CONTROLLO PER ELABORAZIONE RICHIESTE PROCEDURA	28
2.5.1 CONTROLLO VELOCITA'	29
2.5.2 CONTROLLO VELOCITA' DEFINITIVO.....	36
2.5.3 CONTROLLO COPPIA	40
Capitolo 3. VALIDAZIONE SISTEMA DI VOTING E MONITORING	41
3.1 VALIDAZIONE MONITOR CURRENT DDV.....	43

3.2 VALIDAZIONE RVDT POSITION MONITOR.....	50
3.3 OVERSPEED MONITOR.....	55
3.4 UNDEMANDED MOVEMENT	59
3.5 PERFORMANCE MONITOR.....	60
3.6 ASYMMETRY MONITOR.....	62
3.7 DISATTIVAZIONE SOLENOIDI E DDV	66
Capitolo 4. PROVE FUNZIONALI DI CONFRONTO	69
4.1 PROCEDURA DI COLLAUDO SUL BANCO AUTOMATICO	69
4.2 MODALITÀ DI CONFRONTO PROVE FUNZIONALI	72
4.3 PROVA DOPPIO SISTEMA.....	74
4.4 PROVA SINGOLO SISTEMA.....	79
4.5 PROVA DI STALLO.....	81
CONCLUSIONI.....	84

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 Eurofighter Typhoon, il cui prototipo era designato EFA (European Fighter Aircraft)[2]	6
Figura 2 schema di funzionamento	6
Figura 3 schema circuito RL	8
Figura 4 modello della valvola DDV	10
Figura 5 modello doppia integrazione cassetto(1)	11
Figura 6 modello doppia integrazione cassetto(2)	12
Figura 7 modello doppia integrazione cassetto(3)	12
Figura 8 schema esempio di funzionamento DDV[4]	13
Figura 9 schema valvola DDV, torque motor con 4 linee elettriche e doppio cassetto per le linee idrauliche	14
Figura 10 motore idraulico	15
Figura 11 modello del motore idraulico	16
Figura 12 modello completo.....	18
Figura 13 diagramma di Bode del sistema complessivo	19
Figura 14 valvola solenoide	20
Figura 15 shut-off	20
Figura 16 PXI (National Instruments)[5]	22
Figura 17 configurazione Labview, NI Hardware e utilizzatore.....	22
Figura 18 configurazione Labview, Ni Hardware e sensore	23
Figura 19 modello del filtro digitale	23
Figura 20 modello del ramp generator	17
Figura 21 funzionamento ramp generator	17
Figura 22 encoder ottico incrementale [6].....	24
Figura 23 acquisizione encoder	25
Figura 24 acquisizione encoder con segnale proveniente da modulo in frequenza.....	26
Figura 25 state-flow acquisizione encoder con modulo in frequenza a valle	26
Figura 26 schema funzionamento LVDT	27
Figura 27 relazione spostamento cassetto - ratio	28
Figura 28 Rvdt.....	28
Figura 29 controllo proporzionale integrativo	30
Figura 30 risposta alla rampa con solo controllo proporzionale.....	30

Figura 31 minimo valore di K_i per cui diventa instabile	31
Figura 32 confronto al variare della costante integrativa	32
Figura 33 ingrandimento risposta alla rampa	32
Figura 34 Bode controllo velocità proporzionale integrativo	33
Figura 35 larghezza di banda PI	33
Figura 36 modello Simulink controllo velocità feedforward	34
Figura 37 modello Simulink controllo velocità feedforward	34
Figura 38 bode controllo velocità con feedforward	35
Figura 39 larghezza di banda feedforward	35
Figura 40 Bode open loop con PI compensato	37
Figura 41 larghezza di banda controllo PI compensato	38
Figura 42 andamento feedback comando 1 Hz con ampiezza 700 rpm	38
Figura 43 risposta alla rampa massima	39
Figura 44 ingrandimento comando rampa	39
Figura 45 modello Simulink controllo coppia motore esterno	40
Figura 46 schema di funzionamento generale sistema voting/monitoring	41
Figura 47 schema funzionamento DDV current monitor	43
Figura 48 modello Simulink Voter/monitor a cascata per DDv current	44
Figura 49 modello Simulink DDV current injection	45
Figura 50 interfaccia per l'attivazione delle injection	45
Figura 51 test DDV current monitor	47
Figura 52 arresto albero di uscita dual lane DDV current failure	49
Figura 53 ingrandimento arresto albero di uscita dual lane DDV current failure	49
Figura 54 schema semplificativo funzionamento position monitor	50
Figura 55 modello Simulink position monitor	51
Figura 56 modello Simulink rvdv feedback injection	52
Figura 57 test position monitor	53
Figura 58 lvdv feedback durante il test position monitor	55
Figura 59 modulatore in frequenza e motore elettrico con rvdv collegato	56
Figura 60 schema esecuzione prova per overspeed monitor	57
Figura 61 modello Simulink overspeed monitor	58
Figura 62 test overspeed monitor e velocità calcolata da encoder	58
Figura 63 modello Simulink undemanded movement monitor	59
Figura 64 grafico test undemanded movement monitor	60

Figura 65 grafico test performance monior	61
Figura 66 ingrandimento grafico test performance monior	61
Figura 67 modello Simulink asymmetry monitor	63
Figura 68 grafico test asymmetry monitor 1	64
Figura 69 garfico test asymmetry monitor 2	65
Figura 70 disattivazione solenoidi Simulink	67
Figura 71 disattivazione DDV Simulink	67
Figura 72 disattivazione comando su Simulink	68
Figura 73 interfaccia utente Openconsole	68
Figura 74 banco manuale	70
Figura 75 schema software e connessioni con hardware.....	71
Figura 76 PDU golden unit.....	73
Figura 77 risultati prove portata sistema 1	76
Figura 78 risultati prove portata sistema 2	77
Figura 79 risultati prove corrente DDV linea 1	77
Figura 80 risultati prove corrente DDV linea 2	78
Figura 81 risultati prove corrente DDV linea 3	78
Figura 82 confronto bande di incertezza banco automatico	80
Figura 83 confronto bande di incertezza banco automatico	80
Figura 84 coppia di stallo.....	83

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 test DDV current monitor	48
Tabella 2 test DDV current monitor	48
Tabella 3 registrazione position monitor, prima failure.....	54
Tabella 4 registrazione position monitor, seconda failure.....	55
Tabella 5 registrazione test performance monitor	62
Tabella 6 registrazione test performance monitor, disattivazione allarme.....	62
Tabella 7 registrazione test asymmetry monitor	64

Tabella 8 test asymmetry monitor	66
Tabella 9 accuratezze strumenti.....	73
Tabella 10 collaudo su banco manuale	74
Tabella 11 prove doppio sistema sul banco automatico.....	75
Tabella 12 scostamenti media prove rispetto a valori certificati	76
Tabella 13 prove banco vecchio	81
Tabella 14 prove banco nuovo	82
Tabella 15 prova di stallo, incertezze ed errore relativo fra banchi.....	82

ABSTRACT

Oggetto dell'attività consiste nella validazione del banco prove automatico previsto per il collaudo funzionale delle unità idrauliche di potenza dell'impianto di attuazione degli ipersostentatori di bordo d'attacco di un velivolo multiruolo. L'unità di potenza idraulica (PDU) è un componente a quadrupla ridondanza elettrica e doppia ridondanza idraulica controllata ad anello chiuso da una legge di controllo sviluppata dall'azienda Microtecnica. La legge di controllo genera il profilo di correnti necessarie al comando di una valvola idraulica con doppio cassetto a comando diretto (DDV), che a sua volta modula la necessaria portata di olio in pressione ai motori idraulici. La legge di controllo include anche le logiche dei monitor per la gestione dei malfunzionamenti del sistema e le logiche dei controlli prevolo che vengono eseguite in automatico. Il banco prove prevede tutti gli equipaggiamenti necessari alla generazione di potenza idraulica ed elettrica, tutta la sensoristica e le logiche, il software di gestione degli automatismi e delle acquisizioni in tempo reale. L'obiettivo del tirocinio e della tesi è validare, con evidenze documentate anche ricorrendo a modelli di simulazione del sistema realizzati in ambiente Matlab/Simulink, la corretta implementazione delle logiche di controllo in tutte le fasi di prova previste dalla procedura, verificando che sia rispondente a quanto previsto a progetto. Vengono mostrate alcune scelte progettuali del nuovo banco, dei modelli di controllo aggiuntivi come un controllo in velocità e un controllo in coppia per eseguire le prove. Sono state analizzate le logiche dei monitor e la loro implementazione in linguaggio Matlab e ideate delle prove ad hoc per la loro validazione. Inoltre vengono mostrate delle prove funzionali di confronto utilizzando un banco manuale esistente ed una stessa PDU, al fine di fornire un valido strumento di confronto dei risultati. Precedentemente il collaudo avveniva su un banco manuale e l'operatore riproduceva le prove attraverso i vari potenziometri e pulsanti. Con la resa automatica del banco si passa dalle 8 ore alle 3 ore per il collaudo della singola unità. L'attività è svolta tra le due sedi di Torino e di Luserna San Giovanni dove è situato il banco di interesse.

ABSTRACT

The object of the activity is to validate the automatic test bench provided for the functional testing of the power hydraulic units of the leading-edge actuation system of a multirole aircraft.

Previously, testing was done on a manual bench and the operator reproduced the tests through the various potentiometers and buttons.

The hydraulic power unit (PDU) is a quadruple electrical and double hydraulic redundancy component controlled in closed loop by a control system developed by the Microtecnica company. The control system generates the profile of currents required to control a direct-drive hydraulic valve (DDV), which modulates the required flow rate of pressurized oil to the hydraulic motors. The control law also includes monitor logics for handling system malfunctions and pre-flight control logics that are executed automatically.

The test bench includes all the necessary equipment for generating hydraulic and electrical power, the sensors and control logics. In addition, the bench includes software for automatisms and real-time acquisitions.

The objective of the internship and the thesis is to validate, with documented evidence also by using simulation models of the system realized in the Matlab/Simulink environment, the correct implementation of the control logics in all the test phases provided by the procedure, verifying the design requirements. Some design choices of the bench are shown, like two additional control models such as a speed control and a torque control to perform the tests.

The logic of the monitors and their implementation in Matlab language are analyzed and then the results are tested for their validation.

In addition, functional comparison tests using an existing manual bench and the same PDU are shown in order to provide a valid tool for comparing results.

With the new automatic bench, the test time will be reduced from 8 hours to 3 hours for the single unit.

The activity took place at the two sites of Turin and Luserna San Giovanni where the bench of interest is located.

Capitolo 1. INTRODUZIONE

1.1. INTRODUZIONE ALL'AZIENDA

La Microtecnica fu fondata nel 1929 a Torino. La sua attività è rivolta sia nel campo civile che nel campo militare per sistemi di attuazione elettromeccanica ed oleodinamica. Facente parte del gruppo multinazionale United Technologies Corporation nel 2008 diventa una società indipendente rimanendo attiva nella produzione di componenti e parti nei campi: missilistico, aerospaziale ed aeronautico.

Oggi fa parte della Collins Areospace, cui appartengono il sito di Brugherio e Luserna San Giovanni.

Le attività dell'azienda sono progettazione, sviluppo, produzione e assistenza post-vendita con l'obiettivo di far progredire l'industria aerospaziale e della difesa con un forte impegno a sviluppare le tecnologie e a mantenere rapporti stretti e collaborativi con i clienti.

L'azienda ha una lunga storia di collaborazione con il Distretto Aerospaziale Piemonte e con gli esperti del Politecnico di Torino per lo sviluppo tecnologico dei prodotti, in particolare nel campo dell'attuazione[1].

1.1. SCOPO DELL'ATTIVITA'

Il collaudo ha lo scopo di verificare e certificare che il lavoro è stato eseguito secondo le prescrizioni tecniche prestabilite e che il prodotto finale sia in piena conformità rispetto agli accordi con il cliente.

Si tratta di un insieme di prove, misurazioni, accertamenti ed ispezioni finalizzate a dichiarare che le specifiche tecniche siano assicurate.

L'unità di potenza idraulica è stata fin ora collaudata con il banco di collaudo manuale rispettando la procedura (Acceptance Procedure Test) secondo accordi precedentemente stabiliti.

Lo scopo dell'attività di tesi è quella di collaborare all'obiettivo dell'azienda di automatizzare il banco e la relativa procedura di collaudo. La validazione deve prevedere che la procedura di collaudo non può essere modificata e che l'implementazione software dei passaggi richiesti deve essere completamente rispettata, altrimenti si andrebbe a rendere invalida la certificazione.

Anche il banco deve essere opportunamente validato in quanto non sarà più l'operatore a modificare attraverso potenziometri e pulsanti i parametri e le grandezze fisiche richieste dalla procedura, bensì saranno modelli simulink e implementazioni in ambiente Labview a elaborare le richieste. Quindi da ciò nasce la necessità di verificare che la strumentazione, sensoristica e moduli analogici vari si comportino in modo adeguato.

Per la validazione del banco viene utilizzata una Golden Unit. Per Golden Unit si intende un dispositivo ideale rispetto al quale vengono testati tutti i dispositivi successivi. Il termine Gold è usato per descrivere la precisione del device rispetto alle specifiche standard.

Dunque il banco automatico è validato mediante l'uso di una PDU precedentemente collaudata sul banco manuale in modo tale da essere certi che tutte le misurazioni e le prove non siano influenzate da un comportamento inaspettato dello stesso oggetto di collaudo per cui il banco è realizzato.

1.2. DESCRIZIONE DELL'ATTIVITA'

La finalità dell'attività è quella di diminuire considerevolmente il tempo impiegato dall'operatore per effettuare il singolo collaudo. Inoltre a questo si aggiunge il fatto che, rendendo la procedura di collaudo scollegata dalla manualità dell'operatore e dal suo tempo di reazione all'osservazione dei display sul banco, si possa migliorare la ripetibilità di ciascuna prova.

I passaggi principali con cui si può descrivere l'intero processo di validazione del software del banco sono i seguenti:

- Studio della logica di controllo e dei diagrammi di flusso della procedura e loro trasposizione in ambiente Simulink e Matlab. L'utilità di questi software è dovuta alla possibilità da parte di Simulink di poter gestire il controllo e i vari loop chiusi in maniera adeguata seconda la specifica di progetto. In più attraverso il linguaggio Matlab è stato possibile realizzare i diagrammi di flusso in maniera comoda. La prima resa digitale di tali logiche è stata considerata come una prima prova da testare poi sul banco.

- Un vecchio banco manuale è stato utilizzato come base di partenza. Sono stati utilizzati alcune parti ancora utili come l'armadio elettrico con le varie schede analogiche per ogni linea elettrica ridondante, la parte di condizionamento del segnale dei vari sensori e il motore esterno per simulare il carico esterno. È stato aggiunto un Pxi prodotto dalla National Instruments e un computer desktop con sistema operativo Windows per implementare il

controllo digitale da sostituire a quello analogico preesistente. Attraverso Veristand è stato collegato il banco alla logica di controllo.

- È stato realizzato in ambiente Labview un sequenza per ogni prova della procedura di collaudo affinché attraverso tale software si possano inviare correttamente i vari comandi. Veristand e l'applicativo Labview essendo entrambi due prodotti appositamente realizzati dalla Natonal Instruments sono ideali per permettere di lanciare la sequenza di comandi e gestirla in real time.
- Sono stati collegati i vari canali digitali e analogici come previsto da procedura, gli stessi sono comodamente gestibili tramite l'interfaccia Veristand e sottoposti a controllo tutti gli strumenti e sensori dall'ufficio di metrologia.
- È stato effettuato un primo debugging provando a simulare ogni prova della procedura di collaudo controllando su Veristand in real time se i risultati fossero paragonabili alle richieste.
- Per ogni malfunzionamento o imprecisione è stato ricontrollato il codice Matlab e i modelli Simulink.
- A risultato soddisfacente e perfettamente rispecchiante la procedura, in termini di logica e tempi di funzionamento e di superamento delle soglie, sono state prodotte delle prove di riferimento accuratamente analizzate e sottoposte a report.
- È stato realizzato un controllo velocità e un controllo coppia, gestiti ad una frequenza di 7680 Hz dal Pxi, affinché si possano realizzare le sequenze richieste dalla procedura.
- È stato riportato il tutto su un banco definitivo. La Pdu utilizzata è detta Golden Unit, in quanto affinché si possa validare un nuovo banco l'oggetto del collaudo deve essere già stato precedentemente collaudato. In questo modo si è certi che qualsiasi malfunzionamento è dovuto al banco e non alla Pdu. In queste condizioni sono state realizzate delle prove sempre secondo procedura. Queste prove ripetute un numero sufficiente di volte per un campione statistico valido sono state confrontate con delle prove su un banco vecchio già validato. Analizzando tali prove, gli errori e le bande di tolleranza è possibile definire valido o meno il banco.

1.3. DESCRIZIONE DELL'APPLICAZIONE

La Pdu da collaudare sul banco in questione è utilizzata sugli aerei EFA, aeroplano militare multiruolo.

Essa funge da unità di potenza volta a regolare la posizione degli ipersostentatori, che posti sul bordo di attacco aumentano la portanza in fase di decollo e di atterraggio.



Figura 1 Eurofighter Typhoon, il cui prototipo era designato EFA (European Fighter Aircraft)[2]

La Pdu è composta da due moduli idraulici, due motori idraulici ed un riduttore ad ingranaggi. I due moduli sono alimentati da due sistemi indipendenti. Le coppie in uscita sono sommate attraverso gli ingranaggi. In questo modo la coppia è disponibile per essere utilizzata attraverso un sistema meccanico a martinetti per regolare gli slat.

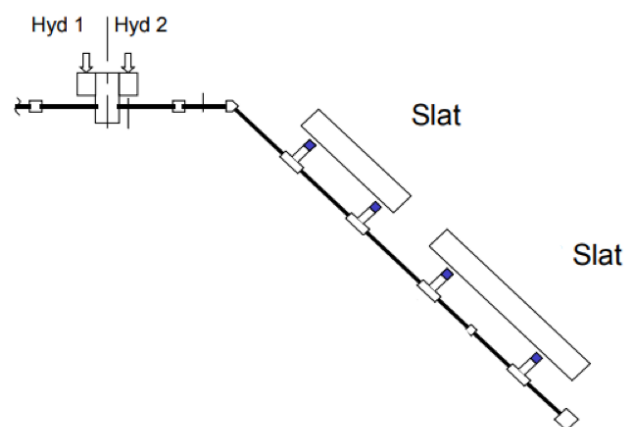


Figura 2 schema di funzionamento

I motori sono regolati attraverso una Direct Drive Valve (DDV) controllata a sua volta da un LVDT a 4 canali che chiudono il closed loop sulla posizione della valvola.

Vi sono inoltre due valvole shut-off e by-pass con solenoidi per motivi di sicurezza.

La ridondanza dei canali è necessaria in quanto attraverso questa configurazione un guasto di un sistema si verifica solo in conseguenza del guasto contemporaneo di più canali.

Il sistema valuta attraverso l'implementazione di voter e monitor tutte le correnti delle linee disattivandole quando il valore esce da determinati range.

1.4. DIRECT DRIVE VALVE

La Direct Drive Valve è una particolare valvola idraulica in closed loop utilizzata in diversi ambiti industriali per il controllo di variabili come posizione, pressione, portata.

Rispetto alle classiche servovalvole non presentano dei canali pilota, ma hanno un motore elettrico in corrente continua più performante che permette appunto anche senza idraulica di muovere il cassetto, è per questo che viene chiamata valvola ad azionamento diretto.

La valvola è controllata da un motore elettrico DC reversibile in modo tale da poter cambiare la direzione di spostamento del cassetto[3]. Il sistema è noto come torque motor.

Il comando di tensione proveniente dal modello di controllo fa ruotare la camma progettata in modo tale da consentire con il suo movimento rotatorio di spostare il cassetto e conseguentemente di modificare l'apertura delle luci come desiderato.

La coppia motrice magnetica generata dal torque motor fa ruotare la camma grazie all'armatura a cui è vincolata presente all'interno del motore elettrico tra gli avvolgimenti.

L'estremità della camma ruota dunque di un angolo θ di qualche grado nei due versi di rotazione (in relazione al gioco presente nel meccanismo, estremamente piccolo) a seconda della direzione della corrente negli avvolgimenti elettrici. Generalmente presentano due avvolgimenti intorno all'armatura, che alimentati producono un flusso magnetico. Questo flusso magnetico porta allo spostamento dell'armatura realizzata in materiale ferromagnetico. Si può dunque risolvendo le equazioni del circuito elettrico e quelle del circuito magnetico passando da una corrente I , attraverso una forza magnetomotrice NI del circuito magnetico e il flusso magnetico ϕ fino ad una forza che viene esercitata sul cassetto.

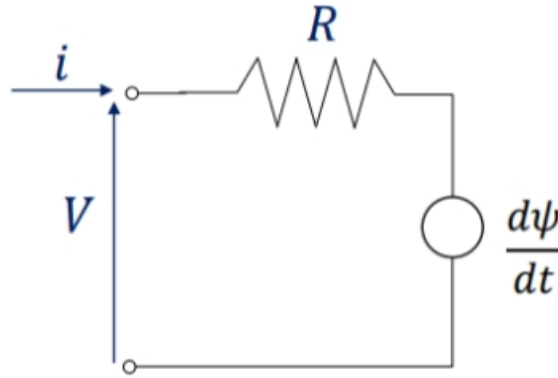


Figura 3 schema circuito RL

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{dN\phi}{dt} = \frac{dLi}{dt}$$

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt}$$

$$V = f\left(i, \frac{di}{dt}, L, R, \frac{dx}{dt}\right)$$

Può essere dunque calcolata la corrente dopo aver applicato la trasformata di Laplace.

Si ottiene quindi una coppia motrice magnetica con segno, funzione del segnale di corrente rilevato.

La coppia è calcolata come:

$$C = F_t i$$

Dove F_t è una costante che tiene in considerazione:

- il guadagno di coppia
 - numero di spire
 - lo spostamento del cassetto valutato come spostamento angolare del torque motor.
- Quest'ultima variabile influisce retroattivamente sul calcolo della coppia magnetica, in quanto lo spostamento del cassetto significa variazione della riluttanza magnetica, quindi di forza magnetomotrice e infine della forza applicata al cassetto.

Fondamentale è la presenza di un rilevamento in feedback, in quanto in sua assenza non si potrebbe controllare in closed loop la posizione del cassetto. A differenza delle tipiche servovalvole che presentano un feedback di tipo meccanico in questo caso è necessario un trasduttore.

Viene quindi implementato un sensore di rilevamento posizione di tipo LVDT che rilevata la posizione restituisce un segnale in tensione V_{rms} ad essa proporzionale.

Il segnale demodulato in tensione viene confrontato con il comando in tensione, il corrispondente errore è inviato sottoforma di corrente al motore fin quando la posizione del cassetto non è quella desiderata e il cassetto si ferma.

Alla coppia disponibile dal torque motor il modello della valvola prevede tre tipi di perdite da sottrarre:

- Perdite dovute allo smorzamento idraulico
- Perdite dovute alla coppia magnetica
- Perdite dovute al flusso

Nell'immagine seguente è mostrato il modello Simulink realizzato secondo le specifiche di progetto.

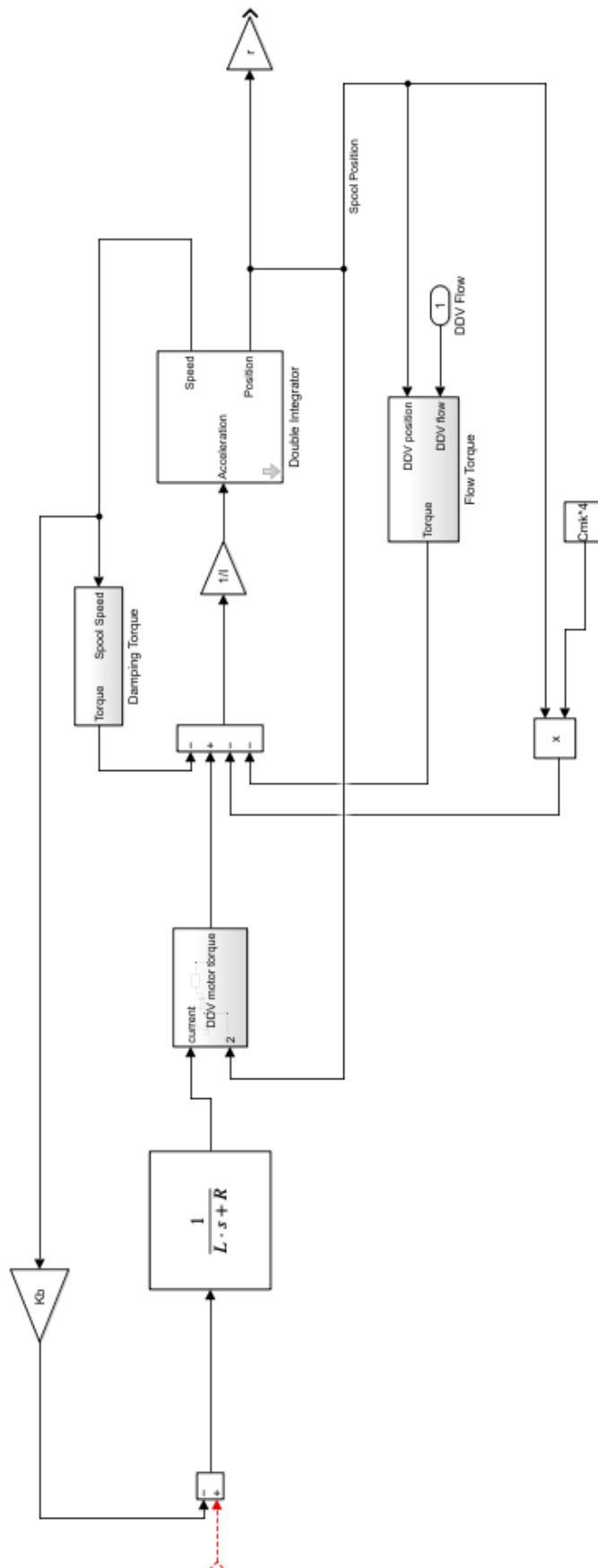


Figura 4 modello della valvola DDV

Il calcolo della coppia all'interno del closed loop della valvola permette conoscendo l'inerzia del cassetto della DDV e del DDV motor di risalire all'accelerazione angolare. Essa corrisponde all'accelerazione angolare α del driver meccanico che muove il cassetto.

A questo punto è possibile calcolare effettuando una doppia integrazione il valore di velocità angolare ω e della rotazione θ .

Considerando però che il cassetto può muoversi solo entro uno spostamento rispetto alla condizione di riposo con luci completamente chiuse di $\pm 1,2$ mm massimo, allora nell'integrazione va tenuto presente che bisogna:

- saturare lo spostamento entro X_{max} e X_{min}
 - disattivare l'integrazione della accelerazione quando il cassetto è a fondo corsa in modo tale che non si continui ad integrare e che quindi la velocità rimanga zero a cassetto tutto aperto.
- È stato quindi implementato su simulink il doppio integratore in questo modo:

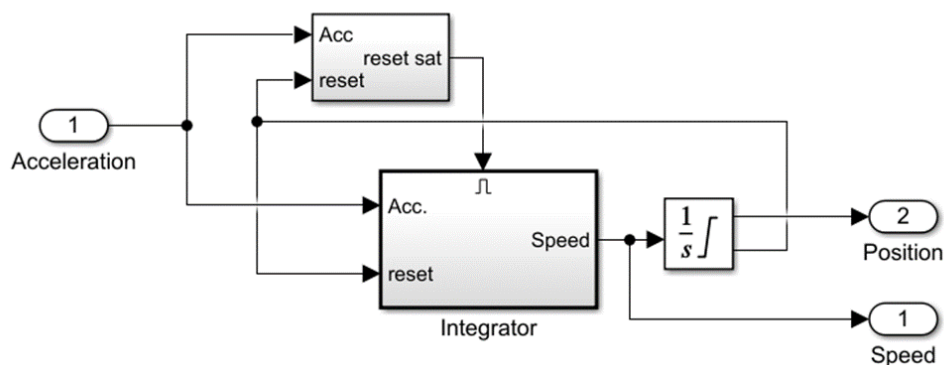


Figura 5 modello doppia integrazione cassetto(1)

Il sistema principale mostra come per una doppia integrazione da accelerazione a posizione che sia coerente con la fisica del problema sia necessario una modellazione attraverso il blocco simulink enable.

Il segnale di saturazione proveniente dall'integratore della velocità viene inviato all'integrale della accelerazione in modo che possa resettarlo quando il cassetto è fermo e mantenerlo a zero.

A questo è aggiunto il blocco enable, che si occupa di resettare tutto il blocco di integrazione dell'accelerazione. Senza di esso il sistema rimarrebbe fermo nella posizione in cui ha raggiunto la saturazione in quanto l'integrazione dell'accelerazione rimarrebbe disattivata.

Con il blocco enable si ha in ingresso accelerazione e saturazione della posizione (resituisce 0 quando non saturato, 1 se saturato superiormente, -1 se saturato inferiormente).

Il blocco calcola il prodotto tra i due segnali, ogni qual volta il segno dell'accelerazione è diverso dal segno della saturazione restituisce un segnale che resetta l'integratore. In questo modo quando la posizione è saturata superiormente e l'accelerazione diventa negativa la velocità torna ad essere diversa da zero e il cassetto può tornare indietro. Lo stesso avviene nel caso in cui la posizione è saturata inferiormente e l'accelerazione diventa positiva.

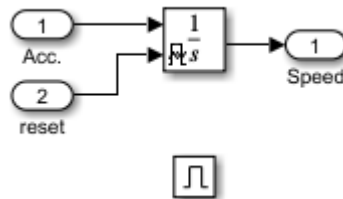


Figura 6 modello doppia integrazione cassetto(2)

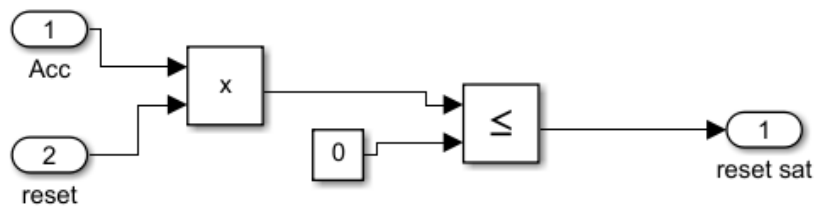


Figura 7 modello doppia integrazione cassetto(3)

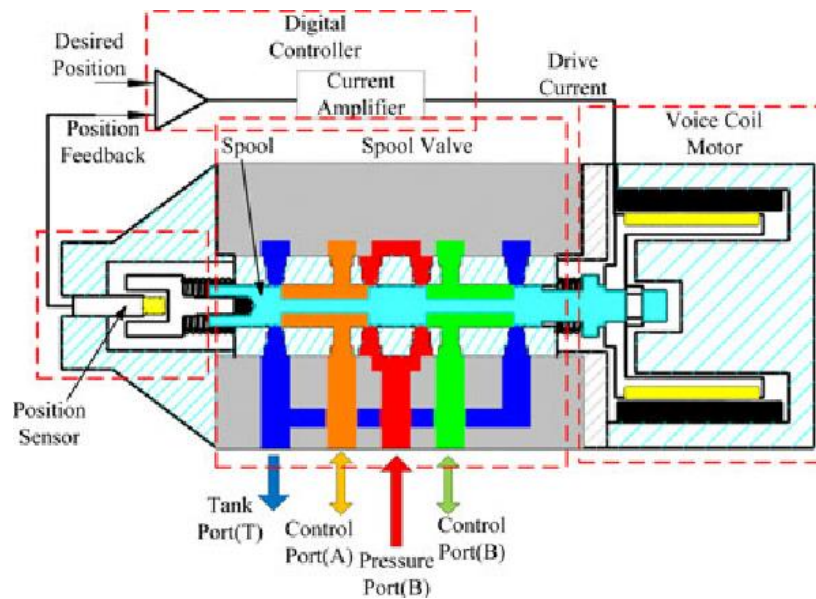


Figura 8 schema esempio di funzionamento DDV[4]

La Direct Drive Valve adottata sul sistema d'attuazione d'interesse in questo lavoro (in figura 9) è realizzata ad hoc per questo tipo di applicazioni in ambito aerospaziale che necessitano di una elevata affidabilità.

Infatti il sistema prevedendo due motori idraulici che lavorano in parallelo necessita di una speciale DDV che li alimenti entrambi contemporaneamente e nelle stesse condizioni di pressione.

La valvola presenta infatti un doppio cassetto rigidamente connesso. Nel momento in cui il torque motor agisce, entrambe le parti del cassetto si spostano e aprono le rispettive luci di ingresso e scarico per ognuno dei due motori idraulici. La pressione di alimentazione e quella alla mandata di una parte della valvola rimangono le medesime dell'altra nel funzionamento ottimale.

Nel momento in cui per un guasto, venga a mancare pressione ad una delle due alimentazioni, il sistema è progettato per continuare a funzionare con un singolo sistema.

Nella figura sono indicati per ogni sezione idraulica del dispositivo in rosa l'alimentazione, in azzurro lo scarico. Nella parte inferiore invece in arancione e in azzurro le due vie all'utenza idraulica.

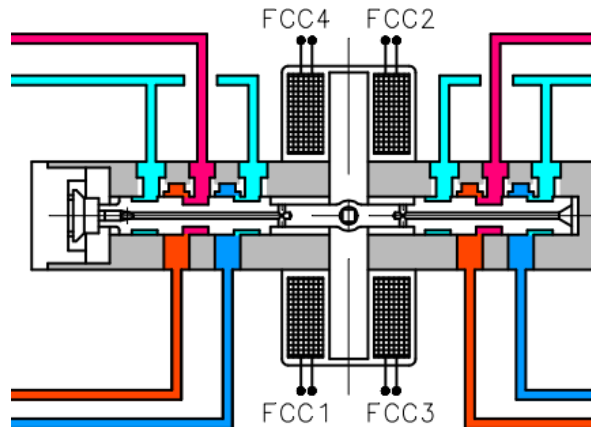


Figura 9 schema valvola DDV, torque motor con 4 linee elettriche e doppio cassetto per le linee idrauliche

Alla doppia ridondanza idraulica se ne aggiunge un'altra di tipo elettrico.

In questo caso si tratta di una quadrupla ridondanza, vengono quindi inviate 4 correnti al torque motor che le traduce in un valore di coppia magnetica. Il sistema è progettato affinché possa funzionare anche con 2 sole coil attive in caso di malfunzionamenti, aumentando il valore di corrente di queste opportunamente.

È la logica di controllo che si occupa nel FCC di elaborare le correnti a seconda delle condizioni di funzionamento e del comando del pilota.

Essendoci quattro linee elettriche, vi sono di conseguenza quattro logiche di controllo in closed loop della DDV funzionanti in contemporanea e 4 linee di feedback.

Il sensore di posizione è realizzato quindi con 4 LVDT i cui segnali demodulati sono poi confrontati con il comando.

1.5 MOTORE IDRAULICO

Il motore idraulico adottato è un motore oleodinamico a pistoncini a cilindrata fissa.

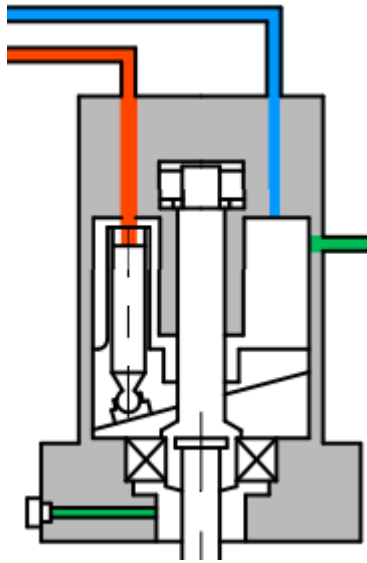


Figura 10 motore idraulico

Lo spostamento del cassetto comporta l'ingresso del fluido la cui portata è determinata da un coefficiente G_p che ne approssima la dinamica.

Tale portata è la stessa che passa per entrambi i motori per cui per calcolarne il salto di pressione viene raddoppiata.

Si definisce hydraulic capacitance C_p come la variazione di volume sulla variazione di pressione. Spesso viene trascurata ma in sistemi di controllo closed loop in cui si richiede elevate prestazioni viene considerata. La coppia è funzione del delta di pressione tra alimentazione e mandata al motore e della cilindrata espressa come volume di fluido per rivoluzione.

$$C = \frac{V \Delta p}{2\pi}$$

$$C = [\text{Nm}]$$

$$V = [\text{m}^3/\text{rev}]$$

$$\Delta p = [\text{Pa}]$$

È presente una perdita dovuta alle resistenze interne del motore K_m .

Calcolata la velocità si può procedere con la doppia integrazione per il calcolo della rotazione dell'albero.

1.6 GENERATORE RAMPA

Affinchè le simulazioni siano coerenti con le specifiche del sistema di attuazione è stato realizzato un modello simulink che dato un set (NWS %) lo modifica opportunamente affinchè si comporti allo stesso modo che sul Fligh Control Computer.

Le specifiche richiedono un acquisizione a 40 Hz e limitano la rampa tra un acquisizione e la successiva a 0,9 NWS%.

Il modello simulink dunque calcola la differenza tra due acquisizioni usando il blocco memory e successivamente il comando in uscita passa per un rate transition ad una frequenza di 80 Hz come richiesto da specifica.

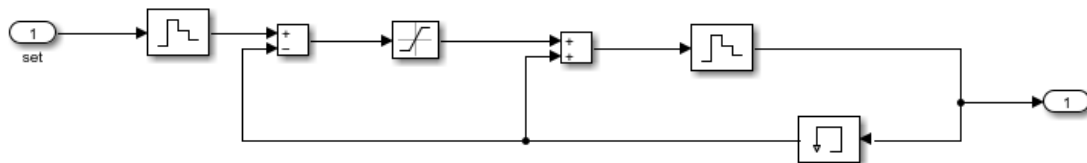


Figura 12 modello del ramp generator

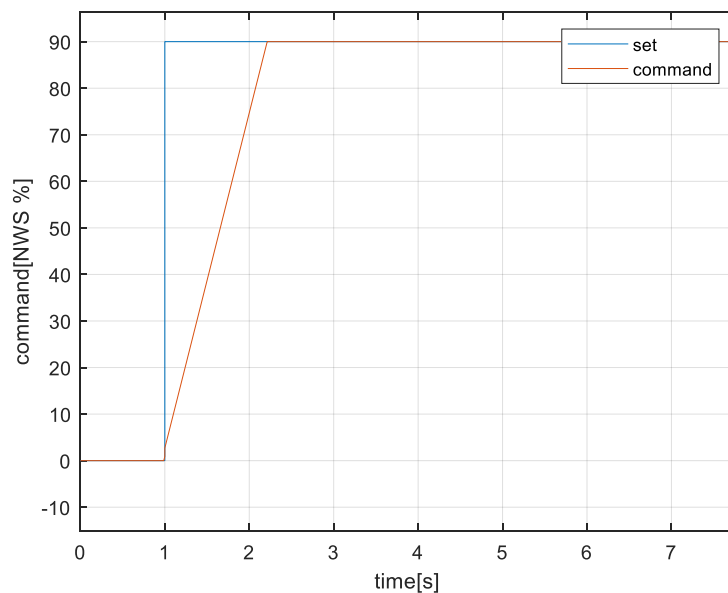


Figura 13 funzionamento ramp generator

Come si può notare l'effetto è quello di modificare eventuali step o rampe troppo veloci ad un limite per cui è progettato il resto del sistema di controllo.

Da qui possiamo concludere che il ramp generator descritto in questo paragrafo può essere usato per filtrare il comando affinché si studi il comportamento del sistema.

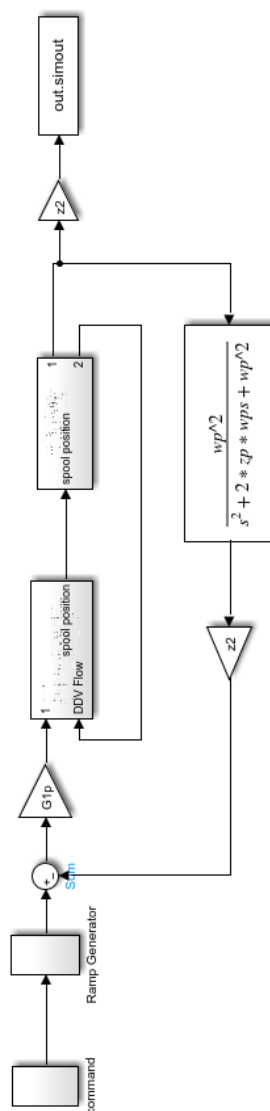


Figura 14 modello completo

È stato effettuato un calcolo della risposta in frequenza del dispositivo per confrontare il comportamento del modello rispetto ai risultati sul banco.

Come set viene comandata una sinusoide con ampiezza 0.4 V e bias 5V in un range di frequenze che va da 0,1 Hz a 2,5 Hz. Il feedback è la posizione in NWS %, dunque la posizione rilevata dal Rvdt.

La specifica richiede che da test sul banco il dispositivo completo di legge di controllo, valvola e motore abbia un margine di fase maggiore di 60° .

Dalla simulazione si è notato come l'andamento del bode con i modelli simulativi e il bode sul banco di collaudo sono sovrapponibili.

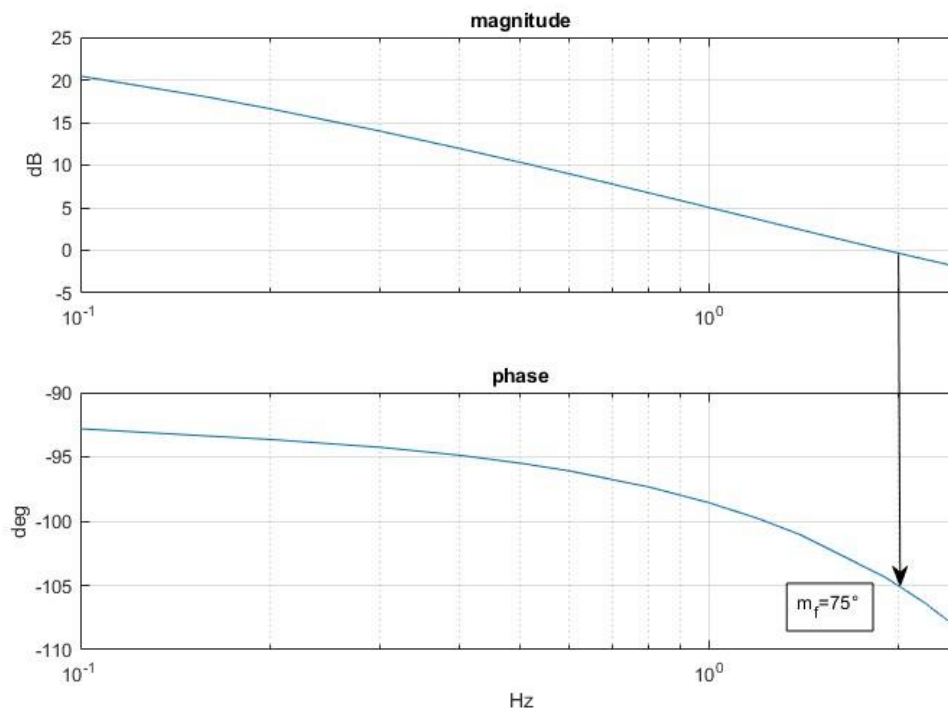


Figura 15 diagramma di Bode del sistema complessivo

1.8 VALVOLE SOLENOIDI E VALVOLE SHUT-OFF

Ognuno dei due motori idraulici può essere messo in modalità by-pass dal FCC, questo è reso possibile da un sistema con valvola solenoide e valvola shut-off per linea idraulica.

Ognuna delle due valvole solenoidi viene energizzata da due spire differenti controllate dal FCC attraverso due delle quattro linee elettriche.

Solo quando entrambe le due linee elettriche vengono staccate la valvola solenoide commuta e permette alla valvola shut-off di mettere in by-pass il motore corrispondente.

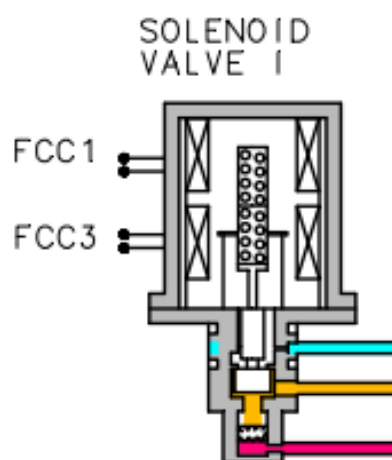


Figura 16 valvola solenoide

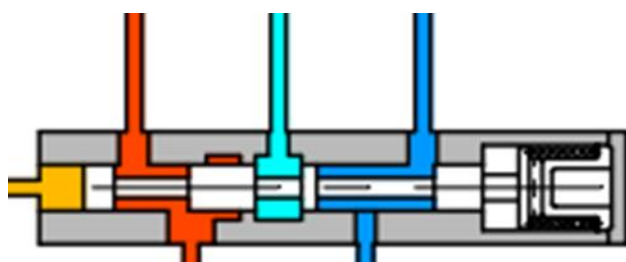


Figura 17 shut-off

Capitolo 2. SETUP SPERIMENTALE E MODIFICHE AGGIUNTIVE AL BANCO

2.1. AMBIENTE DI SVILUPPO

LabView

Labview è un software ingegneristico per applicazioni che richiedono test, misure e controlli con un accesso rapido al hardware e ai dati.

È possibile creare una interfaccia utente customizzata al fine di visualizzare i dati acquisiti usando una sintassi grafica e diagrammi di flusso.

Il software fornisce una vasta libreria di funzioni predefinite e di driver per la gestione dell'hardware che permettono di sviluppare test su sistemi automatici.

Veristand

Veristand è un software per l'esecuzione di applicazioni di test in tempo reale. È possibile creare interfacce per i test in tempo reale e per la registrazione dei dati.

È possibile in questo modo avere sempre sotto controllo durante l'esecuzione dei test tutti i grafici, valori o allarmi opportunamente modificabili.

Inoltre il software si occupa di rendere efficace il sincronismo degli hardware e dei modelli come quelli simulink compilati e caricati in formato .dll.

Sono messi in comunicazione quindi il dispositivo testato con i suoi sensori e il pc, scambiando i vari segnali input/output alle frequenze stabilite dai vari modelli dei loop di controllo.

L'interfaccia Veristand sul desktop pc viene detta OpenConsole.

Matlab e Simulink

Matlab è uno dei più noti software per il calcolo numerico basati sul calcolo matriciale. È stato utilizzato in particolare l'ambiente di modellazione Simulink per realizzare attraverso la logica a blocchi tutti i loop di controllo e i monitor richiesti da specifica. I modelli sono stati poi caricati su Veristand.

Pxi

Il PCI eXtensions for Instrumentation (PXI) è una piattaforma modulare utilizzata come base per la costruzione di apparecchiature elettroniche per test, sistemi di automazione e strumenti di laboratorio prodotta dalla National Instruments.



Figura 18 PXI (National Instruments)[5]

Progettata per misure ed automazione ad elevata performance, possiede un sistema di bus sincronizzati che la rende ideale per realizzazione di banchi in cui sia necessario un controllo e misure in tempo reale.

Il sistema viene connesso alle varie schede analogiche e al desktop Pc con cui scambia i vari input/output, collaborando con i software Veristand e Labview.



Figura 19 configurazione Labview, NI Hardware e utilizzatore



Figura 20 configurazione Labview, Ni Hardware e sensore

2.2 MODELLI .DLL

Tutti i modelli simulink sono stati compilati e convertiti in modelli .dll (Dynamic-link library) per essere caricati in Veristand. In questo modo la logica dei loop viene completamente gestita da Versitand e Matlab/simulink non viene usato per effettuare le prove.

Nonostante i modelli su Simulink funzionassero correttamente è stato notato che durante i test con le date frequenze dei loop il sistema risultava avere degli errori numerici.

Questi errori sono stati ricondotti alla difficoltà da parte della PXI di gestire i filtri digitali esistenti nella FCC del veicolo.

Si è quindi cercato di semplificare al massimo dal punto di vista numerico il calcolo del segnale di uscita da parte del modello.

La funzione di trasferimento dei filtri in questione è:

$$F(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}$$

Scomponendo la funzione di trasferimento e riducendola ad una serie di soli prodotti e somme si ottiene:

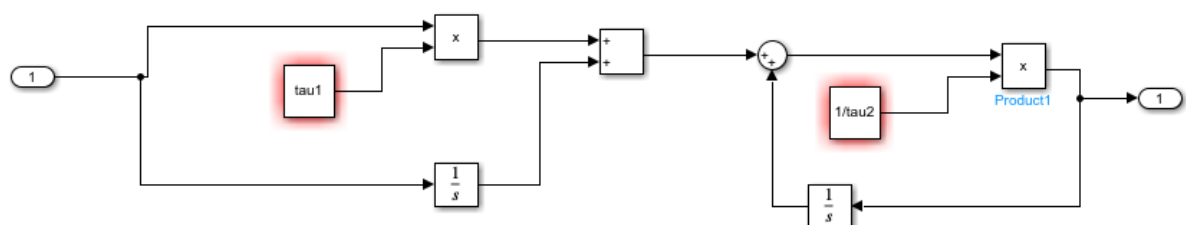


Figura 21 modello del filtro digitale

Questo tipo di modello permette quindi considerando il medesimo tempo di clock di effettuare la stessa operazione aumentando il numero di istruzioni per ciclo.

Lo stesso procedimento è stato applicato a tutti i filtri digitali come quello sopra descritto.

2.3 ENCODER PER ACQUISIZIONE DELLA VELOCITA'

Nel seguente paragrafo vengono spiegate le scelte per l'acquisizione in tempo reale della velocità e del numero di rivoluzioni dell'albero in uscita. È stato accoppiato con uno dei due alberi di uscita un encoder in quanto vi è la necessità di controllare la velocità angolare per verificare il funzionamento dei monitor sia perchè alcune verifiche effettuate nella procedura di collaudo prevedono un controllo in velocità.

Il sistema per la misurazione dell'angolo di rotazione è composto da una interfaccia meccanica di accoppiamento all'applicazione, da un disco e da una parte elettronica di condizionamento. In particolare si tratta di un encoder incrementale. L'encoder è in grado di generare un numero di impulsi al giro espresso con la variabile i nel modello pari a un valore fornito dal costruttore. È un trasduttore rotativo, indiretto, incrementale e di tipo digitale.

L'encoder incrementale fornisce sui due canali due diverse onde quadre. Per calcolare la direzione dello spostamento va valutato se il segnale B è in fase di salita quando il segnale A è in posizione 1 o 0.

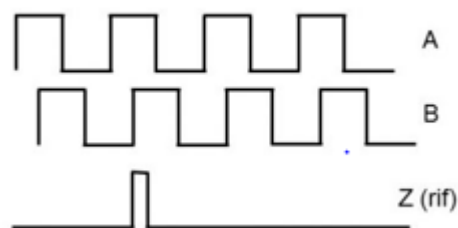


Figura 22 encoder ottico incrementale [6]

Nel modello simulink seguente viene calcolata la posizione e la velocità partendo dal counter degli impulsi fornito dall'encoder.

Per il calcolo della velocità è preso il numero di impulsi per ogni campione acquisito e viene diviso per il numero di impulsi al giro dell'encoder.

In questo modo si ottiene la porzione di giro o il numero di rivoluzioni totali effettuate. infatti sappiamo che vale la relazione:

$$\theta = 360/i$$

Ossia per ogni impulso del trasduttore si ha una rotazione dell'encoder conosciuta. θ indica proprio il valore minimo misurabile di rotazione.

Per il calcolo della velocità invece si è dovuto effettuare il calcolo della derivata discreta che corrisponde a memorizzare il valore precedente dal counter. A questo punto sottraendo ogni valore con il precedente e dividendo per il numero di impulsi al giro i , si ha la rotazione relativa tra un valore campionato e il seguente.

Andando a dividere ancora per il tempo di campionamento si ha il valore della velocità angolare.

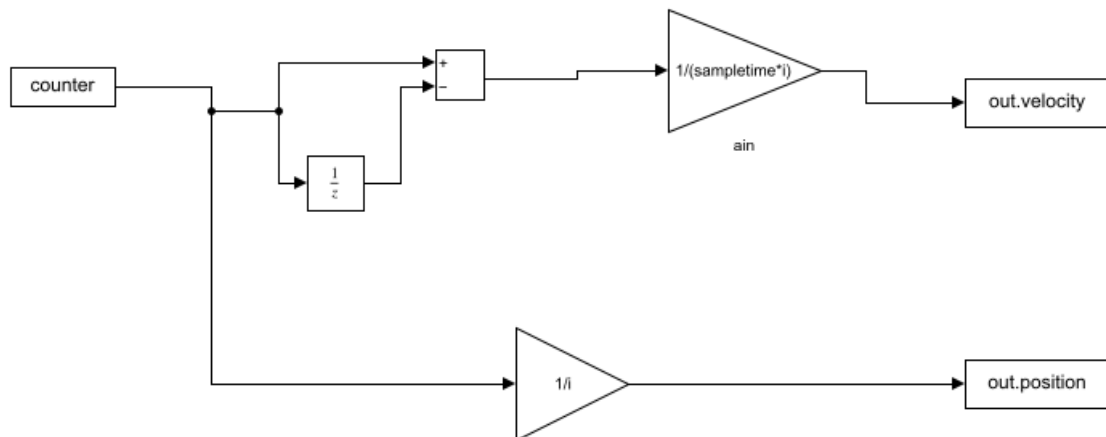


Figura 23 acquisizione encoder

Questo modello è stato successivamente modificato in quanto il calcolo risultava essere eccessivamente lento per il modello di controllo.

Si è optato così per un modulo di condizionamento in frequenza a 5kHz e 5V che collegato all'encoder forniva direttamente un segnale in tensione che opportunamente calibrato fornisce il valore di velocità.

Il valore in rpm e il calcolo del verso di rotazione vengono invece calcolati tramite il seguente modello simulink.

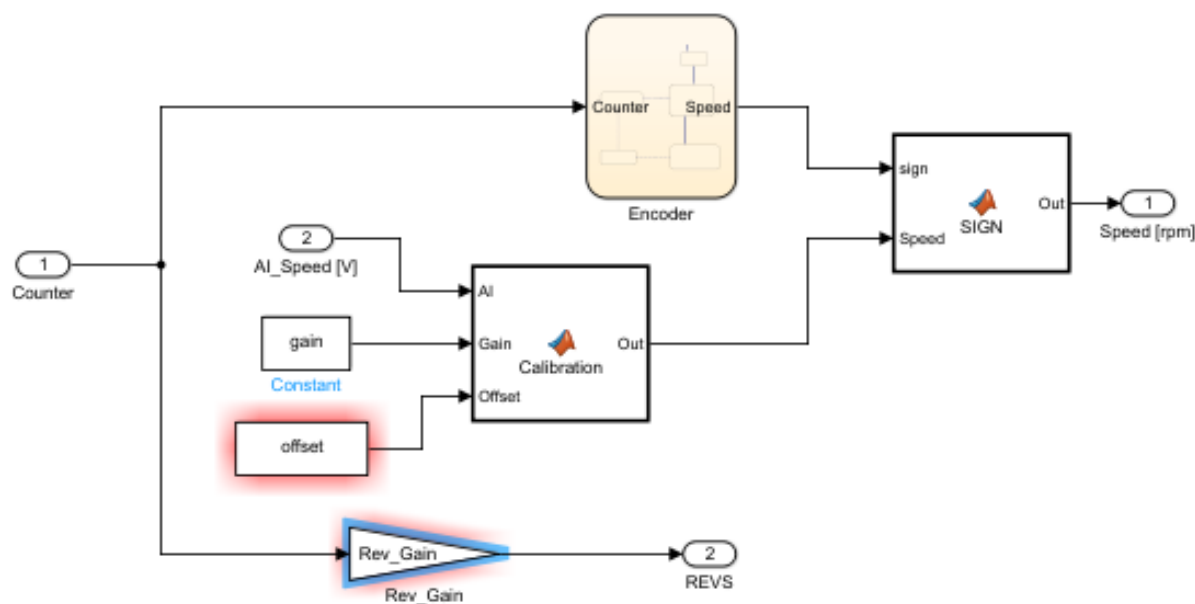


Figura 24 acquisizione encoder con segnale proveniente da modulo in frequenza

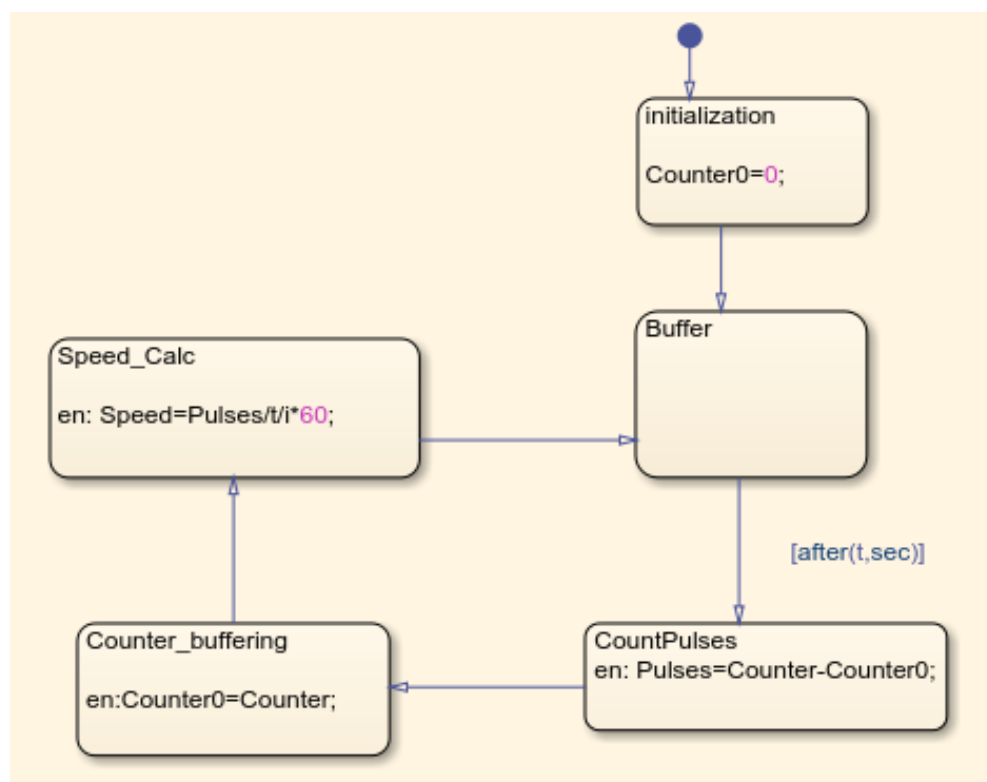


Figura 25 state-flow acquisizione encoder con modulo in frequenza a valle

Il modello riceve un contatore di impulsi calcolato dal treno di impulsi ad onda quadra dell'encoder. Calcola attraverso lo stateflow mostrato in figura la velocità in segno.

Lo stateflow definisce t il periodo in secondi della base tempi. Ad ogni ciclo il modello calcola il numero di impulsi in ogni periodo della base tempi e in questo modo ne calcola la velocità.

2.4 LVDT E RVDT

Il dispositivo presenta un controllo della posizione del cassetto retrozionato attraverso un sensore LvdT (Linear Variable Differential Transformer) direttamente collegato alla valvola. L'lvdt è un trasduttore lineare funzionante in assenza di contatto tramite il principio della mutua induttanza. È presente un avvolgimento principale e due secondari collegati, con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile. Quando il primario è alimentato con una tensione a.c. si induce nel secondario una tensione proporzionale allo spostamento del cassetto.

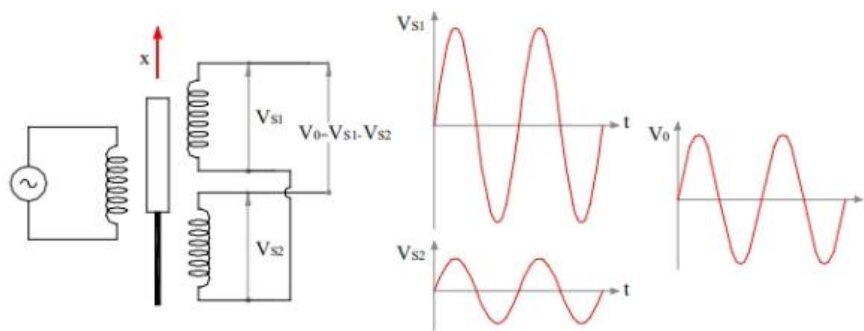


Figura 26 schema funzionamento LVDT

$$V_0 = V_{s1} - V_{s2}$$

V_0 è il valore della differenza delle tensioni indotte.

Un metodo a più alta affidabilità utilizzato nell'applicazione in questione restituisce come segnale finale in V_{rms} il valore di V_0 diviso per la somma delle tensioni dei due secondari.

$$\text{ratio} = \frac{V_{s1} - V_{s2}}{V_{s1} + V_{s2}}$$

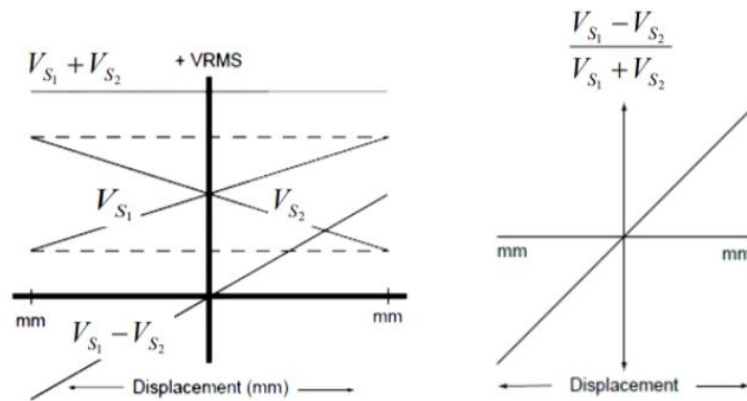


Figura 27 relazione spostamento cassetto - ratio

Allo stesso modo si può descrivere il funzionamento del rvdv utilizzato per il feedback in posizione dell'albero.

Nella figura successiva è mostrato il sensore utilizzato sul banco.

In particolare si possono notare i due canali ridondanti presenti sul dispositivo.



Figura 28 Rvdv

2.5 MODELLI DI CONTROLLO PER ELABORAZIONE RICHIESTE PROCEDURA

L'obiettivo della modifica del banco è quello di velocizzare il processo di collaudo ma ad una condizione ben precisa, ossia che la procedura di collaudo sia la stessa.

La procedura di collaudo prevede che il collaudatore riproduca esattamente le azioni richieste. Viene chiesto di raggiungere determinate velocità a specifiche coppie frenanti del carico esterno.

Sul vecchio banco manuale l'operatore per raggiungere la velocità richiesta aumentava manualmente attraverso i potenziometri il comando al cassetto della valvola, contemporaneamente visualizzava la velocità sul display.

L'obiettivo adesso è quello di permettere al sistema avviato di procedere automaticamente al raggiungimento delle condizioni di velocità.

Discorso analogo può essere fatto per la coppia resistente.

2.5.1 CONTROLLO VELOCITA'

Lo schema di controllo da specifica è progettato per controllare in anello chiuso la posizione dei martinetti in NWS%, quindi escludendo la parte di rimandi meccanici fino agli slat, quello che si controlla è a tutti gli effetti l'abero di uscita dall'unità di potenza idraulica. La retroazione è effettuata attraverso un Rvdt con un doppio canale di uscita in modo tale da realizzare due delle quattro ridondanze richieste.

Per alcune specifiche prove della procedura di collaudo è richiesto che si raggiunga una determinata velocità in rpm dell'albero all'uscita. Per questo è stato realizzato un controllo PI che si occupa di portare la velocità esattamente a quella richiesta e la mantenga ad ogni variazione di parametri richiesta dalla procedura.

Anche questo controllo come quello in posizione funzionante sul FCC del veivolo è un controllo retroazionato.

Per raggiungere un risultato soddisfacente è stato relizzato un modello di controllo Simulink andando a sfruttare i modelli simulativi mostrati nei paragrafi precedenti della valvola e del motore idraulico.

Si provvede quindi ad eludere la parte di controllo digitale in posizione e si comanda direttamente la tensione alla valvola. Il closed loop in velocità è realizzato tramite un encoder con la velocità appositamente convertita in rpm.

L'errore viene adesso calcolato come differenza sulla velocità in rpm tra set e feedback.

Anche in questo caso bisogna rispettare le condizioni di massima rampa realizzabili sull FCC del veivolo.

Per quanto riguarda i valori delle costanti K_p e K_i del controllo proporzionale integrativo si è proceduto attraverso un tuning per tentativi. Il controllo PI è stato inserito a valle della tensione nel modello simulativo del complessivo PDU (DDV e motore idraulico) esposti nei paragrafi precedenti.

Il tuning è stato effettuato seguendo il metodo Ziegler–Nichols. In particolare si è andato a cercare il valore della costante proporzionale K_p , in un controllo puramente proporzionale, per cui la risposta diventasse stabile e non presentasse più oscillazioni.

In seconda battuta si è andato ad effettuare il tuning della costante integrativa K_i , con lo scopo di renderlo il più reattivo possibile e senza errore a regime.

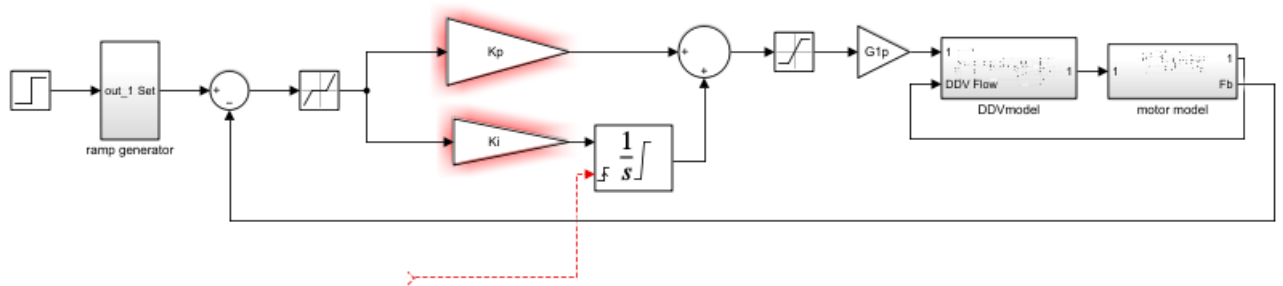


Figura 29 controllo proporzionale integrativo

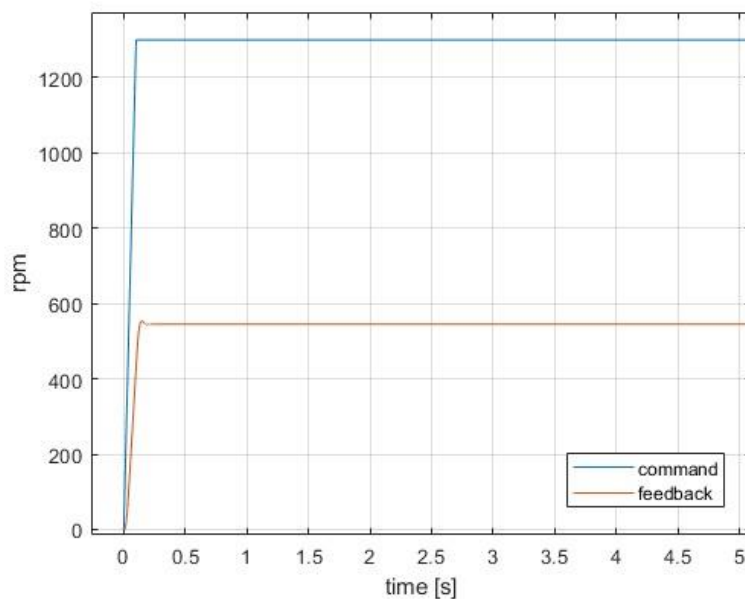


Figura 30 risposta alla rampa con solo controllo proporzionale

Inizialmente è stato provato un controllo puramente proporzionale e si è visto che il feedback non raggiunge mai il valore richiesto.

La prova è ritenuta comunque utile in quanto si può dare una stima del valore di K_p . Si è infatti cercato il valore di tale costante che almeno risponda al set con una rampa e che rimanga stabile.

Tale valore è $K_p=0,0001$.

A questo punto si è inserito il controllo integrativo andando a eseguire il tuning del parametro K_i .

Il primo tentativo con $K_p=0,001$ e $K_i=0,1$ mostra come per valori troppo alti della costante integrativa il sistema diventa instabile e il feedback inizia ad oscillare intorno al valore richiesto dal comando.

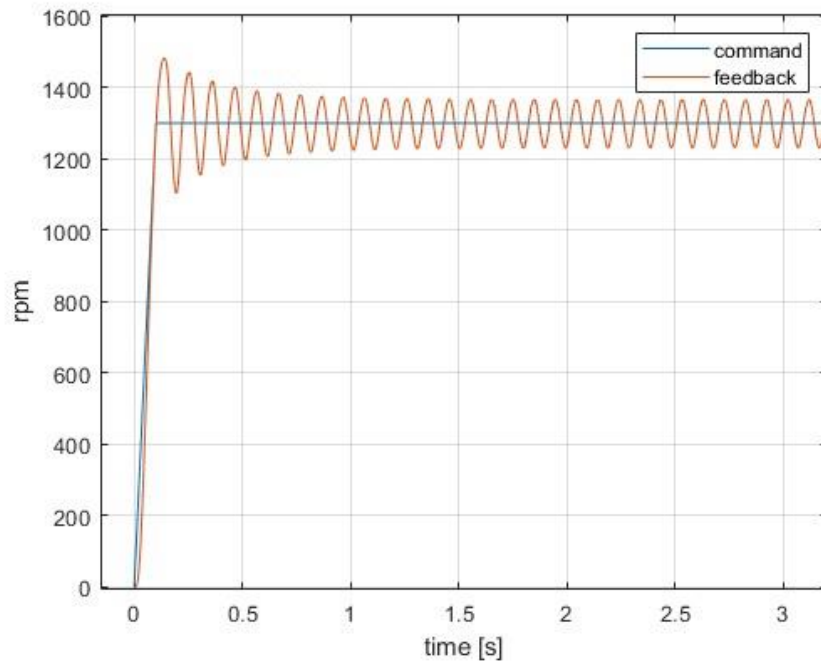


Figura 31 minimo valore di K_i per cui diventa instabile

Allora si è fatto variare il valore di K_i .

In figura è mostrata la risposta alla rampa per $K_i=0.05$, tenendo fisso il valore di K_p precedentemente calcolato.

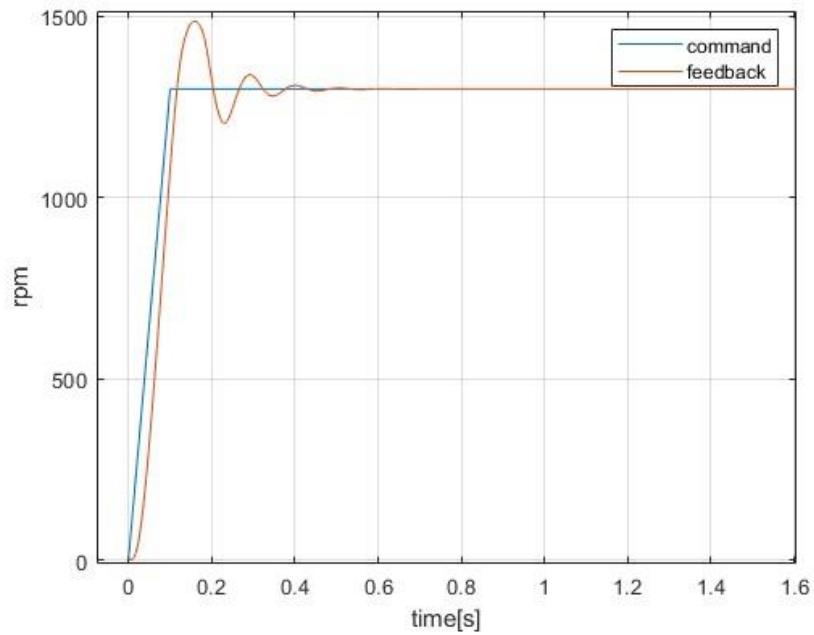


Figura 32 confronto al variare della costante integrativa

Si nota come per $K_i=0,05$ il sistema raggiunge un overshoot abbastanza sostenuto. Si provvede quindi a diminuire la costante integrativa fino a raggiungere una risposta soddisfacente. Con $K_i=0,003$ il sistema raggiunge la velocità massima in 0,5 secondi.

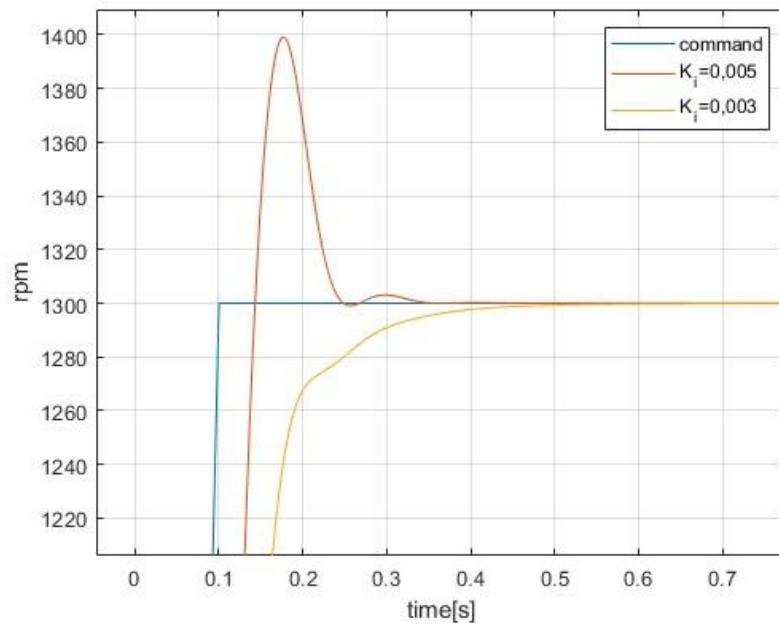


Figura 33 ingrandimento risposta alla rampa

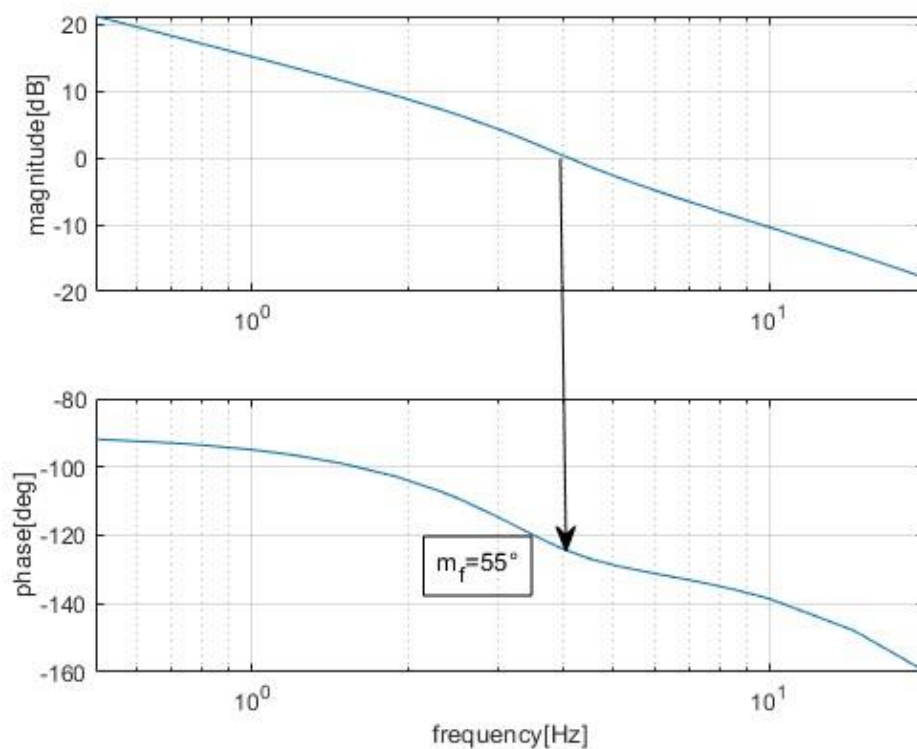


Figura 34 Bode controllo velocità proporzionale integrativo

Per il caso proporzionale integrativo i margini di guadagno e di fase sono pari a:

$M_g = 20 \text{ dB}$

$M_f = 55^\circ$

Sono stati inoltre realizzati dei digrammi di Bode in closed-loop per valutare invece la larghezza di banda. È considerata come frequenza di taglio la frequenza corrispondente a -3 dB.

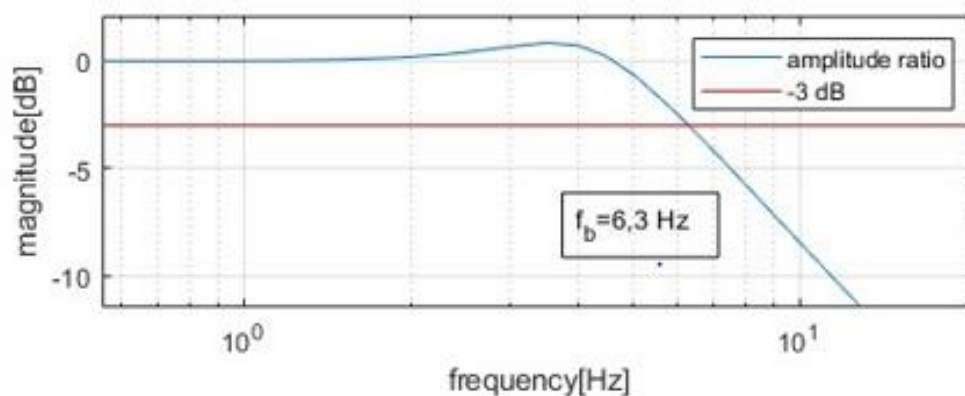


Figura 35 larghezza di banda PI

È stato realizzato un secondo modello di controllo velocità in cui è presente un feedforward al posto del semplice proporzionale.

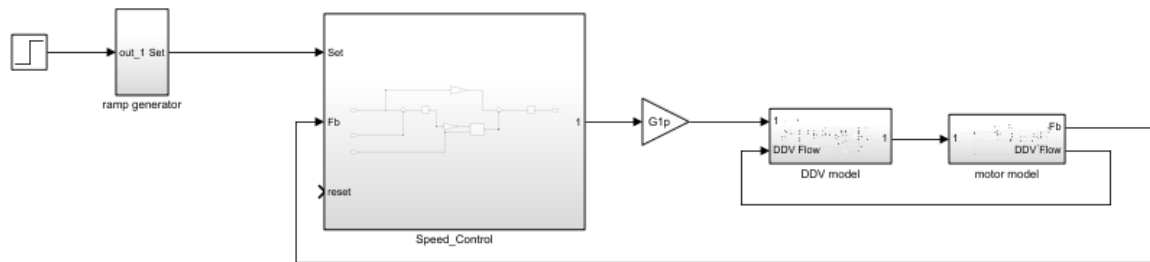


Figura 36 modello Simulink controllo velocità feedforward

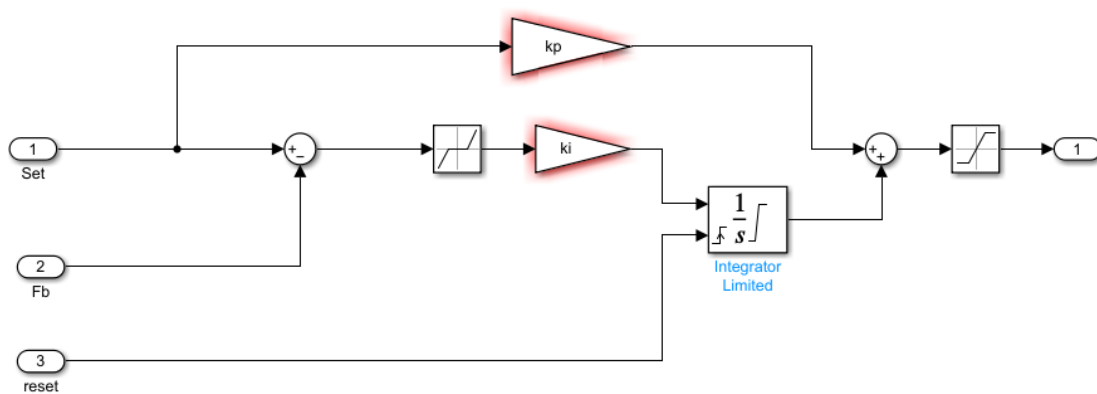


Figura 37 modello Simulink controllo velocità feedforward

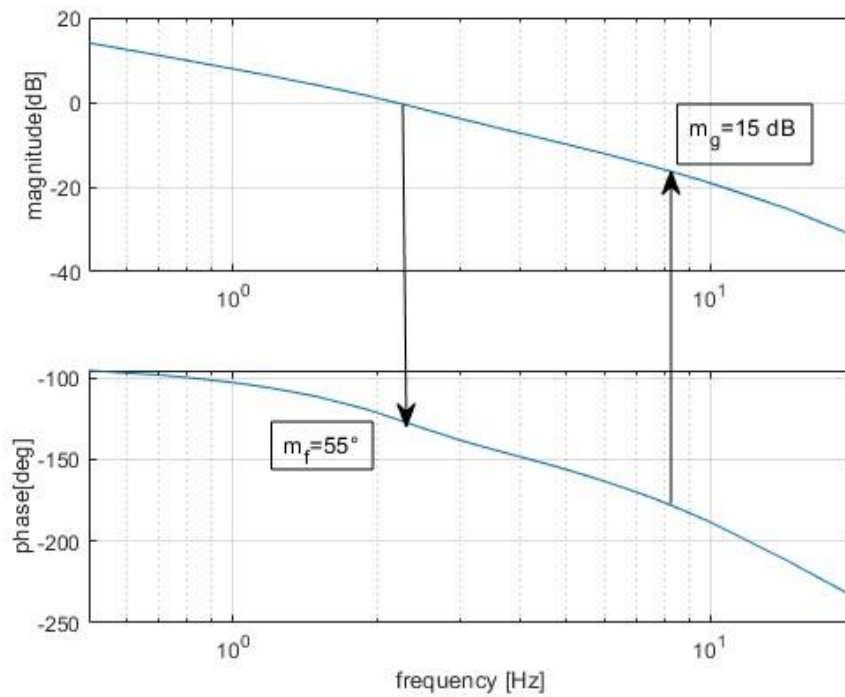


Figura 38 bode controllo velocità con feedforward

Per il caso con feedforward i margini di guadagno e di fase sono:

$M_g = 15 \text{ dB}$

$M_f = 55^\circ$

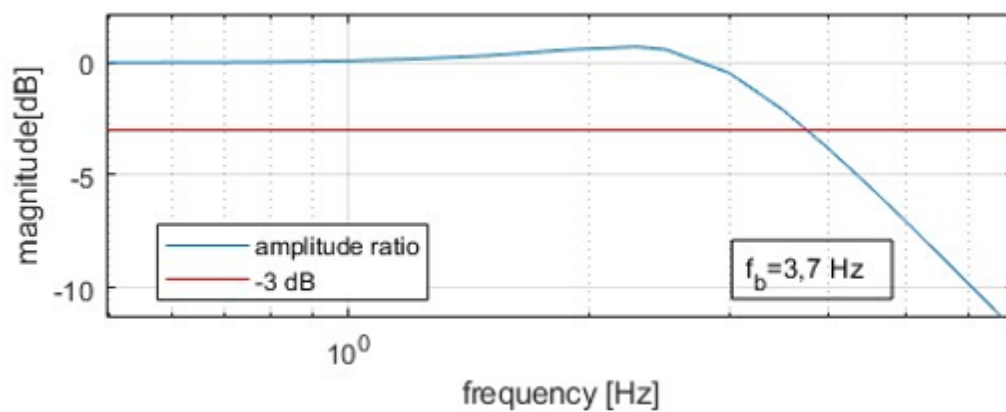


Figura 39 larghezza di banda feedforward

La larghezza di banda è 6 Hz per il caso proporzionale-integrativo mentre è 3,7 Hz per il caso in feedforward.

2.5.2 CONTROLLO VELOCITA' DEFINITIVO

Si è provato a questo punto a migliorare il controllo al fine di aumentare la larghezza di banda, cercando nel contempo di rimanere nei valori consoni di margine di fase e di guadagno in open loop.

Un limite fisico nella larghezza di banda è definito dal motore idraulico che taglia ad una frequenza di circa 10 Hz.

Per avvicinarci più possibile a questo valore è stato aggiunto al controllo PI un compensatore lead. Lo scopo di questo compensatore è quello di spostare gli zeri e i poli della funzione di trasferimento, considerando che la loro posizione prima dell'applicazione del filtro determinava la più bassa frequenza di cut-off.

Un compensatore lead è definito dalla seguente funzione di trasferimento nel dominio delle frequenze:

$$G_{lead}(s) = \frac{1}{\alpha} \frac{s + \frac{1}{\tau}}{s + \frac{1}{\alpha\tau}} = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1}$$
$$\alpha < 1$$

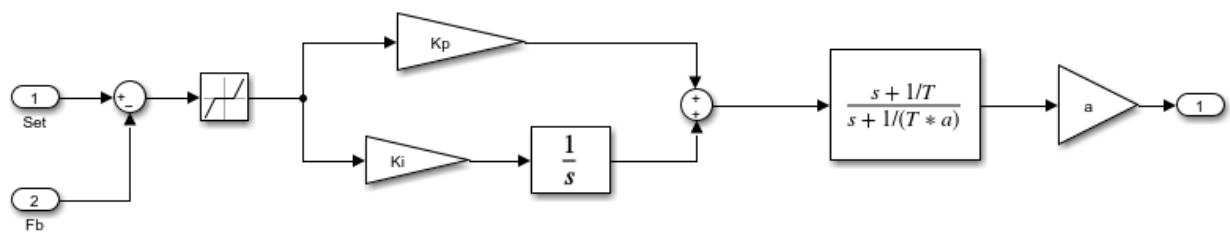
Dalla funzione di trasferimento nel dominio di Laplace possiamo dedurre che il compensatore ha uno zero in:

$$s = -\frac{1}{\tau}$$

E un polo in:

$$s = -\frac{1}{\alpha\tau}$$

Dunque si procede andando a selezionare come zero un punto nel dominio di Laplace ad una frequenza leggermente inferiore alla larghezza di banda nel sistema non compensato. Come polo invece si sceglie un punto corrispondente ad una pulsazione più elevata.



Con i seguenti coefficienti:

$$K_p = 0.0001$$

$$K_i = 0.005$$

$$\tau = 0.044$$

$$\alpha = 1.7$$

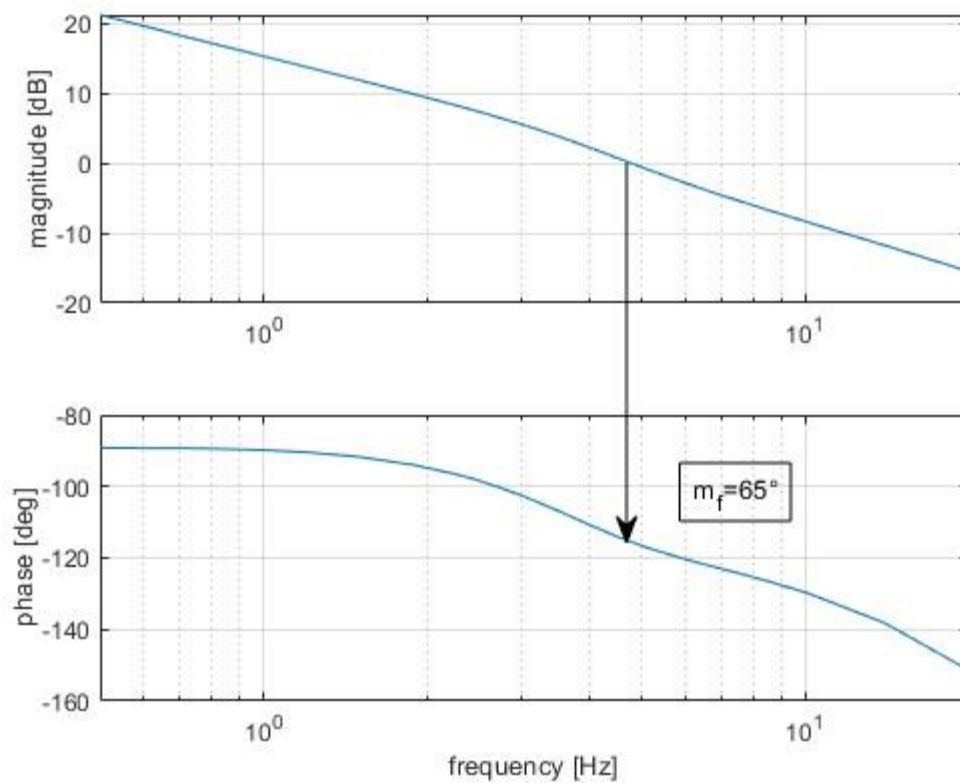


Figura 40 Bode open loop con PI compensato

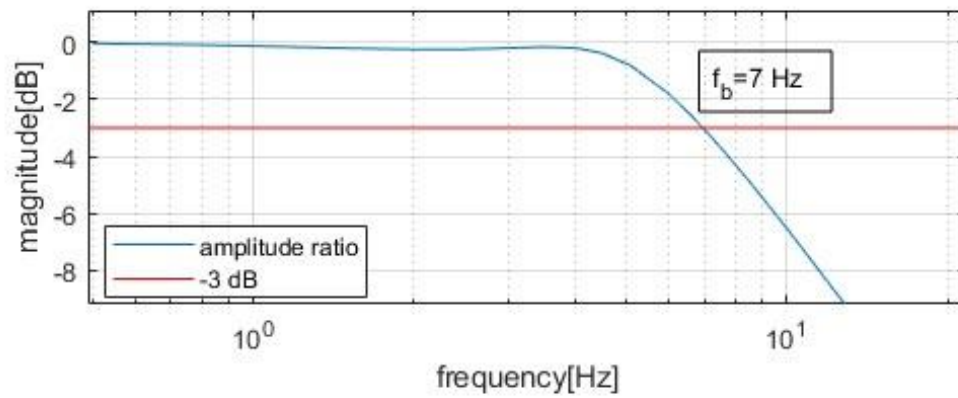


Figura 41 larghezza di banda controllo PI compensato

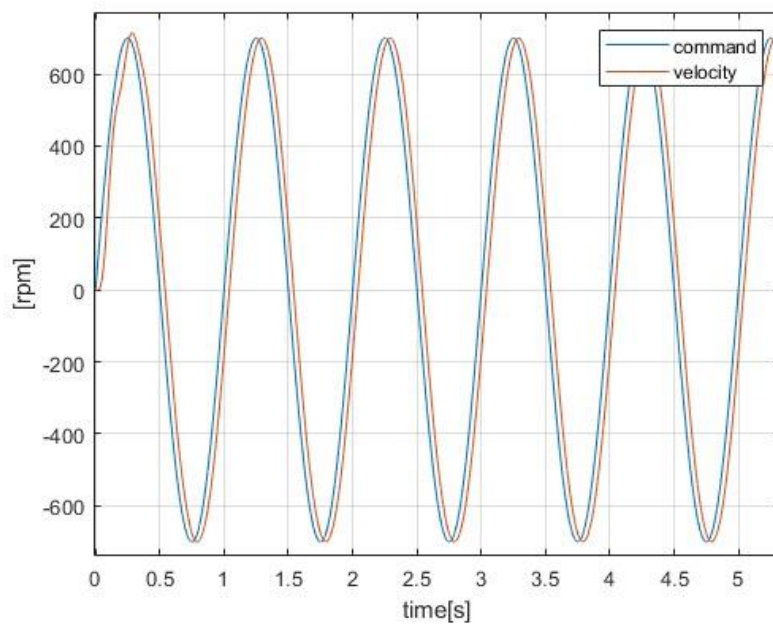


Figura 42 andamento feedback comando 1 Hz con ampiezza 700 rpm

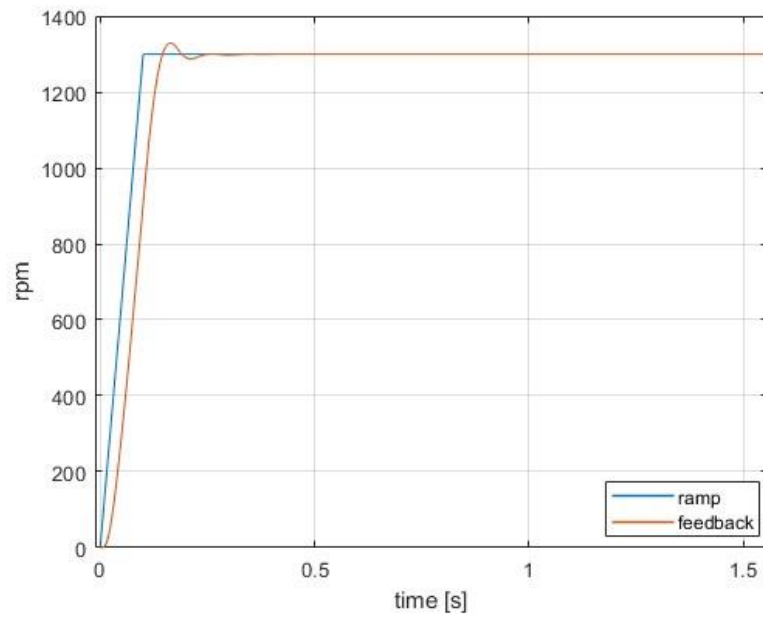


Figura 43 risposta alla rampa massima

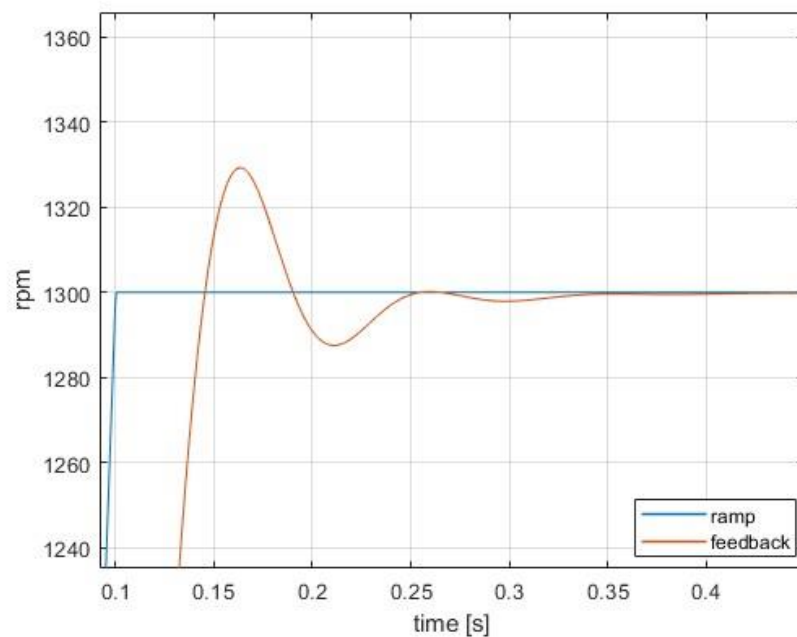


Figura 44 ingrandimento comando rampa

Overshoot=2,3%

Quest'ultimo controllo è stato considerato il più efficace in termini di stabilità, risposta alla rampa massima e di larghezza di banda.

2.5.3 CONTROLLO COPPIA

Alcune prove della procedura di collaudo prevedono l'utilizzo di un motore esterno che funga da utenza e simuli il comportamento del dispositivo nel campo di utilizzo. Quindi si applica una carico frenante all'albero all'uscita della gear box che riproduce il carico aerodinamico sullo slat.

Tra motore esterno e dispositivo è inserito un torsiometro in modo tale da poterne controllare la coppia ed inviare il segnale di feedback al sistema di controllo.

Il set di coppia è fornito seguendo le disposizioni della procedura con delle rampe realizzate in LabVIEW mentre il modello di controllo PI è convertito per essere utilizzato sulla piattaforma Veristand.

È inoltre implementato un input di reset dell'integrale in quanto alla fine di ogni prova può verificarsi che il segnale sia ancora carico e quindi in questo modo può essere azzerato non intaccando la validità della prova successiva. Il segnale viene controllato direttamente su veristand, attraverso la piattaforma Openconsole in cui il canale è associato a uno specifico tasto.

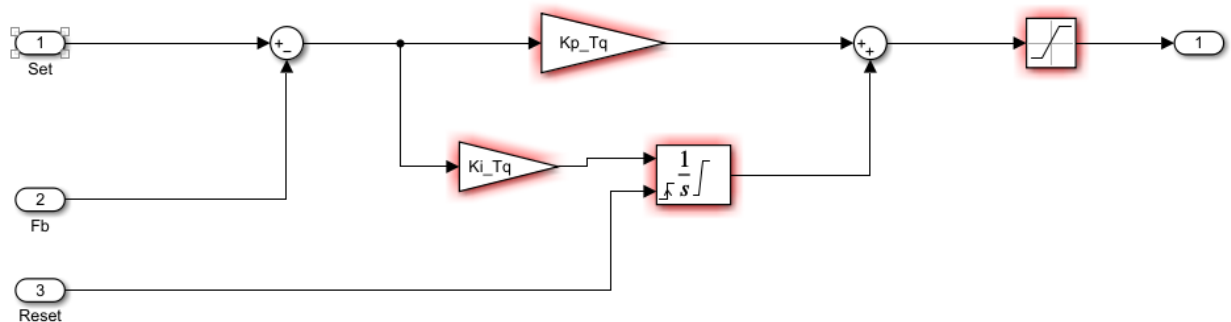


Figura 45 modello Simulink controllo coppia motore esterno

Capitolo 3. VALIDAZIONE SISTEMA DI VOTING E MONITORING

La necessità di avere sul veivolo di un elevata affidabilità e sicurezza è resa possibile attraverso la progettazione delle ridondanze elettriche e idrauliche.

La ridondanza è concepita come una duplicazione dei componenti critici e della loro logica, moduli identici in parallelo effettuano gli stessi calcoli e le stesse funzioni e li inviano al sistema di voting. Questo sistema è utilizzato per riconoscere le failure, ossia il superamento di una certa soglia ritenuta soglia di sicurezza secondo la specifica di progetto. Viene applicato secondo specifica per il controllo delle correnti passanti per la Direct Drive Valve e per le tensioni che l'rvdt invia al software rappresentanti la posizione dell'albero all'uscita.

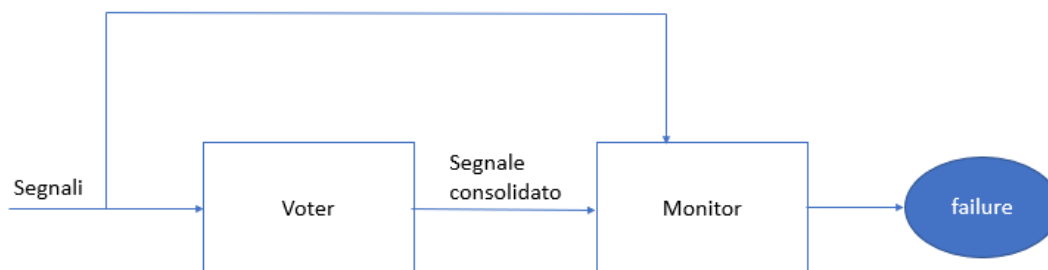


Figura 46 schema di funzionamento generale sistema voting/monitoring

Inizialmente i segnali vengono valutati da un voter, ossia un sistema logico che calcola in maniera appropriata un segnale consolidato. Il segnale consolidato (segnale di riferimento delle condizioni del sistema ad ogni loop) viene reinviato al monitor assieme ai quattro segnali originali in modo tale da confrontare e valutarne le soglie.

Ogni qual volta la soglia venga superata il sistema deve riconoscere la failure.

Per quanto riguarda la failure delle correnti DDV e delle correnti RVDT il sistema continua a funzionare anche con una delle linee disattiva. Questo è possibile in quanto nel momento in cui viene disattivata la linea dalla shut-off valve le altre linee compensano aumentando la corrente.

Il sistema prevede dunque una ulteriore cascata di voter/monitor che viene attivata solo nel caso vi è una linea già in failure. Inoltre vi sono altri quattro monitor rappresentati sulla specifica sempre come flow-chart che verificano altre condizioni di malfunzionamento.

In totale il Flight Control Computer è progettato per avere i seguenti monitor:

- monitor delle correnti DDV, che ricevendo i segnali di corrente della valvola e calcolando attraverso il voter un valore di riferimento restituisce le failure delle linee;

- monitor della posizione RVDT, con un funzionamento simile a quello del caso precedente;
- monitor di avviso movimento non richiesto dell'albero;
- overspeed monitor dell'albero di uscita;
- performance monitor;
- asymmetry monitor delle correnti RVDT;

L'attività di modifica del banco prevede la resa dei monitor da analogici a digitali.

Se prima i voter e i monitor erano stati progettati attraverso l'uso delle schede analogiche, adesso assieme alla parte di controllo è reso digitale anche il sistema di voter/monitoring.

Il funzionamento dei monitor è stato riprodotto su Simulink e linguaggio Matlab, facendo attenzione a verificare che la logica sia la medesima della specifica e che tutti i flow chart siano perfettamente rispettati.

Al modello simulink vengono dunque inviati tutti i segnali utilizzati nel FCC come nel funzionamento in volo dell'aereo.

Attraverso l'interfaccia veristand è stato possibile riportare degli specifici led che mostrassero in tempo reale l'attivazione dei monitor sul desktop pc. Sono stati inseriti dei flag all'interno dei modelli simulink, i quali vengono riportati come canali su piattaforma veristand.

Sulla Open console è quindi visibile lo stato di ogni monitor. In questo modo è stato possibile attraverso dei test preliminari in fase di debugging di controllare il funzionamento anche solo indicativo di ognuno di essi.

La fase successiva è stata quella della validazione vera e propria, in quanto è necessario che i monitor riconoscano le failure in tempi stabiliti esattamente come richiesto da specifica.

Essendo un sistema in real time, ogni processo ha dei requisiti che deve rispettare. La correttezza dipende sia dai risultati restituiti, sia dai tempi con cui vengono realizzati. Si parla infatti di necessità di determinismo del software.

Ogni monitor deve mostrare l'allarme della corrispettiva failure al raggiungimento di una determinata soglia solo quando essa è superata per un numero di campioni preciso. Il tempo è valutabile conoscendo per ogni monitor la frequenza a cui esso gira all'interno dei vari loop. La frequenza di ogni monitor è regolata attraverso uno specifico blocco su simulink, rate limiter.

Attraverso Veristand sono state registrati su un file Excel tutti i canali necessari per ogni prova, rendendo poi possibile un calcolo dei tempi di attivazione e della correttezza rispetto alle richieste.

3.1 VALIDAZIONE MONITOR CURRENT DDV

In questo paragrafo vengono mostrate le modalità di test e di validazione per le correnti passanti per la DDV.

La Direct Drive Valve dell'unità di potenza idraulica dunque riceve quattro tensioni diverse, che significano quattro diverse correnti inviate al torque motor. Il segnale di comando viene inviato quindi ai quattro modelli di controllo i cui loop prima di essere chiusi passano per un sistema di voting e monitoring.

Voter e monitor sono necessari affinché il sistema riconoscendo un valore errato di un determinato segnale ne possa staccare la linea, permettendo alla Pdu di funzionare correttamente e in condizioni ottimali.

Nella figura seguente è mostrato lo schema di funzionamento del suddetto voting/monitoring.

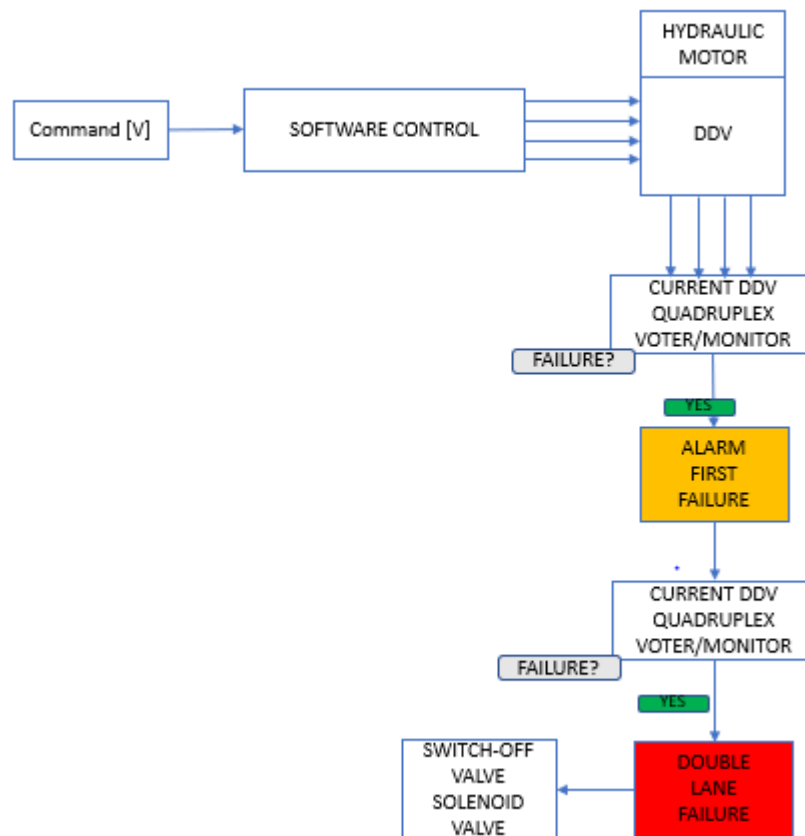


Figura 47 schema funzionamento DDV current monitor

In prima battuta il sistema controlla tutte e quattro le linee ridondanti, successivamente solo se una linea è stata già disattivata dopo aver rilevato una failure, allora vengono controllate le altre tre da un sistema a cascata.

Il dispositivo viene arrestato solo nel momento in cui vengono rilevate almeno due linee in failure.

Il monitor attivo con 4 linee è chiamato Quadmonitor, il monitor attivo con le 3 linee rimanenti è chiamato Triplexmonitor.

I flow chart di ogni voter e monitor sono stati realizzati con il blocco simulink Matlab function, il cui contenuto non viene mostrato per motivi di segretezza aziendale.

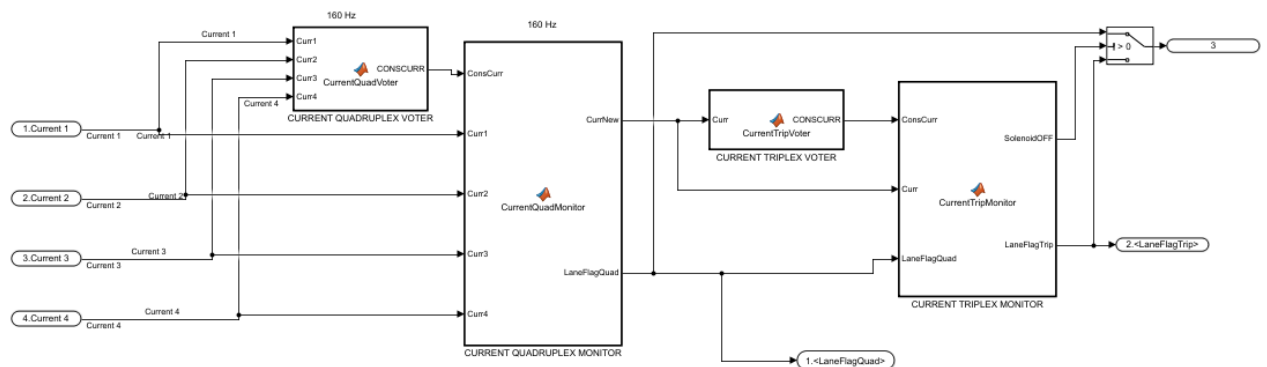


Figura 48 modello Simulink Voter/monitor a cascata per DDV current

La problematica del validare questo monitor sorge in quanto per mostrarne l'attivazione dell'allarme al momento corretto c'è bisogno che effettivamente una delle correnti superi il valore di soglia. Non essendo possibile aumentare la corrente fisicamente, per testarlo è stato inserito a valle del sistema di voter/monitor un modello realizzato ad hoc per manomettere manualmente il feedback di corrente.

In questo modo si ottiene all'uscita un valore di corrente che è del tutto virtuale e non corrisponde a quella effettivamente presente nella linea.

Possiamo però allo stesso tempo simulare un caso di malfunzionamento che bene si presta allo scopo di validare il monitor.

Prima dell'output è inserito un blocco Simulink 'rate transition' per ogni linea in modo tale da permettere al voter/monitor a valle di funzionare alla frequenza data da specifica.

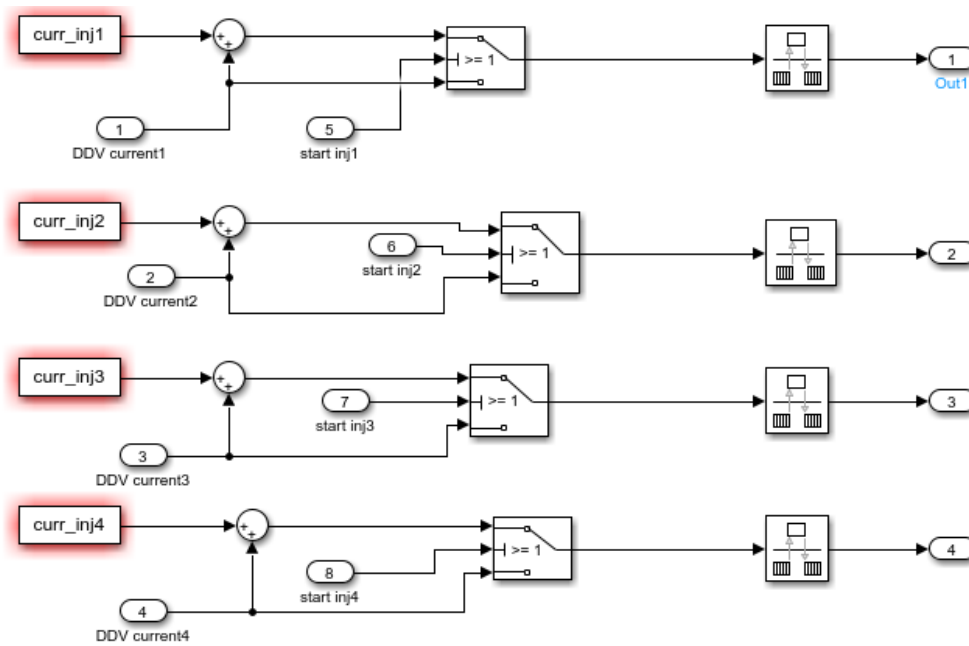


Figura 49 modello Simulink DDV current injection

Nella figura seguente è mostrata l'interfaccia utente realizzata su Veristand per la simulazione di queste failure.



Figura 50 interfaccia per l'attivazione delle injection

Ogni tasto è collegato a un canale Veristand che corrisponde ad uno specifico input 'start inj' su Simulink.

Quando durante una prova viene attivato il tasto sull'Open Console lo switch viene attivato, il modello somma automaticamente alla corrente effettivamente passante per la linea un offset ad ogni ciclo e così si ottiene una corrente virtuale più alta del reale.

Considerando che per essere certi che il monitor funzioni correttamente in ogni combinazione di failure, e che la logica del modello e del codice Matlab non escluda nessun caso, sono state effettuate prove per ogni combinazione di failure.

Le combinazioni testate sono quindi:

- failure linee 1-2
- failure linee 1-3
- failure linee 1-4
- failure linee 2-1
- failure linee 2-3
- failure linee 2-4
- failure linee 3-1
- failure linee 3-2
- failure linee 3-4
- failure linee 4-1
- failure linee 4-2
- failure linee 4-3

Come esempio viene mostrato il caso failure linee 2-1.

Il comando inserito è una sinusoide con le seguenti caratteristiche:

Bias=55 NWS;

ampiezza=12 NWS;

frequenza=1 Hz;

Dopo aver messo in funzione il sistema viene prima attraverso il tasto su Veristand attivato l'injection simulato alla linea 2, una volta comparso l'allarme del primo failure allora viene attivato l'injection della linea 1.

Per ogni linea in failure viene disattivato il solenoide corrispondente. Una volta che entrambe le linee sono in failure il sistema deve arrestarsi.

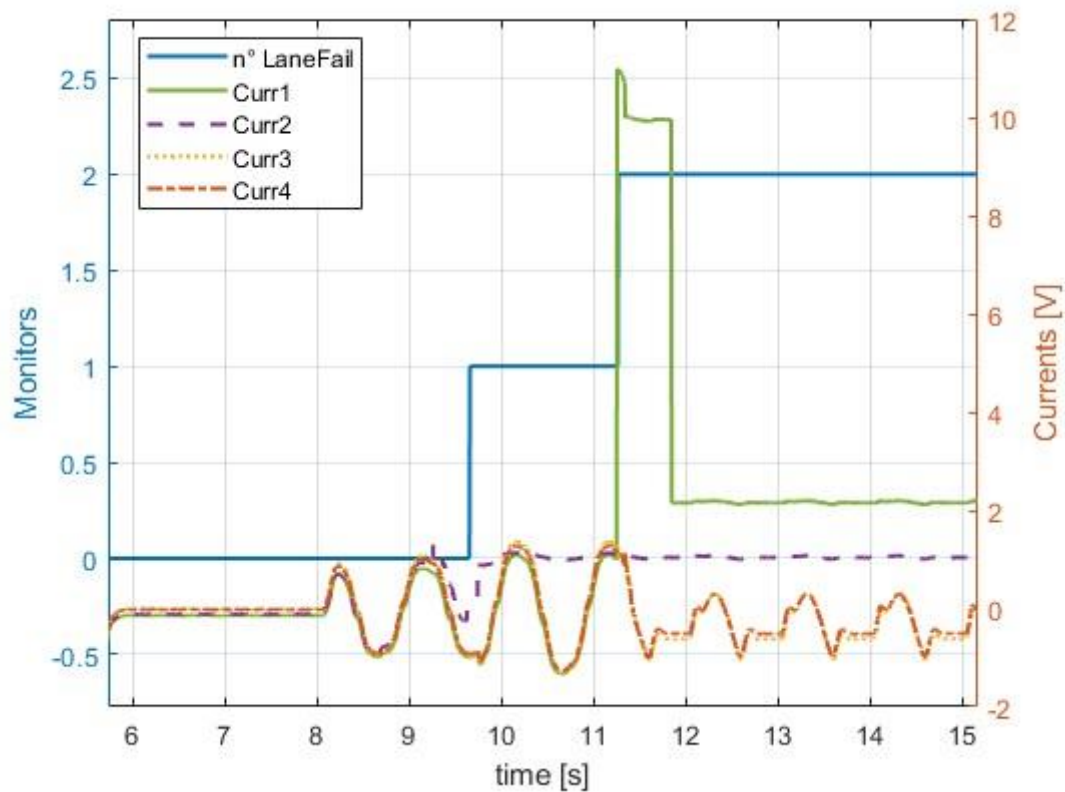


Figura 51 test DDV current monitor

La procedura richiede di garantire entrambe le seguenti condizioni:

- la linea deve risultare in failure quando la differenza tra il valore consolidato del voter e la linea in questione è maggiore del valore soglia 0,8 V per un tempo corrispondente a 6 campioni.
- la linea deve risultare in failure quando la differenza tra il valore consolidato del voter e la linea in questione è maggiore del valore soglia 3.5 V per un tempo corrispondente a 3 campioni.

Essendo la frequenza del monitor impostata a 160 Hz abbiamo:

$$t_f = 1/160 * 6 = 37,5 \text{ ms}$$

time	curr2	consolidato	differenza	failure linea
559,082	-0,813	-0,256	-0,557	0
559,089	-0,815	-0,263	-0,552	0
559,095	-0,822	-0,022	-0,8	0
559,101	-0,824	-0,017	-0,807	0
559,107	-0,827	-0,027	-0,8	0
559,114	-0,829	-0,019	-0,81	0
559,12	-0,83	-0,017	-0,813	0
559,126	-0,834	-0,026	-0,808	1
559,132	-0,835	-0,023	-0,812	1

Tabella 1 test DDV current monitor

In rosso è indicato l'istante in cui la linea supera il valore di soglia della differenza, in giallo l'istante in cui si attiva l'allarme.

Avendo riconosciuto la linea in failure dopo 6 campioni possiamo considerare validato il monitor.

Successivamente viene attivato l'injection simulato della linea 1.

In questo caso il valore di injection current è stato impostato ad un valore più alto per testare la parte di codice che attiva l'allarme nel caso più gravoso in cui la soglia è superata più velocemente e la corrente arriva ad un valore più alto.

Time	ConsCurrT	Curr1_160Hz	differenza	dual lane failure
560,717	1,161	1,019	-0,142	0
560,724	1,357	10,984	9,627	0
560,73	1,358	10,982	9,624	0
560,736	1,334	10,978	9,644	1
560,742	1,332	10,953	9,621	1
560,749	1,308	10,952	9,644	1
560,755	1,298	10,926	9,628	1
560,761	1,277	10,919	9,642	1

Tabella 2 test DDV current monitor

Il monitor in questo caso scatta in un tempo pari a:

$$t_f = 1/160 * 3 = 18,75 \text{ ms};$$

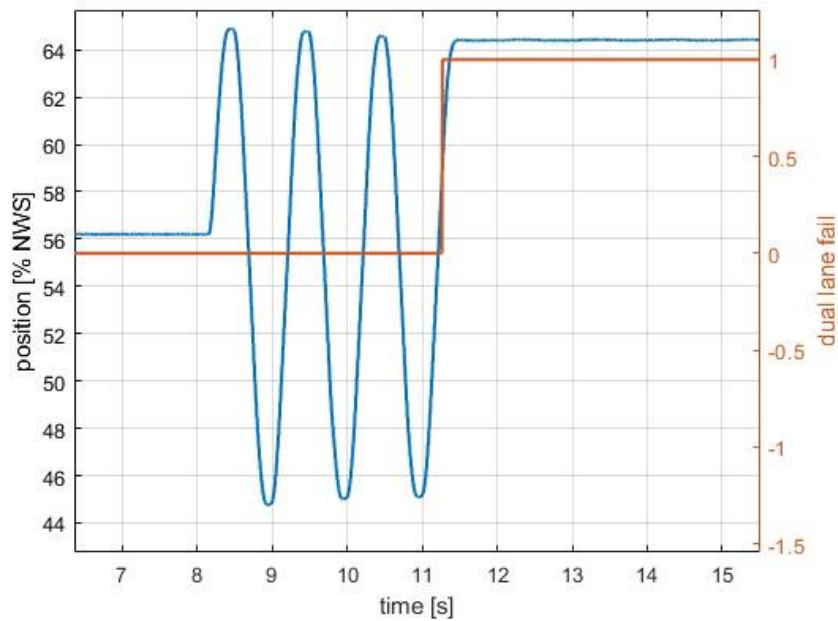


Figura 52 arresto albero di uscita dual lane DDV current failure

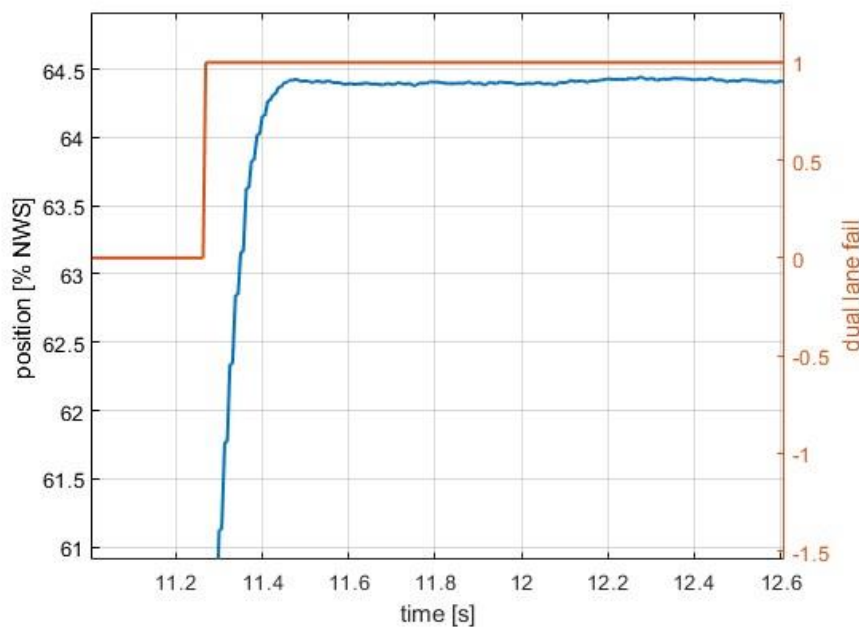


Figura 53 ingrandimento arresto albero di uscita dual lane DDV current failure

Si può notare dal seguente ingrandimento come dal momento dell'attivazione dell'allarme a quello dell'arresto dell'albero di uscita passino circa 0,2 secondi dunque il monitor funziona correttamente e il sistema di controllo e anche i canali analogici rispettano i tempi.

Le piccole oscillazioni della posizione sono dovute a un leggero rumore.

3.2 VALIDAZIONE RVDT POSITION MONITOR

In questo paragrafo viene descritto il funzionamento del position voter/monitor.

Questo monitor è progettato per riconoscere gli errori nel segnale ricevuto dal rvdt, ossia la correttezza del valore V_{rms} dopo essere stato demodulato e moltiplicato per i guadagni secondo specifica. Anche in questo caso i valori da confrontare sono 4 pari alle linee elettriche ridondanti. In particolare il sistema prevede due canali, per ogni albero di uscita, provenienti da ciascun sensore di posizione.

Il voter calcola un valore consolidato rispetto al quale il monitor ne valuta gli scostamenti con ogni linea. Il consolidato viene quindi inviato al software controller come feedback di riferimento.

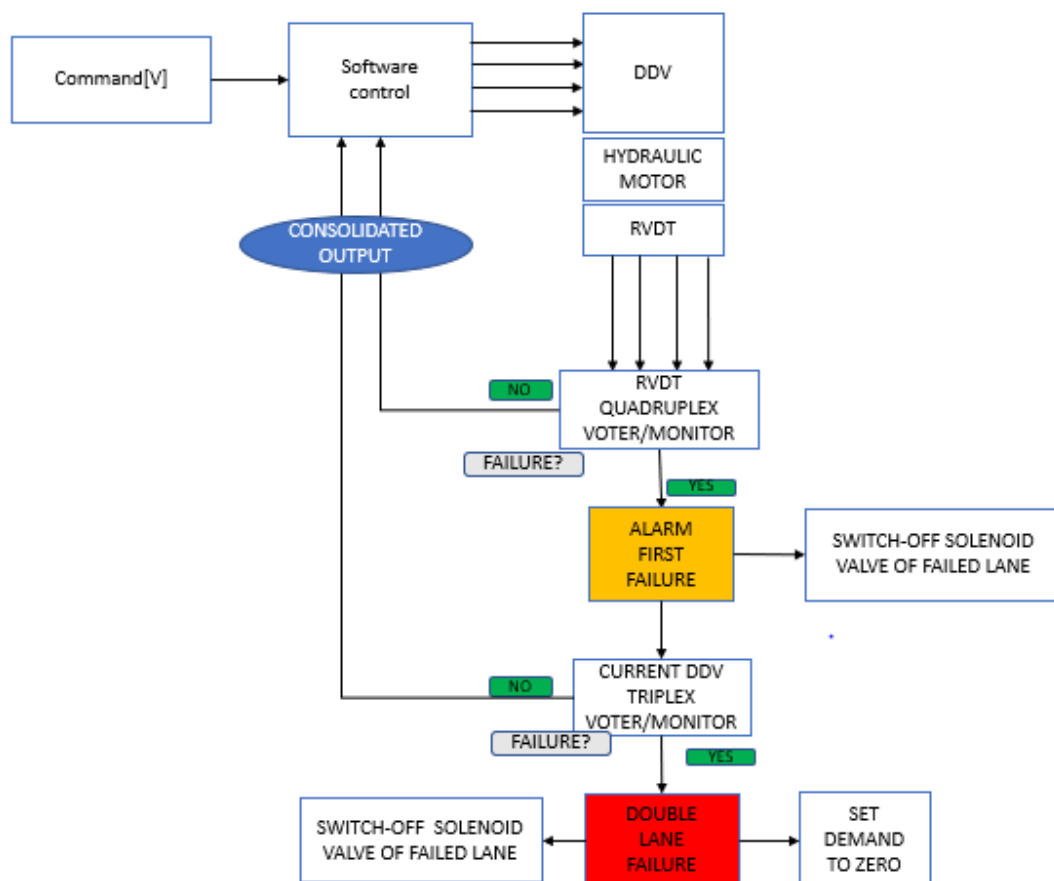


Figura 54 schema semplificato funzionamento position monitor

Nella figura è mostrata la logica con cui il monitor è connesso alla PDU e al software di controllo.

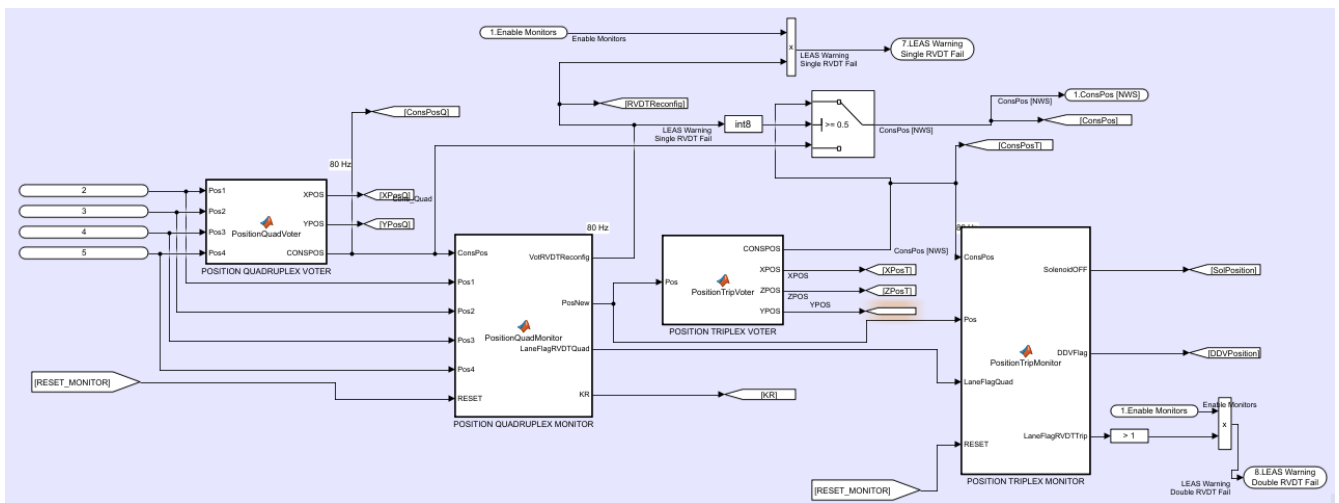


Figura 55 modello Simulink position monitor

Anche in questo caso è stato realizzato un modello Simulink che gestisca la simulazione di una tensione fittizia che corrisponde ad una posizione errata calcolata dal Rvdt. All'uscita dal modello è inserito un 'rate limiter' con frequenza imposta a 80 Hz. Questo monitor essendo inserito rispetto al precedente in un loop più esterno gira ad una frequenza inferiore.

La richiesta della specifica è:

- prima linea in failure riconosciuta dopo 20 campioni consecutivi con differenza consolidato/linea maggiore di 3.2 NWS%
- seconda linea in failure riconosciuta dopo 3 campioni consecutivi con differenza consolidato/linea maggiore di 3.2 NWS%

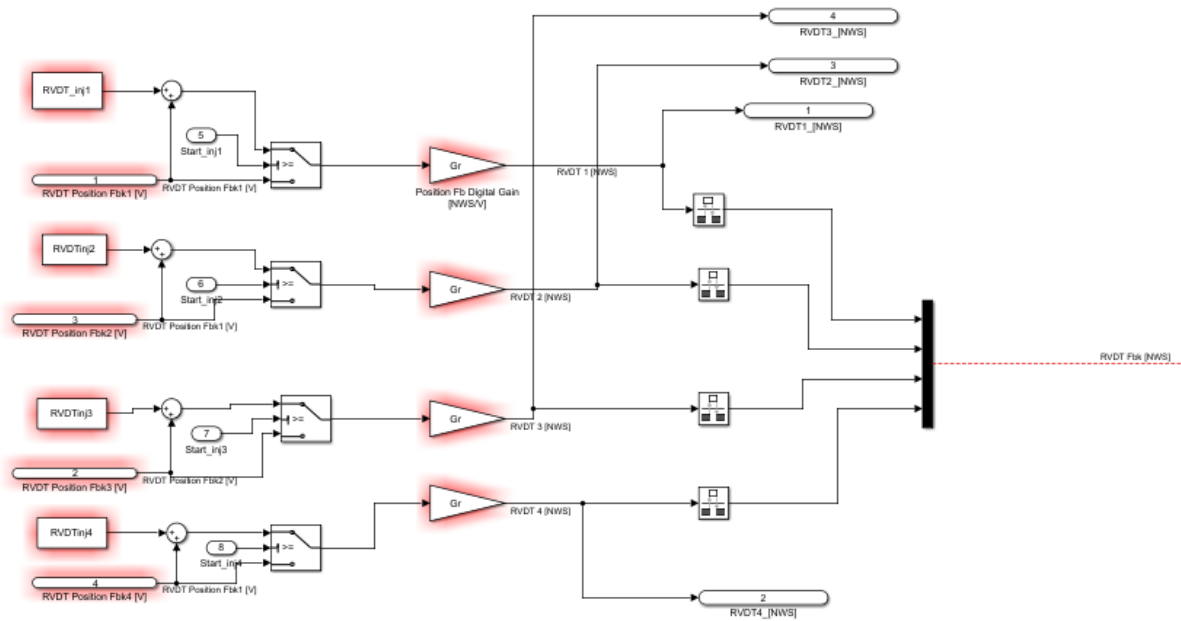


Figura 56 modello Simulink rvdT feedback injection

Il valore di tensione simulato prima di essere inviato al monitor viene moltiplicato per un guadagno statico $Gr[NWS\%/V]$ che esprime il valore misurato di posizione in NWS %.

Le combinazioni testate sono anche in questo caso:

- failure linee 1-2
- failure linee 1-3
- failure linee 1-4
- failure linee 2-1
- failure linee 2-3
- failure linee 2-4
- failure linee 3-1
- failure linee 3-2
- failure linee 3-4
- failure linee 4-1
- failure linee 4-2
- failure linee 4-3

La prova portata come esempio è quella 'failure linea 2- failure linea 1 in questo ordine.

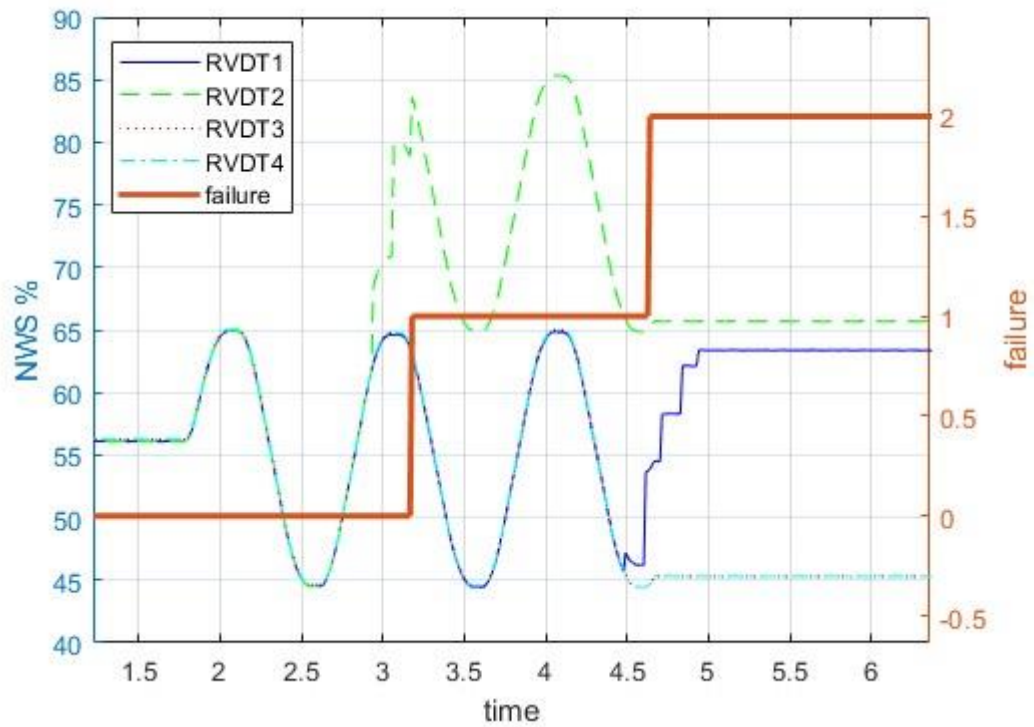


Figura 57 test position monitor

Time	RVDT2_80Hz	ConsPosQ	differenza	lane failure
2976,906	60,253	60,322	-0,069	0
2976,918	61,015	61,1	-0,085	0
2976,931	61,667	61,758	-0,091	0
2976,943	68,569	62,775	5,794	0
2976,956	69,122	63,348	5,774	0
2976,968	69,598	63,795	5,803	0
2976,981	70,017	64,209	5,808	0
2976,993	70,29	64,489	5,801	0
2977,005	70,519	64,709	5,81	0
2977,018	70,697	64,901	5,796	0

2977,03	70,786	64,971	5,815	0
2977,043	70,86	65,041	5,819	0
2977,055	70,849	65,053	5,796	0
2977,068	79,906	65,035	14,871	0
2977,08	79,946	65,068	14,878	0
2977,093	79,896	65,038	14,858	0
2977,105	79,881	65,033	14,848	0
2977,118	79,861	65,033	14,828	0
2977,13	79,741	64,889	14,852	0
2977,143	79,561	64,693	14,868	0
2977,155	79,242	64,396	14,846	0
2977,168	78,861	64,005	14,856	0
2977,18	83,632	63,559	20,073	1
2977,193	83,026	62,955	20,071	1
2977,205	82,358	62,287	20,071	1

Tabella 3 registrazione position monitor, prima failure

In rosso è indicato l'inizio dell'injection simulato, in giallo il momento in cui si attiva l'allarme.

La procedura richiede che la differenza tra il valore consolidato e il valore della corrente in failure sia maggiore di 3,2 NWS% per un tempo corrispondente a 20 campioni prima di attivare l'allarme.

$$t_f = 1/80 * 20 = 250 \text{ ms};$$

Successivamente è testato in sequenza il monitor per la seconda failure.

In questo caso è previsto che il riconoscimento della failure avvenga al terzo campione oltre la soglia della differenza di 3.2.

Time	RVDT1_80Hz	ConsPosT	differenza	lane failure
2978,578	46,204	44,767	-1,437	1
2978,59	46,222	44,764	-1,458	1
2978,603	46,212	44,777	-1,435	1
2978,615	53,636	44,771	-8,865	1
2978,628	53,725	44,846	-8,879	1

2978,64	53,878	45,003	-8,875	2
2978,653	54,149	45,25	-8,899	2
2978,665	54,463	45,562	-8,901	2
2978,678	54,535	45,644	-8,891	2

Tabella 4 registrazione position monitor, seconda failure

Si può notare dal grafico nel tempo delle correnti come una volta riconosciuta la seconda failure il sistema si blocca, in quanto il set viene posto a zero, il cassetto torna chiuso e il feedback rimane costante in quanto non c'è più rotazione.

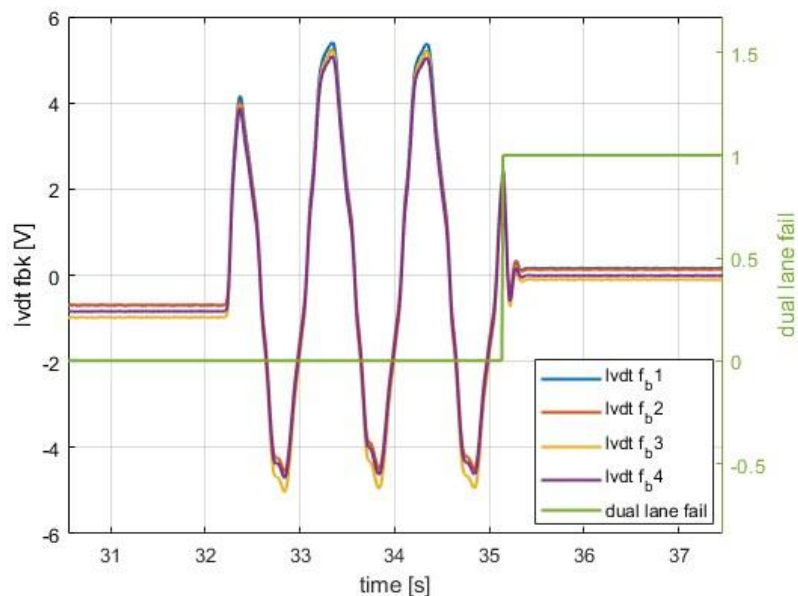


Figura 58 lvd feedback durante il test position monitor

3.3 OVERSPEED MONITOR

La logica di controllo prevede un monitor predisposto appositamente per verificare che la velocità angolare dell'albero in uscita non sia maggiore di un certo valore di soglia.

Tale valore essendo critico per il sistema deve permettere al dispositivo di arrestarsi staccando le valvole shut-off con i solenoidi.

Per testare il monitor si è provveduto a metterlo in comunicazione con un motore elettrico brushless regolabile attraverso un dispositivo di modulazione in frequenza.

Dunque attraverso il potenziometro si va ad aumentare il set in rpm al motore elettrico, con un encoder integrato viene letta la velocità. È stato precedentemente effettuata una calibratura del dispositivo affinché si potesse leggere sempre la velocità corretta su Veristand.

Per validare il monitor è stato collegato il motore elettrico allo stesso rvdv utilizzato sul banco.

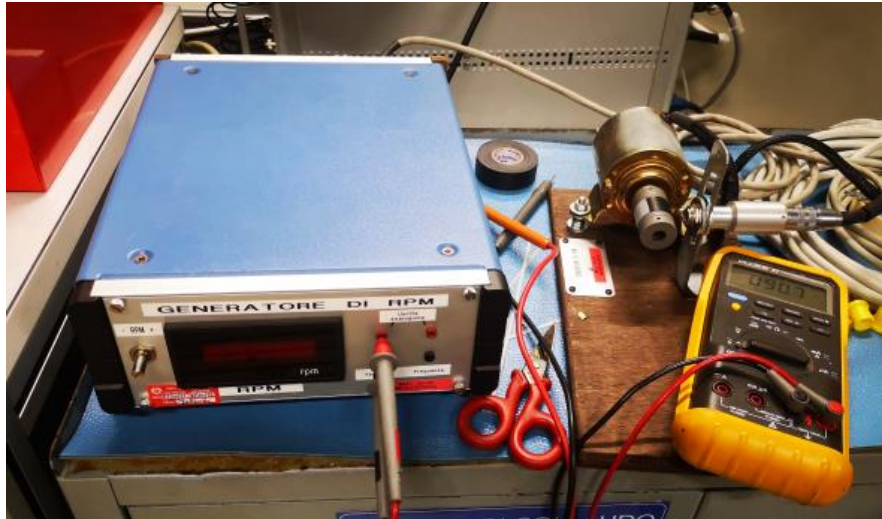


Figura 59 modulatore in frequenza e motore elettrico con rvdv collegato

Quest'ultimo invia il segnale direttamente al Pxi attraverso le stesse schede di condizionamento del segnale utilizzate sul banco.

Dunque in questo modo si può effettuare la verifica scollegandosi dal banco, senza portare in condizioni di overspeed l'oggetto del collaudo.

Per la calibratura è stata utilizzata la funzionalità su Varistand che permette di calibrare un canale.

In questo modo conoscendo la velocità a cui gira il motore tramite il modulatore di frequenza, possiamo associare ad ogni velocità in rpm un valore in tensione corrispondente su cui lavora il monitor.

Il dispositivo di modulazione in frequenza utilizzato restituisce un valore in rpm sul display, dunque si conosce l'effettiva velocità dell'albero.

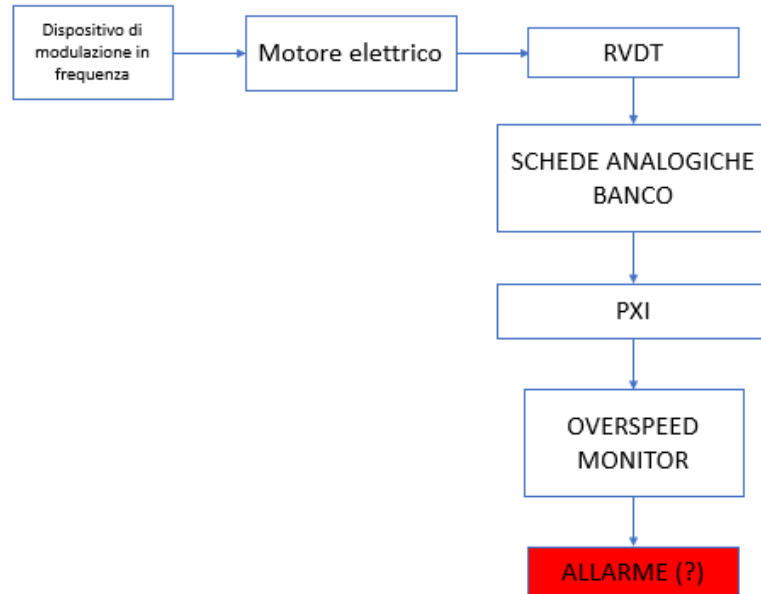


Figura 60 schema esecuzione prova per overspeed monitor

La specifica di funzionamento prevede di calcolare la velocità a partire dal valore della posizione consolidata calcolata dal Position voter.

Il monitor provvede a calcolare dunque a differenza di posizione tra un campione e il successivo e a moltiplicarlo per un fattore di proporzionalità K_{sp} che porta il valore di posizione in tensione[V].

La velocità limite si raggiunge quando tra un campione e il successivo, acquisito ad una frequenza di 40 Hz la tensione supera il valore soglia V_{th} di 8,81 V.

$$K_{sp} = 3,7667 \frac{V}{NWS\%}$$

$$V_{th} = 8,81 \text{ V}$$

$$t_{sample} = 1/40 \text{ s}$$

Il valore limite di velocità può quindi essere calcolato:

$$\text{speed_th} = \frac{V_{th} * 1}{K_{sp} * t_{sample}} [\text{NWS\%/s}]$$

essendo $100 \%NWS = 30$ giri

$$\text{speed}_{rpm} = \text{speed}_{th} * 0,3 = 1684 \text{ rpm};$$

La richiesta da progetto è che l'allarme venga attivato quando la velocità supera la soglia per 4 campioni consecutivi.

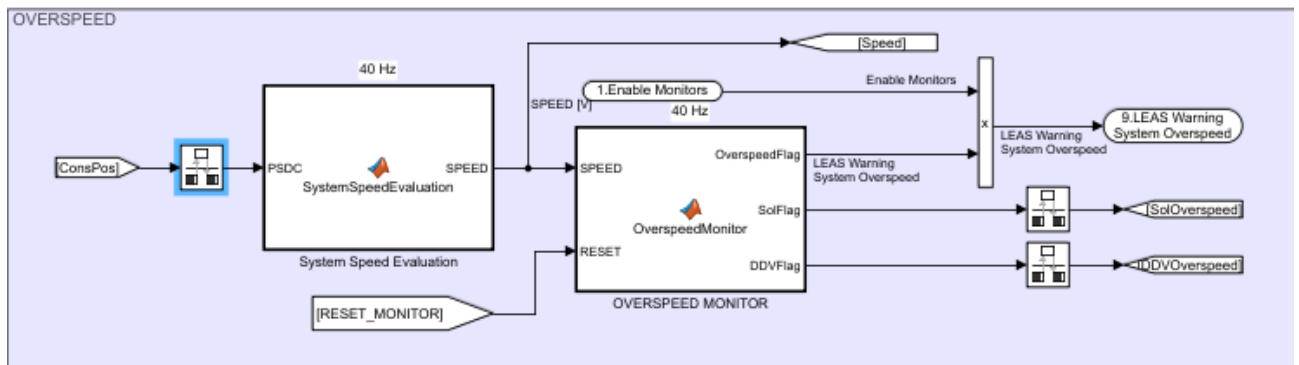


Figura 61 modello Simulink overspeed monitor

Il monitor, oltre a segnalare attraverso un flag prediposto nel modello Simulink il raggiungimento su interfaccia Veristand della velocità di soglia, deve anche inviare un segnale alle valvole shut-off al fine di staccare le solenoidi e portare a scarico il sistema.

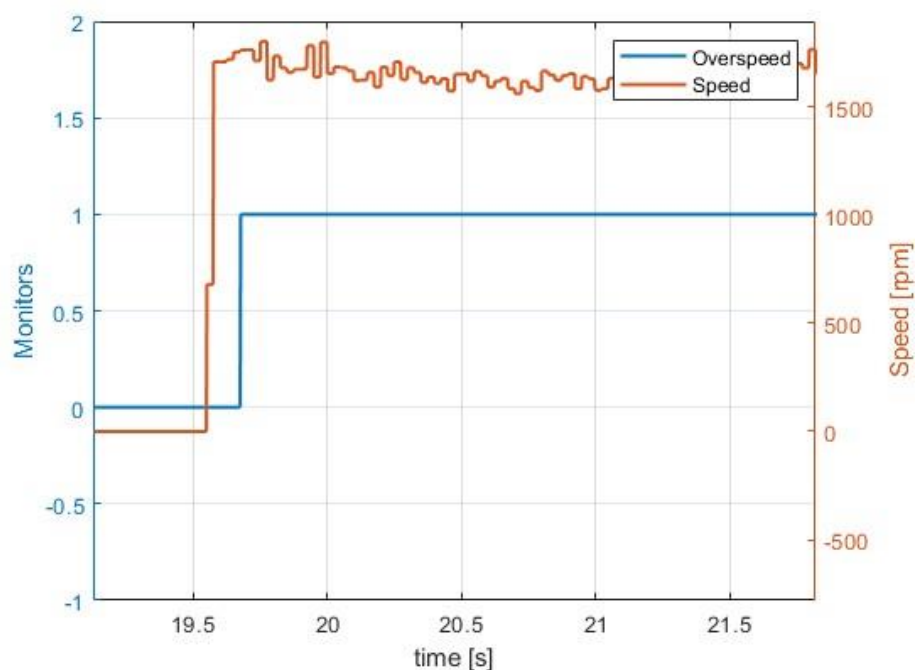


Figura 62 test overspeed monitor e velocità calcolata da encoder

Essendo stato l'allarme attivato dopo 100 ms (4 campioni ad una frequenza di 40 Hz) dal superamento del valore critico il monitor è validato.

$$t = 1/40 * 4 = 100 \text{ ms.}$$

3.4 UNDEMANDED MOVEMENT

Un ulteriore monitor presente è l'undemanded movement. Quest'ultimo è ideato al fine di segnalare qualsiasi movimento recepito dal Rvdt che non sia stato effettivamente richiesto, ad esempio l'albero si muove in direzione opposta rispetto alla posizione comandata.

Per validare questo monitor è stato scollegato l'albero d'uscita assieme al Rvdt. È stato inserito un comando pari a zero della posizione e successivamente si è fatto ruotare l'albero manualmente.

A questo punto il controllo riceve in feedback una posizione rilevata dal rvd, il cui segnale attraverso le schede analogiche viene inviato al monitor digitale in questione. Quest'ultimo lavora ad una frequenza pari a 80 Hz.

Anche in questo caso è stato inserito su simulink un flag che su Veristand viene associato ad un allarme.

Un contatore (sum) aggiornato ad ogni loop calcola la differenza tra il comando effettivo e il feedback, quando si raggiunge un valore soglia, allora scatta l'allarme.

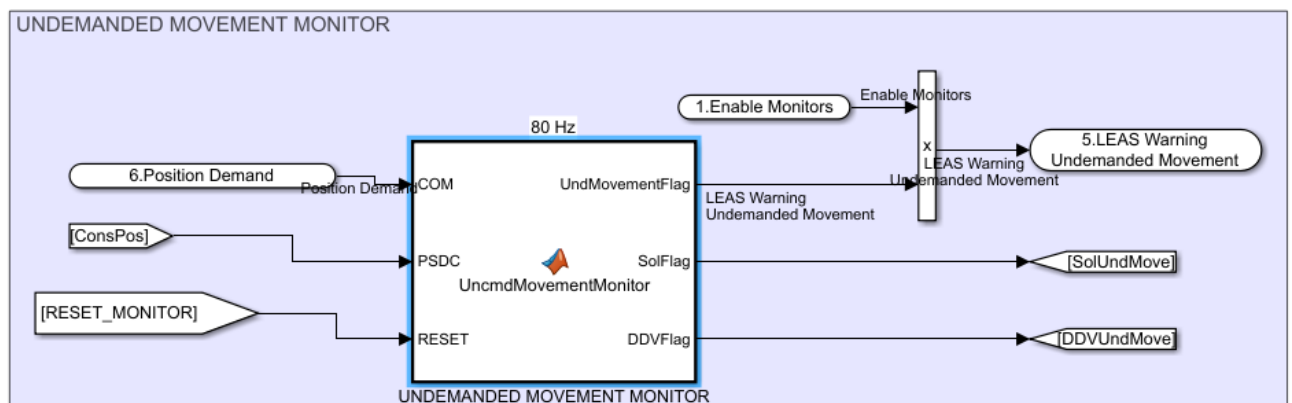


Figura 63 modello Simulink undemanded movement monitor

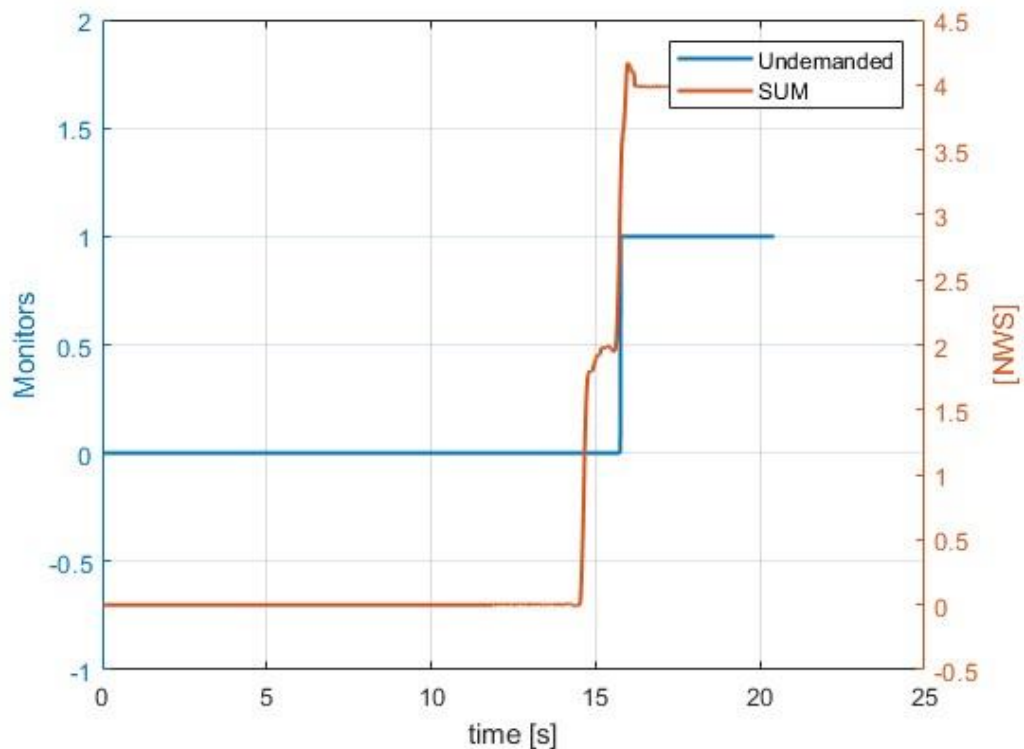


Figura 64 grafico test undemanded movement monitor

Il monitor scatta esattamente quando il contatore raggiunge la soglia 3.2 NWS come richiesto dunque può essere considerato validato.

3.5 PERFORMANCE MONITOR

Il performance monitor si occupa di rilevare:

- bassa velocità, valutata considerando una posizione simulata che calcola appositamente il modello
- mancanza di movimento;

Per poter validare il monitor è necessario simulare una condizione di funzionamento con basse performance. Per fare ciò è stato abbassato il valore della pressione di alimentazione al motore idraulico ed è stata attivata una sola linea elettrica.

La richiesta della specifica è:

- allarme attivo quando la differenza tra il valore del consolidato e di un valore simulato calcolato da uno specifico modello superi la soglia di 5 per più di 3 campioni consecutivi.

Come prova è stato generato un input con una rampa abbastanza lenta da poter notare le variazioni.

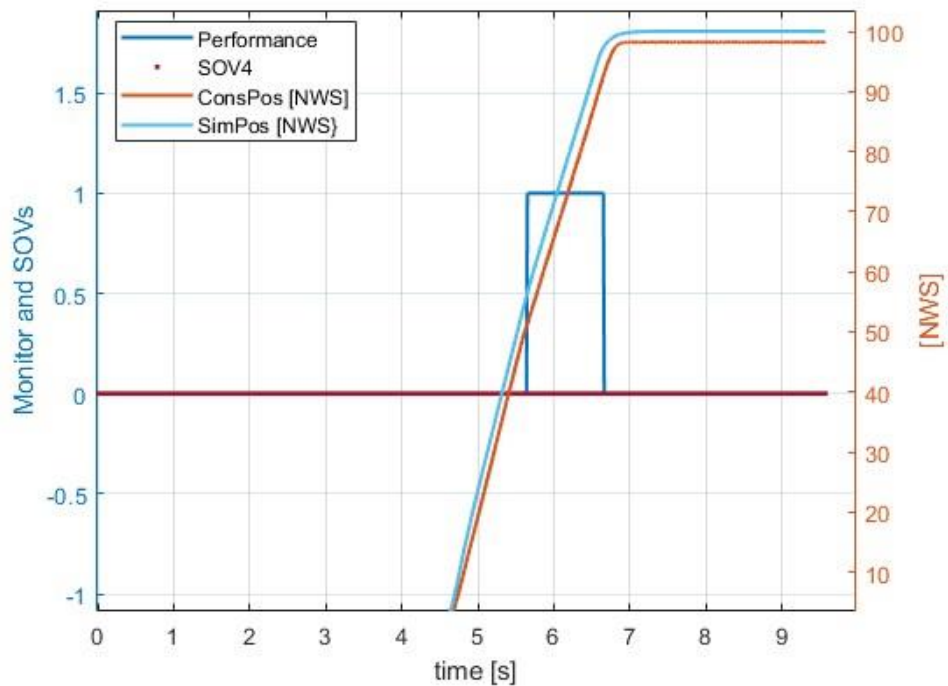


Figura 65 grafico test performance monior

L'unica solenoide attiva è la 4, dal grafico quando il flag SOV è pari a 0 la solenoide è attiva. L'ultima solenoide viene disattivata quando vi è la variazione della pendenza del consolidato. Dalla figura si nota come il performance monitor restituisce l'allarme per la durata di 1 secondo circa.

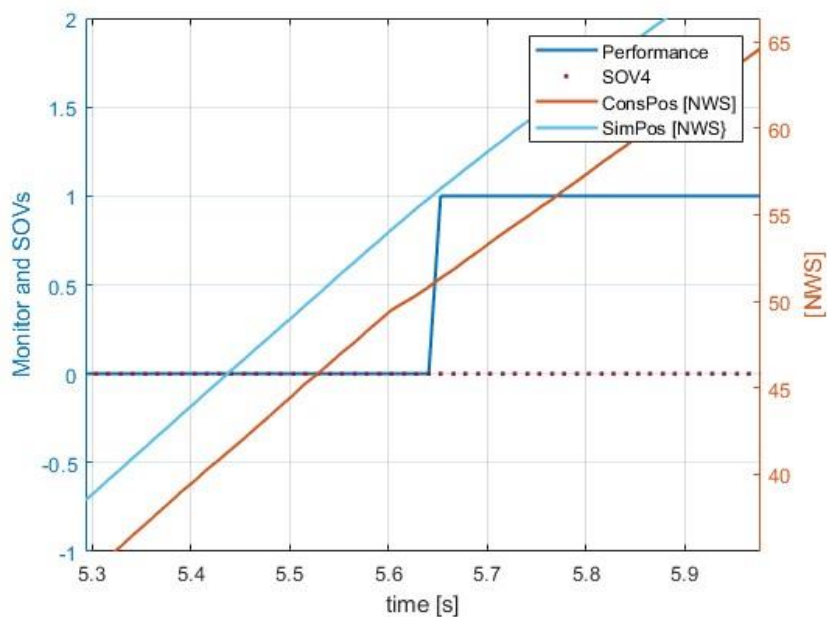


Figura 66 ingrandimento grafico test performance monior

Il valore di soglia della differenza tra il simulato e il consolidato è pari a 5 NWS%.

La procedura richiede che l'allarme venga attivato quando la soglia viene superata per almeno 3 campioni consecutivi. La frequenza di risoluzione del monitor è pari a 80 Hz.

Di conseguenza il tempo di attivazione deve essere pari a:

$$t_f = 1/80 * 3 = 37,5 \text{ ms};$$

Time	Warning Performance	SimPos [NWS]	ConsPos [NWS]	Sim-Cons
271,726	0	54,128	49,481	4,647
271,739	0	54,747	49,919	4,828
271,751	0	55,349	50,32	5,029
271,764	0	55,932	50,828	5,104
271,776	1	56,509	51,341	5,168
271,789	1	57,079	51,824	5,255

Tabella 5 registrazione test performance monitor

Anche per la disattivazione dell'allarme la specifica prevede le stesse richieste.

Time	Warning Performance	SimPos [NWS]	ConsPos [NWS]	Sim-Cons
272,737	1	96,323	91,027	5,296
272,75	1	96,668	91,508	5,16
272,762	1	96,98	92,038	4,942
272,775	1	97,264	92,526	4,738
272,787	0	97,52	92,992	4,528
272,8	0	97,753	93,559	4,194
272,812	0	97,963	94,029	3,934

Tabella 6 registrazione test performance monitor, disattivazione allarme

Il monitor risulta validato in quanto rispetta i tempi e le soglie da specifica.

3.6 ASYMMETRY MONITOR

L'asymmetry monitor si occupa di verificare che non ci siano discordanze eccessive tra i segnali provenienti dal Rvdt.

Le 4 linee elettriche presenti, una volta valutate dal voter e dal monitor delle correnti rvd, vengono passate all'asymmetry monitor. Quest'ultimo ne riceve solamente le due centrali.

La specifica richiede che l'allarme sia attivato quando:

-la differenza tra il due valori centrali delle correnti Rvdt sia superiore a 3,2 NWS% per un tempo maggiore corrispondente a 3 campioni.

Il monitor ha una frequenza di risoluzione pari a 80 hz. Dunque il tempo da verificare deve essere pari a:

$$t_f = 1/80 * 3 = 37,5 \text{ ms};$$

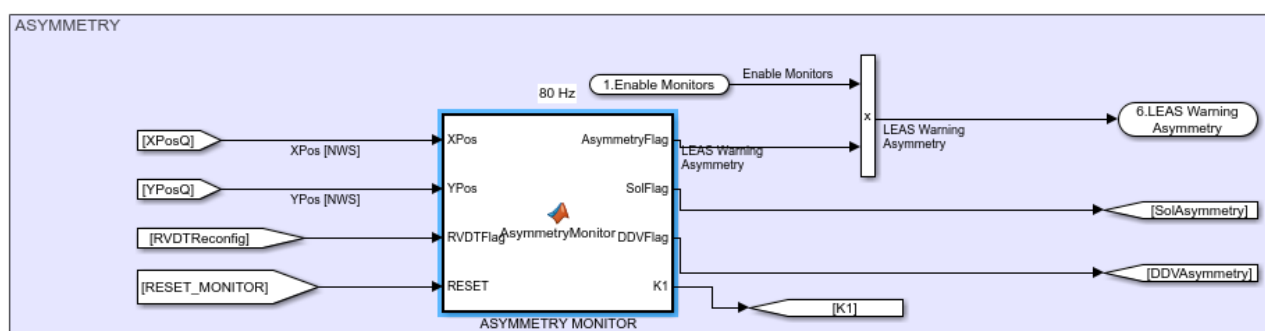


Figura 67 modello Simulink asymmetry monitor

Il monitor deve azzerare il comando DDV e staccare le valvole solenoidi.

Gli output nel modello sono flag utilizzati proprio al fine di disattivare le solenoidi ed azzerare il comando DDV. L'output Leas warning asymmetry è utilizzato invece come canale digitale su Veristand per l'attivazione del led di allarme su Openconsole.

Anche in questo caso è stato utilizzato il metodo delle correnti simulate, appositamente alterate per ricreare una situazione di failure.

Sono state effettuate per completezza due prove, una per ogni albero:

Time	RVDT1_80Hz	RVDT2_80Hz	RVDT3_80Hz	RVDT4_80Hz
365,203	64,915	64,915	64,939	64,939
365,216	64,967	64,967	64,977	64,977
365,228	64,91	64,91	64,959	64,959
365,241	47,992	47,992	64,881	64,881
365,253	28,874	28,874	64,696	64,696
365,266	34,618	34,618	64,424	64,424
365,278	33,297	33,297	64,426	64,426
365,291	32,472	32,472	64,434	64,434

Time	XPOS	YPOS	XPOS-YPOS	Warning Asymmetry
365,203	64,939	64,915	0,024	0
365,216	64,977	64,967	0,01	0
365,228	64,959	64,91	0,049	0
365,241	64,881	47,992	16,889	0
365,253	64,696	28,874	35,822	0
365,266	64,424	34,618	29,806	1
365,278	64,426	33,297	31,129	1
365,291	64,434	32,472	31,962	1
365,303	64,411	32,228	32,183	1

Tabella 7 registrazione test asymmetry monitor 1

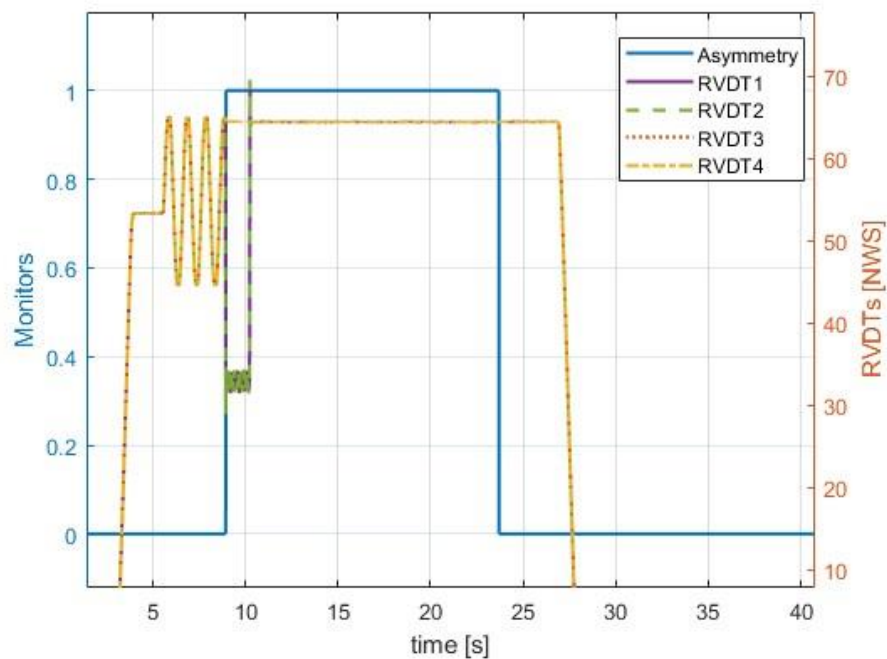


Figura 68 grafico test asymmetry monitor 1

Nella tabella precedente in rosso è indicato il campione in cui inizia l'injection di corrente simulata, il quale viene attivato attraverso lo stesso canale Veristand dei casi precedenti. In giallo invece il primo campione dell'allarme attivo.

In questa prova è stato inoltre testato il funzionamento del reset del monitor inserito nel modello Simulink relativo. Al raggiungimento del valore di soglia il monitor deve arrestare il

sistema e disattivare le solenoidi e anche se le condizioni tornano ad essere di funzionamento ottimale comunque non può ripartire. Il reset serve quindi ad azzerare le variabili in modo tale da poter proseguire con la prova successiva sul banco.

Nelle figure successive è mostrato il caso sull'altro albero.

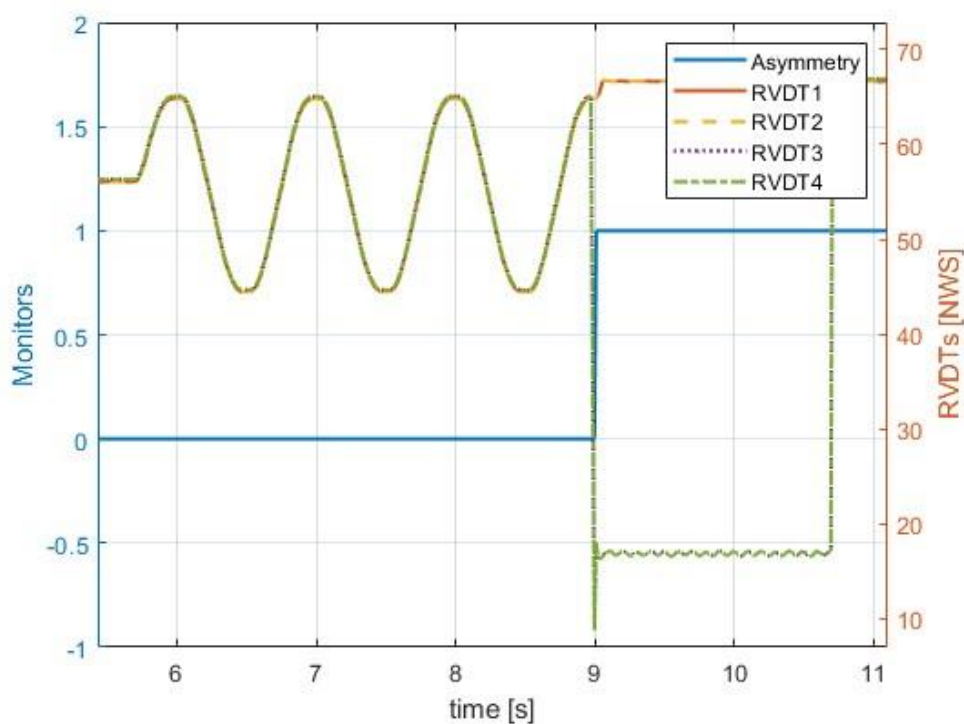


Figura 69 garfico test asymmetry monitor 2

Time	RVDT1_80Hz	RVDT2_80Hz	RVDT3_80Hz	RVDT4_80Hz
277,153	64,813	64,813	65,082	65,082
277,165	64,805	64,805	65,087	65,087
277,178	64,852	64,852	34,343	34,343
277,19	64,859	64,859	8,765	8,765
277,203	64,809	64,809	18,004	18,004
277,215	65,002	65,002	16,465	16,465
277,228	65,54	65,54	16,211	16,211
277,24	66,216	66,216	16,482	16,482

Time	YPOS	XPOS	XPOS-YPOS	Warning Asymmetry
277,153	65,082	64,813	0,269	0
277,165	65,087	64,805	0,282	0
277,178	64,852	34,343	30,509	0
277,19	64,859	8,765	56,094	0
277,203	64,809	18,004	46,805	1
277,215	65,002	16,465	48,537	1
277,228	65,54	16,211	49,329	1
277,24	66,216	16,482	49,734	1

Tabella 8 test asymmetry monitor 2

3.7 DISATTIVAZIONE SOLENOIDI E DDV

Ognuno dei due motori idraulici presenta ha valle una valvola di shut-off per permettere di mandare a scarico il fluido in pressione. Le due valvole di shut-off sono regolate a loro volta da due valvole solenoidi che ricevono le correnti che permettono di aprire e chiudere l'idraulica del sistema.

Ogni qual volta ci si prepara a effettuare una prova si va ad attivare le 4 solenoidi presenti, due per ogni linea idraulica, attraverso l'interfaccia Veristand. Sono stati appositamente creati quattro canali digitali su Veristand che predispongono attraverso la Pxi l'attivazione delle solenoidi.

La disattivazione delle solenoidi può avvenire manualmente attraverso gli stessi pulsanti digitali per favorire la fase di debugging del banco.

Per quanto riguarda invece il funzionamento in fase di collaudo, è stato aggiunto tra i modelli Simulink in formato .dll su Veristand un modello che permetta di staccare le solenoidi ogni qual volta il sistema di monitoring lo richiede secondo la procedura.

I monitor che richiedono di disattivare le solenoidi e mandare a scarico l'idraulica sono:

- Asymmetry
- Rvdt current
- Overspeed
- Undemanded movement
- DDV current

All'interno di ogni modello simulink che rappresenta la logica di flusso di questi monitor è inserito un flag di tipo digitale [0/1], che viene restituito come output.

Tutti gli output che rappresentano queste failure sono gestiti dal modello seguente che permette di gestire la disattivazione delle solenoidi con un unico segnale digitale finale attraverso un blocco AND ed uno switch che abilita e disabilita il funzionamento dei monitor.

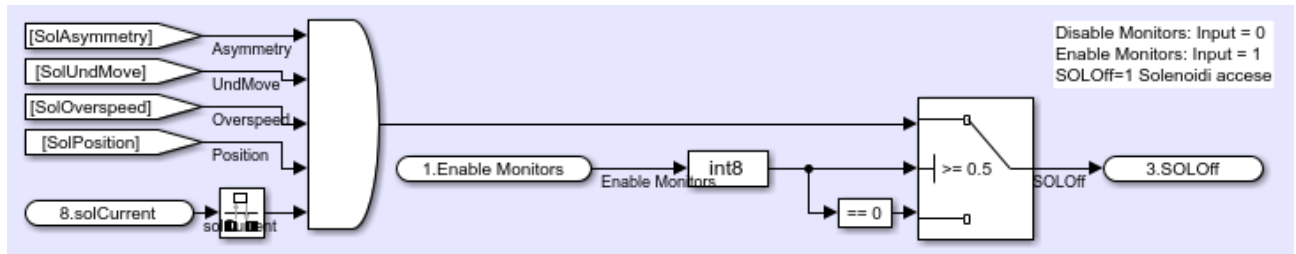


Figura 70 disattivazione solenoidi Simulink

Lo stesso schema è stato usato per la Direct Drive Valve per i seguenti monitor che ne richiedevano la disattivazione:

- Asymmetry
- Overspeed
- Undemanded movement
- Rvdt current
- Performance

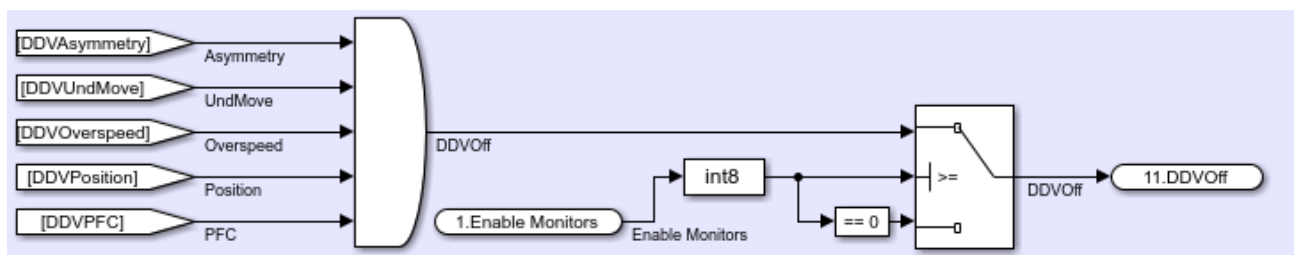


Figura 71 disattivazione DDV Simulink

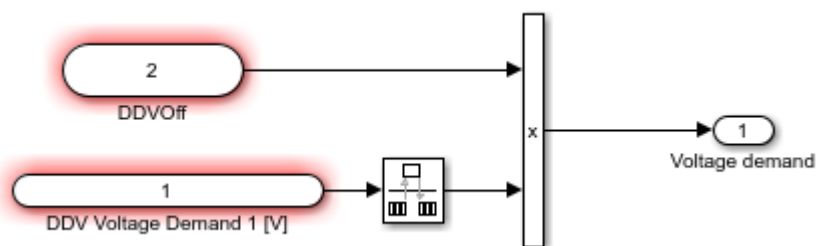


Figura 72 disattivazione comando su Simulink

Quest'ultimo blocco permette ricevendo il flag relativo alla disattivazione del comando, di azzerarlo opportunamente quando i monitor lo richiedono.

Nella foto successiva è mostrata l'interfaccia utente su Veristand chiamata OpenConsole, tramite la quale è possibile dopo aver collegato opportunamente i canali digitali a dei led controllare l'attivazione degli allarmi.



Figura 73 interfaccia utente Openconsole

Capitolo 4. PROVE FUNZIONALI DI CONFRONTO

In questo capitolo vengono trattate le modalità con cui viene convalidato il funzionamento del banco in relazione alla procedura di collaudo. Se nel capitolo precedente ci si era soffermati sulla validazione dal punto di vista software, in questo si va a valutare il banco automatico nel suo complesso rispetto alla procedura di collaudo. Per valutare se il funzionamento è soddisfacente, ossia rispetti con certezza gli accordi con il cliente risalenti all'utilizzo del banco manuale precedente, come riferimento viene assunta la stessa procedura di collaudo.

La procedura di collaudo rimane la medesima sia nel tipo di comando che in termini di risultati di funzionamento, dunque un confronto tra i due banchi è un valido strumento per la validazione.

Essendo l'obiettivo quello di valutare il funzionamento del banco in termini di accuratezza del sistema complesso, bisogna considerare tutti gli errori dovuti ai sensori, alla parte software e hardware.

4.1 PROCEDURA DI COLLAUDO SUL BANCO AUTOMATICO

Sul vecchio banco manuale ogni comando veniva inviato al controllo analogico attraverso potenziometri e bottoni presenti sul banco stesso. Il collaudatore segue ogni indicazione della procedura leggendo sui vari display le variabili richieste.



Figura 74 banco manuale

È mostrato un esempio di una delle prove richieste dalla procedura.

PROVA IN DOPPIO SISTEMA

- Diseccitare una delle bobine, dunque lavorare con tre linee elettriche
- Regolare la pressione in modo da ottenere una pressione differenziale attraverso l'unità di 21 ± 0.2 Mpa
- Aumentare gradualmente la coppia frenante a 18 ± 2 Nm ed il comando DDV in modo da far funzionare l'unità a 1300 ± 20 giri/min

La procedura a questo punto richiede di registrare i seguenti dati:

- Portata attraverso l'unità
- Velocità
- Correnti DDV nelle 3 linee testate
- Pressione differenziale
- Coppia frenante

La stessa procedura viene ripetuta diseccitando una delle bobine alla volta.

Questa prova esempio ha come scopo quello di valutare il funzionamento in condizioni di velocità elevate simulando un carico aerodinamico sugli slat realistico.

In questo modo si valutano le prestazioni in doppio sistema della PDU, in particolare si può valutare il funzionamento in condizioni ottimali con una delle linee elettriche disattiva.

Dopo aver effettuato tutte le prove richieste, aver registrato i dati e controllato che rientrino nei range di tolleranza previsti, l'unità è considerata collaudata.

In ambiente Labview sono state realizzate delle sequenze che automaticamente inviano i comandi al PXI attraverso il software Veristand. Dunque nel rispetto delle procedure la sequenza realizza rampe e imposta set di controllo.

Veristand collaborando con Labview riconosce ogni canale digitale e gestisce gli input e output comunicando con il PXI. Sul PXI sempre attraverso Veristand sono caricati i modelli di controllo, sia quelli del FCC, sia quelli esterni appositamente realizzati per effettuare le prove di collaudo automatiche, ossia il controllo coppia e velocità.

Sarà invece il PXI a comunicare attraverso i suoi canali digitali di input/output con le schede analogiche di condizionamento del segnale.

Nella figura seguente è mostrato uno schema riassuntivo che mostra il funzionamento della parte software del banco.

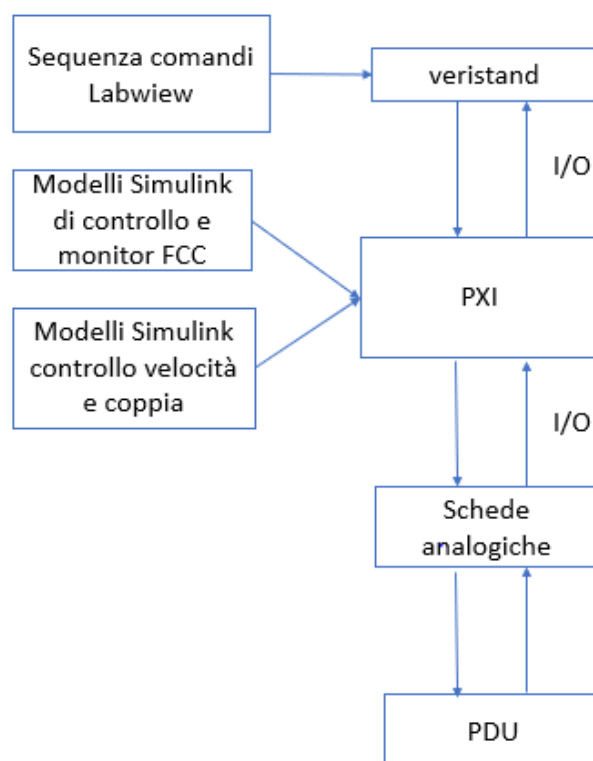


Figura 75 schema software e connessioni con hardware

In questo modo l'operatore non ha più compiti diretti se non il check di funzionamento dei vari dispositivi, in quanto il comando in tensione è definito dalla sequenza Labview e il raggiungimento delle condizioni imposte dal set è effettuato tramite controllo retroazionato.

4.2 MODALITÀ DI CONFRONTO PROVE FUNZIONALI

Una volta realizzato il banco con tutte le componenti hardware e software necessarie, riprodotta la sequenza di comandi in linguaggio di programmazione e validato il software al fine di essere certi del determinismo della macchina si è cercato di realizzare una logica di confronto delle prove tra il banco vecchio e quello automatico nuovo.

L'obiettivo è quello di essere certi che i risultati siano fisicamente realistici.

Ogni prova della procedura di collaudo presenta un margine di tolleranza che descrive la zona di accettazione, ossia i valori entro i quali secondo gli accordi tra committente e produttore l'unità è considerata come collaudata e pronta per l'uso.

Il vecchio banco è considerato come un banco attendibile e già validato, dunque collaudando un'unità e registrandone tutte le variabili di interesse possiamo prendere la Pdu in questione come Golden Unit. Per Golden Unit si intende un'unità di riferimento, già collaudata, il cui funzionamento si è certi sia quello desiderato.

La Golden Unit può dunque essere usata per testare il funzionamento e l'attendibilità del nuovo banco automatico. In questo modo si è certi che qualsiasi variabile il cui risultato sia incoerente con le specifiche è alterata dal funzionamento del banco, della sensoristica o dai canali di acquisizione e gestione dei segnali.

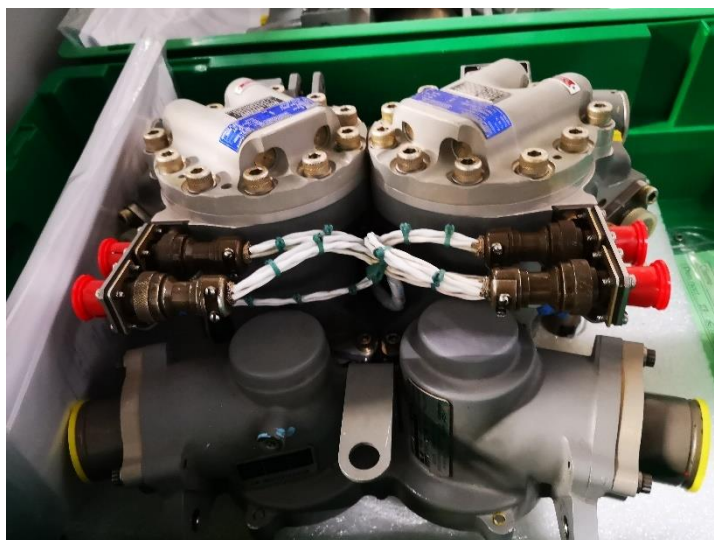


Figura 76 PDU golden unit

Nella seguente tabella sono mostrati i valori delle accuratezze degli strumenti utilizzati sul banco.

strumento	campo di utilizzo	accuratezza
Torsiometro	0-300 Nm	1 %f.s.
manometro differenziale	0-39 Mpa	1% f.s.
manometro differenziale	0-39 Mpa	1% f.s.
flussimetro	0.5-70 l/m	2% rel.
flussimetro	0.5-70 l/m	2% rel.
Encoder	0-1500 rpm	10 rpm
amperometro dc	0±500 mA	1% f.s.
amperometro dc	0±500 mA	1% f.s.
amperometro dc	0±500 mA	1% f.s.
amperometro dc	0±500 mA	1% f.s.
voltmetro lvdt feedback dc	0-10 V	0.3% rel.
voltmetro lvdt feedback dc	0-10 V	0.3% rel.
voltmetro lvdt feedback dc	0-10 V	0.3% rel.
voltmetro lvdt feedback dc	0-10 V	0.3% rel.
voltmetro dc(motor command)	0±10 V	1% rel.
misuratore di posizione rvdt	±30 giri	5%rel.

Tabella 9 accuratezze strumenti

Dopo aver effettuato sul vecchio banco manuale la procedura di collaudo per intero sulla nuova unità di produzione, possiamo considerare quest'ultima come Golden Unit. Per ogni prova sono stati presi come valori di riferimento i valori richiesti da procedura di collaudo. Questi valori saranno poi confrontati con i risultati delle prove sul nuovo banco automatico. Per la validazione finale del banco è stato deciso di valutare due casi:

- Prove i cui risultati sono ad alta ripetibilità e la cui incertezza può essere valutata come dipendente dall'accuratezza della catena di misura e dai sensori. Il grado di precisione è superiore all'accuratezza dello strumento.
- Prove i cui risultati dipendono dalla dinamica della prova, il grado di precisione del risultato a regime può dipendere da più fattori oltre all'accuratezza della catena di misura (attrito, smorzamento).

4.3 PROVA DOPPIO SISTEMA

Risultati collaudo banco manuale:

parametro	Misura acquisita	Range da procedura di collaudo
velocità	1300 rpm	1280 ÷ 1320 rpm
Portata sistema 1	59,2 l/min	≤64 l/min
Portata sistema 2	58,6 l/min	≤64 l/min
Corrente DDV coil 1	280 mA	≤330 mA
Corrente DDV coil 2	279 mA	≤330 mA
Corrente DDV coil 3	300 mA	≤330 mA
Coppia frenante	18 Nm	16 ÷ 20 Nm
Pressione differenziale	21 Mpa	20.8 ÷ 21.2 Mpa

Tabella 10 collaudo su banco manuale

Ogni parametro richiesto dalla procedura durante la prova rientra nel range richiesto, dunque rispetta i requisiti di collaudo. Tali valori vengono quindi considerati come valori di riferimento accettati.

Successivamente è stata ripetuta la prova di collaudo sul banco automatico.

parametro	prova 1	prova 2	prova 3	prova 4	Prova 5	media
Velocità [rpm]	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Portata sistema 1 [l/min]	59,2	60,2	60,5	59,1	59,7	59,8
Portata sistema 2 [l/min]	58,6	58,6	58,9	60,5	59,8	60,3
Corrente DDV coil 1 [mA]	280	284	282	278	279	284
Corrente DDV coil 2 [mA]	279	277	272	279	282	281
Corrente DDV coil 3 [mA]	300	301	297	293	300	302
Coppia frenante [Nm]	18	18	18	18	18	18
Pressione differenziale [Mpa]	21	21	21	21	21	21

Tabella 11 prove doppio sistema sul banco automatico

Considerando che questa prova è ad alta ripetibilità, l'unico errore che ci si aspetta di avere è pari all'accuratezza dello strumento, essendo quasi nulli gli errori sistematici delle prove.

Per quanto riguarda i controlli coppia e velocità, la stabilità delle prove porta ad una accuratezza massima. Sulle correnti e sulle portate dai flussimetri si ottiene invece un errore marginale dovuto all'accuratezza dello strumento.

L'errore può dunque essere considerato come dovuto a soli fattori accidentali. Inoltre è stato effettuato un controllo della compatibilità dei risultati tra le varie prove valutando l'incertezza dipendente dalla sola accuratezza degli strumenti.

Per ultimo è stato effettuato un confronto tra i valori accettati di riferimento e i valori medi delle prove sul nuovo banco.

parametro	valore certificato	media	scostamento
velocità[rpm]	1300	1300	0
Portata sistema 1 [l/min]	59,2	59,86	-0,66
Portata sistema 2[l/min]	58,6	59,62	-1,02
Corrente DDV coil 1[mA]	280	281,4	-1,4
Corrente DDV coil 2[mA]	279	278,2	0,8
Corrente DDV coil 3[mA]	300	298,6	1,4
Coppia frenante [Nm]	18	18	0
Pressione differenziale[Mpa]	21	21	0

Tabella 12 scostamenti media prove rispetto a valori certificati

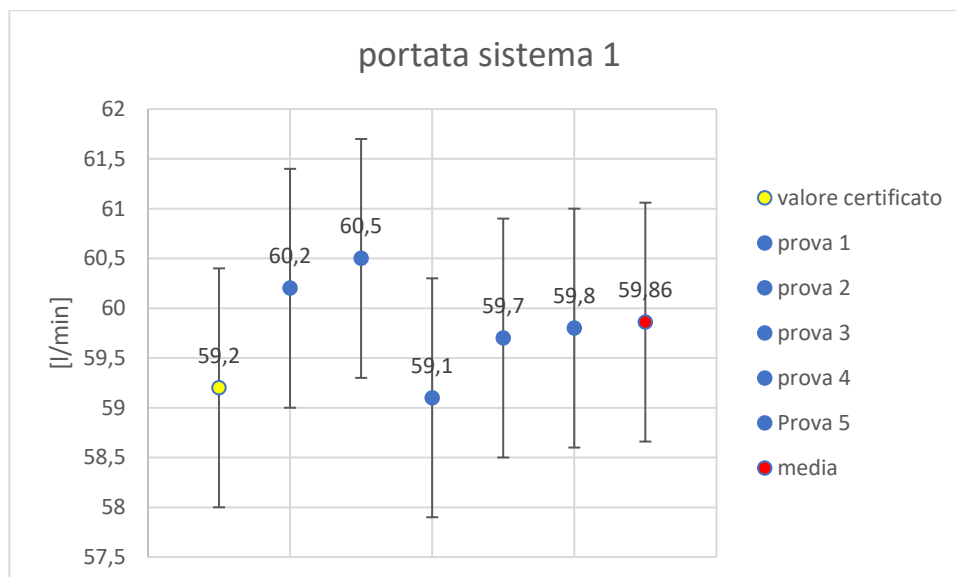


Figura 77 risultati prove portata sistema 1

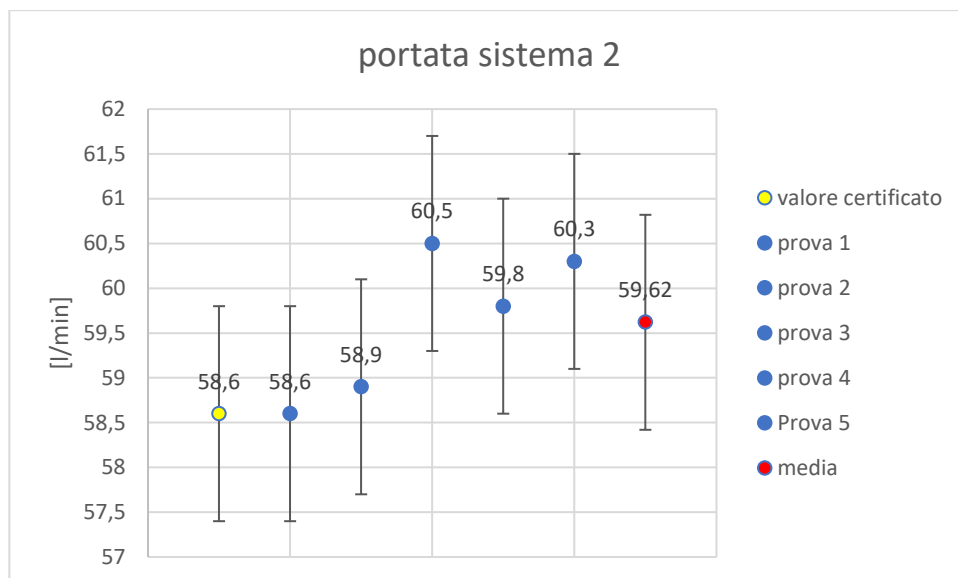


Figura 78 risultati prove portata sistema 2

Si può notare dai grafici precedenti come la portata non è influenzata dalla dinamica della prova, ma che l'incertezza è riconducibile al flussimetro.

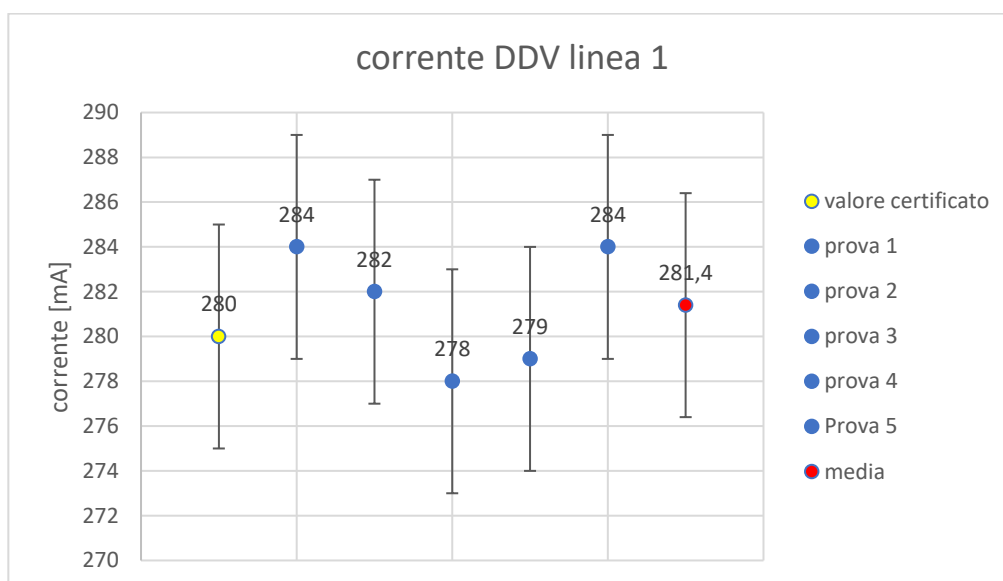


Figura 79 risultati prove corrente DDV linea 1

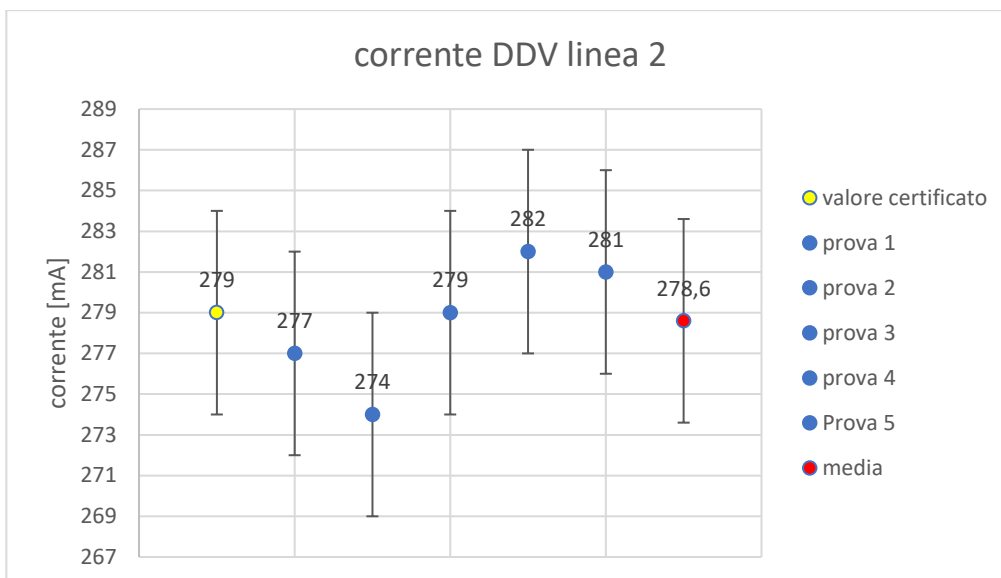


Figura 80 risultati prove corrente DDV linea 2

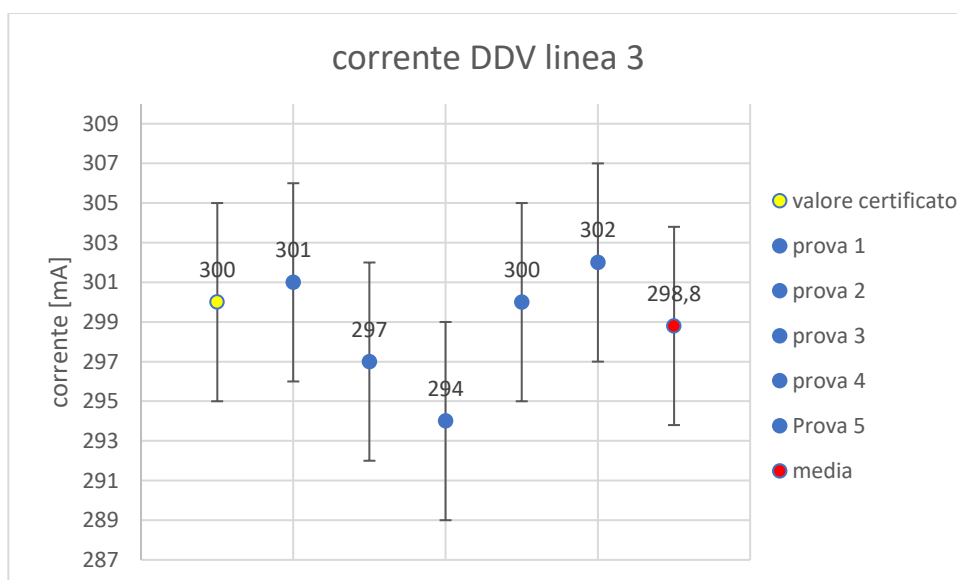


Figura 81 risultati prove corrente DDV linea 3

Dai grafici è possibile notare come i risultati sulle varie linee elettriche della stessa prova sono compatibili tra di loro. Con questo possiamo assumere come validato il segnale di corrente letto in quanto gli errori sono solo dovuti all'amperometro e alla sua accuratezza. Il procedimento è stato utilizzato in maniera analoga per valutare gli altri casi che la procedura richiede.

4.4 PROVA SINGOLO SISTEMA

La prova in singolo sistema prevede di aumentare gradualmente il comando DDV in modo da far funzionare l'unità a 1300 ± 20 giri/min. Impostare una coppia frenante minima di 70 Nm, mantenendo nel contempo la pressione differenziale a 21 ± 0.2 Mpa.

Registrare:

- La velocità
- La portata attraverso l'unità
- La coppia frenante
- Il segnale del LVDT
- La pressione differenziale

Essendo già stati validati i canali di acquisizione delle altre variabili, in questo paragrafo per evitare ripetizioni vengono mostrati i risultati della sola validazione delle linee di feedback provenienti dal LVDT.

A differenza del caso precedente delle correnti non vi è stata la necessità di confrontare varie prove tra di loro, ma sono stati confrontati i valori delle quattro linee direttamente in quanto non vi è dipendenza dai quattro modelli di controllo. Il valore delle quattro tensioni V_{rms} infatti dipende esclusivamente dalla posizione del cassetto e la sua incertezza dalla catena di misura delle linee.

Seguendo le specifiche di progetto si conoscono:

- L'accuratezza del valore in V_{rms} pari a ± 60 mV (9.33 μ m sulla posizione del cassetto)
- Errore dovuto al rumore nella conversione analogico/digitale pari a ± 45 mV

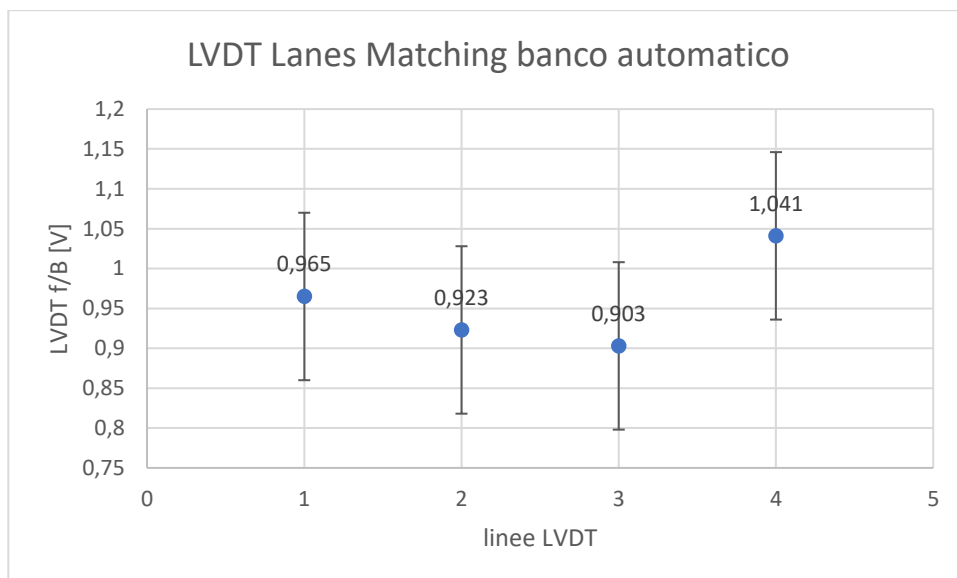


Figura 82 confronto bande di incertezza banco automatico

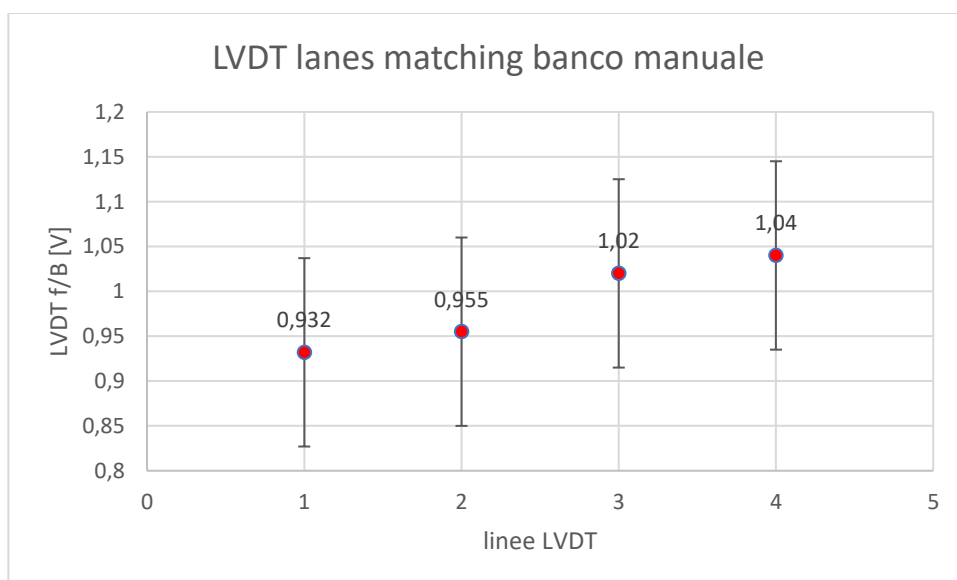


Figura 83 confronto bande di incertezza banco automatico

Come metro di confronto dei dati si sono presi in considerazione anche in questo caso i valori certificati della PDU in questione collaudata sul vecchio banco manuale.

I valori sul nuovo banco sono sovrapponibili con quelli del banco manuale, dunque anche le linee LVDT possono considerarsi validate.

4.5 PROVA DI STALLO

A differenza delle prove precedenti, in questo test previsto dalla procedura di collaudo, i risultati richiesti come valori certificati hanno un errore che non può essere definito dalla sola incertezza dovuta alla catena di misura e dai sensori. Infatti determinati risultati delle prove dipendono da un errore casuale dovuto alla dinamica del sistema, ci si può attendere quindi un errore superiore.

Come strumento di confronto quindi si è calcolata un'incertezza dei valori certificati su cinque prove. Si è poi ripetuto lo stesso procedimento sul nuovo banco automatico.

Il risultato atteso è un'incertezza sul nuovo banco nella peggiore delle ipotesi uguale a quella sul vecchio banco manuale, in quanto sul banco automatico è pari a zero l'influenza dell'operatore sulla prova. Ci si attende dunque una ripetibilità migliore.

Un esempio di prova in queste condizioni di incertezza è la prova di stallo.

La procedura richiede:

- Velocità 1320 rpm max
- Pressione differenziale 24 ± 0.2 Mpa
- Incrementare la coppia frenante fino a che la PDU stalla

Registrare:

Coppia di stallo. Verificare che sia ≥ 110 Nm

coppia di stallo	
prova 1	161 Nm
prova 2	157 Nm
prova 3	158 Nm
prova 4	154 Nm
prova 5	164 Nm
media	158,8 Nm

Tabella 13 prove banco vecchio

	coppia di stallo
prova 1	158 Nm
prova 2	157 Nm
prova 3	159 Nm
prova 4	154 Nm
prova 5	161 Nm
media	157,8 Nm

Tabella 14 prove banco nuovo

Le incertezze risultano essere per il banco automatico 3,5 Nm mentre per il vecchio banco manuale 5 Nm.

Essendo 10 Nm lo scostamento massimo ottenuto, l'incertezza relativa della prova eseguita sul banco manuale è del 3%. Per il banco automatico l'incertezza relativa è 2,2%.

È possibile calcolare infine un valore di incertezza tra i due banchi. Per questo sono stati presi i 2 valori più distanti ottenuti sui due banchi, i cui valori sono stati depurati dell'accuratezza del torsionometro pari a 1% del fondo scala.

$$\text{errore relativo depurato} = 2,5 \%$$

Il risultato può essere considerato soddisfacente considerando il margine rispetto ai 110 Nm di coppia di stallo minima richiesti.

Incetezza banco manuale	Incetezza banco automatico	Errore relativo depurato caso peggiorativo
3%	2,2%	2,5%

Tabella 15 prova di stallo, incetezze ed errore relativo fra banchi

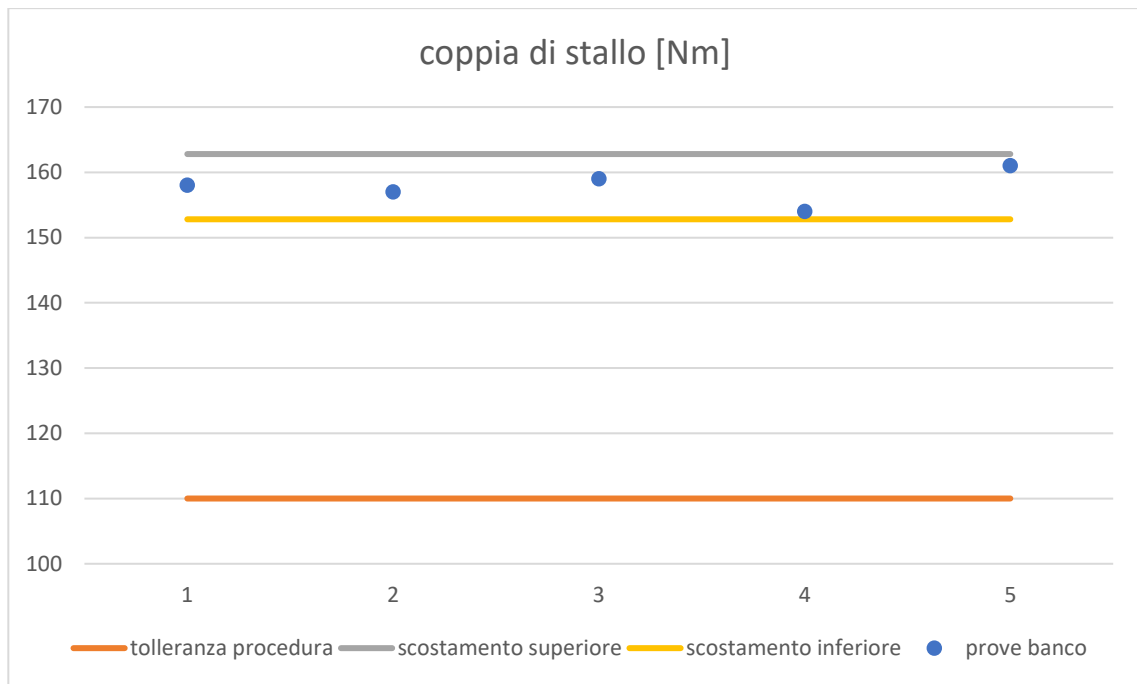


Figura 84 coppia di stallo

Nella figura precedente è mostrato il valore di coppia di stallo sul banco automatico rispetto all'incertezza del banco manuale e alla tolleranza richiesta dalla procedura. I valori della prova sul banco rientrano nell'incertezza dunque sono accettabili.

CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi è stato esposto il lavoro di realizzazione e validazione del nuovo banco di collaudo automatico per le unità di potenza idrauliche.

È stato possibile analizzare l'attività industriale sotto molteplici punti di vista. Infatti si è avuto a che fare con la specifica di progetto dell'oggetto di produzione ma anche con la sua procedura di accettazione.

Si è predisposto un controllo velocità in closed loop realizzato appositamente per la resa automatica del banco, in modo tale di poter esguire le indicazioni della procedura di collaudo e un controllo coppia per controllare la coppia resistente.

Per quanto riguarda il controllo velocità, sono stati utilizzati i modelli della valvola DDV e del motore idraulico appositamente riprodotti in Simulink per realizzare un controllo stabile e funzionale.

Per quanto riguarda invece la validazione della parte software, si è riprodotto seguendo la specifica di progetto tutte le logiche di controllo, compreso tutto il sistema di voting/monitoring.

Per ogni monitor, dopo la trasposizione in linguaggio Matlab/Simulink delle logiche e dei flow-chart, sono state realizzate delle prove ad-hoc per la validazione. Lo scopo finale era quello di accertare il funzionamento regolare in termini di tempo e superamento delle soglie per l'attivazione degli allarmi su banco, tramite la collaborazione dei software National Instruments.

Infine è mostrato un confronto tra un vecchio banco manuale e quello nuovo da validare utilizzando la stessa Golden Unit. In particolare sono analizzati due casi possibili a cui le prove di collaudo possono portare. Uno in cui i risultati sono dipendenti dalla sola incertezza dovuta alla catena di misura, dunque la ripetibilità della prova ha un grado di precisione maggiore o uguale dell'accuratezza degli strumenti. L'altro in cui fattori accidentali dovuti alla dinamica e alle tolleranze della prova portano ad un non completa correlazione dei risultati. In questo caso è calcolabile un errore relativo della prova, in modo tale da confrontarlo rispetto ai margini di accettazione del collaudo.

Per quanto riguarda i lavori futuri, potrebbe risultare vantaggioso realizzare un controllo tramite PLC in modo tale da avere un sistema automatico ad alta affidabilità che regoli la pressione di alimentazione e di mandata dell'olio al sistema idraulico.

Bibliografia

- [1]<https://www.collinsaerospace.com/who-we-are/about-us/global/europe/italy>
- [2]https://it.wikipedia.org/wiki/Eurofighter_Typhoon
- [3] Wu, Shuai et al. "Development of a Direct-Drive Servo Valve With High-Frequency Voice.
- [4]<https://patentimages.storage.googleapis.com/5e/24/90/e7129062522708/US4987927.pdf>
- [5]<https://www.ni.com/en-gb/shop/pxi.html>
- [6]<https://www.celeramotion.com/zettlex/it/supporto/documenti-tecnici/resolver-encoder-ottici-ed-encoder-induttivi/>