

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BERGAMO

Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di progettazione e tecnologie

Dottorato di Ricerca in Meccatronica e tecnologie innovative

XXIV ciclo

Settore scientifico-disciplinare: ING-IND/13

**MACCHINE PER IL CONVERTING:
FUNZIONALITÀ E IMPLEMENTAZIONE
DI TECNICHE DI CONTROLLO**

Relatore:

Chiar.mo Prof. Riccardo Riva

Correlatore:

Ing. Daniele Vaglietti

Tesi di Dottorato

Andrea CARAVITA

Matricola n. 41252

ANNO ACCADEMICO 2011 / 2012

«Le cose non sono mai casuali e
obbediscono a un pensiero preciso
e a un percorso logico e rigoroso
che è sostenuto da passione,
umanità e dedizione»

(P. Fresu – Musica Dentro)

INDICE

1. INTRODUZIONE 1

2. IL SETTORE DEL CONVERTING

2.1. Introduzione	3
2.2. Configurazione delle macchine per Converting	6
2.3. Performance delle macchine per Converting	10

3. ANALISI DEL PROCESSO DI AVVOLGIMENTO

3.1. Tecnologia di avvolgimento	12
3.1.1. Target del processo di avvolgimento	12
3.1.2. Variabili di processo	13
3.1.3. Sistemi di avvolgimento	17
3.2. Tensione ottimale dei materiali	20
3.3. Tecnologie per il controllo del tiro	22
3.3.1. Ballerino	22
3.3.2. Celle di carico	27
3.3.3. Controllo in anello aperto	29
3.3.4. Confronto tra le tecnologie	30
3.4. Studio analitico della pressione di contatto sulle bobine	33
3.5. Dimensionamento dei motori principali	39
3.5.1. Problematiche relative al dimensionamento di motori per avvolgitori .	39
3.5.2. Studio analitico	42
3.5.3. Esempio applicativo	46

4. FUNZIONI WINDER

4.1. Introduzione	50
4.2. Tecniche di calcolo del diametro	53
4.3. Riferimento di tensione del materiale	62
4.4. Controllo della tensione	65
4.5. Azioni agenti sul sistema	69
4.5.1. Analisi dei contributi	69
4.5.2. Determinazione degli attriti	70
4.5.3. Identificazione del momento d'inerzia costante del carico	72

5. SISTEMI DI AZIONAMENTO ELETTRICI IN MACCHINE PER CONVERTING

5.1. Configurazione senza controllore dedicato	75
5.1.1. Descrizione del sistema	75
5.1.2. Confronto tra configurazioni con modelli di azionamento differenti	77
5.2. Configurazione con controllore dedicato	80
5.3. Confronto tra le due architetture	83
5.3.1. Confronto delle prestazioni	83
5.3.2. Confronto della progettazione hardware e software	84

6. IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA SENZA CONTROLLORE DEDICATO

6.1. Funzioni integrate in azionamenti elettrici	86
6.2. Sviluppo del progetto	94
6.2.1. Definizione hardware e programmazione PLC	94
6.2.2. Configurazione della comunicazione	97
6.2.3. Programmazione degli azionamenti	99
6.2.4. Integrazione delle funzioni winder	101
6.3. Caso di studio: RCX-J/16	104
6.3.1. Descrizione della macchina	104
6.3.2. Configurazione hardware	106
6.3.3. Programmazione degli azionamenti	108

7. IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA CON CONTROLLORE DEDICATO

7.1. Caratteristiche del controllore	112
7.1.1. Panoramica hardware	112
7.1.2. Funzionalità del sistema	114
7.1.3. Programmazione del controllore	117
7.2. Sviluppo del progetto	122
7.2.1. Organizzazione del progetto	122
7.2.2. Descrizione delle funzioni	124
7.2.3. Integrazione delle funzioni winder	135
7.3. Caso di studio: RU6	138
7.3.1. Descrizione della macchina	138
7.3.2. Configurazione hardware	141
7.3.3. Programmazione del controllore	143

8. RILIEVI SPERIMENTALI	152
9. CONCLUSIONI	160
BIBLIOGRAFIA	163

1. INTRODUZIONE

La presente tesi di dottorato si propone di analizzare il processo di lavorazione di macchine appartenenti al settore del Converting e approfondire le metodologie per la creazione di progetti finalizzati alla programmazione di azionamenti elettrici multi asse sviluppati in ambito industriale per tale applicazione.

Il lavoro nasce dall'esigenza della IMS Deltamatic SpA, azienda operante da più di cinquanta anni nel settore, di rinnovare i sistemi di azionamento elettrici e di gestione degli assi in modo da creare un nuovo standard aziendale da implementare su tutte le macchine prodotte. Tale cambiamento richiede un'analisi approfondita dei nuovi sistemi in modo da acquisire le competenze necessarie per affrontare in autonomia l'utilizzo di sistemi la cui complessità, già insita nella struttura stessa, è amplificata dalla loro recente introduzione sul mercato. L'obiettivo è quindi quello di sviluppare soluzioni di gestione degli azionamenti dedicate alla specifica applicazione, inserite nell'architettura di automazione esistente all'interno delle macchine ed integrate nella progettazione dei software di controllo, sviluppati dall'ufficio tecnico dell'azienda secondo criteri di programmazione condivisi e consolidati.

Alla base del lavoro risiede l'apprendimento delle nozioni che riguardano il processo di lavorazione di nastri avvolti in bobine, che rappresenta la funzione primaria di impianti per Converting. Poiché gli ambiti industriali che coinvolgono il settore sono estremamente vari e le macchine molto diffuse, nel corso del tempo sono stati condotti numerosi studi relativi al processo di lavorazione ed il principio di funzionamento di tali macchine si è ampiamente consolidato. La loro attuale evoluzione è incentrata sull'aspetto tecnologico, tramite l'introduzione di soluzioni d'automazione e sistemi di controllo avanzati, finalizzato ad aumentare le performance ed accelerare il processo produttivo. C'è quindi la necessità di recepire le proposte del mercato dell'automazione per individuare i punti di innovazione delle macchine e focalizzare i sistemi che meglio si possano integrare nei criteri di progettazione delle macchine utilizzati dall'azienda.

All'interno di questa indagine uno dei campi di maggiore interesse è rappresentato dalle soluzioni disponibili per i sistemi di controllo degli azionamenti elettrici. In generale è possibile effettuare una macro distinzione tra due tipologie di configurazioni: una in cui la gestione degli azionamenti è affidata ad un PLC ed un'altra caratterizzata dall'introduzione di un sistema dedicato al Motion Control. Quest'ultima soluzione comporta una separazione della gestione delle operazioni legate all'automazione di processo da quelle di controllo degli azionamenti e

costituisce una novità per l'azienda; tale cambiamento è fortemente significativo per quanto riguarda le potenzialità del sistema e, considerando che le caratteristiche del controllore introdotto sono notevolmente diverse da quelle di un classico PLC, comporta un nuovo approccio del programmatore nei confronti dell'automazione.

Nel presente lavoro vengono analizzate entrambe le soluzioni, effettuando un confronto sulla progettazione dei sistemi e sulle prestazioni fornite, implementando i progetti di programmazione all'interno dei rispettivi software di sviluppo. La configurazione che prevede il controllo tramite PLC, seguendo una linea tradizionalmente adottata dall'azienda per la gestione della movimentazione degli assi, è basata su sistemi di programmazione già collaudati; al loro interno sono da integrare i nuovi azionamenti, implementando in essi le specifiche funzionalità richieste per le applicazioni. Introducendo invece il sistema aggiuntivo per il controllo assi è necessario ideare un nuovo standard di programmazione, nell'ottica di sfruttare al massimo le potenzialità del controllore ed ottenere un prodotto flessibile che agevoli il compito dei tecnici dell'azienda nelle fasi di sviluppo di nuovi progetti, debug e assistenza. Analizzando il principio di funzionamento comune alle macchine dell'azienda e le varianti nei sistemi di automazione, con particolare attenzione alle tipologie di controllo degli assi, è possibile sviluppare i programmi intorno ad un progetto comune realizzato in modo versatile per adattarlo alle diverse soluzioni richieste.

Durante il lavoro di tesi sono stati sviluppati numerosi programmi dedicati a macchine di diverse tipologie, dei quali, a titolo di esempio, sono riportati due casi significativi. Tutti i progetti sono stati testati e validati sperimentalmente durante il collaudo delle commesse evase dall'azienda nel corso del triennio. Grazie all'ampia gamma di macchine offerte, in grado di coprire una larga casistica delle soluzioni adottate nelle macchine per la lavorazione di bobine, è stato possibile ottenere un riscontro pratico alle teorie note sul processo di lavoro. Inoltre, nella parte finale della tesi, sono riportati alcuni rilievi sperimentali condotti sul campo che hanno permesso di valutare il lavoro svolto e mettere in luce le differenze prestazionali delle due configurazioni esaminate.

2. IL SETTORE DEL CONVERTING

2.1. Introduzione

Al settore del Converting appartengono tutti gli impianti che eseguono un processo di avvolgimento e svolgimento su bobine. Tali macchine hanno quindi come funzione primaria quella di trasportare il nastro, facendolo passare da una bobina ad un'altra di dimensioni generalmente diverse senza incorrere in prodotti difettosi.

Gli obiettivi delle operazioni di conversione delle bobine possono essere i seguenti (Fig.2.1):

- Produzione di bobine di larghezze e diametri ridotti da bobine madri fabbricate, per economia, in grandi dimensioni.
- Lavorazione del materiale per aggiungere determinate caratteristiche: stampa, laminazione, deposizione di film.
- Riavvolgimento di una bobina già prodotta per eliminarne i difetti.

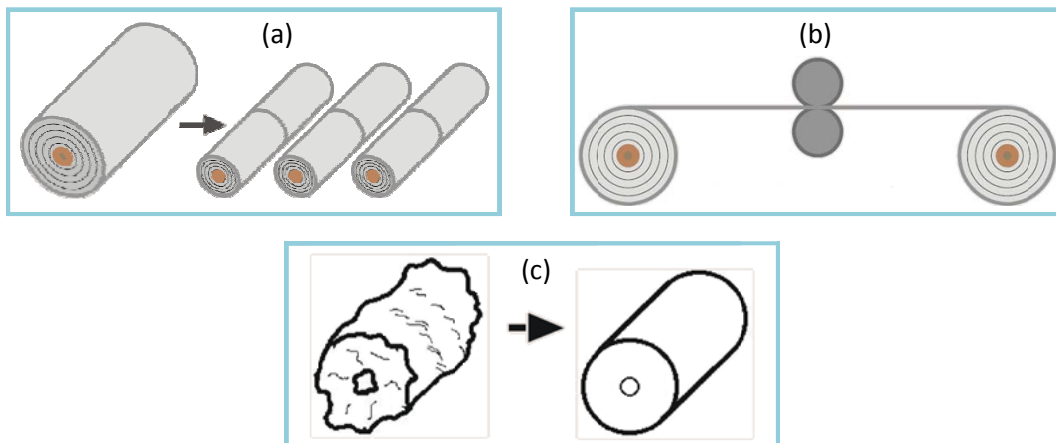


Figura 2.1 - Obiettivi del Converting: riduzione di bobine (a), lavorazione del materiale (b), eliminazione dei difetti (c)

Il prodotto finale del processo costituisce un passaggio intermedio nelle filiere di trasformazione di tutti i materiali realizzati sottoforma di film, generalmente di spessore compreso tra pochi micron e il millimetro: carta, materie plastiche, alluminio e accoppiati. Considerata la versatilità di utilizzo delle macchine per Converting, sono molteplici gli ambiti industriali in cui vengono applicate; tra questi fanno parte per esempio il packaging di alimentari, l'automotive e la fabbricazione di sigarette.

Nel seguito del presente lavoro si farà riferimento alle macchine costruite dall'azienda IMS DELTAMATIC SpA. Le tipologie di macchine prodotte possono essere suddivise nelle seguenti categorie:

- Prebobinatori e ripassatori (*Doctor machines*): sono macchine di controllo di eventuali difetti del materiale e successiva ribobinatura; possono prevedere banco di giunta e stazione di raffilo, avente la funzione di eliminare parti di materiali difettose o non desiderate.

In Fig.2.2 è rappresentato il ripassatore DOC 100 a singola spalla per materiali non stampati con banco di giunta e stazione di raffilo. Caratteristiche: diametro massimo 1000 mm, velocità massima 300 m/min e larghezza utile massima 500 mm.

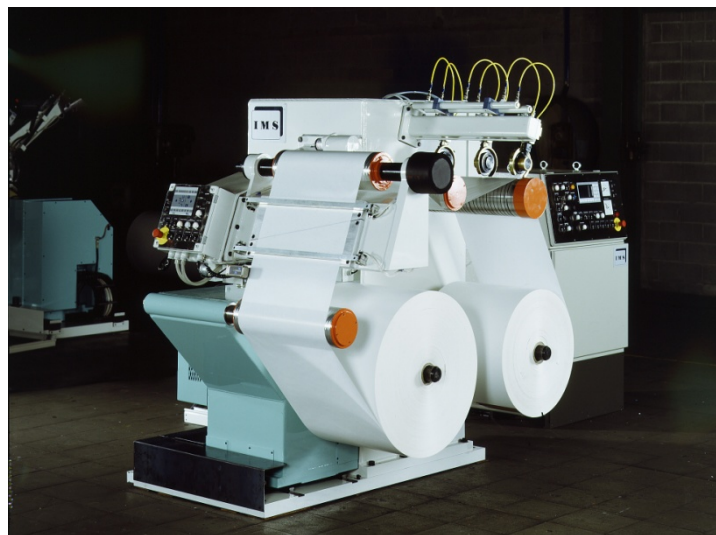


Figura 2.2 - Prebobinatore – Ripassatore DOC100

- Tagliaribobinatrici (*Slitting and rewinding machines*): sono macchine che prevedono, in sequenza, lo svolgimento della bobina iniziale, una fase di taglio e un avvolgimento finale in bobine di diametro e larghezza diversa rispetto a quelle iniziali. Sono tutte equipaggiate con sistemi integrati di scarico automatico e, su richiesta, di sistemi automatici per la messa a punto delle apparecchiature di taglio e di sistemi robotizzati per la movimentazione, il trasporto e la palletizzazione delle bobine.

In Fig.2.3 è rappresentata la tagliaribobinatrice semiautomatica RA2 per carte delicate e autocopianti. Caratteristiche: diametro massimo svolgitore 1200/1800 mm, diametro massimo avvolgitore 1200 mm, velocità massima 1200 m/min, larghezza 1000/2500 mm, larghezza minima di taglio 100 mm.

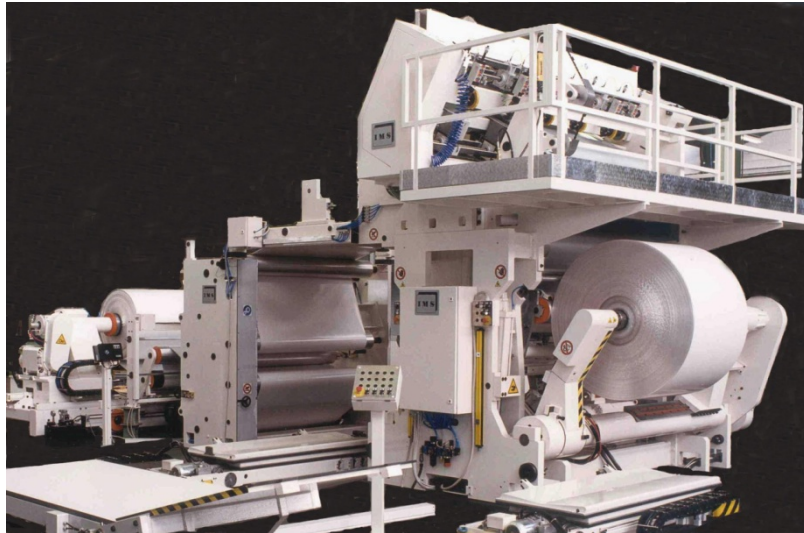


Figura 2.3 - Tagliaribobinatrice semiautomatica RA2

- Avvolgitori e svolgitori (*Winders, Unwinders*): sono macchine automatiche che fanno parte di una linea articolata che può includere ad esempio la stampa o l'accoppiamento tra materiali.

In Fig.2.4 è riportata un'immagine dell'avvolgitore AP190, che costituisce la stazione finale della linea di stampa o laminazione di materiale accoppiato per imballaggi alimentari; è caratterizzato da un sistema automatico che permette di cambiare albero di avvolgimento evitando di interrompere la produzione. Caratteristiche: diametro massimo avvolgitore 1950 mm, velocità massima 800 m/min, larghezza 1650 mm.



Figura 2.4 - Avvolgitore automatico AP190

2.2. Configurazione delle macchine per Converting

Una tipica macchina per Converting è racchiusa tra due stazioni principali che rappresentano l'inizio e il termine del processo di lavorazione: svolgitore e avvolgitore (Fig.2.5). Il primo ha il compito di movimentare la bobina madre ed alimentare la macchina con nuovo materiale; il secondo riceve il nastro lavorato per generare una o più bobine, le quali sono il prodotto finale del processo. Tra le due stazioni terminali il materiale può subire una o più lavorazioni, per esempio stampa o taglio longitudinale, la cui qualità è garantita attraverso un controllo della tensione del nastro, mantenuta ad un valore ottimale per la lavorazione cui è sottoposto.

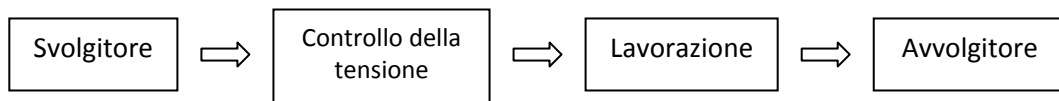


Figura 2.5 - Schema funzionale di una macchina per Converting

Generalmente nella macchina si possono individuare più sezioni a tensione costante, ciascuna caratterizzata da una specifica lavorazione (Fig.2.6). La separazione tra le aree avviene in corrispondenza del passaggio del materiale a contatto con rulli motorizzati, indicati come elementi di traino (*Pull Unit*) poiché trascinano il nastro determinandone la velocità di avanzamento. Su di essi lo slittamento del materiale è evitato solitamente grazie alla spinta di un azionamento pneumatico che mantiene il contatto tra il nastro e il rullo. Naturalmente il numero delle sezioni deve essere ridotto al minimo per motivi di costi, complessità e manutenzione e poiché ciascuna richiede un controllo del tiro dedicato.

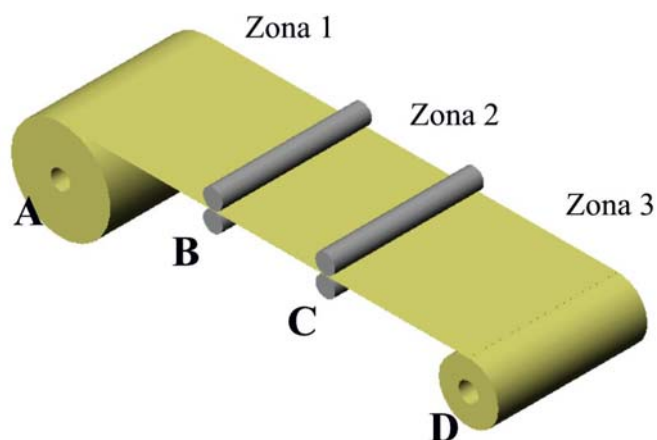


Figura 2.6 - Schematizzazione di una macchina con tre zone distinte di tensione

Per eseguire i controlli nelle varie sezioni è necessario stabilire un riferimento di velocità unico per tutta la linea. In ciascuna area deve essere identificato chiaramente il rullo che determina il riferimento di velocità e che svolge la funzione di Master; gli altri rulli motorizzati hanno il compito di seguire tale riferimento mantenendo la tensione del materiale al valore desiderato durante tutte le fasi di lavoro.

All'interno delle sezioni in cui è suddivisa la macchina sono presenti diversi rulli, motorizzati e non, i quali svolgono specifiche funzionalità:

- alcuni rulli folli servono a guidare il materiale lungo un percorso definito; essi non partecipano attivamente al processo di lavorazione e, poiché sono elementi di passaggio, non è necessario garantire un contatto permanente tra tali rulli e il materiale.
- altri sono coinvolti attivamente nel trasporto del nastro: sono definiti guidabanda i rulli che permettono di cambiare direzione al materiale; flessocurvi allargatori (Fig.2.7) sono invece rulli che, al fine di eliminare le pieghe, effettuano un allungamento progressivo del materiale dal centro verso l'esterno.

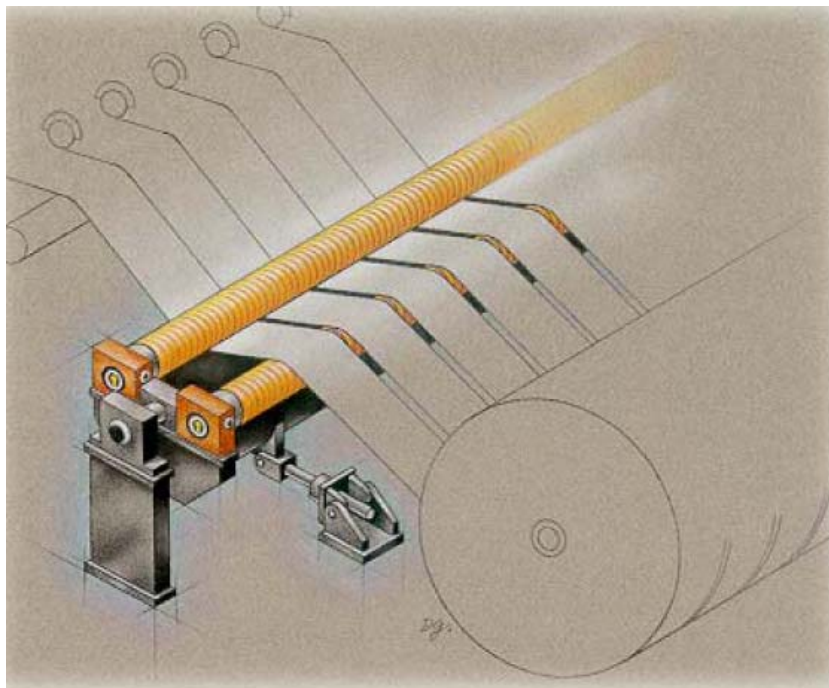


Figura 2.7 - Rullo flessocurvo

- sono presenti inoltre rulli che realizzano lavorazioni sul materiale, come per esempio il taglio (Fig.2.8) che, a seconda del tipo di materiale, può essere effettuato sfruttando uno specifico principio di lavoro: a cesoia, a cordonatura o a lamette.



Figura 2.8 - Rullo per taglio longitudinale del materiale

- infine alcuni rulli sono coinvolti nel controllo di tensione del materiale: il ballerino è costituito da un rullo mobile movimentato da un azionamento pneumatico; in alternativa, all'estremità di un rullo folle di passaggio sono montate celle di carico (Fig.2.9).

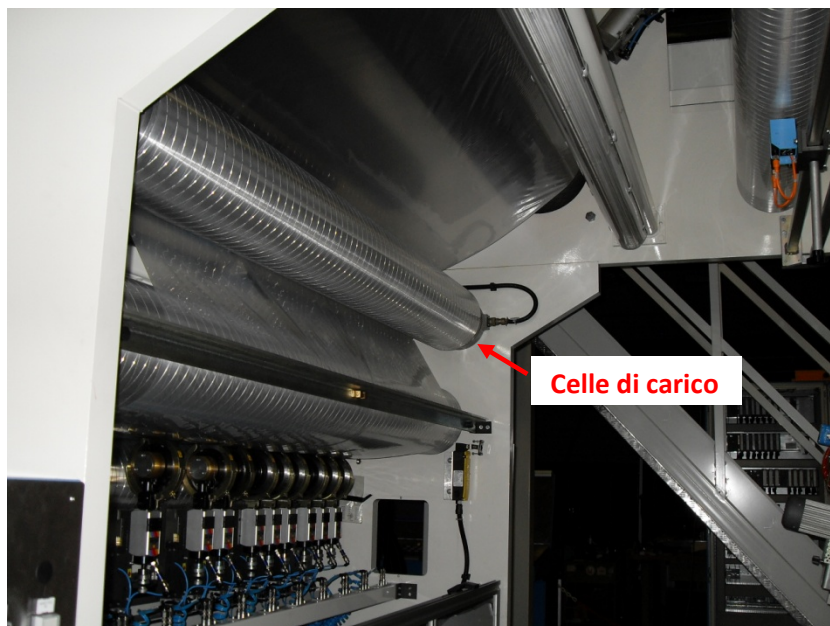


Figura 2.9 - Rulli per il controllo della tensione con celle di carico

All'interno di una macchina per Converting inoltre è solitamente presente un banco di giunta per permettere di congiungere nastri di bobine madri differenti. In base alla tipologia di materiale in lavorazione e al livello di automazione desiderato, esso può essere utilizzato mediante operazioni manuali oppure può essere dotato di un sistema automatico, eventualmente attrezzato di apparecchiature di termosaldatura.

In aggiunta alle zone strettamente legate al processo di lavorazione delle bobine ce ne sono altre esterne, con funzioni generalmente legate alle operazioni di carico della bobina madre e scarico dei prodotti di avvolgimento.

Come esempio, in Fig.2.10 è visualizzato il layout di una macchina progettata dall'azienda IMS Deltamatic per la lavorazione di carta. Essa è costituita da due sezioni a tensione controllata, separate dal rullo di traino; oltre alla presenza di numerosi rulli folli di passaggio si possono individuare il rullo flessocurvo per la distensione del nastro e quello dei coltelli che effettuano il taglio del materiale. Esternamente è inoltre presente un carro per lo scarico automatico delle bobine prodotte.

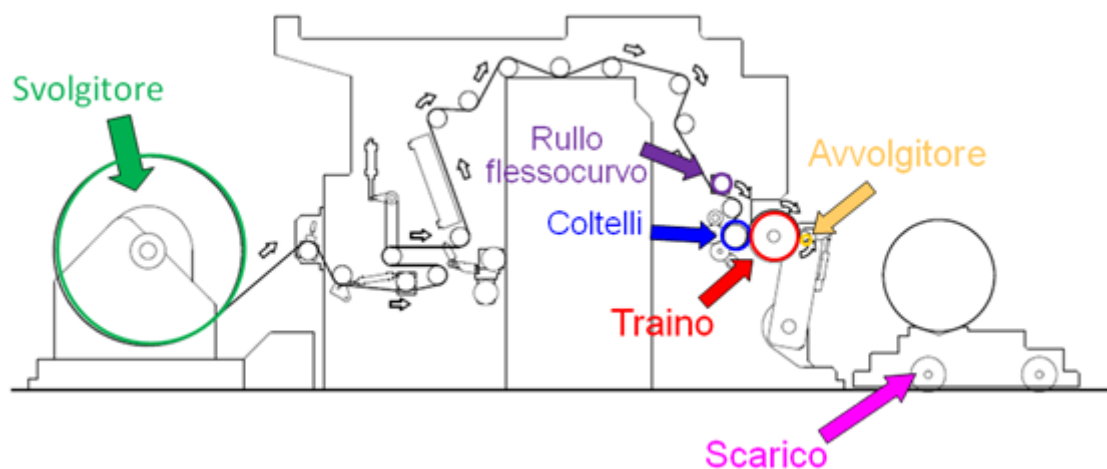


Figura 2.10 - Layout di una macchina per Converting

2.3. Performance delle macchine per Converting

Il criterio principale per valutare le prestazioni del processo di lavorazione delle macchine per Converting consiste nell'analizzare la qualità delle bobine prodotte. L'esame, effettuato nella maggior parte dei casi con metodi visivi e tattili, si basa sulla verifica di compatibilità delle caratteristiche della bobina con i canoni di accettabilità normalmente riconosciuti a livello industriale; in particolare vengono osservate la compattezza della bobina, la planarità e la circolarità della superficie laterale e la presenza di difetti esterni.

Fermo restando la garanzia di qualità del processo, il primo parametro che permette di creare una distinzione di categoria tra le macchine è la velocità massima di produzione, che esprime la velocità di avanzamento lineare del materiale in metri al minuto. Essa dipende principalmente dal tipo di materiale lavorato e dalla tecnica di controllo della tensione adottata, e può variare da 400m/min a 1200m/min. Proprio nell'ultimo anno, grazie all'introduzione di sistemi di controllo più efficaci, è stato raggiunto il limite massimo di 1500m/min su una macchina per la lavorazione di film di alluminio.

Ulteriori fattori da valutare sono le dimensioni delle bobine lavorate, in termini di diametro e larghezza. Limiti meccanici determinano il diametro massimo che, per impianti di taglia grande, può raggiungere i 2000mm e la larghezza di svolgimento, che può arrivare a 1800mm. Per quanto riguarda l'avvolgitore si valuta la relazione tra larghezza minima e diametro massimo: tagliaribobinatrici particolarmente prestazionali sono infatti in grado di avvolgere bobine molto strette con diametro grande, come per esempio la macchina RU6, presentata nel capitolo 7.3, capace di produrre bobine di larghezza 10mm e diametro 1800mm.

In base alla tipologia di materiale in lavorazione e alle dimensioni delle bobine vengono stabiliti i range di tensione da applicare. La coppia sviluppabile dai motori determina il valore massimo che, nella panoramica delle macchine analizzate, può raggiungere i 4000N. La tensione minima dipende invece soprattutto dalle caratteristiche meccaniche degli organi in movimento, in particolare dall'entità delle forze d'attrito; il valore limite osservato è 40N.

Oltre ad agire sulle caratteristiche intrinseche del processo di lavorazione, le performance sono migliorate tramite una riduzione dei fermi di produzione mediante l'inserimento di soluzioni d'automazione. Un esempio è rappresentato dall'utilizzo di avvolgitore a torretta, costituito da due o più stazioni di avvolgimento assiale montati su un supporto rotante (Fig.2.11): mentre una è coinvolta nella produzione, le altre sono in fasi di scarico e preparazione degli alberi. Al termine dell'avvolgimento il supporto ruota per portare in lavoro un nuovo albero; durante la

rotazione una lama taglia trasversalmente il materiale lavorato, liberando le code della bobina prodotta; allo stesso tempo il lembo di nastro presente in macchina viene automaticamente incollato sul nuovo albero, che può quindi cominciare ad avvolgere.

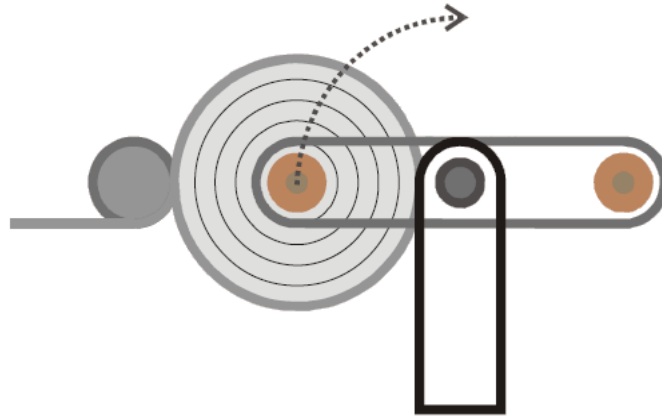


Figura 2.11 - Avvolgitore a torretta

Altre soluzioni sono implementate nell'ottica di riduzione dei tempi di lavoro e agevolazione delle operazioni da parte degli operatori, come per esempio l'introduzione del sistema di posizionamento automatico delle lame di taglio. Mediante un'apparecchiatura mista di azionamenti pneumatici ed elettrici i supporti dei coltelli sono posizionati con estrema precisione e bloccati su una guida lineare in modo che il nastro venga tagliato nei formati selezionati (Fig.2.12). Ciò evita di eseguire operazioni manuali che, oltre a richiedere notevole tempo, sono maggiormente soggette ad errori ed imprecisioni.



Figura 2.12 - Supporti per lame di taglio posizionate con sistema automatico

3. ANALISI DEL PROCESSO DI AVVOLGIMENTO

3.1. Tecnologia di avvolgimento

3.1.1. Target del processo di avvolgimento

La qualità dei prodotti di avvolgimento dipende principalmente dalla capacità di garantire la corretta compattezza alle bobine. Tipici difetti riscontrabili causati da una lavorazione non corretta possono essere (Fig.3.1):

- l'effetto telescopico o una forma non cilindrica, sintomi di una compattezza insufficiente a causa di un eccessivo intrappolamento di aria;
- il collasso dell'anima o l'incollaggio tra le spire che si verificano con una compattezza eccessiva a causa di carichi elevati;
- la stellatura, causata da variazioni brusche delle caratteristiche della bobina durante l'avvolgimento [1].

In ambito industriale il concetto di compattezza generalmente si basa su un'analisi visiva e pratica: si usa considerare una bobina sufficientemente compatta se sopravvive ai sistemi di manipolazione a valle del processo e alla spedizione, ma allo stesso tempo non è così dura da danneggiare il materiale.

I principi fondamentali da seguire per eseguire un processo di avvolgimento corretto sono:

1. Vicino all'anima la bobina deve essere molto dura perché le prime spire servono da base per la crescita di quelle successive. Se l'interno fosse troppo soffice si otterrebbe l'effetto di un avvolgimento telescopico.
2. Al diametro finale deve essere meno compatta, altrimenti il materiale sottostante potrebbe danneggiarsi.
3. La transizione di compattezza dall'anima fino al diametro massimo deve avvenire in maniera molto dolce. Se ci fossero cambiamenti bruschi la bobina tenderebbe alla stellatura [2].

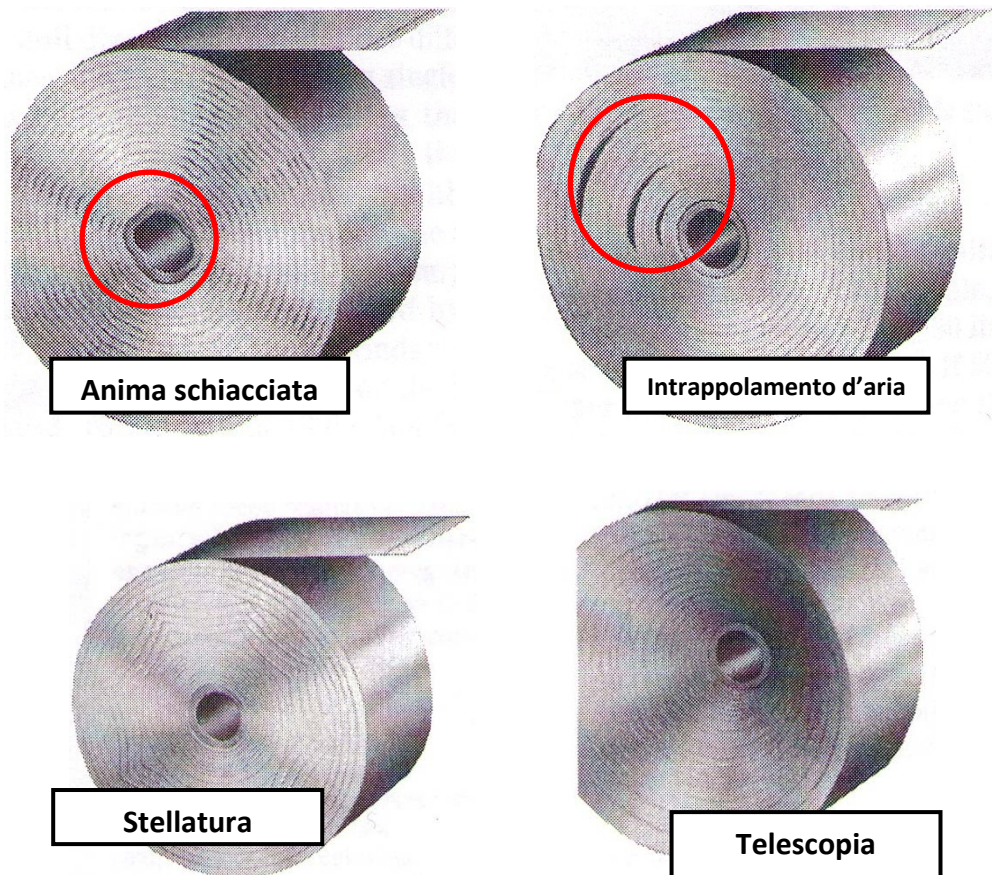


Figura 3.1 – Tipici difetti di bobine

3.1.2. Variabili di processo

Si possono identificare tre parametri di processo principali che permettono di regolare la compattezza dei prodotti di avvolgimento (Fig.3.2): il carico di trazione sul materiale (in breve si adotta il termine inglese *Tension*), la pressione sulla superficie periferica della bobina (*Nip*) e la differenza di coppia applicata tra l'asse della bobina e quello del rullo in appoggio (*Torque*). Anche le proprietà del materiale lavorato e il design del sistema di avvolgimento influiscono sulla qualità del processo, ma i tre parametri, nominati comunemente TNT (*Tension*, *Nip*, *Torque*), sono fondamentali perché sono gli unici controllabili dinamicamente in base alle condizioni di funzionamento [3].

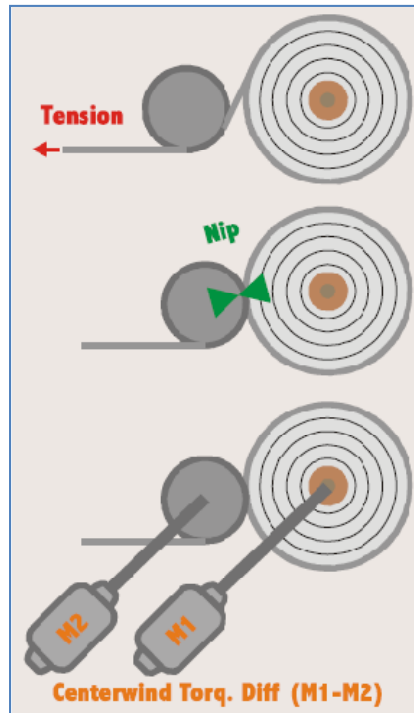


Figura 3.2 - Le variabili di processo di avvolgimento

Tension

La tensione del materiale, generalmente definita come forza per unità di larghezza [N/m], o semplicemente espressa come unità di forza [N], nella direzione MD (Machine Direction) di avanzamento del materiale, è il parametro più influente: più alto è il valore di tensione maggiormente compatta risulta la bobina.

Per ogni tipo di materiale e zona di lavoro è necessario determinare il corretto valore di tensione (§Cap.3.2) che deve essere mantenuto pressoché costante durante tutte le fasi di lavoro. Norme di buon progetto prevedono che la tensione non vari oltre il 10% rispetto al valore di riferimento durante i transitori di velocità e intorno a percentuali inferiori nel funzionamento a regime [2].

La variazione sul valore di tensione è limitata da numerosi vincoli: per esempio se la tensione raggiunge picchi troppo elevati si può incorrere nel rischio di rompere il materiale, altrimenti se è troppo bassa oppure se le oscillazioni diventano significative si possono formare grinze che creano difetti sul prodotto finale.

Nip

Nip indica il carico lineare medio, misurato in forza per unità di larghezza [N/m], tra una bobina in avvolgimento e un rullo a contatto, agente lungo la linea che collega i loro centri.

Tale carico ha il compito di evitare l'intrappolamento di aria tra le spire che, soprattutto per materiali non porosi, ha l'effetto di indebolire la bobina generando l'effetto telescopico. D'altro lato non può essere troppo elevato per evitare di danneggiare il materiale lavorato e il rullo di appoggio. Gli sforzi dovuti alla pressione rischiano infatti di segnare la superficie a contatto e di indurre nelle spire interne uno slittamento che comporta difetti nel prodotto finale [11]. Inoltre un carico eccessivo può essere causa dell'insorgere di fenomeni di vibrazione tra l'albero di avvolgimento e il rullo a contatto.

Generalmente il carico è generato tramite un sistema di attuazione oleodinamico, in base alla cui configurazione viene determinata la geometria del Nip. Il sistema di regolazione deve tenere conto quindi della geometria, insieme a diametro e larghezza della bobina e densità del materiale, per calcolare in tempo reale la corretta pressione del cilindro allo scopo di mantenere la forza di contatto al valore di riferimento (§Cap.3.4).

Torque

L'ultima variabile che influisce sulla compattezza delle bobine è la differenza di coppia tra due rulli motorizzati a contatto.

Il controllo di tale parametro viene effettuato agendo sulle correnti degli azionamenti elettrici oppure introducendo una differenza di velocità tra i due rulli. Generalmente materiali inestensibili possono sopportare una differenza di velocità di circa 0,01%, mentre con materiali estensibili si può arrivare all'1% [2].

Mentre sono stati condotti numerosi studi su Tension e Nip, ne sono stati effettuati pochi sul Torque poiché, per essere applicato, richiede una particolare configurazione della stazione di avvolgimento. Si può comunque supporre che, escludendo fenomeni di slittamento, l'effetto sia semplicemente additivo a quello degli altri.

Combinazione dei tre parametri

Il metodo di valutazione della combinazione dei tre parametri di controllo TNT è chiamato WIT (Wound-In-Tension). Mentre per esempio la tensione descrive solo la sollecitazione del materiale che entra nella bobina, WIT descrive il carico complessivo e, naturalmente, coincide con la tensione nel caso di avvolgitore puramente assiale perché non sono presenti le altre componenti.

Il meccanismo esatto grazie al quale il Nip contribuisce al WIT (e quindi alla compattezza della bobina) non è ancora perfettamente noto. La prima sperimentazione sull'effetto del Nip è stata effettuata da Pfeiffer che determinò la seguente legge [4]:

$$WIT = \frac{1}{B} \cdot \log\left(\frac{N + A}{A}\right) + \frac{T \cdot N}{C + D \cdot N}$$

N = Nip (PLI)
T = Tension (PLI)
A, B, C, D = Coefficienti

Dal grafico di Fig.3.3 che descrive l'andamento del WIT in funzione di N e T si notano due curve limite, una superiore dovuta al coefficiente di attrito del materiale che determina lo slittamento degli strati della bobina, e una inferiore che esclude il funzionamento con tensione negativa. L'avvolgimento è comunque garantito con tiro nullo, lasciando solo l'azione della pressione del Nip. Nella regione di funzionamento WIT è funzione di Nip e tensione; i contributi delle due componenti dipendono dalle proprietà del materiale, di cui la più importante è la comprimibilità nella direzione ZD: materiali voluminosi come tessuti sono altamente influenzati dal Nip, mentre materiali compatti come alluminio e carta lo sono in misura inferiore.

Successivamente Good trovò una relazione più semplice tra Nip e Tension:

$$WIT = T + \frac{\mu \cdot N}{10 \cdot C}$$

WIT = Wound-In-Tension [MPa]
T = tiro materiale [MPa]
 μ = coeff.di attrito dinamico web-web
N = Nip [N/cm]
C = spessore web [mm]

In ambito industriale tali leggi sono di difficile impiego ma forniscono comunque un'indicazione qualitativa utile per dimostrare l'effetto combinato delle variabili di processo sui prodotti di avvolgimento.

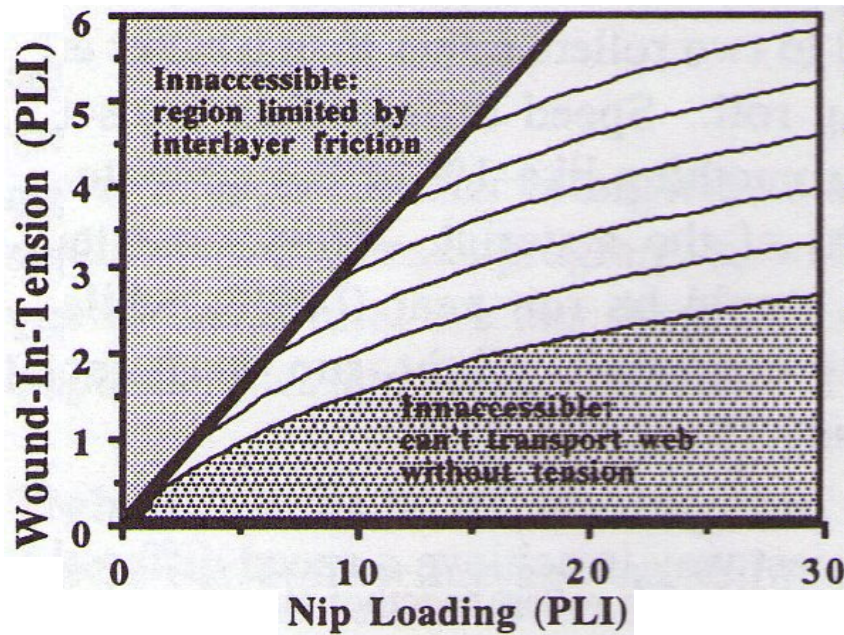


Figura 3.3 – Grafico WIT

3.1.3. Sistemi di avvolgimento

Nell'intento di sfruttare le variabili di processo secondo varie combinazioni sono stati sviluppati diversi sistemi di avvolgimento, che si possono rappresentare secondo tre classi (Fig.3.4).

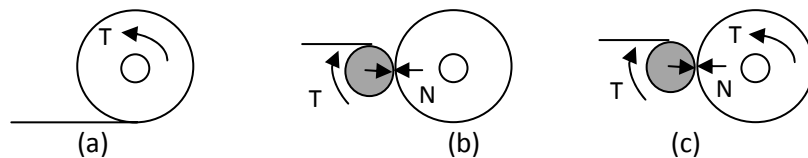


Figura 3.4 - Classi di avvolgimento: assiale (a), periferico (b), assiale-periferico (c)

Il più semplice è l'avvolgitore assiale (Fig.3.5) nel quale la bobina è sostenuta e movimentata attraverso l'anima. Questa categoria è così chiamata perché l'azionamento elettrico, regolato in velocità o in coppia a seconda del sistema di controllo, agisce sull'asse della bobina avvolta generando tensione sul materiale.



Figura 3.5 - Avvolgitore assiale

Un'altra classe di avvolgimento è quella periferica (Fig.3.6), in cui la bobina è movimentata grazie alla pressione superficiale di un rullo motorizzato. Durante l'avvolgimento la bobina e il rullo a contatto devono allontanarsi per permettere la crescita della bobina; il movimento avviene in modo controllato tramite un sistema pneumatico o idraulico per regolare la pressione di contatto. In macchine di grandi dimensioni il rullo è fisso ed è chiamato "tamburo", altrimenti è mobile, solitamente montato su una leva, e ruota in modo da mantenersi sempre in appoggio sulla bobina.

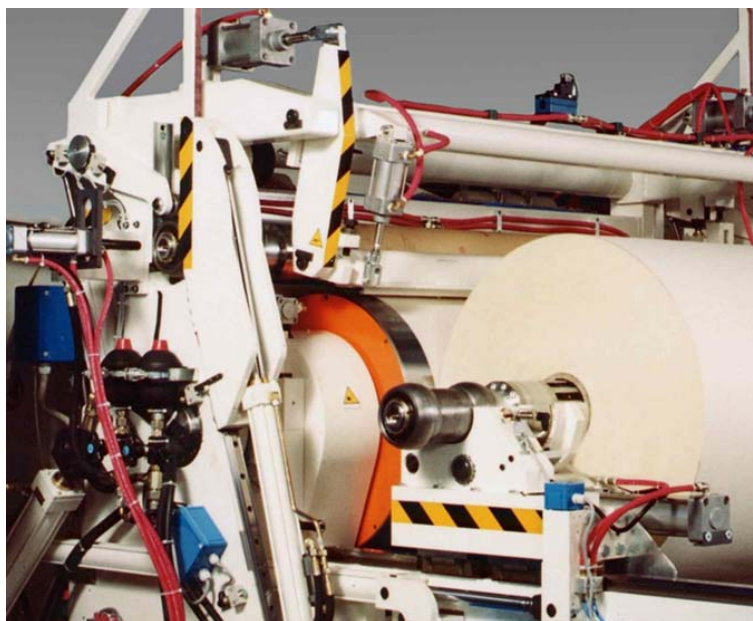


Figura 3.6 - Avvolgitore periferico

Unendo i due sistemi precedenti si ottiene il sistema di avvolgimento assiale-periferico, che permette di controllare la durezza della bobina tramite sia la regolazione del tiro del materiale sia la pressione di contatto; questo sistema permette eventualmente anche di agire sulla differenza di coppia dei rulli, fornendo un ulteriore contributo per migliorare la qualità dei prodotti.

Ognuno dei sistemi citati permette di agire in modo diverso sul WIT. In Fig.3.7 è riportato uno schema grafico che rappresenta i contributi delle variabili di processo nelle diverse classi di avvolgimento e, per ognuna, il grado di compattezza della bobina che ne risulta. Oltre ai sistemi base descritti è raffigurata anche una classe intermedia che consiste in un avvolgimento assiale supportato dall'azione di un rullo a contatto non motorizzato (*layon roller*) che introduce la componente Nip.

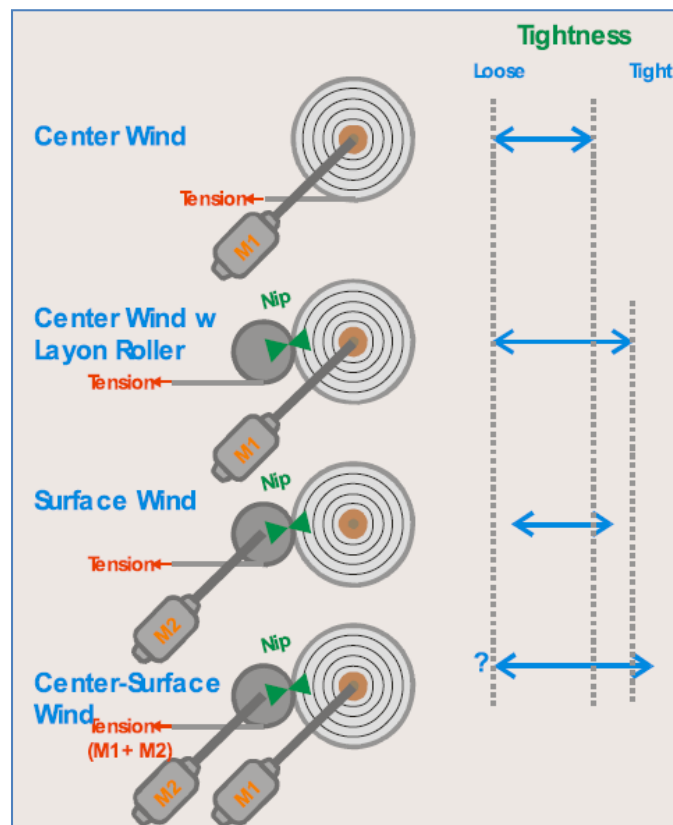


Figura 3.7 - Contributo delle variabili di processo nei sistemi di avvolgimento

3.2. Tensione ottimale dei materiali

La tensione di lavoro corretta non dipende solo dal tipo di materiale, ma anche dalla zona della macchina e dal tipo di lavorazione considerati. Per esempio la tensione in svolgimento viene stabilita su un valore “medio”, sufficiente ad assicurare regolare alimentazione ed allineamento del nastro. Nelle zone di lavorazione intermedie, dove il materiale può essere sottoposto alle fasi di rivestimento, è necessaria una tensione molto bassa. Al contrario, nell’area di avvolgimento ci deve essere una tensione più alta dei livelli precedenti per produrre bobine finite compatte.

Ci sono diversi metodi per determinare la tensione di riferimento. Il sistema più utilizzato si basa sull’esperienza con materiali simili. Se operazioni precedenti sono state soddisfacenti significa che sono state in grado di ottenere una tensione sufficiente per mantenere il materiale teso e stabile lungo la macchina senza romperlo.

Considerando condizioni di funzionamento analoghe con materiali dalle caratteristiche simili, una buona stima viene effettuata tenendo conto che la tensione varia proporzionalmente con lo spessore del materiale. Vale quindi la seguente regola che permette di ricavare la tensione T_2 [N/m] da applicare a uno spessore sp_2 [mm], conoscendo la tensione ottima T_1 [N/m] per uno spessore sp_1 [mm]:

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{sp_2}{sp_1}$$

Se non ci si potesse basare su esperienze precedenti, si trovano suggerimenti su tabelle tecniche redatte da organizzazioni del settore (come TAPPI per la carta) o pubblicate in letteratura [6] [7]. Queste linee guida sono generalmente tabelle o diagrammi delle tensioni in funzione della larghezza [cm] e dello spessore [μ m] per alcune classi di materiali (Tab.3.1).

Qualora non si possedesse uno storico o non ci fossero dati in letteratura da confrontare, un ulteriore procedimento che fornisce un buon punto di partenza per la lavorazione della maggioranza dei materiali si basa sull’analisi del diagramma tensione-deformazione. Il metodo consiste semplicemente nel definire come tensione di riferimento un valore compreso tra il 10% e il 25% della tensione di snervamento del materiale lungo la direzione di lavoro della macchina [2].

MATERIALE	TENSIONE
Acetato	0,035 N/cm/ μm
Alluminio laminato	0,035 ÷ 0,11 N/cm/ μm
Carta	$\frac{(\text{g/m}^2)}{27 \div 40}$ N/cm
Cellophane	0,035 ÷ 0,07 N/cm/ μm
Nylon	0,015 ÷ 0,02 N/cm/ μm
Poliestere	0,035 ÷ 0,07 N/cm/ μm
Polietilene	0,015 ÷ 0,02 N/cm/ μm
Polistirene	0,06 ÷ 0,08 N/cm/ μm
PVC	0,0035 ÷ 0,014 N/cm/ μm

Tabella 3.1 - Tensione di riferimento per classi di materiali

3.3. Tecnologie per il controllo del tiro

3.3.1. Ballerino

La tecnologia del ballerino è uno dei più tradizionali sistemi di misura e controllo della tensione. Consiste in un rullo folle montato su una leva mobile il cui movimento è controllato tramite un cilindro pneumatico e la cui posizione è monitorata tramite un sensore. Quando la tensione sul nastro aumenta (o diminuisce), il materiale flette il ballerino in una nuova posizione che viene rilevata e inviata all'azionamento per generare una reazione per diminuire (o aumentare) la tensione (Fig.3.8).

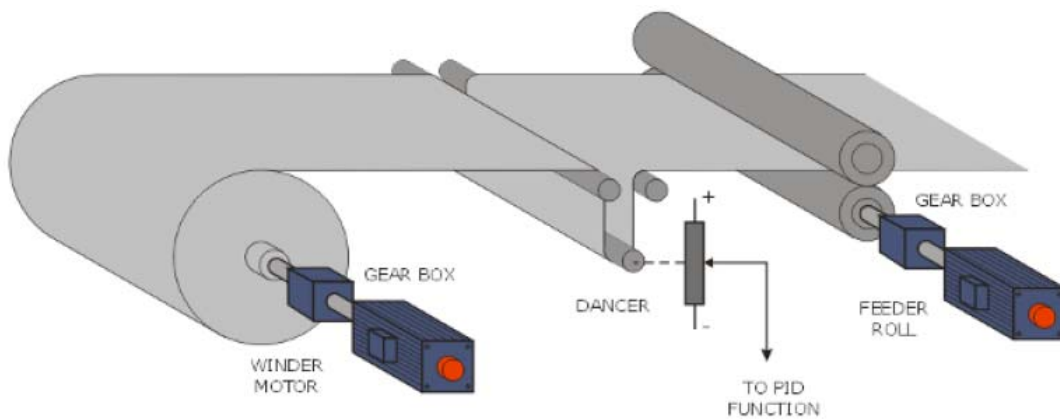


Figura 3.8 - Sistema di controllo della tensione con ballerino

Il vantaggio primario nell'impiego del ballerino è che permette di tollerare e compensare rapidi gradienti di tensione sul materiale causati dal processo di lavorazione (per esempio taglio al volo), da scarse regolazioni da parte dell'azionamento oppure da difetti di produzione (bobine ovalizzate). Tale capacità proviene dalla riserva di materiale accumulato a cavallo del rullo mobile che, entro certi limiti, può aumentare o diminuire durante le variazioni di tensione.

Lo svantaggio è che, nonostante serva a controllare la tensione del nastro, né il riferimento né il feedback sono espressi in unità ingegneristiche direttamente collegabili al carico sul materiale: i parametri di controllo sono la pressione del cilindro [bar] e il feedback misurato tramite la posizione della leva. Problematiche relative al processo di funzionamento sono legate agli attriti e all'inerzia del sistema mobile: una buona progettazione del ballerino deve tendere a minimizzare entrambi gli aspetti per rendere più reattivo il movimento e più efficace il sistema di controllo (Tab.3.2).

VANTAGGI	SVANTAGGI
• Permette di rilasciare il materiale durante le condizioni di instabilità dinamiche (accelerazioni, decelerazioni, giunzioni di nuove bobine, svolgimento di bobine ovalizzate ecc.) • E' efficace quando le velocità in gioco sono elevate e il controllo di tensione richiede un'estrema precisione • Può assorbire picchi di tensione dovuti a vibrazioni, disturbi che si propagano in seguito a svolgimenti di bobine ovalizzate	• Non permette una rilevazione diretta del valore della tensione; è possibile ricavarlo soltanto da considerazioni meccaniche e geometriche • Richiesta di molto spazio nella macchina • I potenziometri per la rilevazione della posizione possono essere soggetti a disturbi • Basse performance dovute all'eccessivo attrito di origine meccanica di tutto il gruppo danzatore. Quest'attrito deve essere minore di 1/10 della tensione minima di funzionamento

Tabella 3.2 - Vantaggi e svantaggi del controllo della tensione mediante ballerino

Il processo di scelta della configurazione del sistema a ballerino, oltre al dimensionamento meccanico del rullo e dei relativi supporti, comprende le seguenti fasi:

1. Definizione della tipologia di montaggio

Il ballerino può essere montato secondo una configurazione verticale o orizzontale: la prima (Fig.3.9a) è adatta per materiali poco resistenti, la cui tensione è molto più piccola del peso del rullo, mentre la seconda (Fig.3.9b) è più appropriata per materiali la cui tensione di lavoro è paragonabile al peso del rullo mobile [2].

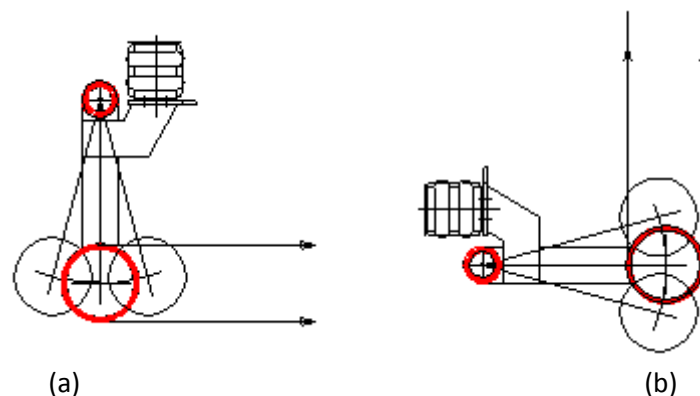


Figura 3.9 - Tipologie di montaggio del ballerino: verticale (a) e orizzontale (b)

Analoghe tipologie di montaggio si differenziano per i diversi angoli di abbracciamento del materiale sul ballerino, che dipendono dalla posizione dei rulli precedente e successivo a

quello mobile nel percorso del materiale. In particolare si distinguono i casi in cui il movimento del danzatore avviene lungo la bisettrice dell'angolo formato dal nastro di ingresso e di uscita al rullo (Fig.3.10a) oppure non avviene lungo la bisettrice (Fig.3.10b).

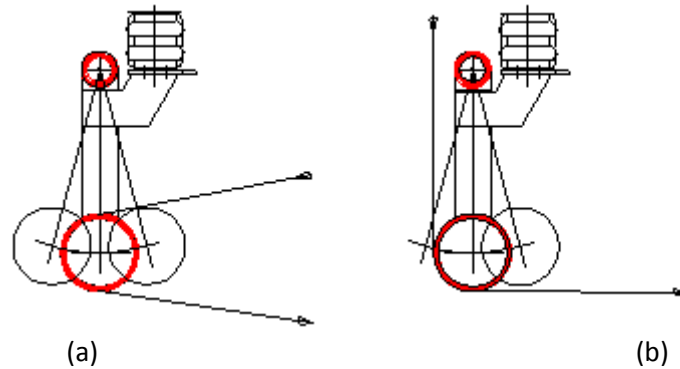


Figura 3.10 - Movimento del ballerino: lungo la bisettrice (a) e non lungo la bisettrice (b)

2. Dimensionamento e posizionamento dell'attuatore pneumatico

Oltre ai cilindri pneumatici classici vengono utilizzati altri tipi di attuatori, come quelli a soffiETTO, che utilizzano la spinta dell'aria su un elemento deformabile. Questi tipi di attuatori sono costituiti da camere ad aria compressa in gomma sintetica, collegati eventualmente in più elementi (Fig.3.11). Il loro vantaggio sta nel fatto che, oltre ad eliminare i problemi di attrito e usura dei componenti striscianti, possono sviluppare notevoli forze anche in presenza di ingombri piuttosto ridotti.



Figura 3.11 - Attuatore pneumatico a doppio soffiETTO (modello Mecman 192-216-100)

Indipendentemente dalla tipologia di attuatore impiegato, il suo dimensionamento e posizionamento sulla leva mobile sono effettuati con due principali obiettivi:

- garantire la copertura del range di tensione del materiale richiesto sulla base del campo di lavoro della pressione pneumatica cercando di ottenere la risoluzione massima sul controllo della tensione. In particolare è necessario che la tensione massima corrisponda ad una pressione inferiore alla massima fornibile dall'impianto e quella minima sia superiore alla pressione minima garantita dalla valvola proporzionale regolatrice.
- minimizzare la dimensione dell'attuatore in modo da ridurre gli attriti che influiscono sulla sensibilità del sistema.

Si consideri per esempio il tipico caso riportato in Fig.3.12, in cui il rullo danzatore, montato verticalmente, è movimentato tramite una leva di lunghezza a da due cilindri pneumatici posizionati ad una distanza b dal fulcro della leva.

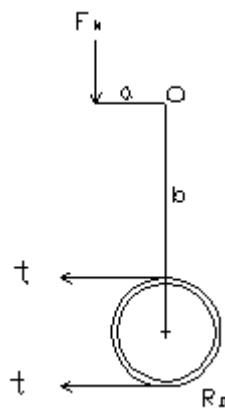


Figura 3.12 – Ballerino con attuatore pneumatico

Per calcolare la pressione da comandare all'attuatore in modo da ottenere sul materiale un determinato valore di tensione vale la seguente formula:

$$\text{Pressione} = \frac{\text{leva_b}}{\text{leva_a}} \cdot \frac{\text{Tiro_attuale}}{\text{Forza_max_cilindro}} \cdot \text{Pressione_max}$$

Considerando quindi la pressione tipica massima per gli impianti industriale di 6bar e ipotizzando che le specifiche di progetto richiedano un campo di lavoro tra 100N e 800N, si possono individuare i seguenti valori ottimali di dimensionamento del sistema:

- Alesaggio del cilindro: 63 mm, per cui corrisponde una spinta di 1870N a 6bar

- Lunghezza della leva a : 186 mm
- Distanza tra cilindro e fulcro della leva b : 390 mm

La pressione comandata copre infatti completamente il campo di tensione richiesto (Tab.3.3).

Pressione [bar]	Tensione [N]
0,7	100
1,3	200
2,0	300
2,7	400
3,4	500
4,0	600
4,7	700
5,4	800

Tabella 3.3 - Corrispondenza tra pressione comandata e tensione del materiale

3. Scelta del sensore di posizione

Per il rilevamento della posizione angolare del rullo danzatore è preferibile utilizzare sensori che non prevedano contatto (per esempio sensori ad ultrasuoni) perché non introducono attriti ed hanno un veloce tempo di risposta. Essi sono montati in modo da misurare la distanza dal profilo di una camma appositamente progettata (Fig.3.13) per ottenere una corrispondenza lineare tra la lettura del segnale elettrico del sensore (in tensione o corrente) e lo spostamento angolare della leva mobile.



Figura 3.13 - Camma per rilievo della posizione del rullo danzatore

3.3.2. Celle di carico

Un sistema alternativo per il controllo della tensione consiste nell'utilizzo di celle di carico, che permettono di convertire la tensione sul materiale in un segnale elettrico direttamente proporzionale. Tipicamente il segnale in uscita è nell'ordine di qualche mV, ma, a seconda del ricevitore, viene amplificato nei campi 0 – 10V oppure 0(4) – 20mA. Come per il sistema a ballerino il segnale viene utilizzato per regolare la velocità (o la coppia) dell'azionamento che reagisce in modo da mantenere la tensione al valore desiderato (Fig.3.14). Solo per alcune applicazioni particolari in cui vengono lavorati materiali estensibili poco resistenti, come il polietilene, la reazione al segnale delle celle di carico che rilevano la tensione nella zona dell'avvolgitore non viene affidata ad un azionamento elettrico ma all'espansione pneumatica degli alberi di avvolgimento. Questi lavorano infatti come frizioni la cui coppia trasmessa alla bobina è regolata tramite una valvola proporzionale pneumatica. Tali applicazioni particolari non saranno oggetto di approfondimento all'interno della presente tesi.

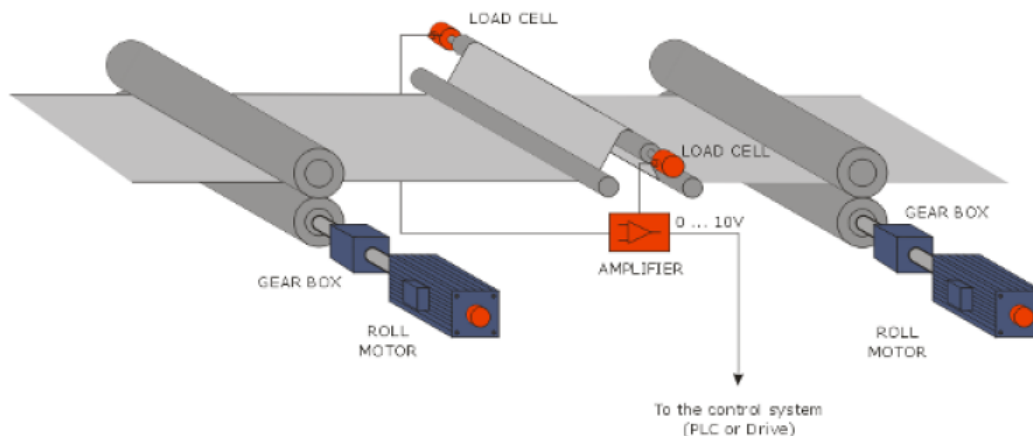


Figura 3.14 - Sistema di controllo della tensione con celle di carico

In fase di progetto della macchina vengono stabiliti gli angoli α e β che definiscono la direzione di ingresso e di uscita del materiale rispetto al rullo folle dove sono montate le celle. Rispetto a tali angoli viene calcolata la forza risultante che agisce sul trasduttore (Fig.3.15).

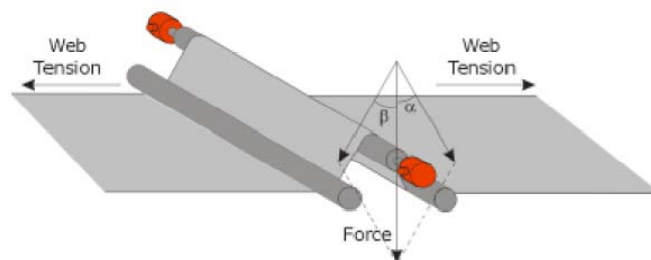


Figura 3.15 - Forza risultante misurata dalle celle di carico

Noti quindi gli angoli α e β , per dimensionare correttamente le celle di carico è necessario conoscere il campo di tensione di lavoro definito da specifiche di progetto e l'orientamento di lettura del trasduttore. Bisogna tenere conto inoltre del peso del rullo stesso nel caso la direzione di misura non sia orizzontale.

Considerando l'esempio di Fig.3.16 la forza totale risultante F_{RTOT} misurata dalle celle vale:

$$F_{RTOT} = T \cdot (\cos \beta - \cos \alpha)$$

Poiché nel caso valutato la tara non dà contributo, ipotizzando di montare una cella di carico per ogni estremità del rullo, risulta che ogni cella deve sostenere un carico F_R :

$$F_R = \frac{F_{RTOT}}{2}$$

Norme di progetto stabiliscono che tale sollecitazione deve rientrare nel campo di lavoro massimo della cella, tenendo anche conto che, nel caso la tara sia inferiore al 30% del carico nominale, la sollecitazione minima deve essere maggiore del 10% del carico nominale e maggiore del 30% se la tara è maggiore al 30% [8].

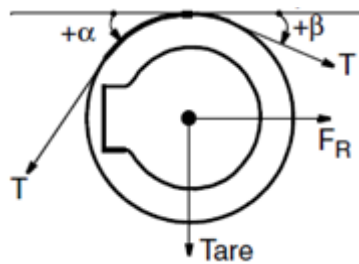


Figura 3.16 - Schema delle forze agenti sulle celle di carico

3.3.3. Controllo in anello aperto

Il controllo della tensione può anche essere effettuato in anello aperto (Fig.3.17), agendo sulla coppia dell'azionamento elettrico che viene stimata per garantire il mantenimento della tensione di riferimento sul materiale.

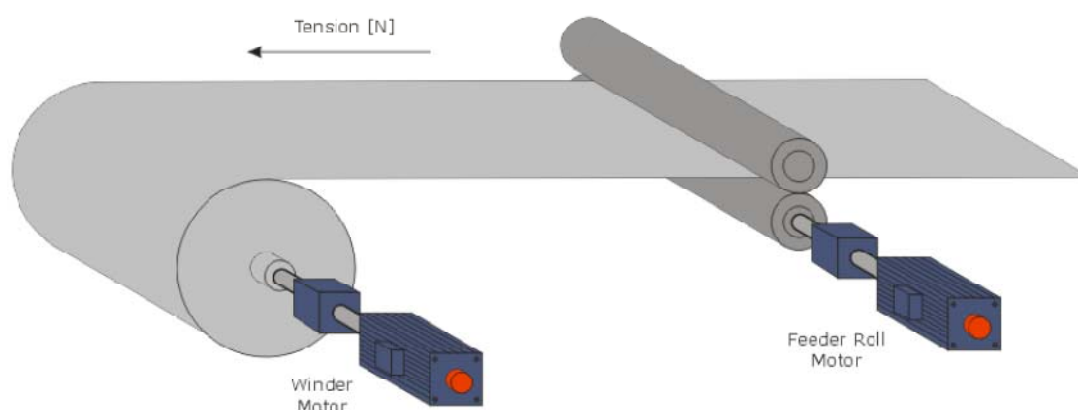


Figura 3.17 - Sistema di controllo della tensione in anello aperto

Parametro fondamentale è il diametro della bobina che permette di trasformare il carico tangenziale richiesto nella coppia sull'asse motore. Per ottenere la maggior precisione nella regolazione è necessario introdurre inoltre una compensazione degli attriti e delle inerzie del sistema, in modo da garantire un corretto calcolo della coppia anche durante i transitori di velocità.

Naturalmente lo svantaggio di questo sistema è la sua minore accuratezza rispetto ai controlli in anello chiuso a causa della difficoltà nel realizzare una stima perfetta dei carichi resistenti e inerziali, la cui entità è variabile nel tempo a causa dell'usura degli organi meccanici.

Ciò che è importante in fase di dimensionamento del motore è garantire che la coppia minima di lavoro sia sufficientemente alta rispetto ai carichi resistenti per attrito in modo da ottenere una regolazione più accurata. È necessario considerare quindi le condizioni di diametro e tensione minimi per calcolare la coppia minima sul motore e confrontarla con la coppia necessaria per vincere gli attriti, ipotizzabile sulla base delle esperienze precedenti. Si agisce quindi sul rapporto di trasmissione per far sì che la coppia necessaria per generare la tensione sia almeno maggiore di quella per la compensazione degli attriti.

3.3.4. Confronto tra le tecnologie

La scelta del sistema di controllo della tensione nelle varie zone delle macchine per Converting dipende da numerosi fattori legati agli ingombri meccanici, al costo dell'impianto e alle prestazioni dell'asse da controllare in termini di rapporto tra valori minimo e massimo di diametro e tensione. In ambito industriale è stata sviluppata una tabella per guidare i progettisti nelle varie applicazioni (Tab.3.4) [9].

	Anello aperto	Ballerino	Celle di carico
Rapporto diametri: Dmax / Dmin	Fino a 10:1	Fino a 15:1	Fino a 15:1
Range tensione: Tmax / Tmin	Fino a 6:1	Dipende dalla regolazione del supporto	Fino a 20:1
Rapporto D x Range T: Dmax/Dmin x Tmax/Tmin	Fino a 40:1	Fino a 40:1 Dipende dalla regolazione del supporto	Fino a 100:1
Velocità linea	Fino a 600m/min	Fino a 2000m/min	Fino a 2000m/min
Materiale	Carta, tessile, foglio metallo	Gomma, cavo, tessile, carta, lamina metallo	Carta, lamina metallo

Tabella 3.4 - Campi di utilizzo dei sistemi di controllo della tensione

Per verificare la validità dei campi di utilizzo presentati in Tab.3.4, ho effettuato un'analisi delle commesse della IMS Deltamatic SpA dall'anno 2008. Lo studio ha evidenziato che l'impiego delle diverse tecnologie ha sempre rispettato i limiti teorici di utilizzo.

A titolo di esempio riporto i dati dello svolgitore di due commesse, una in cui viene adottato il sistema a ballerino (Tab.3.5) e un'altra in cui sono utilizzate le celle di carico (Tab.3.6). Nelle tabelle vengono confrontate le specifiche dell'asse con i parametri teorici di utilizzo dei vari sistemi; sono indicati in verde i campi in cui il confronto risulta positivo e in rosso quelli in cui emerge che il sistema non sia utilizzabile.

	Dati macchina	Anello aperto	Ballerino	Celle di carico
Diametro max [mm]	1800			
Diametro min [mm]	160			
Rapporto diametri: Dmax / Dmin	11,25	Fino a 10:1	Fino a 15:1	Fino a 15:1
Tensione max [N]	2800			
Tensione min [N]	1000			
Range tensione: Tmax / Tmin	2,8	Fino a 6:1	-	Fino a 20:1
Rapporto D x Range T: Dmax/Dmin x Tmax/Tmin	31,5	Fino a 40:1	Fino a 40:1	Fino a 100:1
Velocità linea [m/min]	1000	Fino a 600	Fino a 2000	Fino a 2000
Materiale	Accoppiato	Carta, tessile, foglio metallo	Gomma, cavo, tessile, carta, lamina metallo	Carta, lamina metallo

Tabella 3.5 - Specifiche di svolgitore con sistema di controllo a ballerino

	Dati macchina	Anello aperto	Ballerino	Celle di carico
Diametro max [mm]	1500			
Diametro min [mm]	163			
Rapporto diametri: Dmax / Dmin	9,20	Fino a 10:1	Fino a 15:1	Fino a 15:1
Tensione max [N]	4000			
Tensione min [N]	400			
Range tensione: Tmax / Tmin	10	Fino a 6:1	-	Fino a 20:1
Rapporto D x Range T: Dmax/Dmin x Tmax/Tmin	92,02	Fino a 40:1	Fino a 40:1	Fino a 100:1
Velocità linea [m/min]	600	Fino a 600	Fino a 2000	Fino a 2000
Materiale	Alluminio	Carta, tessile, foglio metallo	Gomma, cavo, tessile, carta, lamina metallo	Carta, lamina metallo

Tabella 3.6 - Specifiche di svolgitore con sistema di controllo con celle di carico

Affidando la progettazione del sistema di controllo alle linee guida di Tab.3.4, la scelta risulta complessa per un'applicazione in cui il campo di utilizzo può essere valido per più di una tecnologia, come può essere il caso in Tab.3.5 in cui potrebbero essere adottati sia ballerino sia celle di carico. Poiché i due sistemi hanno prestazioni analoghe per quello che riguarda il sistema di regolazione, in termini di stabilità e tempo di risposta [10], la scelta dipende unicamente da esigenze costruttive. In Tab.3.7 viene effettuato un riepilogo sul confronto dei due sistemi di controllo in anello chiuso.

Sistema di controllo	Caratteristiche	Vantaggi	Svantaggi
Ballerino	• Il suo utilizzo diviene obbligatorio quando è prevista la giunzione in movimento	• Possibilità di assorbimento di picchi di tensione • Possibilità di agire come riserva di materiale • Flessibilità • Facilità di manutenzione	• Richiesta di maggiore spazio • Parti in movimento e notevoli inerzie
Celle di carico	• Adatto quando si ha a disposizione un limitato spazio macchina e non si hanno alti valori di accelerazione e decelerazione • Da utilizzare quando il materiale non è flessibile e quindi è difficilmente avvolgibile attorno al rullo danzatore	• Misura diretta della tensione • Assenza di parti in movimento	• Assenza d'assorbimento di picchi di tensione a causa della mancanza di accumulo di materiale • Accelerazioni e decelerazioni difficili da gestire • Delicatezza • Richiesta di una taratura periodica • Richiede un'elaborazione del segnale in uscita (elettronica di filtraggio)

Tabella 3.7 - Confronto dei sistemi di controllo della tensione in anello chiuso

3.4. Studio analitico della pressione di contatto sulle bobine

A seconda della configurazione della stazione di avvolgimento lo studio della geometria della pressione esercitata superficialmente sulla bobina può variare.

Il caso più semplice è quello in cui i pesi della bobina e dei supporti mobili non agiscono lungo la linea del Nip. Considerando quindi un doppio attuatore oleodinamico che agisce sulle estremità del rullo, il carico può essere calcolato come:

$$N = \frac{2 \cdot P \cdot A}{W}$$

N = carico Nip [N/m]
P = pressione cilindro [N/m²]
A = area cilindro [m²]
W = larghezza bobina [m]

Definendo quindi un carico adatto per il materiale in lavoro, nota la larghezza del materiale, è possibile ricavare la pressione da comandare al cilindro che deve rimanere costante durante tutto il processo di avvolgimento.

Se invece la direzione di spinta del Nip deve tenere conto anche dei contributi delle masse in gioco, è necessario uno studio approfondito delle geometrie del sistema meccanico. In tal caso infatti la pressione necessaria per mantenere la forza di contatto al valore di riferimento deve adattarsi in tempo reale al variare delle direzioni delle forze considerate, funzioni del diametro della bobina.

Considero come esempio il sistema rappresentato in Fig.3.18, in cui due cilindri oleodinamici generano una spinta sulle leve rotanti che supportano l'albero di avvolgimento e garantiscono l'appoggio della bobina su un rullo di contrasto mediante il controllo della pressione nelle camere di testata. La contropressione nelle camere di culatta è invece mantenuta fissa ad un valore di 30bar. In figura si identificano i punti caratteristici C, asse dell'albero di avvolgimento, R, centro di rotazione delle leve di supporto, O, asse del tamburo di contrasto e M, punto di giunzione tra lo stelo del cilindro e le leve.

Dalle tavole di progettazione meccanica vengono rilevate le distanze e gli angoli della geometria di partenza, che corrisponde alla condizione di inizio avvolgimento in cui il diametro della bobina coincide con quello dell'anima (Tab.3.8).

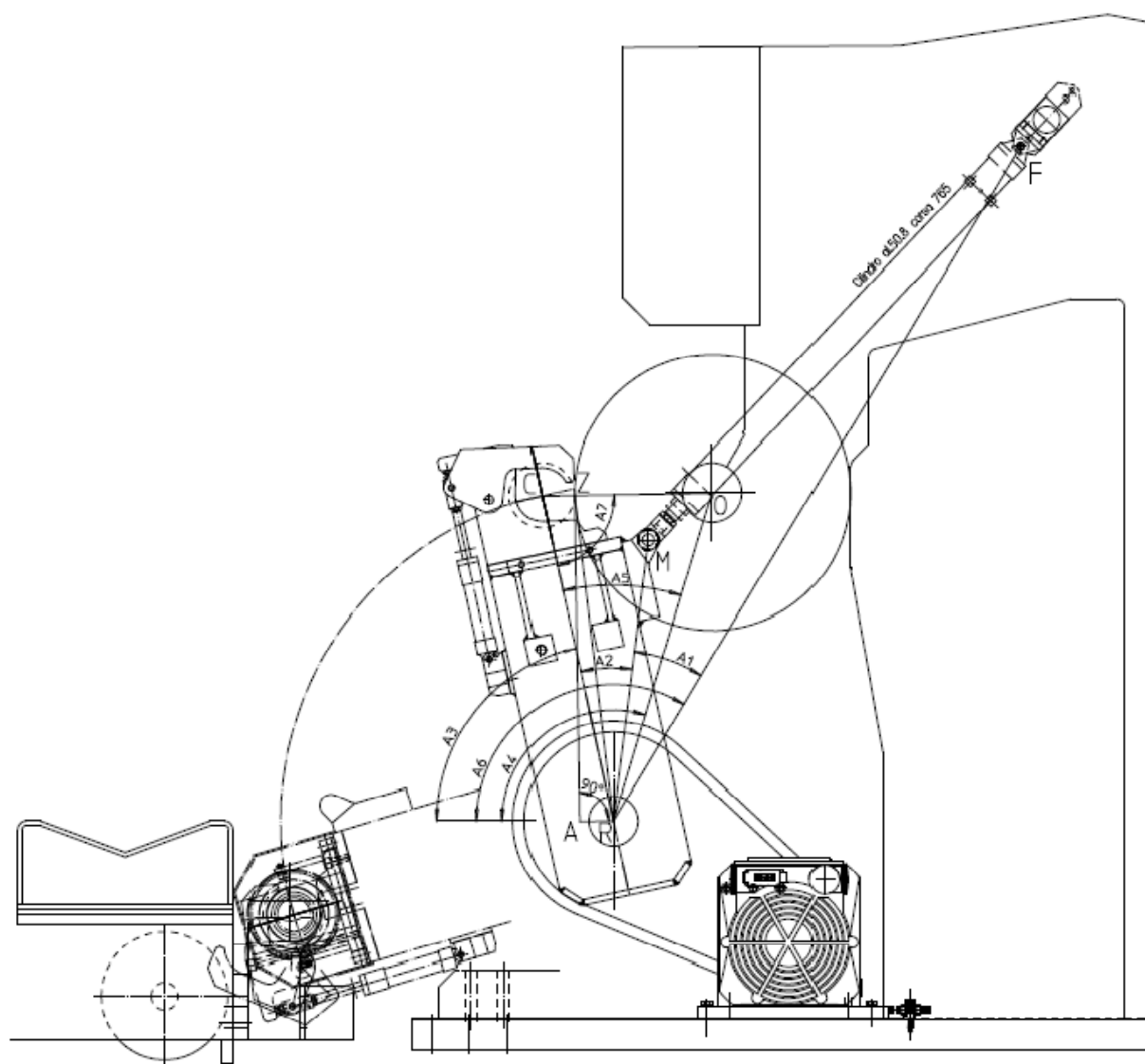


Figura 3.18 – Geometria delle leve di avvolgimento

Variabile	Valore	Descrizione
FM ₀	869 mm	Distanza F-M iniziale (stelo completamente dentro)
RM	438.3 mm	Distanza R-M
FR	1244 mm	Distanza R-F
RC	616 mm	Distanza R-C
RO	615.3 mm	Distanza R-O
Dt	350 mm	Diametro del rullo di appoggio
Da	120 mm	Diametro bobina a inizio avvolgimento
A2	23.46°	Angolo con vertice in R e lati verso M e C
A4	99.64°	Angolo con vertice in R e lato verso O e la direzione orizzontale
A6	130.76°	Angolo con vertice in R e lato verso F e la direzione orizzontale

Tabella 3.8 - Parametri geometrici rilevati dalle tavole di progettazione meccanica

Dai dati rilevati è possibile calcolare altri parametri relativi alla geometria di partenza che saranno utili per la valutazione dei carichi:

Distanza iniziale OC₀: $OC_0 = \frac{D_t}{2} + \frac{D_a}{2} = 235 \text{ mm}$

Angolo A5: $A5 = \arccos\left(\frac{RO^2 + RC^2 - OC_0^2}{2 \cdot RO \cdot RC}\right) = 22,01^\circ$

Angolo A3: $A3 = A4 - A5 = 77,63^\circ$

Angolo A1: $A1 = A6 - A2 - A3 = 29,67^\circ$

Con l'avanzare del processo di avvolgimento, il diametro della bobina aumenta e i supporti ruotano allontanandosi dal rullo di appoggio. In base alla corsa dei cilindri c , che viene misurata tramite un potenziometro lineare, è quindi possibile risalire al diametro della bobina.

Lunghezza FM: $FM = FM_0 + c$

Angolo di rotazione delle leve: $A = \arccos\left(\frac{FR^2 + RM^2 - FM^2}{2 \cdot FR \cdot RM}\right) - A1$

Lunghezza OC: $OC = \sqrt{RC^2 + RO^2 - 2 \cdot RC \cdot RO \cdot \cos(A5 + A)}$

Diametro bobina D_b [mm]: $D_b = 2 \cdot OC - D_t$

Noto il diametro è possibile quindi calcolare dinamicamente i contributi per il riferimento di pressione (Fig.3.19). Nell'equazione di equilibrio dei momenti intorno al punto R si deve tenere conto dei seguenti termini:

- Coppia generata dal peso della bobina: C_b

$$\text{Massa della bobina } M_b \text{ [kg]: } M_b = \frac{\rho \cdot \pi \cdot (D_b^2 - D_{an}^2) \cdot L_b}{4 \cdot 10^6}$$

con ρ = densità materiale [kg/dm³]

D_{an} = diametro esterno dell'anima [mm]

L_b = lunghezza bobina [mm]

$$\text{Contributo } C_b \text{ [N} \cdot \text{mm]: } C_b = M_b \cdot 9,81 \cdot RC \cdot \cos(A3 - A)$$

- Coppia generata dal peso dell'albero di avvolgimento: C_{alb}

La massa dell'albero di avvolgimento M_{alb} è nota.

$$\text{Contributo } C_{br} \text{ [N} \cdot \text{mm]: } C_{br} = M_{alb} \cdot 9,81 \cdot RC \cdot \cos(A3 - A)$$

- Coppia generata dal peso delle leve di supporto: C_{sup}

La massa delle leve di supporto M_{sup} è misurata sperimentalmente sull'asse dell'albero di avvolgimento.

$$\text{Contributo } C_{sup} \text{ [N} \cdot \text{mm]: } C_{sup} = M_{sup} \cdot 9,81 \cdot RC \cdot \cos(A3 - A)$$

- Coppia per generare la forza di contatto F_c [N/cm] tra bobina e rullo di contrasto: C_{FC}

$$\text{Semisomma lati triangolo ROC: } SS_{ROC} = \frac{OC + RO + RC}{2}$$

$$\text{Area triangolo ROC: } A_{ROC} = \sqrt{SS_{ROC} \cdot (SS_{ROC} - OC) \cdot (SS_{ROC} - RO) \cdot (SS_{ROC} - RC)}$$

$$\text{Braccio della forza di contatto: } B_{FC} = \frac{2 \cdot A_{ROC}}{OC}$$

$$\text{Contributo } C_{FC} \text{ [N} \cdot \text{mm]: } C_{FC} = \frac{B_{FC} \cdot F_c \cdot L_b}{10}$$

- Coppia generata dalla contropressione in culatta al cilindro P_c su un'area utile Z_c

$$\text{Semisomma lati triangolo FMR: } SS_{FMR} = \frac{FR + RM + FR}{2}$$

$$\text{Area triang. FMR: } A_{FMR} = \sqrt{SS_{FMR} \cdot (SS_{FMR} - FR) \cdot (SS_{FMR} - RM) \cdot (SS_{FMR} - FR)}$$

$$\text{Braccio della spinta del cilindro: } B_c = \frac{2 \cdot A_{FMR}}{FM}$$

- Coppia generata dalla pressione in testata al cilindro P_T su un'area utile Z_T

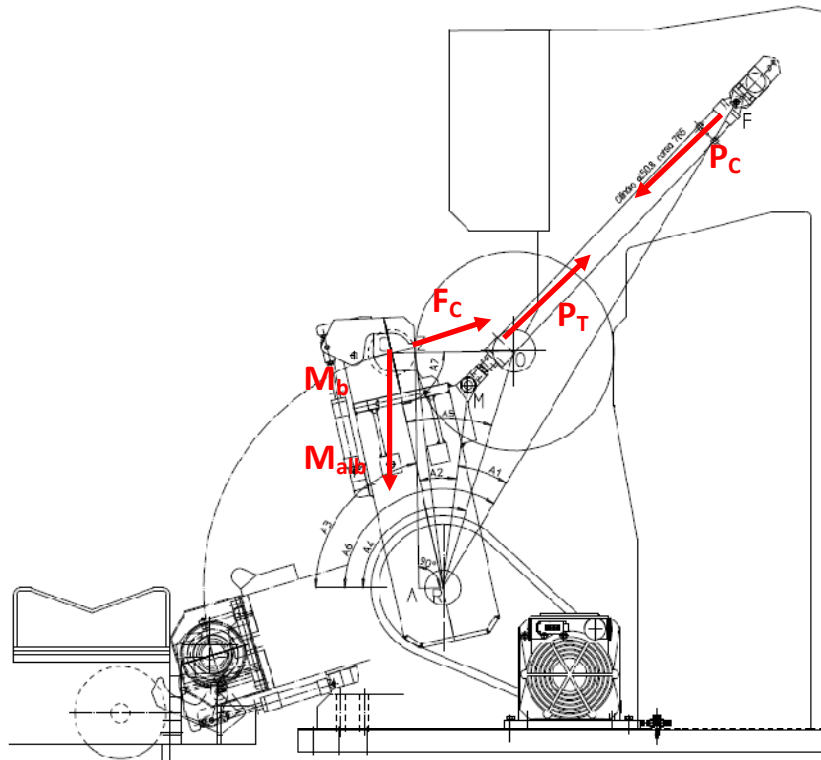


Figura 3.19 – Contributi per la generazione della forza di contatto

L'equazione di equilibrio, in cui si considerano le pressioni in [bar], le coppie in [$\text{N} \cdot \text{mm}$] e le aree in [cm^2], è la seguente:

$$\sum M_R = 0 : \quad C_b + C_{br} + C_{sup} + C_{FC} - P_T \cdot Z_T \cdot B_C \cdot 10 + P_C \cdot Z_C \cdot B_C \cdot 10 = 0$$

da cui è possibile ricavare la pressione da esercitare nelle camere in testata, che è la variabile controllata:

$$P_T = \frac{C_b}{Z_T \cdot B_C \cdot 10} + \frac{C_{br}}{Z_T \cdot B_C \cdot 10} + \frac{C_{sup}}{Z_T \cdot B_C \cdot 10} + \frac{C_{FC}}{Z_T \cdot B_C \cdot 10} + \frac{P_C \cdot Z_C}{Z_T}$$

Eseguendo una simulazione di funzionamento si considerano i seguenti parametri:

Sezione di spinta in testata dei cilindri: $Z_T = 40,54 \text{ cm}^2$

Sezione di spinta in culatta dei cilindri: $Z_C = 30,40 \text{ cm}^2$

Massa dell'albero di avvolgimento: $M_{alb} = 90 \text{ kg}$

Massa delle leve di supporto: $M_{sup} = 16 \text{ kg}$

Densità del materiale: $\rho = 0,85 \text{ kg/m}^3$

Larghezza della bobina: $L_B = 1600 \text{ mm}$

Forza di contatto: $F_C = 2 \text{ N/cm}$

Diametro esterno dell'anima: $D_{an} = 130\text{mm}$

Si può ricavare quindi il valore del diametro della bobina in funzione della variabile di ingresso al sistema, cioè la corsa dei cilindri oleodinamici (Fig.3.20).

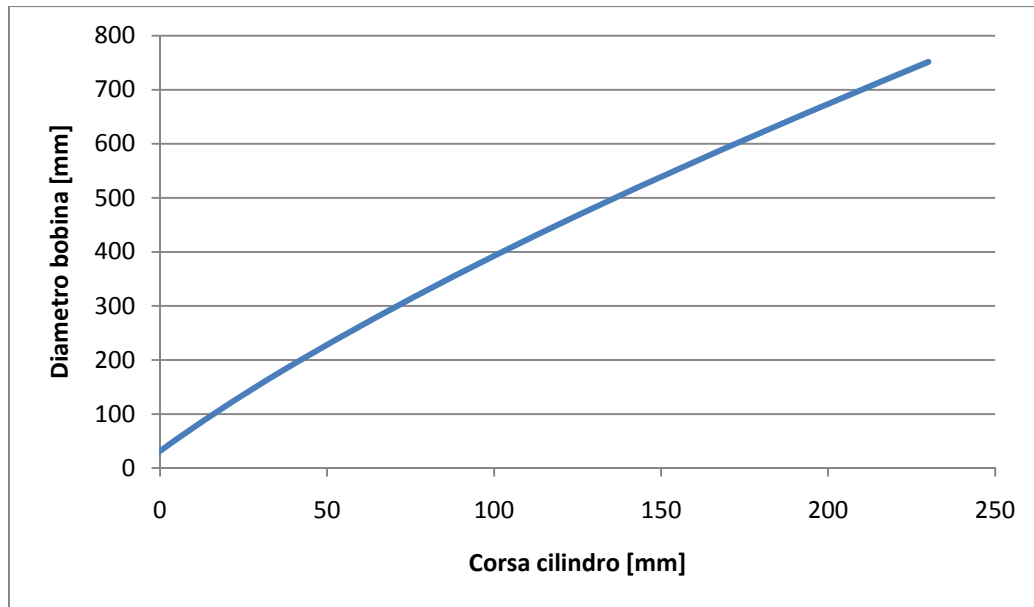


Figura 3.20 - Diametro della bobina in funzione della corsa dei cilindri

L'andamento della variabile di controllo, ossia la pressione della testata dei cilindri, in funzione della crescita del diametro della bobina è rappresentata in Fig.3.21.

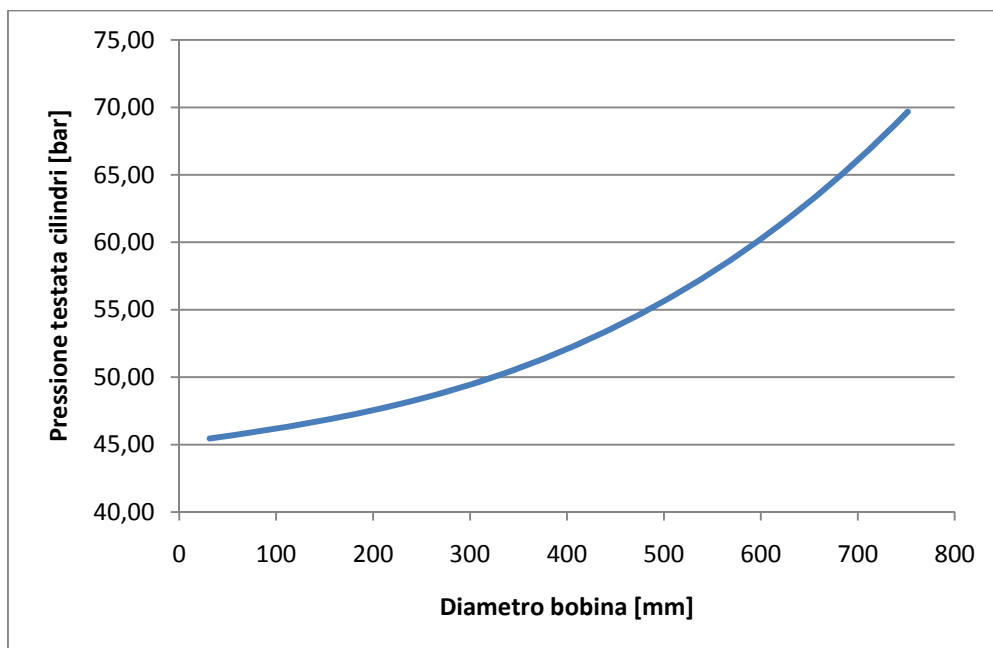


Figura 3.21 - Pressione in testata ai cilindri in funzione del diametro della bobina

3.5. Dimensionamento dei motori principali

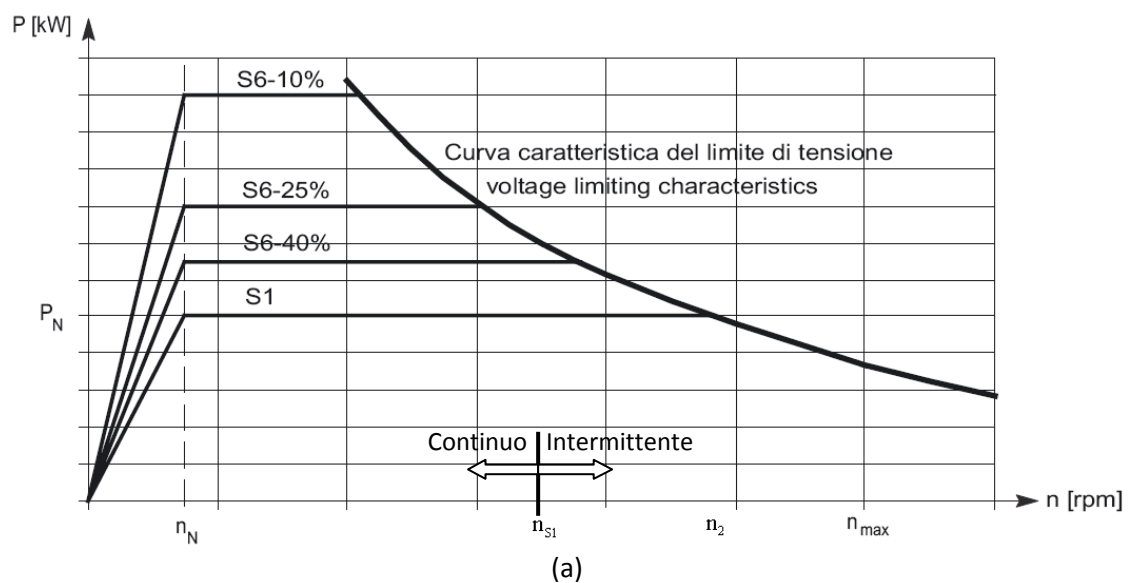
3.5.1. Problematiche relative al dimensionamento di motori per avvolgitori

Fino agli anni '80 sulle macchine per Converting sono stati utilizzati motori in corrente continua perché la regolazione della tensione sul materiale, che avveniva in anello aperto tramite il controllo di coppia, risultava problematico tramite motori AC per due motivi:

1. un motore AC non poteva garantire un accurato controllo di coppia lungo un ampio range di velocità perché la corrente di eccitazione e quella generante la coppia non erano controllate indipendentemente
2. un significativo ripple di coppia di un motore AC poteva influire sulla qualità del prodotto.

Con l'introduzione di tecniche di controllo vettoriale per il controllo di coppia e modulazioni di larghezza d'impulso (PWM) sono stati risolti entrambi i problemi e si è cominciato quindi a sostituire motori in continua con motori AC asincroni [12].

La scelta del motore asincrono applicato ad avvolgitori è vantaggiosa perché l'andamento della coppia richiesta segue perfettamente il campo di funzionamento del motore (Fig.3.22) sia per velocità inferiori a quella nominale sia nel campo di deflussaggio (§Cap.3.5.2).



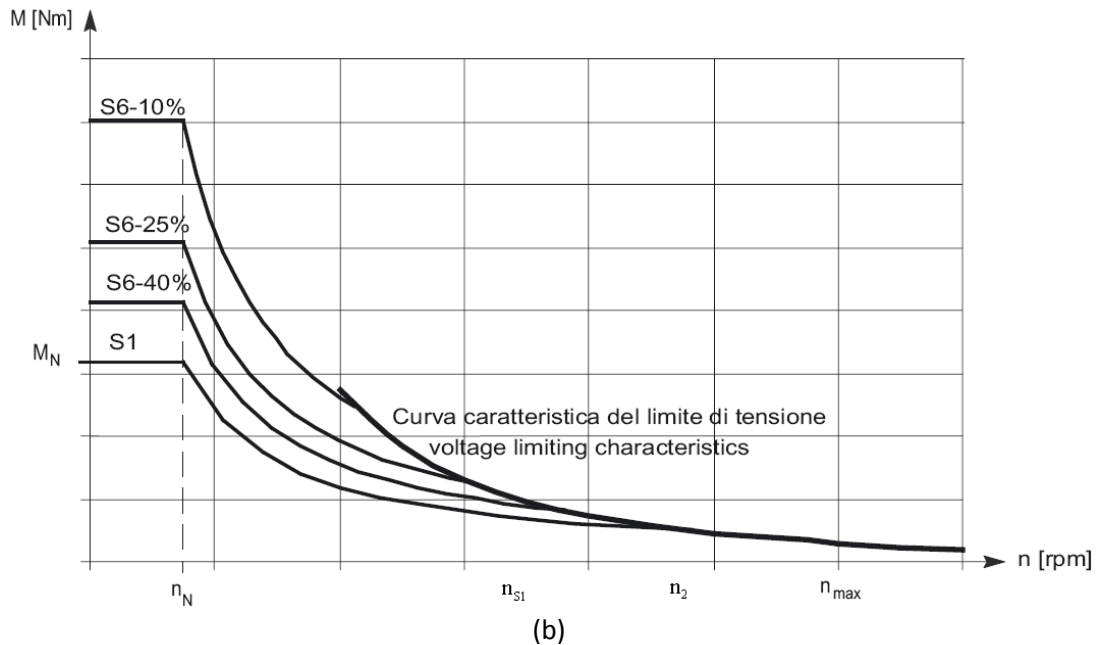


Figura 3.22 Campo di funzionamento del motore asincrono: velocità - potenza (a) e velocità – coppia (b)

Una delle problematiche che si affrontano in fase di dimensionamento riguarda la capacità di sovraccarico del motore oltre la coppia nominale, richiesta durante l'arresto rapido nel caso la bobina abbia una massa sufficientemente grande. Per il funzionamento a regime o per arresti in condizioni di lavoro normali si considera infatti che la coppia limite di progetto sia quella delimitata dalla curva S1, che definisce il limite di utilizzo continuativo del motore senza incorrere in anomalie di tipo termico. La valutazione delle situazioni d'emergenza viene svolta invece nel campo superiore a S1 in cui il limite è imposto dalle curve S6 che definiscono la quota di utilizzo del motore rispetto ai periodi di pausa, mediante percentuali che decrescono all'allontanarsi da S1, in un ciclo teorico di 10 minuti.

Ad alte velocità la curva limite più restrittiva è rappresentata dai valori di coppia massimi imposti dalla tensione di alimentazione. I campi di funzionamento dei motori asincroni si riferiscono ad una tensione in ingresso al motore di 425V, che è variabile con la tensione di rete e il tipo di convertitore utilizzato (Tab.3.9).

Tipo convertitore	Tensione rete (3AC)	Tensione bus (DC)	Tensione motore (3AC)
Active line module	400V	600V	425V
Smart line module	400V	528V	380V
Smart line module	480V	634V	460V

Tabella 3.9 - Tensioni di alimentazione al motore con differenti tensioni di rete e convertitori Siemens Sinamics S120

Per conoscere i limiti del motore con una tensione di uscita diversa da 425V, è necessario spostare la curva caratteristica del limite di tensione per adeguarla alla nuova tensione di uscita V_{NEW} :

- Calcolo nuova potenza P_2 : $P_{2NEW} = P_2 \cdot \left(\frac{V_{NEW}}{425V}\right)^2$
- Calcolo nuova velocità n_2 : $n_{2NEW} = n_2 \cdot \left(\frac{V_{NEW}}{425V}\right)^2$

Per esempio, rilevando sul campo di funzionamento di un motore una potenza limite di 14kW a 6000rpm, si può calcolare che, alla stessa velocità, con una tensione di 380V, la potenza massima è:

$$P_{NEW} = 14kW \cdot \left(\frac{380V}{425V}\right)^2 = 11,3kW$$

Nelle applicazioni per avvolgitori è necessario tenere conto del limite di tensione nel calcolo del carico a velocità massima che viene raggiunta nelle condizioni di diametro minimo. Poiché è consigliato scegliere il motore in modo da mantenersi ad una distanza del 30% da tale curva [13], si usa fissare un diametro minimo di dimensionamento maggiore rispetto a quello minimo stabilito dalle specifiche di commessa, in modo che la velocità massima raggiunta dal motore risulti inferiore. Bisogna quindi tenere conto di questo vincolo di progettazione nella programmazione dell'azionamento imponendo il corretto limite sulla velocità massima.

3.5.2. Studio analitico

Si considera come analisi di partenza un generico equilibrio di potenza di un sistema a carico inerziale e coppia resistente fissa, in cui sono indicati a primo membro i termini riferiti al motore m e a secondo quelli riferiti al carico c :

$$\boxed{\eta \cdot (C_m \cdot \omega_m - (J_m + J_{T1}) \cdot \dot{\omega}_m \cdot \omega_m) = C_r \cdot \omega_c + (J_c + J_{T2}) \cdot \dot{\omega}_c \cdot \omega_c} \quad (1)$$

Generalmente si trascurano i termini inerziali di motore J_m e trasmissione J_{T1} e J_{T2} poiché non ancora noti durante il primo dimensionamento e soprattutto perché poco significativi rispetto all'inerzia del carico J_c . Si aggiunge comunque, per semplicità, una quota aggiuntiva di inerzia considerando la bobina come un cilindro pieno, anziché cavo, in modo che il termine J_c risulti maggiorato, compensando tutti i termini non considerati.

$$J_m = J_{T1} = J_{T2} = 0$$

Nell'equazione (1) è stato inserito un generico rendimento della trasmissione η , ma è necessario distinguere i casi di moto diretto η_d o retrogrado η_r , che dipendono dal segno del secondo membro W_2 :

- se $W_2 = (C_r \cdot \omega_c + J_c \cdot \dot{\omega}_c \cdot \omega_c) > 0$: $\eta = \eta_d$
è il caso di avvolgitore e traino, in cui il motore deve generare tensione sul materiale con coppia positiva. Risulta quindi:

$$\boxed{\eta_d \cdot C_m \cdot \omega_m = C_r \cdot \omega_c + J_c \cdot \dot{\omega}_c \cdot \omega_c} \quad (2)$$

- se $W_2 = (C_r \cdot \omega_c + J_c \cdot \dot{\omega}_c \cdot \omega_c) < 0$: $\eta = \frac{1}{\eta_r}$
vale per lo svolgitore, in cui il motore crea tensione sul materiale con coppia negativa:

$$\boxed{\frac{1}{\eta_r} \cdot C_m \cdot \omega_m = C_r \cdot \omega_c + J_c \cdot \dot{\omega}_c \cdot \omega_c} \quad (3)$$

I valori di tali rendimenti sono valutati in modo cautelativo indipendentemente dal tipo di trasmissione utilizzata:

$$\eta_d = 0,9$$

$$\eta_r = 0,9$$

Dalle equazioni precedenti, ipotizzando un rapporto di trasmissione τ , si ricava infine l'espressione della coppia motrice:

$$C_m = \frac{\tau}{\eta} \cdot (C_r + J_c \cdot \dot{\omega}_c) \quad (4)$$

Nel caso di dimensionamento di svolgitore o avvolgitore le coppie riferite al carico sono (Fig.3.23):

- Coppia resistente C_r : dovuta alla tensione del materiale periferica alla bobina

$$C_r = T \cdot \frac{D}{2} \quad [\text{Nm}]$$

con: T = tensione materiale [N]

D = diametro della bobina [m]

- Coppia inerziale: dovuta all'inerzia della bobina

$$C_i = J_c \cdot \dot{\omega}_c \quad [\text{Nm}]$$

$$\text{dove: } J_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot L_B \cdot \frac{D^4}{4} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\dot{\omega}_c = \frac{v}{60 \cdot t} \cdot \frac{2}{D} \quad [\text{rad/s}^2]$$

con: ρ = densità materiale [kg/m^3]

L_B = larghezza bobina [m]

D = diametro bobina [m]

v = velocità periferica [m/min]

t = tempo accelerazione [sec]

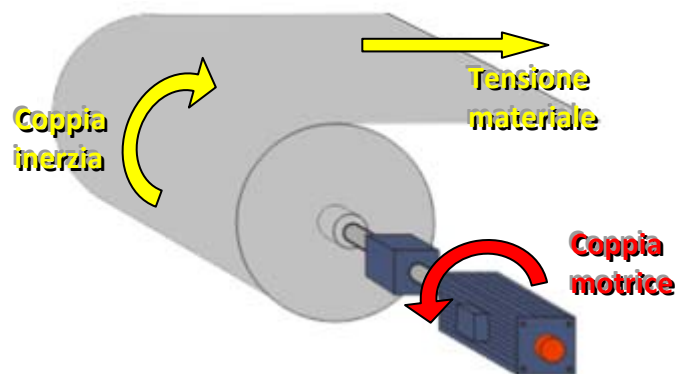


Figura 3.23 - Rappresentazione delle forze/coppie per il dimensionamento di svolgitore e avvolgitore

La valutazione dei carichi è eseguita sulla base delle specifiche tecniche della commessa che stabiliscono i limiti di processo e i parametri utili per la definizione della legge di moto. Nella

descrizione della macchina vengono infatti stabiliti la velocità massima e i tempi per le rampe di accelerazione, arresto normale, rapido e d'emergenza. Per ogni asse vengono inoltre definiti i valori minimi e massimi di diametro e tensione del materiale.

Sono quindi considerate le varie situazioni di funzionamento per trovare i punti significativi che servono a rappresentare le curve di coppia e potenza richieste (Fig.3.24):

- Regime stazionario con tensione massima e bobina di diametro massimo:

$$P_{mSTAZ} = \frac{1}{\eta} \cdot T_{MAX} \cdot \frac{v_{MAX}}{60} \cdot \frac{1}{1000} \quad [\text{kW}] \quad (5)$$

$$C_{mSTAZ} = \frac{\tau}{\eta} \cdot T_{MAX} \cdot \frac{D_{MAX}}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (6)$$

- Velocità di rotazione con bobina di diametro massimo: corrisponde alla velocità massima alla quale viene richiesta la coppia massima C_{mSTAZ}

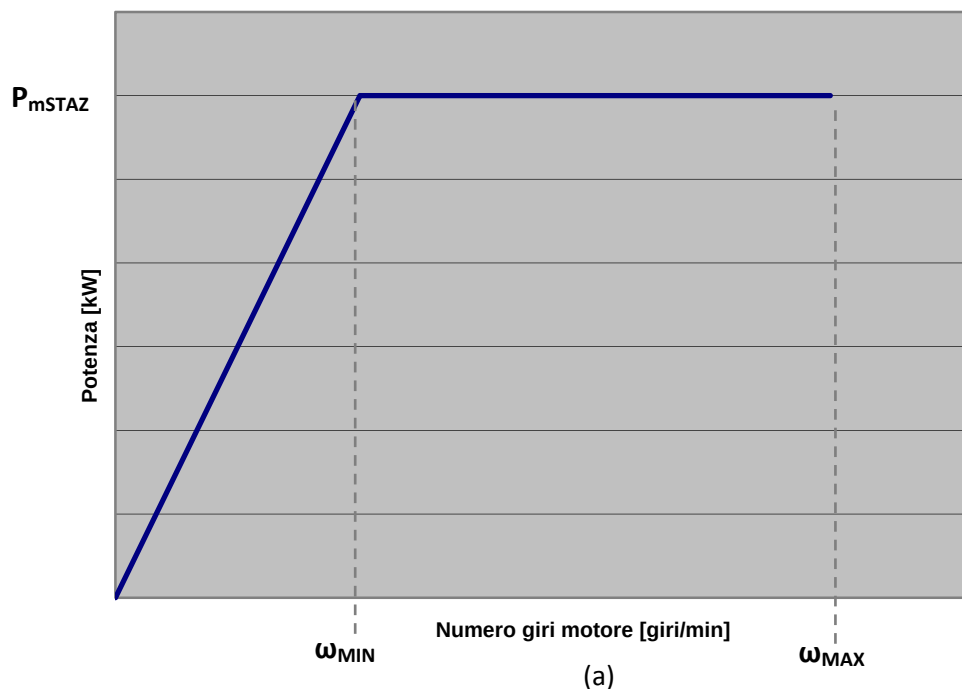
$$\omega_{MIN} = \frac{v_{MAX}}{\tau \cdot \pi \cdot D_{MAX}} \quad [\text{rpm}] \quad (7)$$

- Coppia richiesta a velocità massima con diametro minimo e tensione massima:

$$C_{mVMAX} = \frac{\tau}{\eta} \cdot T_{MAX} \cdot \frac{D_{MIN}}{2} \quad [\text{Nm}] \quad (8)$$

- Velocità massima richiesta: corrisponde alla condizione di diametro minimo, il quale solitamente non è il diametro più piccolo raggiungibile in lavoro poiché viene scelto un diametro superiore per limitare la velocità massima (§Cap.3.5.1)

$$\omega_{MAX} = \frac{v_{MAX}}{\tau \cdot \pi \cdot D_{MIN}} \quad [\text{rpm}] \quad (9)$$



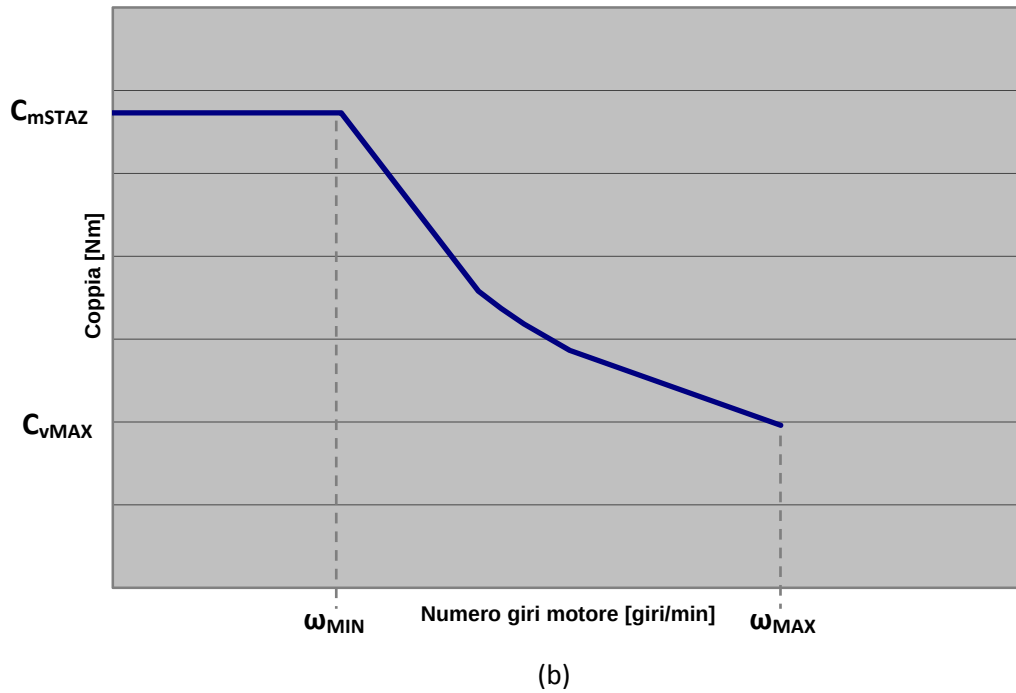


Figura 3.24 - Curve di potenza (a) e coppia (b) richieste

Le curve così trovate sono quindi da confrontare con le curve caratteristiche dei motori disponibili a catalogo. Per individuare il motore adatto è necessario verificare le seguenti condizioni:

- Potenza nominale del motore P_N : $P_N > P_{mSTAZ}$
- Coppia nominale del motore C_N : $C_N > C_{mSTAZ}$
- Velocità nominale del motore n_N : $n_N \approx \omega_{MIN}$
- Velocità massima del motore n_2 : $n_2 > \omega_{MAX}$
- Coppia del motore alla velocità ω_{MAX} : $C_{\omega_{MAX}} > C_{vMAX}$

Inoltre sono da analizzare le condizioni di sovraccarico del motore nelle seguenti situazioni:

- Arresto rapido con tensione massima e bobina di diametro massimo:

$$C_{mQSTOP} = \frac{\tau}{\eta} \cdot \left(T_{MAX} \cdot \frac{D_{MAX}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot L_B \cdot \frac{D_{MAX}^4}{4} \cdot \frac{v_{MAX}}{60 \cdot t_{QSTOP}} \cdot \frac{2}{D_{MAX}} \right) \quad [\text{Nm}] \quad (9)$$

- Arresto d'emergenza con tensione minima e bobina di diametro massimo:

$$C_{mESTOP} = \frac{\tau}{\eta} \cdot \left(T_{MIN} \cdot \frac{D_{MAX}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot L_B \cdot \frac{D_{MAX}^4}{4} \cdot \frac{v_{MAX}}{60 \cdot t_{ESTOP}} \cdot \frac{2}{D_{MAX}} \right) \quad [\text{Nm}] \quad (10)$$

Entrambi i valori devono essere inferiori alle curve caratteristiche S6. Per agevolare l'arresto in caso di emergenza si prevede generalmente anche un freno ausiliario che viene azionato quando il diametro della bobina da arrestare è significativo e la coppia richiesta è alta.

Il dimensionamento del motore è fortemente influenzato dalla scelta della trasmissione, costituita tipicamente da cinghie dentate. Essendoci un carico a inerzia variabile il rapporto di trasmissione non viene individuato nell'ottica di effettuare un'ottimizzazione, per esempio della coppia RMS, ma di trovare un compromesso tra la minimizzazione di coppie e velocità massime.

3.5.3. Esempio applicativo

Per svolgere un esempio di dimensionamento di motore si considera una ribobinatrice per la lavorazione di alluminio dalle seguenti specifiche:

- Velocità massima: 600 m/min
- Larghezza utile massima: 1450 mm
- Densità del materiale: 2700 kg/m³
- Tempo di accelerazione per raggiungere la velocità massima: 60 sec
- Tempo di arresto normale dalla velocità massima: 60 sec
- Tempo di arresto rapido dalla velocità massima: 15 sec
- Tempo di arresto d'emergenza dalla velocità massima: 6 sec

L'asse da analizzare è uno svolgitore per il quale sono richieste le seguenti performance:

- Diametro massimo di svolgimento: 1400 mm
- Diametro minimo di svolgimento: 160 mm
- Tensione massima del materiale: 5000 N
- Tensione minima del materiale: 400 N

La trasmissione avviene tramite cinghie dentate:

- Numero denti puleggia condotta: 90
- Numero denti puleggia condotta: 34
- Rapporto di trasmissione τ : 0,3778
- Rendimento di trasmissione η_r : 0,95 (maggiorata in modo cautelativo)

Si possono quindi calcolare i dati necessari per descrivere la curva caratteristica relativa al carico:

- Regime stazionario con tensione massima e bobina di diametro massimo:

$$P_{mSTAZ} = \eta_r \cdot T_{MAX} \cdot \frac{v_{MAX}}{60} \cdot \frac{1}{1000} = \frac{0,95 \cdot 5000N \cdot 600m/min}{60000} = 47,5kW$$

$$C_{mSTAZ} = \tau \cdot \eta_r \cdot T_{MAX} \cdot \frac{D_{MAX}}{2} = 0,3778 \cdot 0,95 \cdot 5000N \cdot \frac{1,4m}{2} = 1346Nm$$

- Velocità di rotazione con bobina di diametro massimo:

$$\omega_{MIN} = \frac{v_{MAX}}{\tau \cdot \pi \cdot D_{MAX}} = \frac{600m/min}{0,3778 \cdot \pi \cdot 1,4m} = 337rpm$$

- Coppia richiesta a velocità massima con diametro minimo e tensione massima:

$$C_{mVMAX} = \frac{\tau}{\eta} \cdot T_{MAX} \cdot \frac{D_{MIN}}{2} = 0,3778 \cdot 0,95 \cdot 5000N \cdot \frac{0,16m}{2} = 144Nm$$

- Velocità massima richiesta:

$$\omega_{MAX} = \frac{v_{MAX}}{\tau \cdot \pi \cdot D_{MIN}} = \frac{600m/min}{0,3778 \cdot \pi \cdot 0,16m} = 3160rpm$$

Considerata la difficoltà nel trovare un motore con velocità nominale circa uguale a ω_{MIN} che garantisca la coppia C_{mVMAX} alla velocità ω_{MAX} , si decide di diminuire la velocità massima del motore aumentando il diametro minimo di progetto a 500mm. Si ottengono quindi i nuovi valori:

- Coppia richiesta a velocità massima con diametro minimo e tensione massima:

$$C_{mVMAX} = \frac{\tau}{\eta} \cdot T_{MAX} \cdot \frac{D_{MIN}}{2} = 0,3778 \cdot 0,95 \cdot 5000N \cdot \frac{0,5m}{2} = 449Nm$$

- Velocità massima richiesta:

$$\omega_{MAX} = \frac{v_{MAX}}{\tau \cdot \pi \cdot D_{MIN}} = \frac{600m/min}{0,3778 \cdot \pi \cdot 0,5m} = 1011rpm$$

Nel funzionamento con diametri inferiori a 500mm si manterrà una velocità massima di rotazione ω_{MAX} , limitando la velocità periferica dell'asse e quindi della macchina. Per esempio ad un diametro di 300mm la velocità periferica massima raggiungibile dalla linea è:

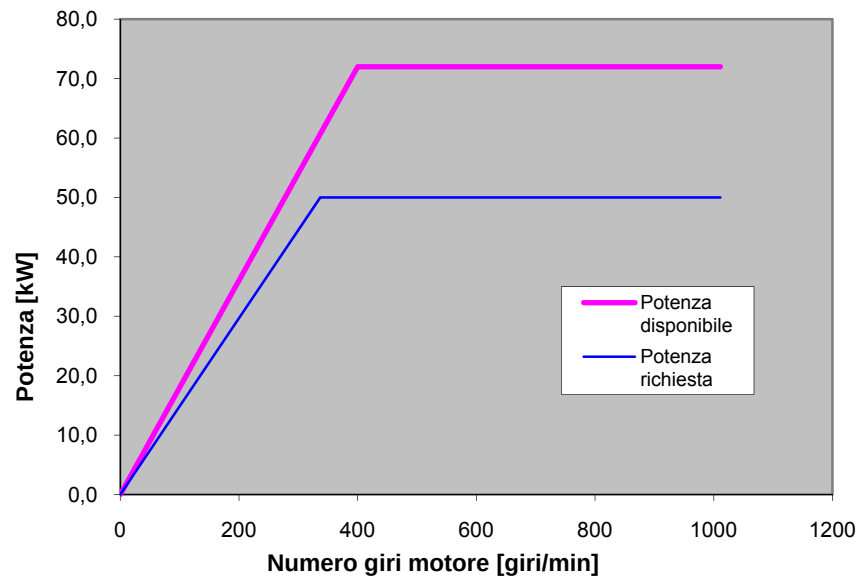
$$v_{MAX} = \pi \cdot D \cdot \omega_{MAX} \cdot \tau = \pi \cdot 0,3m \cdot 1011rpm \cdot 0,3778 = 360m/min$$

Da catalogo dei motori asincroni Siemens viene scelto quindi il motore 1PL6 228-4DB30-0ED3 che verifica le condizioni di progetto:

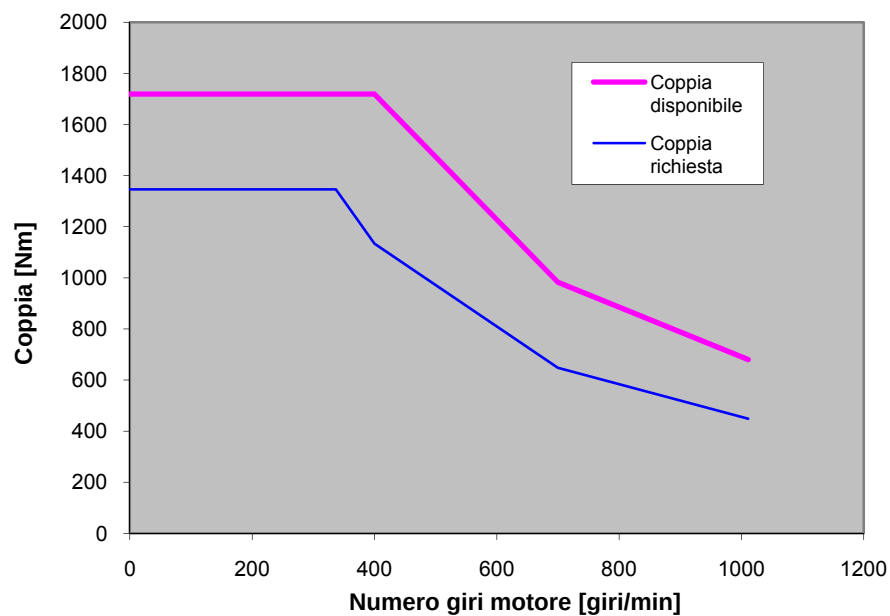
- Potenza nominale del motore P_N : $P_N = 72kW > 47,5kW = P_{mSTAZ}$
- Coppia nominale del motore C_N : $C_N = 1719Nm > 1346Nm = C_{mSTAZ}$

- Velocità nominale del motore $n_N:n_N = 400\text{rpm} \approx 337\text{rpm} = \omega_{\text{MIN}}$
- Velocità massima del motore $n_2: n_2 = 2000\text{rpm} > 1011\text{rpm} = \omega_{\text{MAX}}$
- Coppia del motore alla velocità ω_{MAX} : $C_{\omega\text{MAX}} = 680\text{Nm} > 449\text{Nm} = C_{v\text{MAX}}$

Il confronto tra le curve caratteristiche è quindi verificato (Fig.3.25).



(a)



(b)

Figura 3.25 - Confronto tra curva caratteristica del motore con la potenza (a) e la coppia (b) richieste

Infine devono essere verificate le condizioni di sovraccarico:

- Arresto rapido con tensione massima e bobina di diametro massimo:

$$C_{mQSTOP} = \frac{\tau}{\eta} \cdot \left(T_{MAX} \cdot \frac{D_{MAX}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot L_B \cdot \frac{D_{MAX}^4}{4} \cdot \frac{v_{MAX}}{60 \cdot t_{QSTOP}} \cdot \frac{2}{D_{MAX}} \right) =$$

$$= 0,3778 \cdot 0,95 \cdot \left(5000N \cdot \frac{1,4m}{2} + \frac{1}{2} \cdot 2700kg/m^3 \cdot \pi \cdot 1,45m \cdot \frac{1,4m^4}{4} \cdot \frac{600m/min}{60 \cdot 15sec} \cdot \frac{2}{1,4m} \right)$$

$$C_{mQSTOP} = 1851Nm$$

- Arresto d'emergenza con tensione minima e bobina di diametro massimo:

$$C_{mESTOP} = \frac{\tau}{\eta} \cdot \left(T_{MIN} \cdot \frac{D_{MAX}}{2} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot L_B \cdot \frac{D_{MAX}^4}{4} \cdot \frac{v_{MAX}}{60 \cdot t_{ESTOP}} \cdot \frac{2}{D_{MAX}} \right) =$$

$$= 0,3778 \cdot 0,95 \cdot \left(400N \cdot \frac{1,4m}{2} + \frac{1}{2} \cdot 2700kg/m^3 \cdot \pi \cdot 1,45m \cdot \frac{1,4m^4}{4} \cdot \frac{600m/min}{60 \cdot 6sec} \cdot \frac{2}{1,4m} \right)$$

$$C_{mESTOP} = 1362Nm$$

La coppia calcolata necessaria per effettuare l'arresto rapido è superiore alla coppia nominale del motore, ma è comunque garantita una coppia massima di 2363Nm per un sovraccarico temporaneo.

Il motore soddisfa quindi tutti i requisiti per l'applicazione considerata.

4. FUNZIONI WINDER

4.1. Introduzione

Le funzioni per il controllo di un motore elettrico applicato ad un asse svolgitore/avvolgitore, note come funzioni “winder”, comprendono i sistemi di analisi di processo e di calcolo dei parametri necessari per elaborare i riferimenti di velocità e/o coppia trasmessi al relativo azionamento. La complessità di tali funzioni dipende dal tipo di applicazione; ciò è facilmente intuibile se si pensa per esempio alla differenza tra l’implementazione di un controllo di tensione con celle di carico rispetto al controllo in anello aperto, per il quale non avviene l’analisi del valore attuale della tensione e quindi non è inserita alcuna regolazione dinamica della variabile.

Per descrivere le funzionalità elaborate viene proposto in Fig.4.1 uno schema completo del sistema [9]. Al suo interno si caratterizzano tre zone:

- L’area superiore schematizza la macchina, per cui si individuano, da sinistra a destra: il traino, che determina la velocità lineare di produzione, il sistema per il controllo della tensione con il relativo sensore, per esempio il ballerino, e l’avvolgitore, sul quale può essere montato un dispositivo per la rilevazione del diametro.
- Il riquadro viola di destra rappresenta l’azionamento elettrico dell’avvolgitore (o dello svolgitore), che include le regolazioni di corrente e velocità e l’elaborazione del riferimento e dei limiti di coppia. Si interfaccia con il motore, oltre che per la trasmissione di potenza, anche per la rilevazione di dati necessari per le regolazioni e la diagnostica di funzionamento.
- La zona dal contorno verde contiene uno schema a blocchi delle funzioni winder che ricevono in ingresso i dati di processo della macchina e necessitano di un’interfaccia di comunicazione bidirezionale con l’azionamento per la trasmissione dei parametri di riferimento e la ricezione dei valori reali di funzionamento.

All’interno si possono distinguere blocchi che, interconnessi tra di loro, svolgono funzioni specifiche. Seguendo la numerazione presentata in Fig.4.1, si individuano:

- 1) la determinazione del diametro della bobina: esistono diversi metodi per l’elaborazione del diametro e, in base all’applicazione, viene adottata la tecnica più adatta. Tutti i dati inviati all’azionamento sono dipendenti dal

diametro ed è quindi fondamentale che tale calcolo sia effettuato nel modo più rapido e corretto possibile.

- 2) l'elaborazione del riferimento di tensione sul materiale: generalmente si prevede una curva, nota come "taper", che descriva la diminuzione di tensione di lavoro all'aumentare del diametro in modo da variare la compattezza della bobina gradualmente (blocco 2a). Inoltre è implementata una funzione che gestisce tale riferimento in modo che venga applicato un valore sostitutivo in determinate condizioni di funzionamento della macchina e che il cambio di valore sia effettuato con una variazione non discontinua (2b).
- 3) il regolatore PID per il controllo di tensione sul materiale: elabora la correzione di velocità (o coppia) da trasmettere all'azionamento per fare in modo che la tensione rilevata corrisponda al valore desiderato (3a). Tale funzione ovviamente non è elaborata nei sistemi di controllo della tensione in anello aperto. Il riferimento al regolatore può provenire dal blocco 2b descritto in precedenza se sono presenti celle di carico oppure dal blocco 3b, che gestisce il riferimento di posizione, se il controllo di tensione viene effettuato con ballerino.

Il PID è inoltre configurato con il fattore proporzionale P variabile con il diametro della bobina secondo una funzione di diminuzione lineare (3c).

- 4) determinazione dei carichi agenti sul sistema: vengono analizzati tutti i carichi resistenti e inerziali per calcolare la coppia di riferimento al motore (4a). Tale valore viene quindi trasmesso all'azionamento a valle del regolatore di velocità in modo da compensare in anticipo i termini relativi al carico e minimizzare la correzione in uscita dal regolatore (4b).

Nel caso il controllo della tensione sia in anello aperto o in anello chiuso con correzione di coppia, la stima dei carichi viene utilizzata per impostare il limite di coppia dell'azionamento. In tali casi infatti è proprio il limite di coppia del motore che determina la tensione sul materiale e deve essere calcolata in modo da compensare anche gli ulteriori contributi legati alle coppie inerziali e di attrito (4c).

- 5) il calcolo della velocità di riferimento all'azionamento: viene effettuata sulla base delle funzioni descritte in precedenza poiché tiene conto del riferimento di velocità della macchina, del diametro attuale e della correzione in uscita dal

PID per il controllo della tensione. Il segno della velocità dipende dal senso di avvolgimento che può variare a seconda del percorso del materiale all'interno della macchina.

- 6) l'adattamento del guadagno proporzionale P del regolatore PI della velocità interno all'azionamento: viene scalato linearmente in funzione dell'inerzia della bobina poiché la capacità di reazione del sistema ad errori sulla velocità deve rimanere ottimale indipendentemente dalle variazioni d'inerzia.

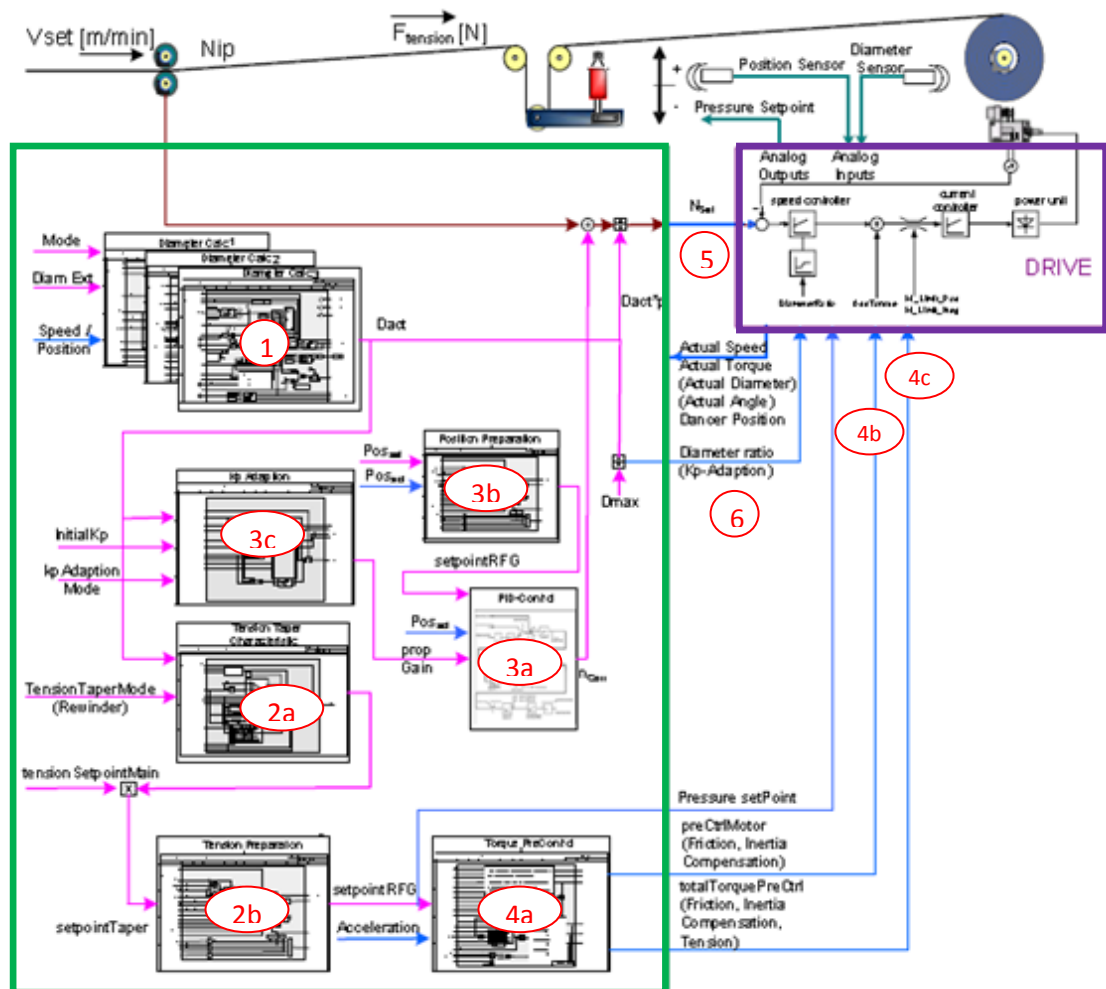


Figura 4.1 - Schema a blocchi delle funzioni winder

4.2. Tecniche di calcolo del diametro

L'accurata determinazione del diametro della bobina di un avvolgitore (o svolgitore) è uno dei principali obiettivi in un sistema per il controllo della tensione. Tutti i parametri di interesse sono infatti dipendenti dal diametro: il riferimento di velocità, la compensazione della coppia inerziale, le funzioni di adattamento dei guadagni dei regolatori, il riferimento di tensione. Nell'ottica di miglioramento delle prestazioni delle macchine per Converting è quindi necessario assicurarsi che l'elaborazione di tale parametro sia effettuata nel modo più preciso e rapido possibile in modo da garantire un valido aggiornamento dei parametri direttamente influenzati.

Esistono diverse tecniche comunemente usate per la determinazione del diametro di una bobina: alcune sono più adatte alla rilevazione del diametro a macchina ferma, altre dipendono da parametri di movimento e sono utilizzati durante la marcia dell'asse. Tali metodi sono implementati nel sistema di controllo per sottrarre l'utilizzatore della macchina all'inserimento manuale del valore, in modo da automatizzare e velocizzare il processo di lavoro ed evitare che siano introdotti errori significativi.

1. Rilevamento tramite rullo di contrasto

In un sistema in cui la bobina è avvolta a contatto con un rullo di contrasto è necessario che il rullo o la bobina stessa siano montati su una leva mobile che permette l'allontanamento dei due componenti al crescere del diametro (Fig.4.2). In entrambi i casi può essere rilevata la posizione della leva mobile, tramite un potenziometro lineare o angolare a seconda delle applicazioni, per determinare, con uno studio della geometria meccanica, il diametro della bobina (§Cap.3.4).

Vantaggi:

- La determinazione è semplice e ripetitiva.
- Richiesta una scarsa manutenzione di tipo meccanico.
- Il metodo non richiede l'asse in movimento, quindi può essere utilizzato sia in condizioni di marcia sia a macchina ferma.

Svantaggi:

- La bobina deve essere a contatto con un rullo di contrasto, la cui presenza dipende dalla progettazione meccanica della macchina. Talvolta, se il materiale avvolto non è adatto a subire la pressione superficiale, il rullo di contrasto, anche se previsto, non viene mantenuto in appoggio; in tali casi la tecnica di rilevamento del diametro non può essere applicata.
- La presenza di un rullo di contrasto può limitare il diametro massimo di avvolgimento della bobina.
- È necessario un sistema di attuazione, tipicamente pneumatico, per garantire il contatto tra la bobina e il rullo.
- Difetti sulla bobina, come per esempio l'ovalizzazione, possono compromettere la determinazione del diametro.
- L'acquisizione del segnale deve essere filtrata, causando un lento aggiornamento del valore; per questo motivo si ritiene più adatto utilizzare questa tecnica a macchina ferma.

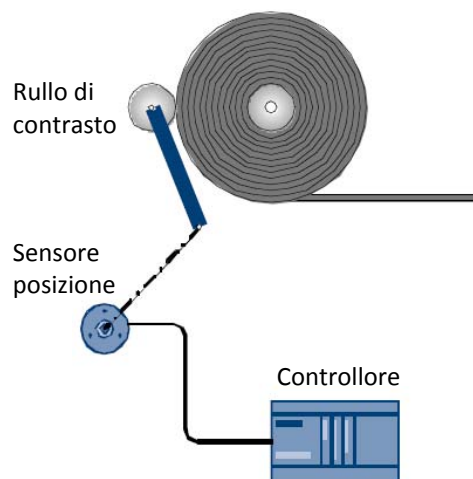


Figura 4.2 - Determinazione del diametro tramite rilevazione della posizione del rullo di contrasto

2. Rilevamento tramite sensore

Tramite un sensore che permette di rilevare la distanza dalla superficie della bobina è possibile acquisire un segnale direttamente proporzionale al diametro (Fig.4.3). Tipicamente il sensore è del tipo a ultrasuoni, ma possono essere adottati anche dispositivi di rilevazione spaziale ottici oppure a laser.

Nonostante questa tecnica di determinazione del diametro sia estremamente valida perché non richiede né organi a contatto con la bobina né il movimento dell'asse, ha il grande svantaggio che il segnale proveniente dal sensore necessita un filtro di acquisizione che rallenta notevolmente l'aggiornamento del valore del diametro. Tale considerazione, valida anche per la tecnica di rilevazione della posizione del rullo di contrasto, comporta che, in sistemi ad alte prestazioni, tale metodo non venga utilizzato per una determinazione dinamica del diametro ma possa essere utilizzato solo per impostare il valore alla partenza dell'avvolgimento.

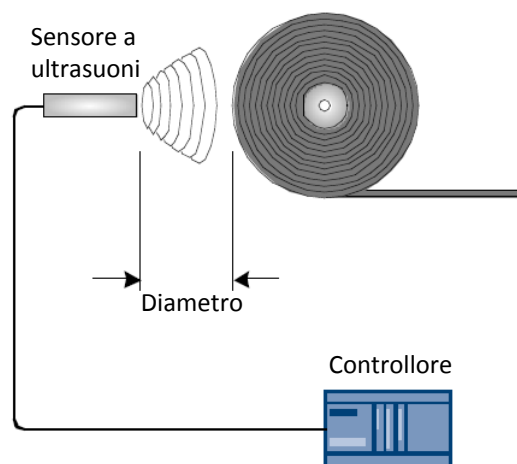


Figura 4.3 - Rilevamento del diametro tramite ultrasuoni

Vantaggi:

- Bassa manutenzione.
- Fornisce un segnale direttamente proporzionale al diametro.
- Non richiede organi a contatto con il materiale in lavoro.
- Il metodo non richiede l'asse in movimento, quindi può essere utilizzato sia in condizioni di marcia sia a macchina ferma.

Svantaggi:

- Richiede un accurato montaggio e calibrazione.
- Sensibile a sporco e polvere.
- L'acquisizione del segnale deve essere filtrata, causando un lento aggiornamento del valore; per questo motivo si ritiene più adatto utilizzare questa tecnica a macchina ferma.

3. Determinazione tramite lo spessore del materiale

La tecnica nasce dalla considerazione che il diametro della bobina di un avvolgitore può essere facilmente determinato durante il processo di lavoro aggiungendo, ad un diametro di partenza, una misura pari al doppio dello spessore del materiale per ogni giro compiuto.

Noti quindi la velocità del motore n , tramite per esempio il segnale di un encoder, e lo spessore h , il diametro D risulta dalla seguente integrazione:

$$D = \int 2 \cdot h \cdot n \cdot dt$$

In un sistema di elaborazione a tempo discreto, effettuando un campionamento della velocità in un intervallo fisso dt , noto il diametro al passo $x-1$, è possibile calcolare il nuovo valore al passo x svolgendo l'integrazione della funzione in un tempo $dint$ mediante il seguente algoritmo:

$$d_x = d_{x-1} + \frac{dt}{dint} \cdot 2 \cdot h \cdot n_x$$

L'accuratezza di questo metodo dipende dalla correttezza del valore dello spessore considerato e soprattutto dalla capacità del sistema di mantenere la bobina estremamente compatta evitando l'intrappolamento di aria che falserebbe il calcolo. Se entrambe le condizioni sono verificate questa tecnica rappresenta un'ottima soluzione perché fornisce una determinazione del diametro certa e molto stabile, indipendentemente dalla velocità di lavoro. Difficilmente però viene adottata perché garantire la compattezza perfetta di una bobina è estremamente complesso e, a causa della variabilità dei materiali e delle condizioni di processo, è impossibile stabilire a priori la qualità dell'avvolgimento.

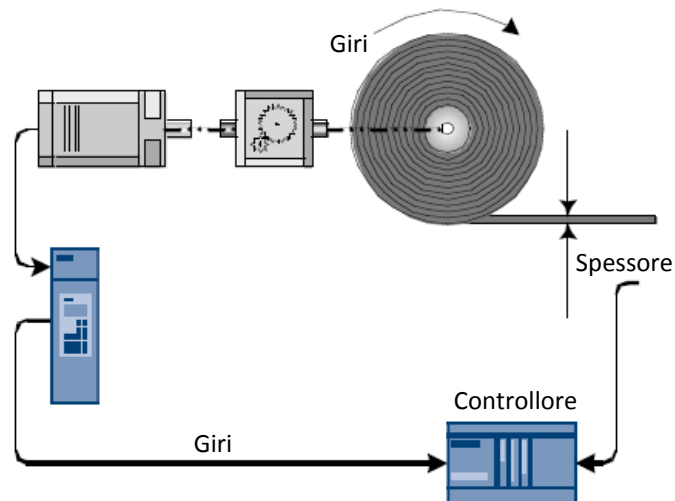


Figura 4.4 - Determinazione del diametro tramite lo spessore del materiale

Vantaggi:

- Se possiede le condizioni opportune fornisce una determinazione accurata e stabile.
- Non è sensibile a variazioni o disturbi sulla velocità.
- Non richiede filtri.

Svantaggi:

- È un metodo in anello aperto poiché non è in grado di reagire ad eventuali errori nel calcolo.
- Può richiedere l'azione Nip per eliminare l'intrappolamento di aria.
- La variabile spessore deve essere estremamente precisa.
- Richiede un diametro di partenza molto preciso.

4. Calcolo tramite rapporto velocità periferica e angolare

La tecnica, usata per avvolgitori assiali, consiste nel calcolare il diametro tramite il rapporto tra la velocità periferica v e quella di rotazione n della bobina.

$$D = \frac{v}{\pi \cdot n}$$

La velocità periferica può essere rilevata tramite un encoder montato su un rullo a diametro fisso, progettato in modo che su di esso non avvenga slittamento del materiale. Questa funzione viene realizzata mediante l'encoder montato sul motore del traino nel caso tale asse

sia presente nella macchina (Fig.4.5). La velocità angolare della bobina è nota invece tramite l'azionamento elettrico del motore dell'asse.

Il metodo è valido e fornisce un valore preciso quando la macchina lavora a regime di velocità, ma non è accurato durante le accelerazioni e decelerazioni a causa dei ritardi di reazione dell'asse nel caso di inerzia significativa e delle correzioni di velocità per mantenere il controllo della tensione. Inoltre è afflitto da errore a velocità molto basse, perciò viene utilizzato soltanto al di sopra di una determinata soglia.

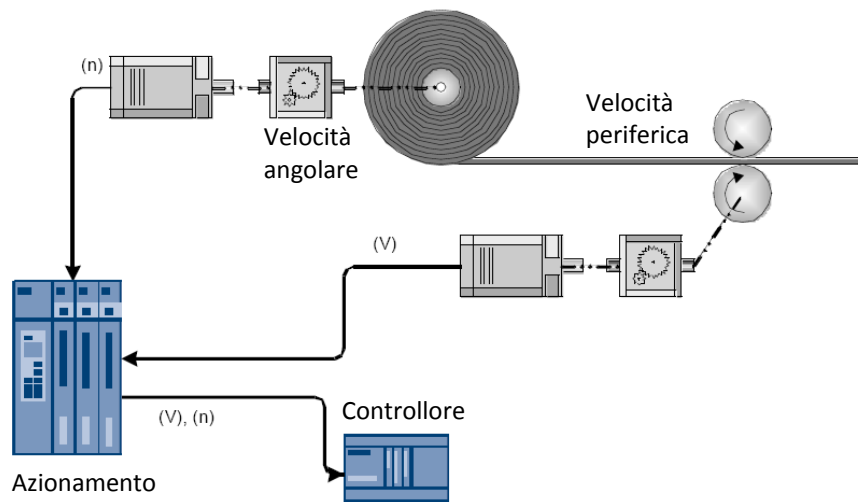


Figura 4.5 - Calcolo del diametro tramite il rapporto v/n

Vantaggi:

- Non richiede hardware aggiuntivo perché sfrutta segnali di encoder già presenti sulla macchina.
- Non richiede organi a contatto con la bobina.
- Determinazione precisa a regime, anche con bobine difettose.
- Sfrutta un calcolo estremamente semplice.

Svantaggi:

- Non può essere applicata per avvolgitori periferici.
- Viene effettuato solo sopra una soglia di velocità.
- Il valore di diametro ottenuto viene filtrato per ottenere un andamento più stabile.
- Non preciso durante le variazioni di velocità della macchina.

5. Calcolo tramite rapporto spostamento periferico e angolare

La tecnica è simile a quella precedente perché consiste nel calcolo del diametro conoscendo le velocità periferica e angolare della bobina, ma si basa sull'integrazione di entrambi i valori su un intervallo legato al raggiungimento di un determinato numero di giri della bobina. In seguito all'integrazione si ottengono quindi lo spostamento periferico s e angolare θ , da cui si calcola il diametro D nel modo seguente:

$$D = 2 \cdot \frac{s}{\theta}$$

Il vantaggio di questo metodo è che il diametro viene tracciato in un intervallo di tempo invece che calcolato istantaneamente. Ciò permette di aumentare la stabilità in tutte le condizioni di funzionamento, sia durante le variazioni di velocità sia a regimi molto bassi, senza la necessità di introdurre filtri in uscita.

Inoltre il risultato ottenuto può essere sfruttato per un'ulteriore funzione che consente di stimare lo spessore del materiale in lavoro. Poiché l'aggiornamento del diametro viene effettuato a distanza di un numero di giri fisso N , lo spessore h è ottenuto mediante la differenza tra i diametri D_x e D_{x-1} calcolati in step consecutivi:

$$h = \frac{D_x - D_{x-1}}{2 \cdot N}$$

Il valore dello spessore è molto utile innanzitutto per un controllo di qualità del materiale e inoltre consente di implementare la funzione di arresto della macchina per raggiungere un determinato diametro della bobina (§Cap.7.2).

Vantaggi:

- Più preciso del metodo v/n durante accelerazioni e decelerazioni e a velocità basse.
- Non richiede filtri.
- Consente di calcolare lo spessore del materiale.

Svantaggi:

- Non può essere applicata per avvolgitori periferici.
- Complessità di calcolo perché richiede la doppia integrazione e il conteggio del numero di giri effettuati per azzerare le funzioni di integrazione.

6. Calcolo del diametro iniziale tramite spostamento del ballerino

In un sistema costituito da un controllo della tensione tramite ballerino lo spostamento periferico della bobina è determinato con precisione in funzione della rotazione del rullo mobile.

È possibile quindi calcolare il diametro di partenza facendo compiere al ballerino uno spostamento in due posizioni note x_1 e x_2 e rilevando, per entrambe, le posizioni angolari (α_{x1} e α_{x2}) dell'asse, rilevate mediante l'encoder montato sul motore dello svolgitore. Il corrispondente spostamento periferico L_{x1-x2} della bobina è misurato manualmente alla prima messa in servizio ed è costante per qualsiasi valore di diametro determinato. È quindi possibile ottenere il diametro con il seguente calcolo:

$$D = \frac{L_{x1-x2}}{\pi \cdot (\alpha_{x1} - \alpha_{x2})}$$

Il metodo è limitato ad applicazioni dove è presente il ballerino e può essere utilizzato solamente a macchina ferma per determinare il diametro di partenza poiché è necessario imporre un riferimento al sistema di controllo della tensione diverso da quello di lavoro. Ove possibile viene comunque adottato perché permette di ottenere un valore estremamente preciso.

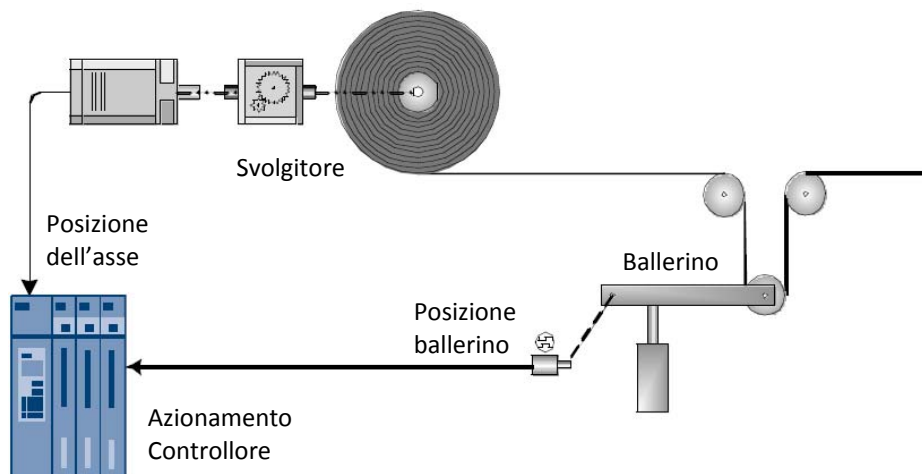


Figura 4.6 - Calcolo del diametro iniziale tramite lo spostamento del ballerino

Confronto tra le tecniche di determinazione del diametro

Sulla base delle considerazioni precedenti si può concludere che, nel caso di svolgitori e avvolgitori assiali, la tecnica di determinazione del diametro tramite il rapporto degli spostamenti s/θ sia la più accurata e meno limitante per le varie applicazioni. Ove possibile viene quindi sempre utilizzata poiché fornisce un valore del diametro stabile, con un aggiornamento estremamente rapido, durante tutte le situazioni di lavoro della macchina, indipendentemente dalla qualità della produzione e dalla progettazione meccanica dell'asse.

Poiché il metodo può essere applicato solo con la macchina in movimento, viene sempre abbinato ad una delle tecniche che sfruttano sensori esterni in modo da garantire la corretta impostazione del diametro a macchina ferma.

Se presente il sistema di controllo della tensione con ballerino viene inoltre adottata anche la tecnica di determinazione del diametro iniziale tramite lo spostamento del rullo danzatore. Ciò vale in particolare per lo svolgitore poiché, a differenza dell'avvolgitore, non è mai dotato di un rullo di contrasto tramite il quale rilevare la dimensione della bobina; se non è presente alcun sensore esterno è necessario adottare tale tecnica per garantire un valore esatto all'inizio del funzionamento della macchina.

4.3. Riferimento di tensione del materiale

Per un avvolgitore la tensione di lavoro corretta deve essere stabilita in modo che sia garantita l'adeguata compattezza della bobina dall'anima fino al diametro massimo (§Cap.3.1.1). In particolare la qualità del processo di avvolgimento migliora garantendo una diminuzione graduale della tensione al crescere della bobina; per questo motivo viene implementata una funzione, nota come "taper", che permette di definire l'andamento in funzione del diametro.

Poiché il riferimento di tensione è un parametro fondamentale per il processo e deve essere valutato quotidianamente dall'operatore per ottimizzare il funzionamento della macchina in base al materiale da lavorare, è richiesto che tale funzione sia svolta nel modo più semplice possibile. Nella maggior parte dei casi viene quindi adottata una funzione di tipo lineare, definita tramite l'impostazione delle tensioni a diametri minimo e massimo.

Ad essa corrisponde quindi un rapporto di diminuzione, chiamato "taper ratio", pari a:

$$ratio = \frac{T_{dmin} - T_{dmax}}{T_{dmin}} \%$$

Dato quindi un diametro intermedio d , la tensione di lavoro viene espressa moltiplicando la tensione a diametro minimo per il seguente fattore:

$$taper\ factor = 1 - \frac{ratio}{100} \cdot \left(\frac{d - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \right)$$

Dal punto di vista teorico è possibile scegliere anche altri tipi di funzioni matematiche [9], per esempio di tipo iperbolico, implementata mediante la seguente espressione:

$$taper\ factor = 1 - \frac{ratio}{100} \cdot \left(1 - \frac{d_{min}}{d} \right)$$

In alternativa si può definire una curva di diminuzione definita per punti (Fig.4.7), ma nella pratica nessuna delle soluzioni riesce a fornire dei benefici significativamente maggiori rispetto alla semplice funzione di tipo lineare.

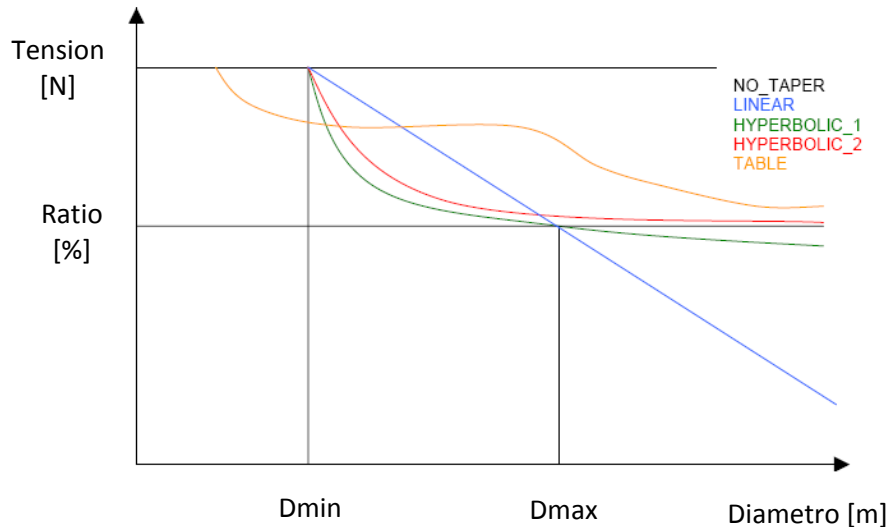


Figura 4.7 - Curve per la diminuzione di tensione in funzione del diametro

In alcuni casi però risulta utile modificare la funzione di taper con l'obiettivo di sfruttare al massimo la coppia disponibile del motore in modo da rendere la bobina più compatta possibile. Ciò viene praticato per esempio in applicazioni in cui viene lavorata la carta che ha la proprietà di comprimersi facendo in modo che, aumentando la compattezza, risulti un diametro finale più piccolo a parità di metri avvolti. Con l'obiettivo quindi di contenere il più possibile la dimensione della bobina, si imposta un riferimento di coppia C da mantenere costante al variare del diametro, ottenendo una curva di tensione T descritta dalla seguente funzione iperbolica:

$$T = \frac{C}{2 \cdot d}$$

Impostando per esempio una coppia di lavoro di 200Nm, si ottiene la curva di diminuzione del tiro rappresentata in Fig.4.8.

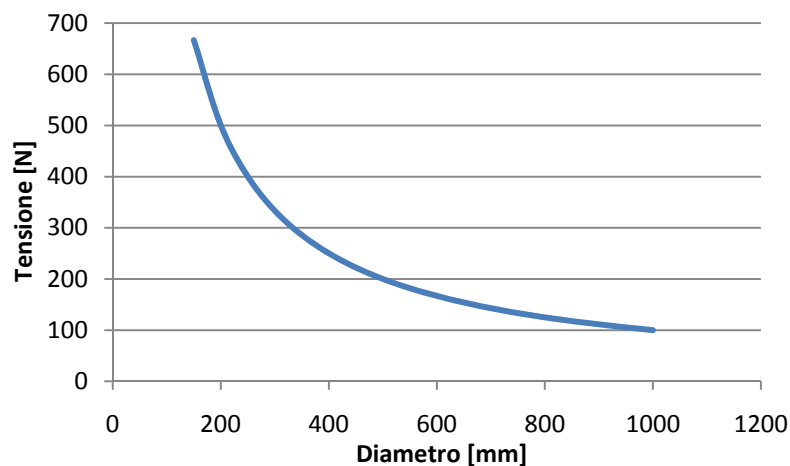


Figura 4.8 - Andamento della tensione per ottenere una coppia di lavoro costante

La tensione sul materiale viene impostata ad un valore diverso da quello risultante dal taper quando la macchina è alla velocità zero oppure quando sono in corso alcune operazioni particolari, per esempio di scarico o imballaggio. In tutti questi casi viene stabilito un unico valore alternativo alla tensione di lavoro e solitamente è pari alla tensione minima di progetto. Per evitare che cambiamenti repentini del riferimento di tensione influiscano sulle caratteristiche della bobina, generando difetti come la stellatura (§Cap.3.1.1), è importante che la variazione sia effettuata senza discontinuità con adeguate rampe.

4.4. Controllo della tensione

La funzione centrale nella gestione dell'azionamento elettrico di un avvolgitore è il controllo della tensione del materiale.

Per i sistemi in anello chiuso viene utilizzato un regolatore PID, di norma adottato in ambito industriale perché permette di realizzare una sufficiente regolazione della variabile da controllare garantendo una semplice configurazione e messa in servizio.

Nel caso siano presenti celle di carico l'errore in ingresso al regolatore, o *deviation value* (Fig.4.9), viene determinato mediante la differenza tra il riferimento di tensione (§Cap.4.3) e il valore attuale, acquisito attraverso un ingresso analogico e opportunamente rielaborato in modo da ottenere una misura espressa in Newton. L'errore risultante esprime quindi un dato significativo per la valutazione della produzione perché direttamente collegabile alla qualità del processo.

Con il sistema a ballerino invece la tensione di lavoro non viene stabilita all'interno dell'azionamento elettrico, bensì è mantenuta al valore di riferimento impostando la corretta pressione al cilindro pneumatico che movimenta il rullo mobile, determinata sulla base delle considerazioni geometriche del sistema (§Cap.3.3.1). La regolazione in anello chiuso implementata nelle funzioni winder permette di controllare la posizione del rullo per mantenerlo in uno stato di equilibrio fisso. L'errore è quindi espresso in una percentuale di deviazione della posizione rispetto a quella di riferimento, indicata generalmente come 50% poiché viene determinata in fase di progettazione in modo da assicurarsi un margine di compensazione sulle variazioni di tensione uguale sia per picchi positivi che negativi. Tramite un sensore viene rilevato il valore attuale di confronto, acquisito mediante segnale analogico ed espresso in percentuale rispetto ai limiti di corrente (o tensione) dell'ingresso stesso.

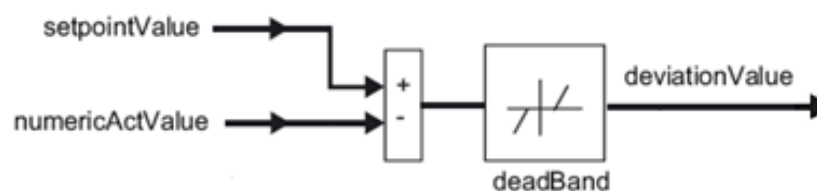


Figura 4.9 - Calcolo dell'errore sulla variabile di regolazione

Il regolatore opera mediante i contributi delle tre azioni: proporzionale, integrale e derivativa (Fig.4.10). Di queste però il contributo derivativo non viene sfruttato poiché non necessario ai fini di un buon controllo della tensione.

La taratura dei parametri per ottimizzare la regolazione viene effettuata partendo da valori noti per esperienze precedenti, che vengono rielaborati in base all'applicazione valutando la reazione del sistema a cambiamenti del riferimento di tensione. La procedura viene effettuata a diversi diametri per studiare la differente reattività del sistema a seconda della variazione dell'inerzia. Per tale motivo si usa impostare un guadagno proporzionale P variabile linearmente con il diametro della bobina.

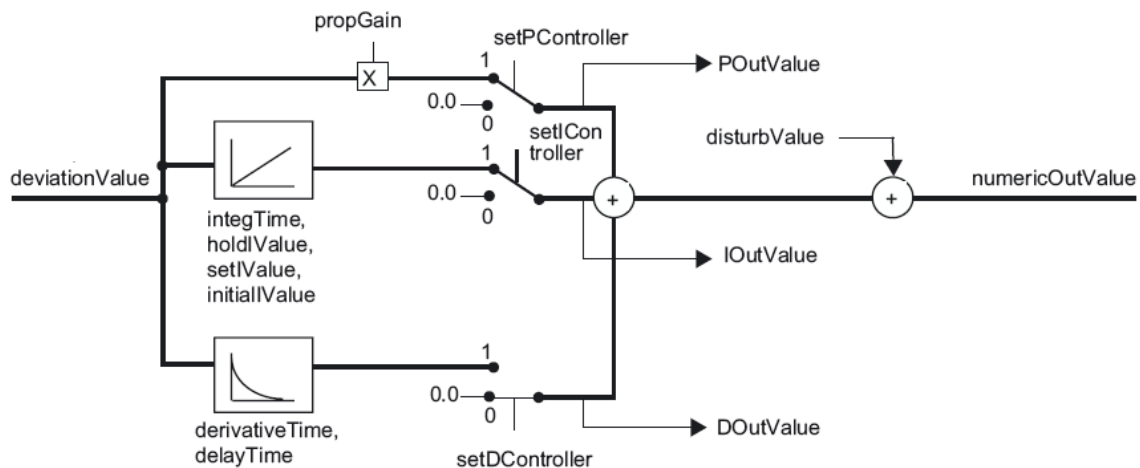


Figura 4.10 - Schema di regolazione PID

Lo stesso sistema di controllo della tensione in anello chiuso può essere configurato in due modi alternativi a seconda dell'utilizzo del valore in uscita dal regolatore. Come descritto in precedenza, esso può essere impiegato come correzione del riferimento di velocità per il motore (Fig.4.1) oppure in aggiunta al riferimento di coppia se il controllo dell'azionamento viene effettuato mediante la regolazione dei limiti di coppia (Fig.4.11). Nonostante entrambe le soluzioni siano ugualmente valide viene sempre adottata la prima: in tal caso il motore possiede già un riferimento corretto di velocità, a meno di eventuali errori sul calcolo del diametro, e la correzione agisce unicamente per mantenere la tensione al valore desiderato. Complessivamente si ottiene quindi un riferimento di velocità che tiene conto di due contributi: velocità della linea v e valore in uscita dal regolatore v_{PID} , entrambi espressi in [m/min] e rielaborati per ottenere un dato in [rpm] utile all'azionamento.

$$v_{rpm} = \frac{v + v_{PID}}{\pi \cdot diam}$$

Nel caso della correzione di coppia l'entità del valore in uscita dal regolatore è invece molto variabile perché include, oltre al contributo per mantenere il tiro costante, anche la

compensazione degli errori sulla stima delle coppie per attrito e inerziali. Il riferimento di velocità comprende comunque un termine aggiuntivo, definito *override*, necessario per far sì che il motore lavori con una velocità superiore a quella della linea in modo da raggiungere il limite di coppia su cui agisce la regolazione.

$$v_{rpm} = \frac{v}{\pi \cdot diam} + override$$

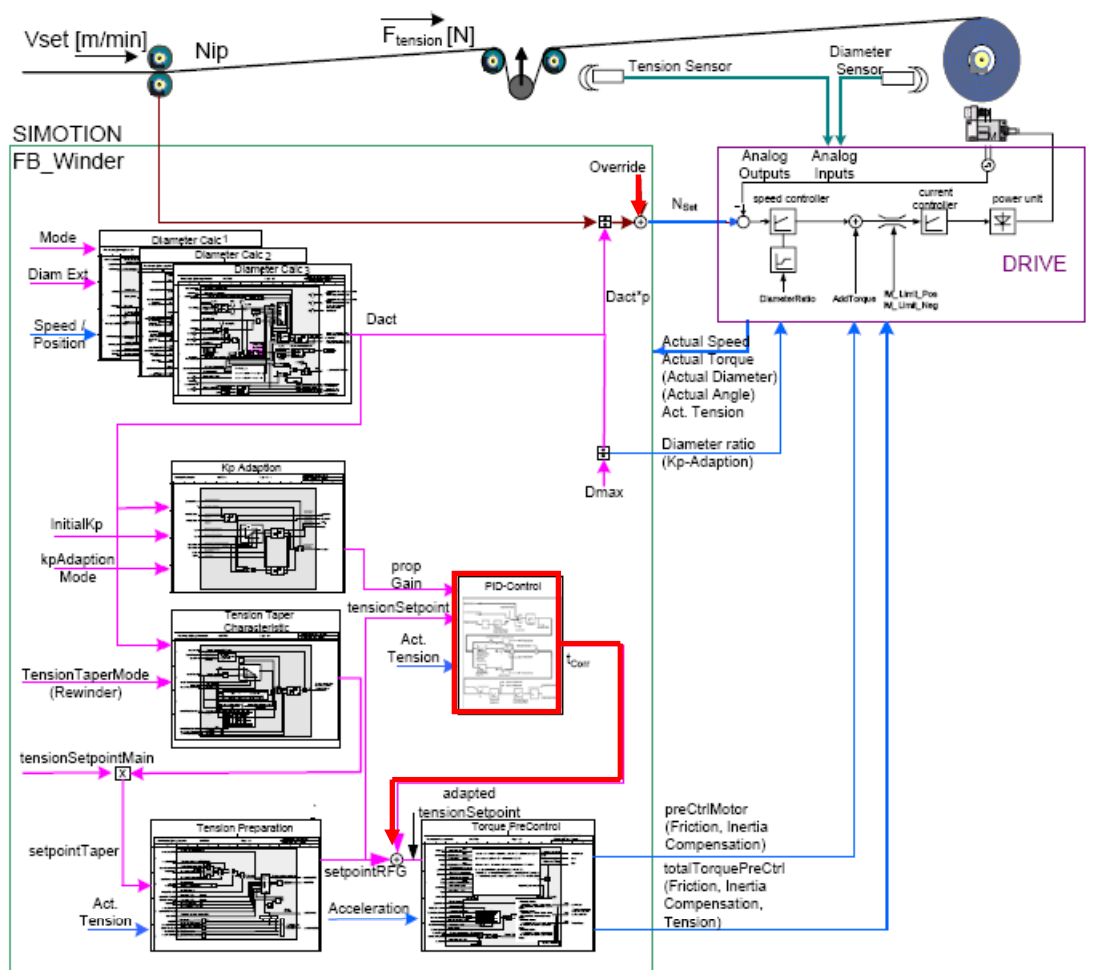


Figura 4.11 - Schema delle funzioni per il controllo in coppia di avvolgitore con celle di carico

Se il controllo della tensione è in anello aperto lo schema generale è molto semplificato poiché non c'è alcun regolatore (Fig.4.12). L'azionamento opera in limite di coppia, calcolato basandosi sulla stima dei carichi. L'unica differenza rispetto al caso descritto in precedenza, in cui il regolatore genera una correzione di coppia per compensare errori nella valutazione dei carichi, nel sistema in anello aperto non viene effettuato alcun controllo e può essere quindi affetto da errore.

Poiché anche questa tecnica di controllo agisce sul limite di coppia, il riferimento di velocità è calcolato incrementando il termine legato alla velocità della linea di una determinata percentuale, per far sì che sia raggiunto il limite di coppia impostato.

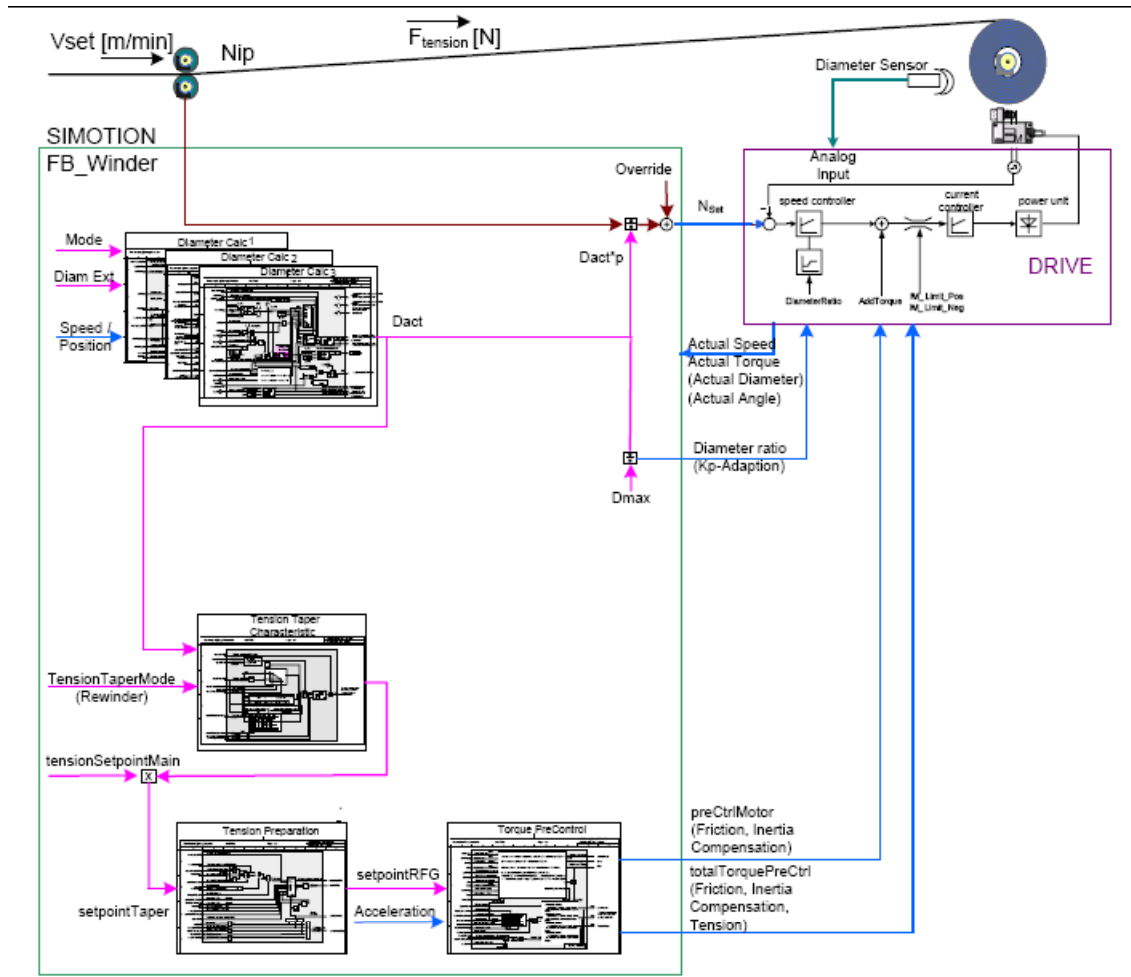


Figura 4.12 - Schema delle funzioni per il controllo della tensione in anello aperto

4.5. Azioni agenti sul sistema

4.5.1. Analisi dei contributi

Il calcolo dei carichi dinamici viene svolto con obiettivi differenti a seconda del sistema di controllo della tensione adottato. Nel caso sia attivo un controllo in anello chiuso con correzione di velocità la stima della coppia necessaria al motore viene utilizzata come feed-forward da aggiungere a valle del regolatore di velocità, in modo da minimizzare l'errore su tale regolatore (Fig.4.13a). Invece per un controllo di tensione in anello chiuso con correzione di coppia oppure in anello aperto il calcolo è necessario per determinare il limite di coppia da imporre al motore (Fig.4.13b).

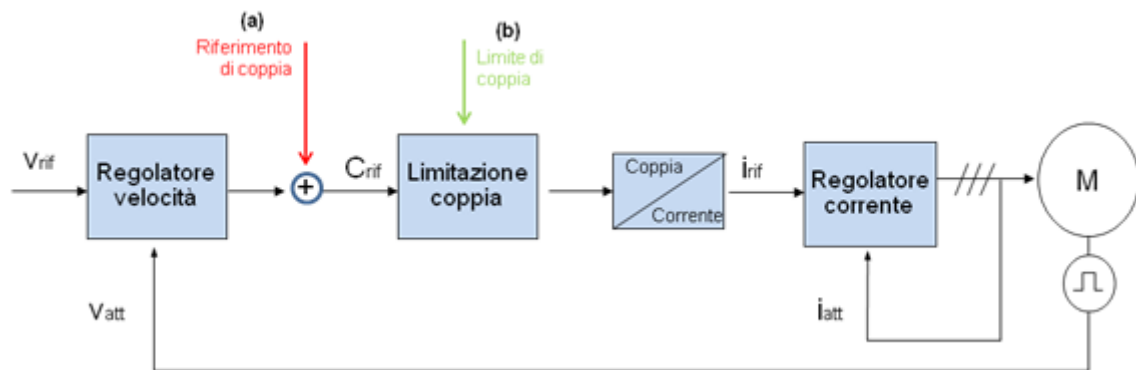


Figura 4.13 - Inserimento della coppia calcolata come aggiunta al regolatore di velocità (a) oppure come limite di coppia (b)

Dall'equilibrio di potenza del sistema (§Cap.3.5.2) è possibile esprimere la coppia sviluppata dal motore considerando i seguenti termini:

- Coppia necessaria per generare tensione T sul materiale.
- Coppia d'attrito C_{att} riferita al motore.
- Momento d'inerzia del motore J_m .
- Momento d'inerzia costante del carico J_{fix} .
- Momento d'inerzia della bobina J_b (variabile con il diametro).

$$C_m = \tau \cdot \left(T \cdot \frac{D}{2} + \left(\frac{J_m}{\tau^2} + J_{fix} + J_b \right) \cdot \dot{\omega}_c \right) + C_{att} \quad (1)$$

Dei termini compresi nell'equazione sono facilmente determinabili:

- Rapporto di trasmissione τ , poiché dato di progetto
- Tensione del materiale T [N] e diametro della bobina D [m], derivanti dalle altre funzioni winder
- Inerzia del motore J_m [kg·m²], reperibile tramite catalogo del motore
- Inerzia variabile J_b [kg·m²], calcolata tramite la massa M [kg] e le caratteristiche della bobina: larghezza L_B [m], diametro attuale D [m], diametro minimo D_{min} [m], densità del materiale ρ [kg/m³]

$$M = \pi \cdot \rho \cdot L_B \cdot \frac{D^2 - D_{min}^2}{4}$$

$$J_c = M \cdot \frac{D^2 + D_{min}^2}{8}$$

- Accelerazione della bobina $\dot{\omega}_c$ [rad/s²], ottenuta tramite l'accelerazione impostata nella legge di moto della linea a [m/s²] e il diametro attuale D [m]

$$\dot{\omega}_c = \frac{2 \cdot a}{D}$$

Risulta invece più complesso il calcolo dei termini d'attrito e momento di inerzia costante del carico, i quali vengono determinati empiricamente in fase di collaudo.

4.5.2. Determinazione degli attriti

Il contributo di coppia per vincere gli attriti non è stimabile in fase di progetto, quindi, per determinarne l'entità, viene effettuato un test durante il collaudo della macchina. Poiché il valore da rilevare è funzione del numero di giri del motore, la procedura di identificazione consiste nel mettere in movimento l'asse e rilevare la coppia sviluppata dal motore a differenti velocità. Per assicurarsi che il valore ricavato sia attribuibile unicamente alla coppia d'attrito il test è realizzato senza bobina, così da escludere il termine relativo alla tensione del materiale; inoltre le rilevazioni sono effettuate a velocità costante in modo da rendere più accurata l'acquisizione dei valori e, soprattutto, annullare i carichi inerziali. Dell'equazione che esprime la coppia motrice (1) rimane dunque solo il termine relativo all'attrito:

$$C_m = \tau \cdot \left(\cancel{\frac{T \cdot D}{2}} + \left(\frac{J_m}{\tau^2} + J_{fix} + J_b \right) \cdot \cancel{\dot{\omega}_c} \right) + C_{att}$$

Durante il test viene raggiunto il numero di giri massimo del motore calcolato, in fase di dimensionamento, mediante la velocità massima della linea e il diametro minimo di progetto. Suddividendo tale valore in dieci intervalli si ottengono gli step ai quali effettuare le rilevazioni. Per esempio si considerino le seguenti specifiche:

- Velocità massima: 1400 m/min
- Diametro minimo: 450 mm
- Rapporto di trasmissione: $28/90 = 0,3111$

Il numero di giri massimo del motore è calcolato come:

$$\omega_{MAX} = \frac{v_{MAX}}{\tau \cdot \pi \cdot D_{MIN}} = \frac{1400m/min}{0,3111 \cdot \pi \cdot 0,45m} = 3183rpm$$

Viene effettuata quindi una prova fino a 3200rpm ottenendo i seguenti dati:

Velocità [rpm]	Coppia [Nm]
50.0	7.02
355.0	10.42
705.0	18.03
1055.0	17.56
1405.0	13.77

Velocità [rpm]	Coppia [Nm]
1755.0	11.03
2105.0	10.23
2455.0	9.99
2805.0	10.04
3200.0	10.39

Dai risultati è possibile ricavare una curva per punti che rappresenta l'andamento della coppia d'attrito in funzione del numero di giri del motore (Fig.4.14).

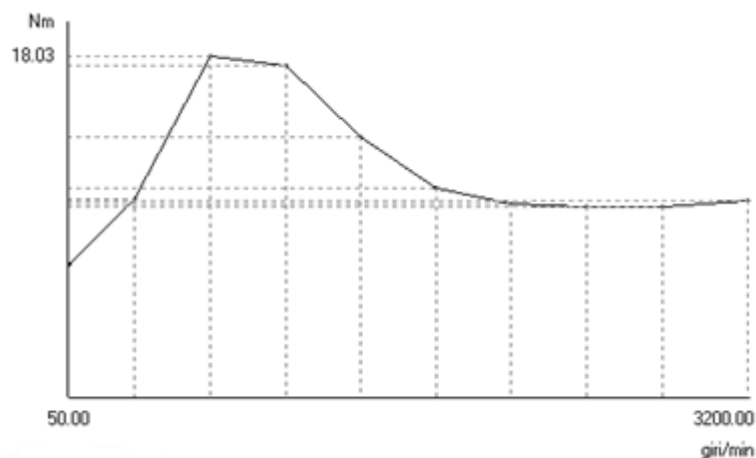


Figura 4.14 - Coppia d'attrito in funzione del numero di giri del motore

4.5.3. Identificazione del momento d'inerzia costante del carico

Nonostante il momento d'inerzia costante del carico potrebbe essere fornito come dato di progetto rilevato tramite disegni meccanici 3D, risulta più semplice e efficace attuare una procedura di identificazione empirica durante le prime fasi di messa in servizio della macchina. Lo studio viene effettuato mettendo in rotazione l'asse sul quale viene montato il solo albero senza materiale avvolto; in questo modo la coppia sul motore è semplificata dei termini relativi alla tensione del materiale e all'inerzia della bobina. Compensando correttamente i contributi ormai noti d'inerzia del motore e degli attriti, nell'espressione della coppia del motore (1) rimane incognita solamente il termine d'inerzia che tiene conto di tutte le masse movimentate: freni, mandrini, riduttore e tutti i componenti meccanici mobili, esclusi il rotore del motore e la massa della bobina, già specificati nell'equazione.

$$C_m = \tau \cdot \left(\cancel{\frac{T}{\omega_0}} \cdot \frac{D}{2} + \left(\frac{J_m}{\tau^2} + J_{fix} + \cancel{\frac{J_b}{\omega_0}} \right) \cdot \dot{\omega}_c \right) + C_{att}$$

L'identificazione avviene in modo indiretto poiché non si basa sull'analisi della coppia inerziale ma del suo effetto. Se infatti il feed-forward di coppia è effettuato correttamente, il regolatore di velocità dell'azionamento viene sgravato dal compito di correggere il riferimento di coppia durante le rampe di accelerazione e decelerazione e quindi, in tali situazioni, mantiene un valore pressoché costante. Obiettivo del test è dunque realizzare delle variazioni di velocità sull'asse, individuando il valore del momento d'inerzia J_{fix} che minimizzi il parametro in uscita dal regolatore di velocità.

Vengono proposti di seguito i risultati di una procedura eseguita imponendo al motore di uno svolgitore variazioni di velocità (curva verde) da 0 a 50m/min secondo le normali rampe di lavoro.

Durante il primo test è stato mantenuto a zero il momento di inerzia: $J_{fix} = 0$. Si può notare in Fig.4.15 che l'uscita del regolatore di velocità (curva arancione) sia variabile durante le rampe; in particolare il valore è positivo in accelerazione e negativo in decelerazione proprio perché serve un contributo aggiuntivo in tali fasi per mettere in moto e arrestare le masse movimentate. Nell'esempio la coppia massima rilevata nella rampa di accelerazione è +2,5Nm.

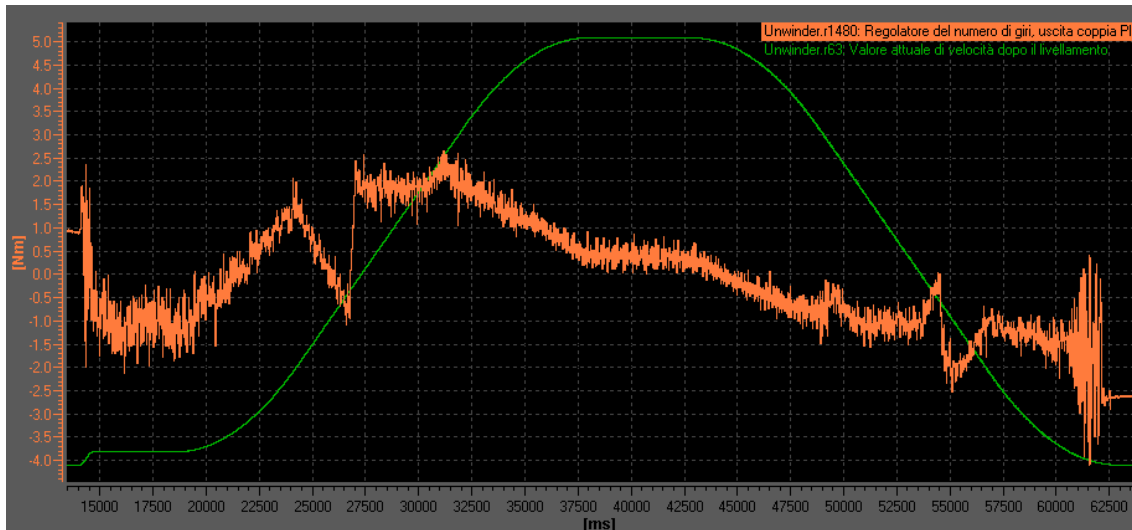


Figura 4.15 - Andamento della coppia in uscita dal regolatore di velocità con $J_{fix}=0$

Nel secondo test il momento di inerzia è stato impostato ad un valore eccessivamente alto: $J_{fix}=4\text{kg}\cdot\text{m}^2$. In Fig.4.16 si osserva che il regolatore fornisce una compensazione di segno opposto rispetto al caso precedente; in accelerazione per esempio la correzione di coppia è negativa perché il riferimento di coppia a valle del regolatore è maggiore della reale richiesta al motore.

In questo caso la coppia massima rilevata durante la variazione positiva di velocità è -6Nm.

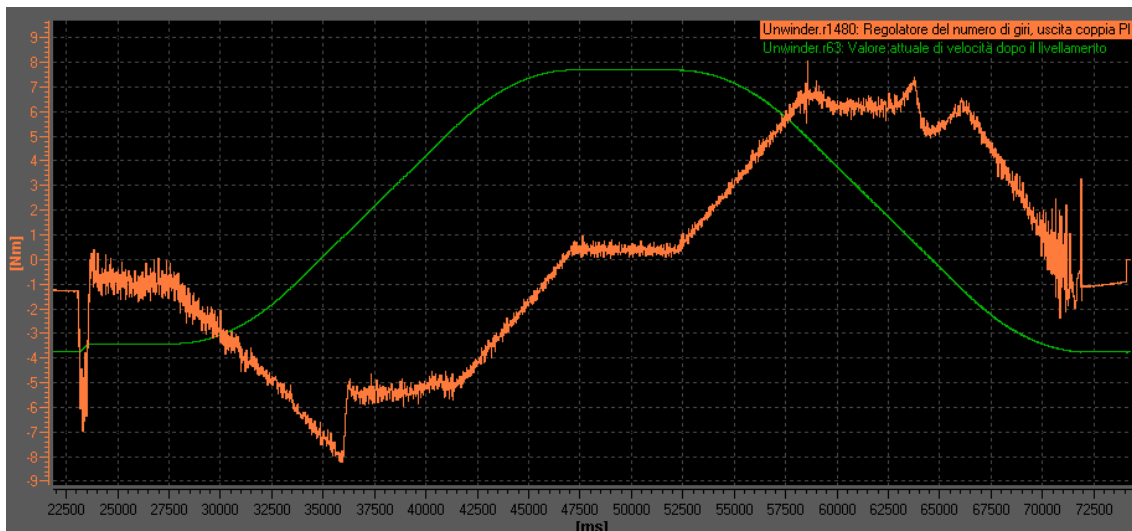


Figura 4.16 - Andamento della coppia in uscita dal regolatore di velocità con $J_{fix}=4$

In Fig.4.17 si nota l'andamento desiderato, ottenuto impostando un momento di inerzia considerato ottimo: $J_{fix}=0,5\text{kg}\cdot\text{m}^2$. A meno di variazioni locali, osservabili anche nei casi

precedenti e indipendenti dalla problematica in questione, la coppia in uscita dal regolatore è pressoché costante ed è circa nulla sia a regime di velocità che durante le rampe.

La coppia massima rilevata durante l'accelerazione è 1Nm.

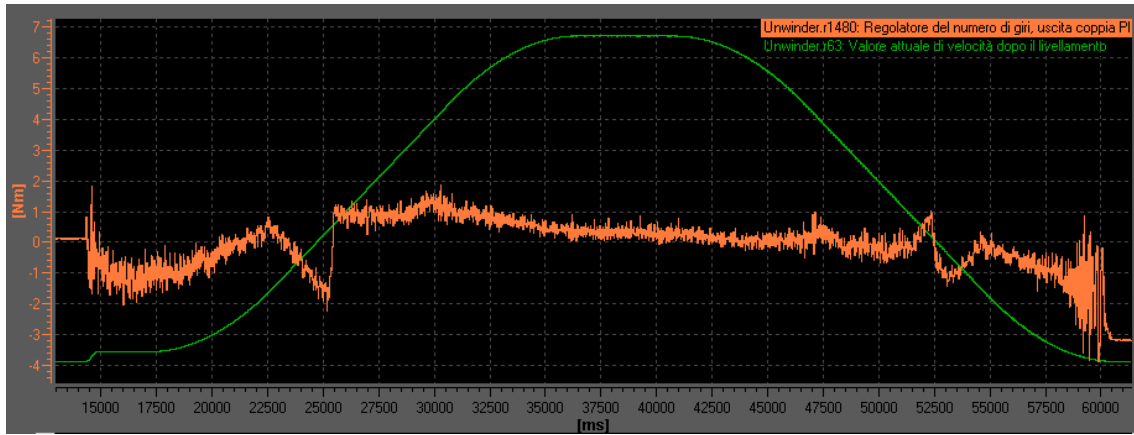


Figura 4.17 - Andamento della coppia in uscita dal regolatore di velocità con $J_{fix}=0,5$

5. SISTEMI DI AZIONAMENTO ELETTRICI IN MACCHINE PER CONVERTING

5.1. Configurazione senza controllore dedicato

5.1.1. Descrizione del sistema

Nelle macchine per Converting il controllo dell'automazione di processo è affidato ad un PLC principale collegato mediante bus di campo ad apparecchiature periferiche decentrate. Viene così effettuata la rilevazione di sensori e pulsantiere necessari per lo sviluppo della logica di comando delle varie funzioni di attuatori elettrici, pneumatici e oleodinamici. Il processo viene generalmente sorvegliato tramite l'interfaccia grafica di un pannello operatore e, in alcuni casi, supervisionato da un sistema gestionale SCADA.

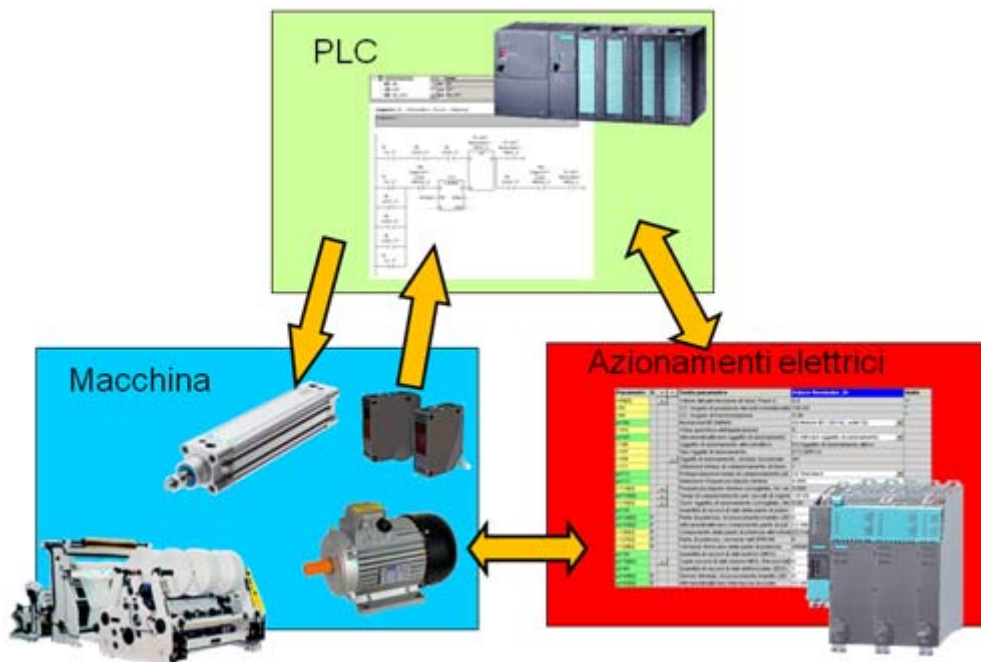


Figura 5.1 - Architettura dell'automazione in sistemi senza controllo assi dedicato

All'interno della gestione dell'automazione rientra il controllo di azionamenti elettrici (o *drives*), utilizzati per il comando di motori regolati in velocità o coppia. Nell'architettura più semplice e maggiormente utilizzata il controllore degli azionamenti è il PLC, il quale ha il compito di gestire i singoli motori e coordinare i movimenti di assi con funzioni sincronizzate. Gli azionamenti sono collegati da un lato tramite bus di campo al PLC, con il quale avviene lo

scambio di dati di processo e di funzionamento. Dall'altra parte al motore, al quale fornisce la potenza elettrica e dal quale riceve, tramite un'interfaccia elettronica o mediante segnali elettrici, i dati necessari alle regolazioni interne e alla diagnostica di funzionamento (Fig.5.1).

Indipendentemente dai modelli e dalle tipologie di hardware utilizzato, la suddivisione delle funzionalità di Motion Control tra azionamento e controllore è ben definita. Il PLC si occupa infatti delle logiche che determinano le sequenze e le tipologie dei comandi di movimento e di tutti i parametri che definiscono le leggi di moto degli assi. Inoltre esegue il coordinamento dei motori che fanno parte della macchina svolgendo le seguenti funzioni:

- Interfaccia con il pannello operatore, sul quale vengono impostati i riferimenti per il funzionamento della macchina e visualizzati i parametri di stato degli azionamenti.
- Elaborazione del riferimento di velocità comune alla linea in base alle condizioni della macchina.
- Limitazioni di velocità in funzione dei diametri di svolgitore e avvolgitore.
- Gestione delle situazioni di arresto della macchina, legate allo stato dei sensori e a quello dei parametri dell'azionamento.
- Generazione delle rampe di accelerazione e decelerazione, dipendenti dal riferimento di velocità della linea e dalle tipologie di arresto.

L'azionamento d'altra parte ha il compito di elaborare tutte le operazioni specifiche per la funzione che l'asse deve svolgere. Quindi, oltre alle funzioni base, che includono le tipiche regolazioni di corrente e velocità, in base all'applicazione desiderata vengono implementati:

- Per svolgitori e avvolgitori: programmi con funzioni winder.
- Per gli altri assi della linea, come per esempio il traino: elaborazione del riferimento di velocità e conversione in [rpm].
- Per assi con funzioni di posizionamento: generazione della legge di moto mediante i parametri ricevuti dal PLC e regolazione di posizione.

5.1.2. Confronto tra configurazioni con modelli di azionamento differenti

Generalmente la configurazione hardware degli azionamenti utilizzata in macchine per Converting è multi asse, in cui esiste un unico componente che si occupa del collegamento alla rete elettrica ed esercita la funzione di raddrizzatore, convertendo la corrente trifase proveniente dalla rete in continua; essa è poi fornita in ingresso a tutti gli azionamenti per la generazione di potenza ai motori.

A seconda della marca e del modello gli azionamenti si differenziano, oltre che per il software di progettazione, anche per il bus di campo adottato e l'interfaccia tra il modulo potenza e la scheda di controllo. Si consideri per esempio il confronto tra due tipologie di azionamento utilizzati per applicazioni con avvolgitori: Parker SSD 890 e Siemens Sinamics S120.

Gli azionamenti Parker SSD 890 sono convertitori dotati di una scheda elettronica di controllo dedicata per ogni drive. In Fig.5.2 si può notare una disposizione compatta dei dispositivi, tipica delle applicazioni con potenze ridotte, in cui tutti i convertitori sono collegati al bus di corrente continua generato dal modulo di alimentazione collegato alla rete elettrica. Il bus di campo che permette di comunicare con il controllore è determinato dal modulo opzionale di comunicazione montato, che può abilitare uno tra i seguenti protocolli: Ethernet, PROFIBUS, DeviceNet, CANopen, ControlNet.

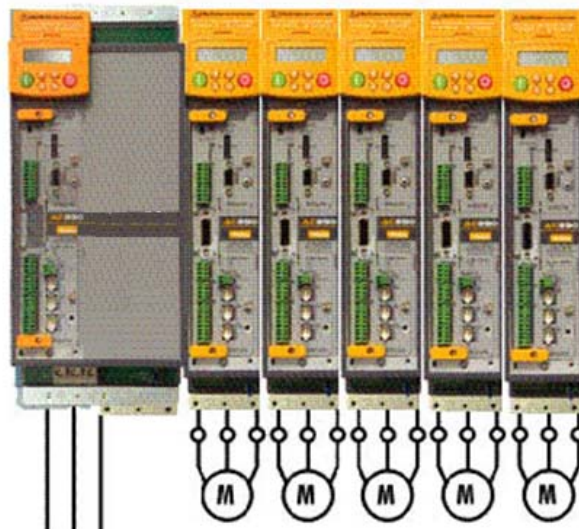


Figura 5.2 - Azionamenti Parker SSD 890

Gli azionamenti Siemens del tipo Sinamics S120 sono progettati invece suddividendo i moduli di potenza dall'unità di controllo. Esiste infatti un unico dispositivo di riferimento, nominato *Control Unit*, che gestisce un gruppo di moduli di potenza il cui numero di unità varia da 4 a 12

a seconda dei modi di regolazione interni richiesti e delle funzioni aggiuntive abilitate. Sono affidati quindi alla Control Unit gli oneri di calcolo dei regolatori, gestione delle memorie dei parametri e interfaccia di comunicazione con il controllore, che può avvenire attraverso i bus PROFIBUS o PROFINET. Il collegamento alla rete elettrica esterna avviene anche in questo caso tramite un componente, chiamato *Line Module*, il quale converte la tensione trifase alternata nel circuito DC che fornisce l'alimentazione di potenza per gli azionamenti. Tutti i dispositivi, compresi motori e encoder, sono dotati di targhetta elettronica di riconoscimento e collegati all'unità di controllo mediante un'interfaccia comune, denominata DRIVE-CLiQ.

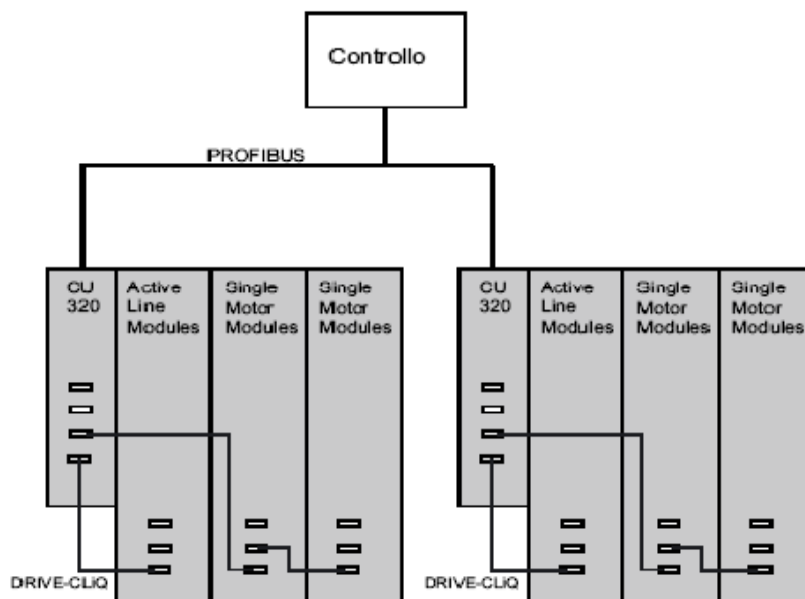


Figura 5.3 - Azionamenti Siemens Sinamics S120

Per quanto riguarda il software di progettazione, la differenza tra azionamenti di produttori diversi consiste nella possibilità di ricevere una configurazione già determinata e garantita e nella flessibilità per apportare modifiche o aggiungere funzionalità. Gli azionamenti di Parker SSD per esempio vengono forniti di una completa programmazione dedicata per le differenti applicazioni e l'intervento dell'utilizzatore è limitato ad una parametrizzazione delle funzioni disponibili. Nel caso del drive Sinamics S120 di Siemens invece solo alcune funzioni, come quella di posizionamento semplice, sono già integrate. Per tutte le altre è disponibile un ambiente di programmazione a blocchi completamente libero per inserire le logiche di gestione dei parametri dell'azionamento (Fig.5.4). Il lavoro esposto nella presente tesi è consistito proprio nello studio necessario per implementare nuovi programmi in azionamenti

Sinamics S120 applicati alle macchine per Converting, come per esempio le funzioni winder per gli assi svolgitore e avvolgitore.

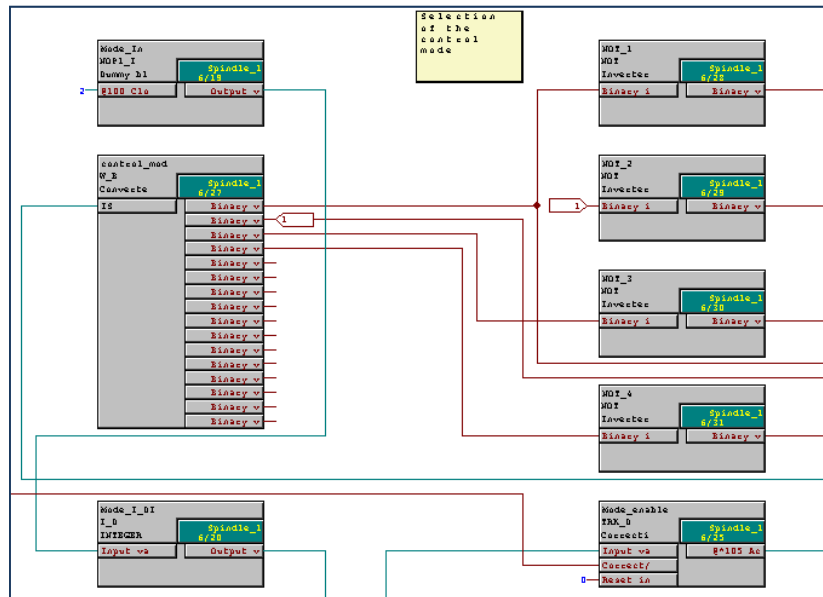


Figura 5.4 - Ambiente di programmazione per azionamenti Siemens Sinamics S120

5.2. Configurazione con controllore dedicato

In alternativa alla tipica gestione dell'automazione in cui gli azionamenti elettrici sono controllati direttamente dal PLC, è stato recentemente introdotto nelle macchine per Converting un dispositivo intermedio dedicato al Motion Control. In particolare il caso di studio affrontato è il controllore Siemens Simotion, le cui funzionalità sono abbinate ai dispositivi del tipo Sinamics S120 (§Cap.5.1). A differenza di un classico PLC, tale controllore è progettato per operare in collaborazione con gli azionamenti; possiede quindi funzioni specifiche per la movimentazione di assi di vario tipo, comprese camme elettroniche e interpolazioni, ed è in grado di elaborarle in tempi estremamente rapidi, nell'ordine del millisecondo.

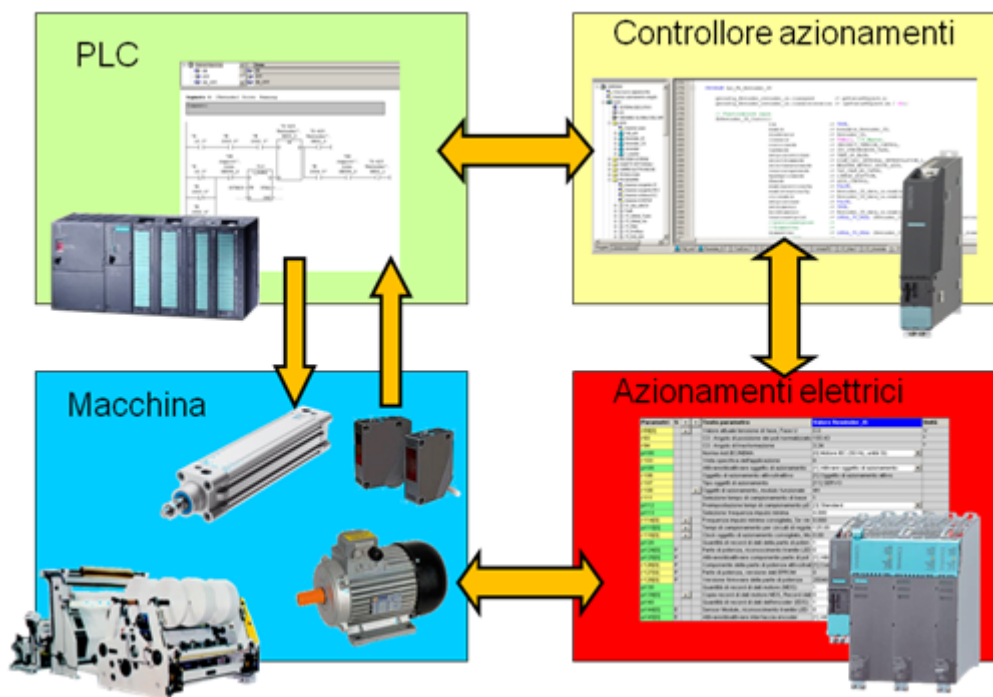


Figura 5.5 - Architettura dell'automazione in sistemi con controllo assi dedicato

Pur essendo un elemento che introduce notevoli cambiamenti per quello che riguarda le funzionalità della macchina, dal punto di vista della struttura hardware del controllo dell'automazione non comporta modifiche rilevanti poiché viene aggiunta solamente una scheda da integrare nel sistema Sinamics S120. Il controllore è già predisposto infatti per il collegamento agli azionamenti perché contiene, oltre alla CPU che elabora le funzioni di Motion Control, una Control Unit utilizzabile per la gestione dei parametri degli azionamenti collegati con interfaccia DRIVE-CLiQ. La naturale predisposizione all'accoppiamento tra le

famiglie Simotion e Sinamics è dimostrata inoltre dal fatto che il software di programmazione è lo stesso, agevolando la configurazione dei collegamenti tra i dispositivi.

Il collegamento con gli azionamenti è favorito inoltre perché Simotion è in grado di operare, mediante i bus PROFIBUS o PROFINET, con due reti di comunicazione indipendenti (Fig.5.5); ciò consente di separare la rete con il PLC, che solitamente include anche altre apparecchiature periferiche, da quella con le Control Unit Sinamics. Si ha quindi la possibilità di dedicare agli azionamenti una comunicazione con velocità di trasferimento dati maggiore, garantendo tempi più rapidi di aggiornamento dei parametri.

La presenza di un controllore dedicato agli azionamenti sgrava il PLC da tutti i compiti di gestione delle velocità e di elaborazione in tempo reale dei parametri riguardanti i drives. A differenza della struttura senza controllore dedicato, nel PLC rimangono le seguenti funzioni:

- Interfaccia con il pannello operatore per la ricezione delle impostazioni di funzionamento della macchina e la trasmissione dello stato degli azionamenti.
- Logiche di abilitazione dei movimenti.
- Analisi dello stato dei sensori che determinano l'arresto della macchina o condizionano l'avvio del movimento dei motori.

Il controllore degli azionamenti riceve le impostazioni di processo dal PLC e si fa carico di tutte le funzioni di coordinamento dei motori della linea: elaborazione del riferimento di velocità, generazione delle rampe di accelerazione e decelerazione e valutazione delle condizioni di arresto dipendenti da parametri ricavati dal movimento degli assi, come per esempio la condizione di raggiungimento di un determinato diametro delle bobine. Inoltre si occupa di tutte le funzioni strettamente collegate alla gestione del movimento dei singoli azionamenti, generando i riferimenti di velocità e coppia. Tra queste quindi sono incluse l'elaborazione delle leggi di moto per posizionatori, e più in generale per movimenti a velocità controllata, e la gestione delle funzioni winder. Agli azionamenti rimangono invece solo le funzioni base, che comprendono principalmente le tipiche regolazioni in anello chiuso di corrente e velocità e la gestione dei riferimenti e limiti di coppia.

Caratteristica del controllore analizzato è la disponibilità di diverse tipologie di linguaggi di programmazione, ad alto livello o di tipo grafico, selezionabili a seconda delle funzioni da implementare per facilitare la scrittura e la comprensione del codice. Inoltre è dotato di un sistema di esecuzione dei programmi multi task, che garantisce maggiore flessibilità alla programmazione poiché consente di assegnare tempi di elaborazione diversi a funzioni con

differente priorità. Proprio grazie alla versatilità del sistema il controllore potrebbe essere utilizzato in sostituzione al PLC anche perché consente, tra gli altri, anche l'utilizzo di un linguaggio con schemi logici a contatti; tale soluzione è però considerata ancora prematura perché un sistema consolidato come il PLC, nato specificatamente per lo sviluppo dell'automazione di processo, garantisce maggiore semplicità di utilizzo.

5.3. Confronto tra le due architetture

5.3.1. Confronto delle prestazioni

L'introduzione di un controllore dedicato agli azionamenti ha come principale obiettivo il miglioramento delle performance delle macchine per Converting.

Il vantaggio primario si ha nel minore tempo di esecuzione dei programmi, in particolare quelli in cui vengono implementate le funzioni di coordinamento dei motori della linea. Nell'architettura tradizionale, il PLC elabora il riferimento di velocità mediante una funzione che incrementa il valore ad ogni ciclo di elaborazione, che avviene ad intervalli fissi. Per non sovraccaricare la CPU e non rischiare di allungare eccessivamente l'esecuzione delle altre funzioni, tale codice viene solitamente richiamato ogni 50ms; considerando i ritardi dovuti alla comunicazione mediante bus di campo, ne consegue un aggiornamento del riferimento negli azionamenti in circa 60ms. Nel controllore Simotion invece l'elaborazione è assegnata a task a priorità elevata ed effettuata ciclicamente ogni 3ms, consentendo un calcolo del valore molto più rapido. In questo modo, ad ogni aggiornamento del riferimento, è minore l'errore di velocità in ingresso al regolatore del numero di giri interno all'azionamento; ne consegue una regolazione più efficace e, come effetto pratico, un miglior controllo della tensione del materiale.

Altra funzione che trae notevole vantaggio da un'elaborazione rapida dei programmi è il calcolo di previsione dell'arresto della macchina per il raggiungimento di un dato valore di diametro dell'avvolgitore o dei metri di materiale lavorato. Anche in questo caso il tempo ridotto di esecuzione del codice, abbinato ad un aggiornamento più frequente dei parametri di controllo, permette di eseguire le operazioni con risultati più efficienti, garantendo tolleranze sul target di arresto inferiori.

I tempi di elaborazione delle funzioni specifiche per ogni asse, come quelle winder dedicate agli avvolgitori, invece non sono significativamente diversi nelle due architetture; l'esecuzione dei programmi all'interno degli azionamenti nel caso siano controllati direttamente da PLC, avviene infatti nell'ordine di qualche millisecondo, come nel controllore Simotion.

Rispetto ad una configurazione standard, la presenza di un dispositivo dedicato al Motion Control permette inoltre di avere a disposizione tools di progettazione utili per implementare operazioni complesse, come per esempio camme elettroniche o posizionamenti sincronizzati. Questi sono stati utilizzati prevalentemente per le movimentazioni nell'area di scarico, consentendo di migliorare le prestazioni di sistemi già utilizzati in precedenza e di realizzare

apparecchiature di nuova concezione. Il sistema offre inoltre funzionalità ancora non testate, come la gestione di assi interpolati e la movimentazione di robot.

Un ulteriore vantaggio è la possibilità di effettuare una diagnostica approfondita sullo stato dei motori grazie alla presenza dei cosiddetti Oggetti Tecnologici, i quali rappresentano l'interfaccia tra l'azionamento e il programma utente. Tali Oggetti sono infatti predisposti al collegamento con i "telegrammi" configurati nei dispositivi Sinamics per lo scambio dati con il controllore. Essi contengono quindi tutte le informazioni di funzionamento dell'asse reale, come per esempio lo stato di abilitazione, la presenza di eventuali anomalie e i parametri della legge di moto attiva. Nel caso di utilizzo del solo PLC non si ha questa predisposizione e la definizione del set di informazioni scambiate con gli azionamenti risulta meno agevole.

Oltre ai dati relativi ai parametri standard degli azionamenti, c'è da considerare la problematica relativa alla mole di informazioni riguardanti le impostazioni delle leggi di moto e delle parametrizzazioni delle specifiche funzioni degli assi che dal PLC devono essere trasferite agli azionamenti, come per esempio i dati sulle dimensioni delle bobine per gli avvolgitori/avvolgitori o i tempi di accelerazione e decelerazione per i posizionatori. Nel caso di comunicazione diretta con gli azionamenti tali informazioni si aggiungono a quelle già contenute nei telegrammi standard disponibili nel sistema Sinamics, i quali però sono limitati nella dimensione (in termini di byte) e nel formato dei dati (non vengono interpretati in virgola mobile): la configurazione della comunicazione deve quindi tenere conto delle restrizioni imposte dal sistema. La problematica non si presenta se utilizzato il dispositivo Simotion poiché tutti i dati aggiuntivi sono trasmessi a tale controllore senza particolari limitazioni, se non quelle imposte dal bus di campo adottato.

5.3.2. Confronto della progettazione hardware e software

La progettazione elettrica dei sistemi nelle due configurazioni è pressoché identica perché l'introduzione del controllore Simotion comporta solamente l'inserimento della relativa scheda elettronica. Questa è totalmente integrata nel sistema Sinamics S120 poiché contiene al suo interno, oltre al calcolatore dedicato al Motion, l'unità di controllo per interfacciarsi con gli azionamenti. Sono però diversi i collegamenti relativi al bus di campo: nella configurazione tradizionale gli azionamenti sono connessi alla rete del PLC, alla quale solitamente appartengono anche altre apparecchiature periferiche, come per esempio batterie

pneumatiche o pannello operatore, che limitano le prestazioni del bus; nella configurazione con controllore dedicato, gli azionamenti sono invece inclusi in una rete dedicata ad alta velocità, consentendo un aggiornamento dei dati più rapido.

Inoltre, in fase di progettazione hardware, si deve tenere conto dei carichi di elaborazione cui sono sottoposte nei due diversi casi la CPU del PLC e le Control Unit Sinamics. Se presente il dispositivo Simotion, tali schede di controllo sono infatti alleggerite di numerose funzioni: è sufficiente quindi scegliere modelli di PLC dalle prestazioni inferiori ed è possibile ridurre il numero di Control Unit, ciascuna delle quali, dovendo eseguire meno funzionalità, può gestire un numero maggiore di azionamenti. Nell'ambito di una valutazione economica deve essere quindi comparato il costo del dispositivo Simotion all'eventuale risparmio nella scelta delle altre schede di controllo.

Dal punto di vista della progettazione software c'è invece una notevole differenza tra le due configurazioni. Se da una parte l'integrazione tra Simotion e azionamenti è favorita dal fatto che l'ambiente di sviluppo dei programmi è lo stesso, per contro la complessità insita in un sistema dedicato al Motion Control comporta un aumento della difficoltà nella comprensione delle funzionalità e nella stesura del codice. La problematica è amplificata considerando che Simotion è un prodotto relativamente nuovo sul mercato e che periodicamente è soggetto ad aggiornamenti per migliorarne le funzionalità e semplificarne l'utilizzo. Inoltre offre una realtà di programmazione completamente diversa da quella del PLC, ormai estremamente consolidata e conosciuta in ambito industriale; è necessario quindi un notevole investimento di tempo per permettere al personale tecnico di comprendere a fondo le novità del sistema.

Certamente la possibilità di usufruire nell'ambiente di programmazione del controllore di varie tipologie di linguaggi, ciascuna specifica per una particolare applicazione, può favorire sia la stesura sia la comprensione del codice. L'opportunità di poter utilizzare, tra gli altri, un linguaggio strutturato ad alto livello, pur introducendo un ulteriore grado di difficoltà, consente di poter implementare funzioni più complesse di quelle sviluppabili con semplici schemi grafici a contatti o a blocchi.

6. IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA SENZA CONTROLLORE DEDICATO

6.1. Funzioni integrate in azionamenti elettrici

Il controllo del moto di motori elettrici è basato sull'elaborazione di sistemi di regolazione delle variabili elettriche e meccaniche, con l'obiettivo di generare la corretta tensione di alimentazione all'attuatore per rispettare l'andamento della variabile di ingresso che, a seconda dei casi, può essere la posizione, la velocità o la coppia.

Le tecniche di regolazione interne agli azionamenti variano con la tipologia di motore adottato. Considerando che il campo di utilizzo nelle macchine per Converting è limitato a motori AC, gli azionamenti Sinamics S120 consentono di selezionare una tra le seguenti tecniche di controllo: scalare, mediante il controllo del rapporto tra tensione e frequenza, e vettoriale, nelle varianti Servo e Vector, con o senza feedback di velocità. La scelta viene effettuata in base all'applicazione, valutando le caratteristiche dei diversi metodi e l'entità delle risorse necessarie alla loro elaborazione nel sistema di controllo.

La soluzione più semplice è il controllo della caratteristica v/f , in cui la tensione dello statore viene controllata proporzionalmente alla frequenza della corrente, mantenendo costante il flusso sul motore. La frequenza di lavoro è calcolata direttamente dalla velocità di riferimento e non esiste dunque una regolazione del numero di giri, alleggerendo notevolmente il carico sul sistema di controllo. Questa tecnica è stata utilizzata per controlli di velocità senza encoder in applicazioni con dinamiche basse.

La tecnica di regolazione vettoriale si basa invece sul controllo delle componenti di corrente i_s e i_q che agiscono indipendentemente sulla generazione di flusso e di coppia. A differenza di un motore in corrente continua, le due componenti non sono reali correnti circolanti negli avvolgimenti statorici ma sono le proiezioni su due assi, solidali al rotore, di un vettore equivalente di un unico sistema di corrente trifase. È quindi necessario, oltre alla misura di velocità angolare, anche quella di posizione angolare, indispensabile per valutare le proiezioni dei vettori tensione e corrente ed applicare la trasformata di Park [15]. Tale tecnica viene realizzata nei Sinamics S120 in due varianti: Servo, adatta per applicazioni in cui è presente un controllo mediante un sistema di Motion Control di livello superiore, e Vector, da preferire se le leggi di moto e i parametri per l'ottimizzazione delle dinamiche sono generati internamente all'azionamento. La tipologia Vector è creata quindi includendo l'analisi del modello del

motore ed implementando anelli di regolazione aggiuntivi, come per esempio un feed-forward di coppia nell'anello di velocità; conseguentemente richiede una maggiore quantità di risorse necessarie per l'elaborazione della regolazione nell'unità di controllo. Il carico di elaborazione richiesto può essere facilmente valutato comparando il numero di azionamenti che possono essere regolati da una Control Unit con le diverse tipologie di regolazione: fino a 12 unità in modalità v/f, fino a 6 in Servo e fino a 4 in Vector. Poiché la tecnica Vector risulta molto più onerosa, nello sviluppo dei progetti con azionamenti Sinamics S120, con o senza il controllore Simotion, si è preferito adottare la metodologia di regolazione Servo, ove non sufficiente la regolazione v/f.

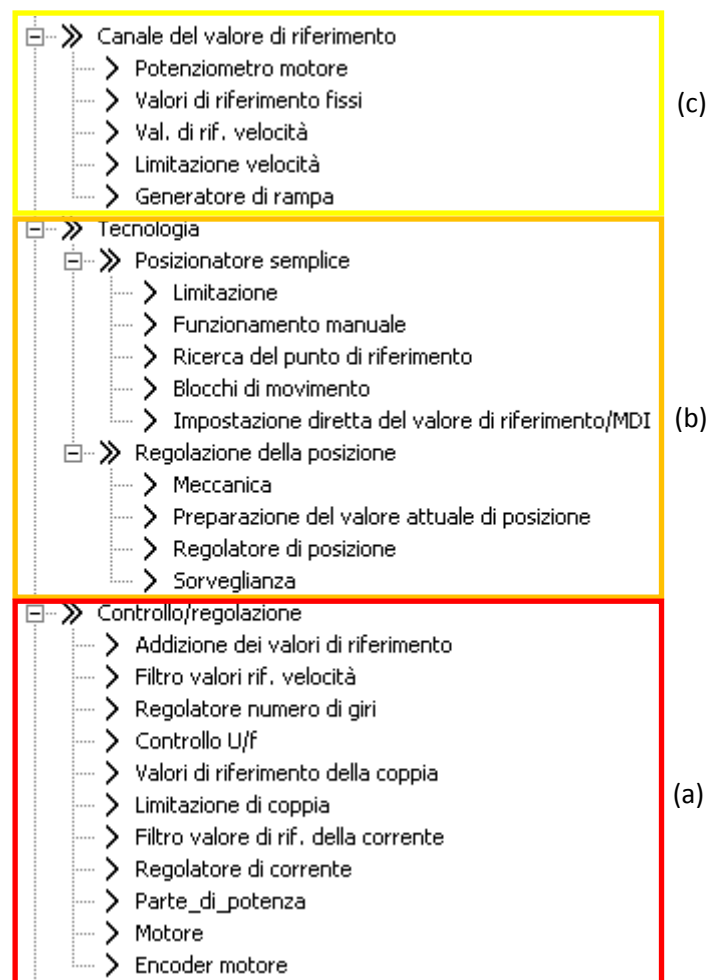


Figura 6.1 - Albero introduttivo agli schemi di regolazione dell'azionamento (a) con funzioni opzionali per posizionatore (b) ed elaborazione del riferimento di velocità (c)

A seconda del sistema di regolazione selezionato vengono adattate le schermate di parametrizzazione dell'azionamento. In particolare viene visualizzato un percorso che permette di seguire la logica dello schema di regolazione, dal riferimento di velocità al valore della tensione elettrica verso il motore. Sono invece collocati esternamente a tale visualizzazione due elementi relativi al controllo del moto considerati opzionali: la regolazione di posizione e l'elaborazione del riferimento di velocità mediante la generazione di rampa (Fig.6.1).

Analizzando quindi lo schema di controllo base (Fig.6.1a), il parametro di ingresso è il riferimento di velocità in [rpm], che rappresenta la variabile controllata mediante il regolatore PI del numero di giri (Fig.6.2). La parametrizzazione del regolatore avviene tramite valori impostabili; in particolare è possibile configurare il guadagno P in modo che vari linearmente secondo un parametro di riferimento. Ciò succede per esempio per gli azionamenti applicati ad assi svolgitori/avvolgitori, in cui viene utilizzato il diametro della bobina per adattare il valore del parametro proporzionale all'aumentare della massa movimentata.

Confrontando il riferimento con il feedback proveniente dal sistema di misura della velocità montato sul motore, tipicamente un encoder, il regolatore elabora in uscita il riferimento di coppia per compensare l'errore misurato.

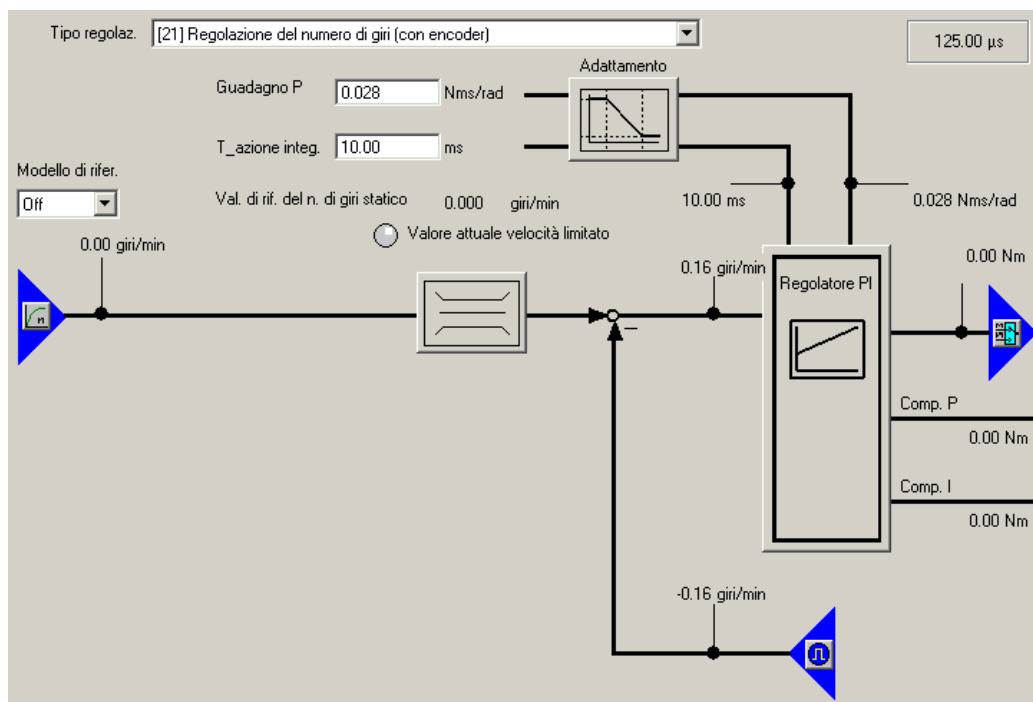


Figura 6.2 - Schema del regolatore PI del numero di giri

In aggiunta al valore in uscita dal regolatore di velocità può essere immesso un contributo di coppia per la compensazione delle coppie d'attrito e inerziali. Tale termine è utile per ridurre la generazione di errori di velocità, rendendo il sistema più reattivo di fronte ai cambiamenti dei carichi agenti sul sistema.

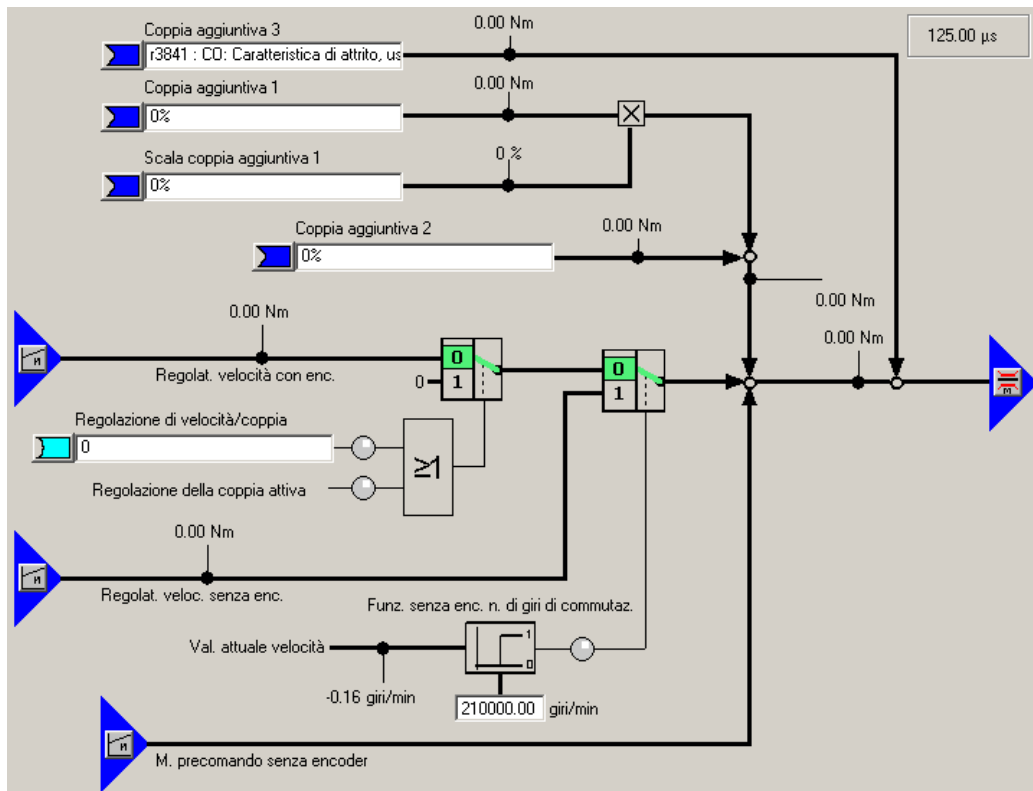


Figura 6.3 - Schema del feed-forward di coppia

In seguito è impostata una limitazione sul riferimento di coppia, calcolata come minimo tra il valore impostato di coppia massima e il valore di coppia derivante dal limite di corrente e dalla curva di potenza del motore.

Per un azionamento regolato in velocità il limite di coppia viene stabilito generalmente al valore nominale in modo da garantire un funzionamento continuativo senza rischio di sovraccarico termico; viene però aumentato nei casi in cui è necessario sfruttare il campo al di sopra della curva S1 del motore, come nel caso dell'avvolgitore, per il quale viene impostato al valore della coppia massima raggiungibile.

Per assi in regolazione di velocità ma con controllo di coppia invece la limitazione rappresenta la variabile di controllo ed è impostata in base alla stima dei carichi. Ciò avviene per esempio per avvolgitori con controllo della tensione del materiale in anello aperto, i quali, avendo un riferimento di velocità periferica superiore a quella degli altri assi, raggiungono il limite di

coppia mantenendosi alla velocità della linea e sviluppando una coppia pari al limite; essa è calcolata in modo che sia generata una determinata tensione sul materiale e, nelle fasi di variazione della velocità, siano correttamente compensati i carichi d'attrito e inerziali.

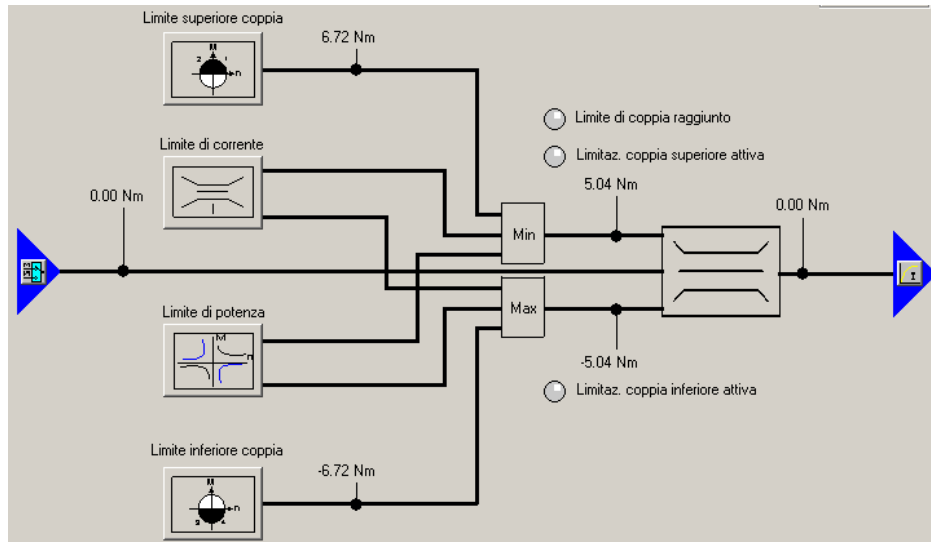


Figura 6.4 - Schema della limitazione di coppia

Il riferimento di coppia limitato viene quindi convertito in un valore di corrente, la quale è trasformata nelle due componenti riferite al sistema di coordinate solidali al rotore per ottenere il contributo utile per la generazione di coppia. Su tali valori viene quindi effettuata la regolazione di corrente, ottenendo così la tensione di riferimento al motore.

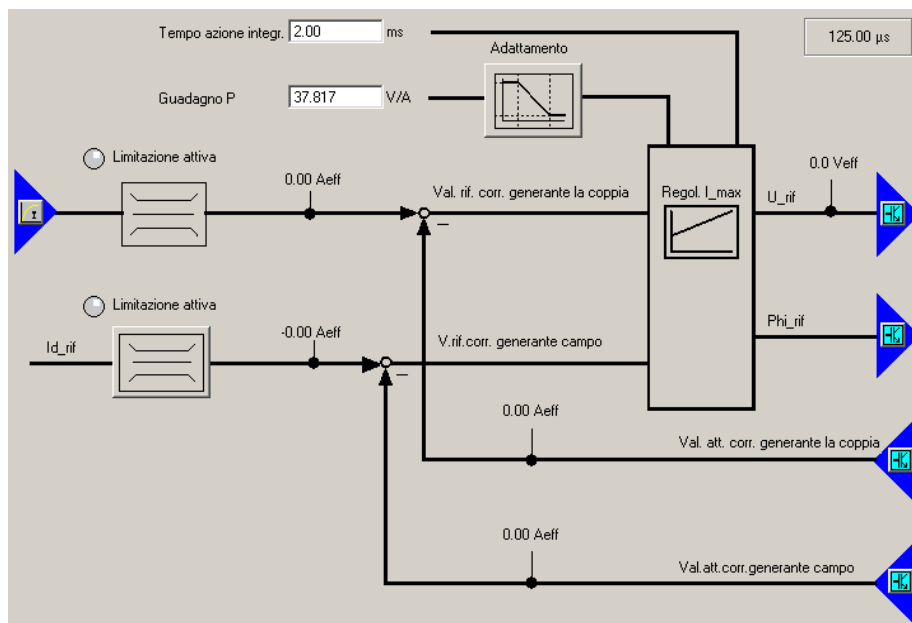


Figura 6.5 - Schema della regolazione di corrente

Indipendentemente dalla tecnica di controllo adottata la variabile ultima controllata dall'azionamento è la tensione di fase. Quest'ultima viene pilotata tramite la tecnica PWM; essa prevede amplificatori che commutano dalla condizione di conduzione a quella di interdizione ad una frequenza elevata, generando un treno di impulsi di tensione che, filtrato dall'induttanza degli avvolgimenti, può essere approssimato al suo valore medio.

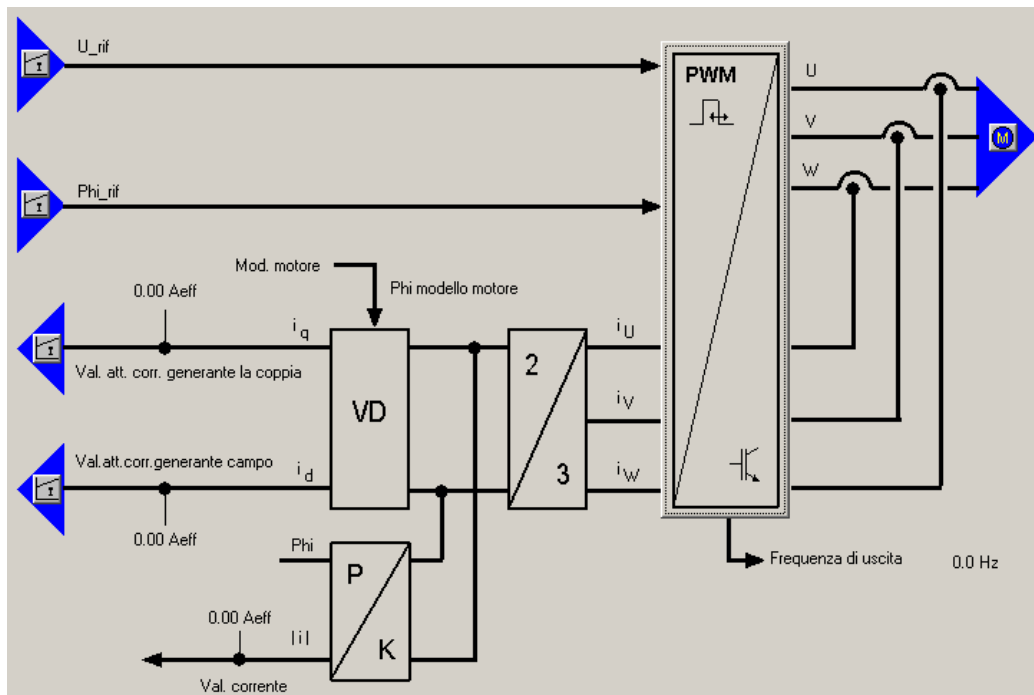


Figura 6.6 - Pilotaggio delle tensioni di fase mediante modulazione PWM

Una delle funzioni opzionali integrate nell'azionamento è quella dedicata agli assi posizionatori, che prevede l'elaborazione del riferimento di posizione ed il relativo regolatore (Fig.6.1b). Il sistema richiede come impostazione di base la definizione delle caratteristiche meccaniche dell'asse, tra cui il rapporto di trasmissione ed eventuali giochi meccanici, in modo da convertire correttamente gli impulsi di misura dell'encoder nello spostamento reale dell'asse, il quale viene definito per comodità in una generica unità di misura LU (Fig.6.7).

Sulla base della configurazione meccanica viene elaborato il riferimento di posizione, che può provenire dal controllore oppure essere impostato tramite l'attivazione di funzioni predefinite nell'azionamento. Il risultato viene fornito ad un regolatore PI (Fig.6.8), il quale genera il riferimento di velocità utilizzato come ingresso agli schemi analizzati in precedenza.

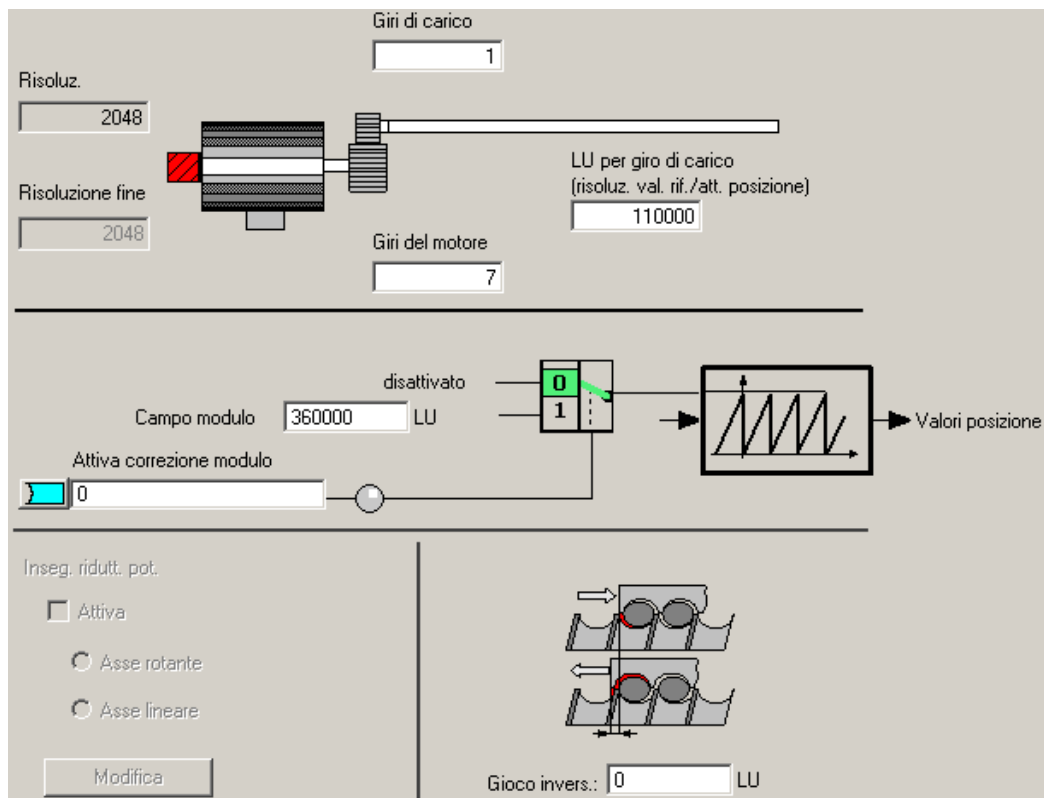


Figura 6.7 - Definizione delle caratteristiche meccaniche

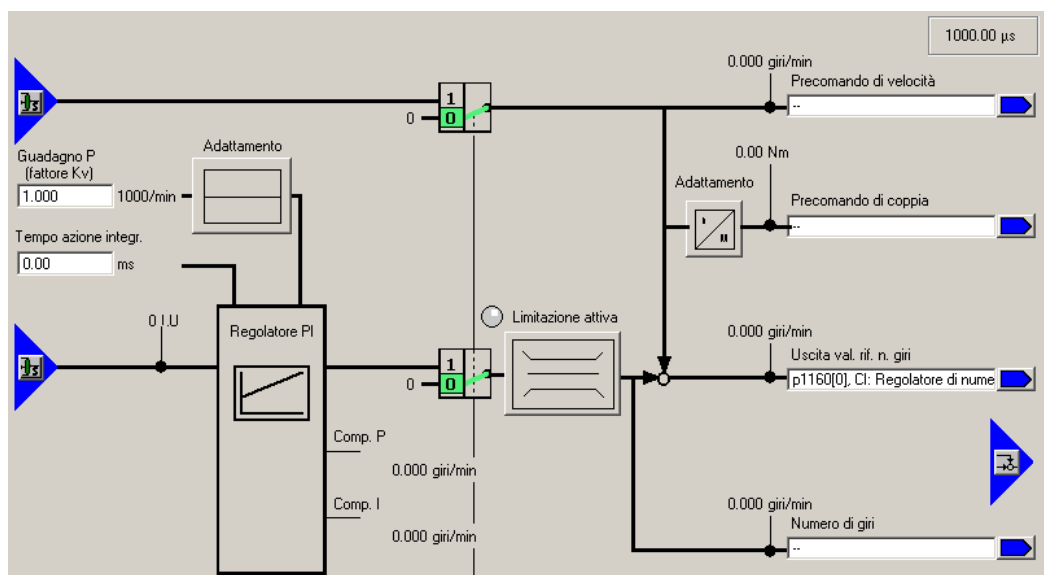


Figura 6.8 - Schema del regolatore di posizione

Un'ulteriore funzione opzionale permette di elaborare il riferimento di velocità. Essa prevede la determinazione del riferimento tramite l'impostazione del controllore oppure tramite l'utilizzo di valori fissi selezionabili mediante codice binario. Viene poi elaborato tramite una legge di variazione parametrizzabile secondo i tempi di accelerazione, decelerazione e jerk (Fig.6.9). Nel contesto delle macchine esaminate tale funzione viene utilizzata per assi esterni

alla linea di produzione, tipicamente appartenenti all'area di scarico, e che non svolgono operazioni di posizionamento: generalmente è attivata in azionamenti che devono eseguire funzionalità semplici ed eseguono solamente una regolazione di velocità dell'asse.

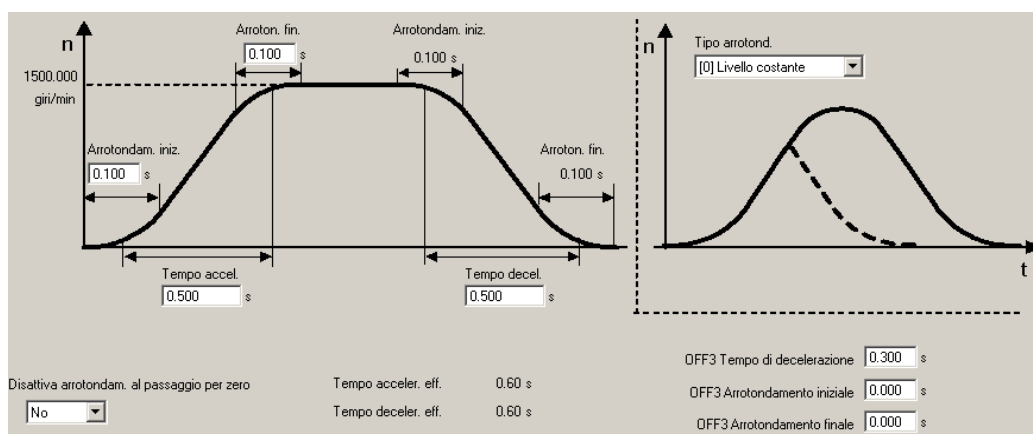


Figura 6.9 - Parametrizzazione della rampa di velocità

6.2. Sviluppo del progetto

6.2.1. Definizione hardware e programmazione PLC

Lo sviluppo di un progetto per la programmazione di un sistema d'automazione comincia con la definizione delle caratteristiche hardware della componentistica elettronica. Punto di partenza è la scelta del PLC con tutti i moduli di gestione dei segnali digitali e analogici di input e output; dal controllore viene generato il bus di campo al quale vengono collegati tutti gli altri oggetti coinvolti nell'automazione, come per esempio espansioni periferiche del PLC, azionamenti elettrici, pannelli per la visualizzazione di dati, termoregolatori (Fig.6.10). Per ognuno di essi vengono dichiarate le specifiche riguardanti l'indirizzo di accesso alla rete e le caratteristiche della comunicazione con il PLC che, nel caso sia adottato il protocollo PROFIBUS, viene definito come Master della comunicazione.

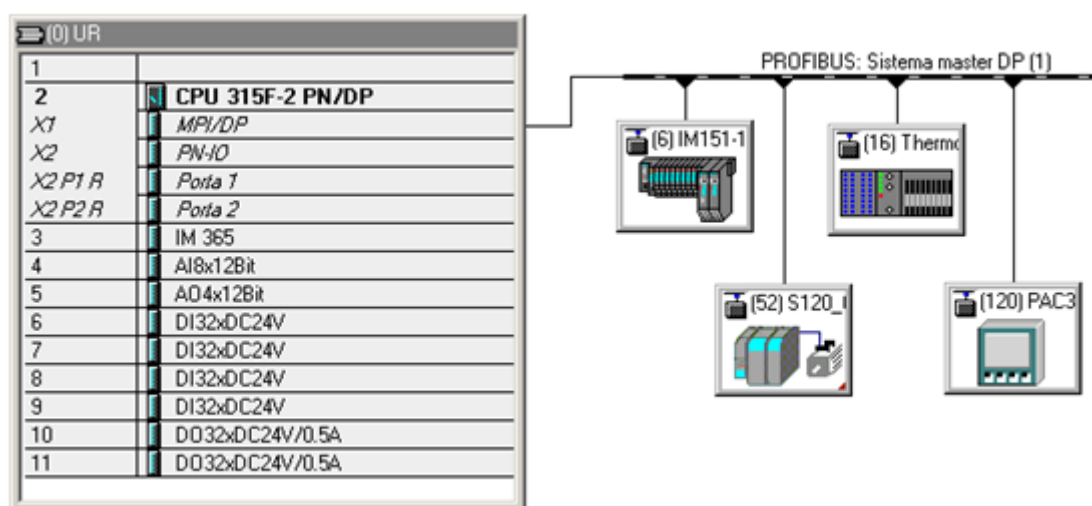


Figura 6.10 - Configurazione hardware dei componenti elettronici

Tra le impostazioni richieste nelle schede di configurazione del PLC c'è anche la definizione dei tempi assegnati ai task richiamati a intervalli fissi con priorità più alta rispetto al ciclo principale elaborato in background. All'interno di tali task vengono eseguite le funzioni più importanti legate alla gestione degli azionamenti elettrici riguardanti la manipolazione del valore di velocità della linea e, in particolare, la generazione della rampa. È importante dunque che il tempo impostato per il richiamo del task sia il minore possibile, tipicamente nell'ordine dei 50ms, tenendo conto della capacità di carico della CPU e dell'entità delle altre funzioni eseguite.

Le funzioni relative al riferimento di velocità elaborano il valore impostato sul pannello operatore, sulla cui schermata principale è disponibile una serie di opzioni selezionabili e pulsanti per l'incremento e il decremento del riferimento stabilito (Fig.6.11).

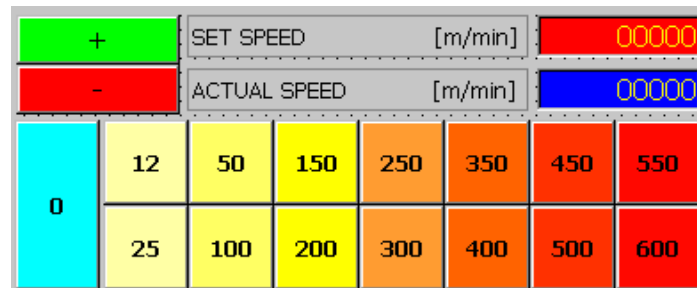


Figura 6.11 - Impostazione del riferimento di velocità sul pannello operatore

Prima di effettuare la generazione di rampa tra il valore attuale e la velocità impostata, viene valutata la necessità di ridurre il riferimento rispetto alle condizioni della macchina. Innanzitutto viene svolto il controllo sulla velocità di rotazione dei motori di svolgatore e avvolgitore per evitare il superamento del valore massimo. In fase di progetto (§Cap.3.5.2) è infatti stabilito un diametro a cui vengono raggiunti i giri massimi dell'asse e al di sotto del quale è necessario ridurre la velocità della linea per mantenere costante la rotazione del motore al valore limite. Per svolgere tale valutazione viene calcolato un fattore k , che determina la percentuale di riduzione della velocità:

$$k = 1 - \frac{rpm_{attuale} - rpm_{limite_inf}}{rpm_{limite_sup} - rpm_{limite_inf}}$$

Nel caso assuma un valore inferiore all'unità la condizione limite è raggiunta poiché significa che i giri del motore sono entrati nel range considerato critico, definito mediante due valori rpm_{limite_inf} e rpm_{limite_sup} a cavallo della velocità massima del motore. Il fattore k è quindi moltiplicato per il riferimento di velocità per ottenere il nuovo valore massimo raggiungibile. Vengono effettuate inoltre altre valutazioni sulle condizioni che richiedono il rallentamento o l'arresto della macchina. A seconda della gravità dell'evento le diverse situazioni sono distinte in quattro categorie:

1. Riduzione della velocità al valore minimo decretato dalle normative: viene comandato per garantire la sicurezza quando avviene l'accesso in una zona pericolosa, all'interno della quale è possibile sostare se gli organi in movimento sono limitati ad una velocità massima consentita.

2. Arresto con il tempo normale di decelerazione: tipicamente viene effettuato in circa 40/60 secondi (dalla velocità massima) senza compromettere la qualità della produzione. Viene eseguito in presenza di anomalie che possono indurre guasti a lungo termine, come per esempio il malfunzionamento dei ventilatori dei motori.
3. Arresto con rampa rapida: è effettuato in circa 15/20 secondi cercando di mantenere controllata la tensione sul materiale per garantire una buona qualità sul prodotto di avvolgimento. Viene comandato in presenza di anomalie gravi degli azionamenti elettrici o di dispositivi direttamente coinvolti nella produzione, da quelli elettronici come il bus di campo a quelli meccanici come il sistema di aspirazione del materiale scartato; è necessario anche nel caso siano rilevate irregolarità nel funzionamento di organi che garantiscono la qualità del processo di lavoro, come per esempio la pressione di lavoro degli alberi espansibili sui quali vengono inserite le anime o la posizione delle presse utilizzate per fermare il materiale a macchina ferma.
4. Arresto d'emergenza: è eseguito in circa 5/8 secondi senza garantire il controllo della tensione del materiale. Viene comandato alla pressione di un pulsante d'emergenza oppure alla violazione di un dispositivo di protezione per zone estremamente pericolose.

Tra gli arresti eseguiti con le normali rampe di lavoro merita un approfondimento separato quello causato non da anomalie del sistema, ma da condizioni calcolate. Nel PLC l'unica situazione considerata è il raggiungimento di un determinato metraggio di materiale lavorato. La rilevazione della quantità di nastro avvolto viene effettuata mediante l'encoder montato sul motore del traino, se tale motore è presente; altrimenti un dispositivo di misura viene montato sull'asse di un rullo non motorizzato, sul quale agisce la spinta di un ulteriore rullo folle per evitare lo slittamento del materiale, garantendo la correttezza della rilevazione. La condizione di arresto viene calcolata confrontando i metri restanti per raggiungere il riferimento stabilito nelle impostazioni di processo con lo spazio necessario all'arresto, considerando la velocità istantanea della macchina V_{att} [m/min] e il tempo N_{time} [sec] per l'arresto dalla velocità massima V_{max} [m/min]:

$$Metri_{arresto} = \frac{\frac{V_{att}}{60} \cdot \left(N_{time} \cdot \frac{V_{att}}{V_{max}} \right)}{2} [m]$$

Sulla base del riferimento impostato e delle valutazioni effettuate si ottiene quindi il valore di velocità della linea, il quale viene trasmesso agli azionamenti in formato percentuale in modo

che ognuno possa convertirlo nella corretta velocità di rotazione del motore a seconda del relativo diametro e rapporto di trasmissione.

6.2.2. Configurazione della comunicazione

Indipendentemente dal bus di campo impiegato, l'unità di controllo Sinamics S120 consente di attivare una comunicazione ciclica con il controllore mettendo a disposizione un set di dati (telegramma) per ogni dispositivo collegato ad essa mediante DRIVE-CLiQ: moduli di potenza (Motor Module), convertitore AC/DC (Line Module) oppure schede I/O digitali o analogiche (Terminal Module). La dimensione è limitata in funzione della tipologia del dispositivo e al massimo raggiunge 36 byte in uscita e 32 byte in ingresso per i telegrammi dei moduli di potenza. In accordo con le caratteristiche dei parametri dell'azionamento, i singoli dati hanno un'estensione massima di 32 bit e non possono essere interpretati mediante virgola mobile.

Il software di programmazione propone una lista di telegrammi standard configurati secondo protocolli di comunicazione degli azionamenti elettrici riconosciuti a livello internazionale e un'ulteriore serie di telegrammi ottimizzati dal costruttore estendendo i dati standard. Per i moduli motore le varie tipologie di telegrammi (Tab.6.1) si differenziano in base alla presenza di uno o due encoder nelle regolazioni dell'azionamento, all'eventuale esecuzione di posizionamenti e alla necessità di imporre limitazioni di coppia.

Tipo di telegramma	Descrizione sintetica
Telegrammi standard	
1	interfaccia n-rif a 16 bit senza encoder
2	interfaccia n-rif a 32 bit senza encoder
3	interfaccia n-rif a 32 bit con encoder 1
4	interfaccia n-rif a 32 bit con encoder 1 ed encoder 2
5	interfaccia n-rif a 32 bit con DSC ed encoder 1
6	interfaccia n-rif a 32 bit con DSC ed encoder 1 e 2
Telegrammi Siemens	
101	interfaccia n-rif
102	interfaccia n-rif con encoder 1 e limitazione di coppia
103	interfaccia n-rif con encoder 1 e 2 e limitazione di coppia
105	interfaccia n-rif con DSC, encoder 1 e limitazione di coppia
106	interfaccia n-rif con DSC, encoder 1 e 2 e limitazione di coppia

Tabella 6.1 - Telegrammi standard e configurati dal costruttore

Per eseguire una parametrizzazione più flessibile delle funzioni già integrate negli azionamenti e per configurare quelle implementate nei programmi aggiuntivi i telegrammi standard sono stati ampliati con dati specifici per le diverse applicazioni, in modo che, tramite il PLC, e quindi il pannello operatore, fosse possibile modificare dinamicamente il comportamento degli assi senza ricorrere ad una continua riprogrammazione degli azionamenti. Per comodità sono state stabilite quattro classi di applicazioni, per ognuna delle quali è stato creato uno specifico set di dati: posizionatori (Tab.6.2), winder (Tab.6.3), assi in velocità con encoder e assi in velocità senza encoder.

Dati PLC → Azionamento

Word	Parametro
1	Comando abilitazioni (bit)
2	Riferimento posizione
3	Comando movimenti (bit)
4	Riferimento velocità
5	Accelerazione
6	Decelerazione
7	Posizione homing encoder
8	Limite software positivo
9	Limite software negativo
10	Numero blocco movimento

Dati Azionamento → PLC

Word	Parametro
1	Stato abilitazioni (bit)
2	Posizione attuale
3	Stato funzioni posizionario (bit)
4	Coppia attuale
5	Velocità attuale
6	Codice guasto attivo
7	Codice avviso attivo

Tabella 6.2 - Telegramma configurato per posizionario

Dati PLC → Azionamento

Word	Parametro
1	Comando abilitazioni (bit)
2	Riferimento velocità
3	Comando funzioni winder (bit)
4	Riferimento tiro materiale
5	Sovravelocità
6	Diametro di partenza
7	Riferimento ballerino
8	P per PID tiro a diametro min
9	P per PID tiro a diametro max
10	Tempo I per PID tiro
11	Larghezza bobina
12	Densità materiale avvolto

Dati Azionamento → PLC

Word	Parametro
1	Stato abilitazioni (bit)
2	Velocità attuale
3	Stato funzioni winder (bit)
4	Coppia attuale
5	Tiro materiale attuale
6	Diametro attuale
7	Codice guasto attivo
8	Codice avviso attivo
9-10	Impulsi encoder

Tabella 6.3 - Telegramma configurato per avvolgitore

Per ognuna delle classi è stato creato nel PLC un blocco funzionale specifico, scritto in linguaggio strutturato SCL (Structured Control Language), all'interno del quale vengono richiamate le funzioni di sistema per l'attivazione della comunicazione ed elaborati tutti i parametri del telegramma. Viene effettuata per esempio la conversione delle unità di misura e la gestione di alcuni segnali di abilitazione in modo che l'istanza di richiamo della funzione assuma un'interfaccia semplificata e che quindi l'utente che mette in servizio un azionamento sia agevolato nella programmazione dei segnali di scambio con il controllore.

Considerata la limitazione nella quantità di dati trasmissibili con gli azionamenti, un'alternativa allo scambio dati tradizionale mediante telegrammi è l'attivazione di una comunicazione aciclica, basata sulla lettura o scrittura di parametri dell'azionamento avviata, per ogni necessità, mediante una specifica richiesta. Nonostante il vantaggio di poter accedere a qualsiasi parametro dell'azionamento senza limitazioni, questa tecnica viene adottata solo se sia strettamente necessario estendere il set di informazioni scambiate ciclicamente poiché comporta un aggiornamento dei dati in tempi più lunghi rispetto al metodo tradizionale ed un carico di elaborazione maggiore sui sistemi di controllo.

6.2.3. Programmazione degli azionamenti

All'interno del software di programmazione degli azionamenti vengono definite le caratteristiche di tutti i dispositivi collegati alle unità di controllo. Il convertitore AC/DC e tutti i moduli di potenza sono definiti per potenza e modello, i motori dotati di targhetta elettronica e interfaccia DRIVE-CLiQ sono dichiarati senza specifiche poiché queste sono acquisite solo durante il collaudo, mentre gli altri tipi di motori, Siemens senza DRIVE-CLiQ o di terze parti, sono configurati con tutti i dati di targa. Al momento della dichiarazione degli azionamenti viene richiesta la modalità di regolazione, la quale determina la visualizzazione delle schermate sul controllo di velocità, coppia e corrente, e l'attivazione delle funzioni opzionali per la gestione del posizionario e la generazione di rampa sul riferimento di velocità (§Cap.6.1).

Al termine della fase di configurazione si ottiene per ogni Control Unit la visualizzazione della topologia di collegamento dei dispositivi (Fig.6.12), che deve corrispondere allo schema di cablaggio effettivamente realizzato.

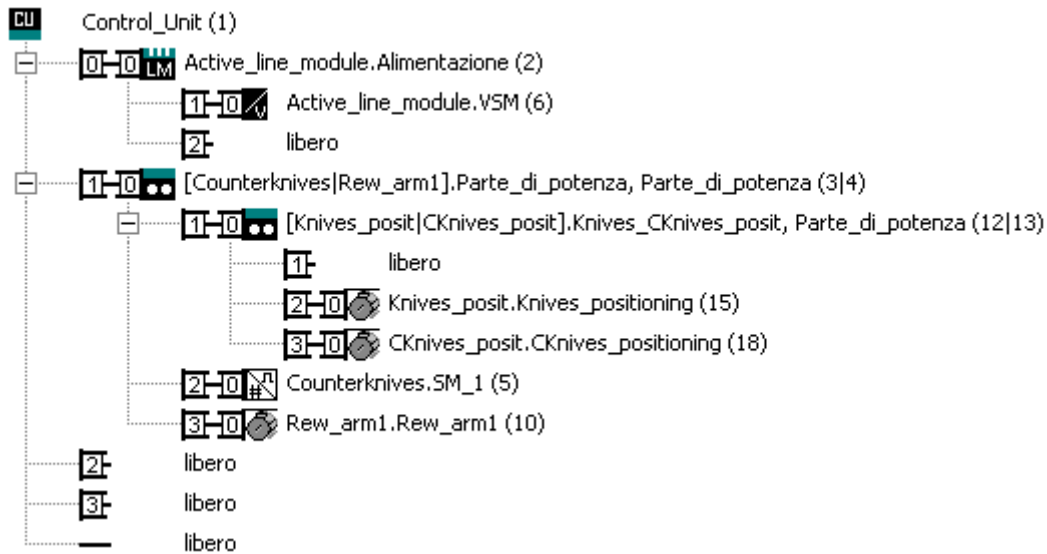


Figura 6.12 - Topologia dei collegamenti DRIVE-CLiQ

Per ogni dispositivo configurato viene poi inserito uno schema di programmazione, all'interno del quale è possibile sviluppare, mediante un linguaggio grafico a blocchi, le funzioni specifiche per gestire la logica di funzionamento ed operare direttamente sui parametri del sistema. Anche in questo caso sono stati creati quattro diversi blocchi standard per le differenti classi di applicazione definite già precedentemente: posizionatori, winder, assi in velocità con encoder e assi in velocità senza encoder. Poiché l'editor di programmazione permette di suddividere i blocchi in schede e di dividere ognuna in sei campi, è stato possibile collocare in modo conveniente le diverse funzioni. Per esempio l'ultima scheda di ogni programma è stata destinata all'inserimento di blocchi per la comunicazione con il PLC assegnando i valori del telegramma, convertiti nelle opportune unità di misura, ai parametri dell'azionamento.

Poiché per gli assi in velocità (esclusi gli assi winder) e i posizionatori le funzioni per la gestione della movimentazione sono già integrate nell'azionamento, la loro programmazione è consistita soltanto nell'elaborazione ulteriore dei parametri proveniente dal controllore. Nel posizionatore vengono convertiti i tempi di accelerazione e decelerazione dalla velocità massima v_{max} (Fig.6.13), trasmessi in [sec] dal PLC, e ricalcolati in percentuale rispetto al valore massimo configurato nell'azionamento in $[m/s^2]$, secondo la seguente formula:

$$acc [\%] = 100 \cdot \frac{v_{max} [m/min]}{60 \cdot t_{acc} [sec]} / acc_{max} [m/s^2]$$

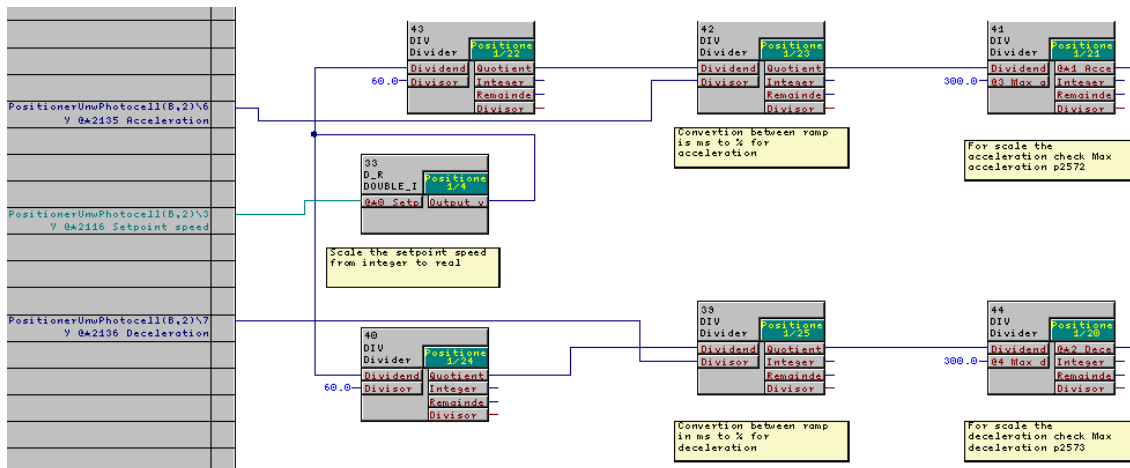


Figura 6.13 - Schema a blocchi per la conversione di accelerazione e decelerazione

Nello schema degli assi comandati in velocità con encoder, come il traino o gli altri rulli motorizzati della linea di produzione, viene effettuata la conversione del riferimento della velocità, dalla percentuale proveniente dal PLC al numero di giri del motore, considerando la rotazione massima del motore al 100% della velocità della macchina. Al risultato viene poi aggiunto un valore di overspeed, anch'esso definito in percentuale rispetto alla velocità massima della macchina; tale valore è utilizzato per rendere più efficace l'azione di alcuni rulli intermedi, come per esempio il rullo flessocurvo, mentre è nullo per il traino che deve operare alla velocità esatta di produzione.

$$v_{rpm} = \frac{v_{\%}}{100} \cdot v_{max} + v_{overspeed}$$

Anche nel caso degli assi con controllo di velocità senza encoder viene effettuata la conversione della velocità dalla percentuale trasmessa dal PLC agli [rpm] utilizzati nell'azionamento; tale valore viene poi utilizzato come riferimento per la generazione di rampa mediante la funzione integrata nei Sinamics S120.

6.2.4. Integrazione delle funzioni winder

Il programma per l'implementazione delle funzioni winder viene integrato nello schema di svolgitore e avvolgitore mediante l'inserimento dei blocchi di una libreria sviluppata da Siemens per la specifica applicazione. Essa ha il vantaggio di essere già predisposta per il collegamento dei parametri di configurazione delle funzioni ai dati del telegramma di comunicazione e dei parametri risultanti dai calcoli effettuati dai blocchi del programma ai parametri dell'azionamento: riferimento di velocità, feed-forward e limitazione di coppia.

La libreria include numerose delle funzioni utilizzate nelle operazioni di assi per avvolgimento, attivabili e configurabili a seconda delle esigenze; poiché è completamente aperta al programmatore, è possibile comunque modificarla per aggiunte o perfezionamenti. Le funzioni incluse svolgono le seguenti operazioni:

- Calcolo del diametro: ottenuto dal rapporto tra la velocità della linea [m/min] e quella di rotazione del motore [rpm], può essere calcolato sia con il metodo semplice della divisione sia con quello del rapporto tra l'integrazione dei valori.
In alternativa può essere utilizzato il collegamento ad un sensore, la cui rilevazione viene trasformata in diametro mediante una curva definita per punti.
- Caratteristica sulla tensione di lavoro: realizza una diminuzione del riferimento di tensione proveniente dal controllore dal diametro minimo a quello massimo per garantire una graduale diminuzione della compattezza della bobina nel corso dell'avvolgimento.
- Controllo della tensione (Fig.6.14): sono messe a disposizione le tecniche di controllo in anello aperto e in anello chiuso con regolatore PI. Come descritto nel Cap.4.4, tali sistemi possono agire sulla coppia del motore, attivando un override sul riferimento di velocità e calcolando i limiti di coppia dell'azionamento, oppure correggendo direttamente il riferimento di velocità. Per ottimizzare il regolatore è implementata inoltre una funzione lineare per variare il fattore proporzionale in funzione del diametro della bobina.
- Compensazione dell'inerzia: per reagire dinamicamente alle variazioni di velocità è calcolata una coppia per compensare il momento d'inerzia costante del carico e quello variabile della bobina, tenendo conto di diametro, larghezza e densità del materiale. Per effettuare il calcolo è stimata l'accelerazione come derivata della velocità, che può essere rilevata tramite il riferimento oppure il valore attuale.
- Gestione del movimento in jog di velocità: quando la macchina non è in produzione l'asse può essere movimentato con un riferimento di velocità indipendente dalla linea, generalmente utilizzato durante le fasi di preparazione dell'anima o della bobina; esso è espresso come riferimento periferico e rielaborato in base al diametro per ottenere il numero di giri del motore.

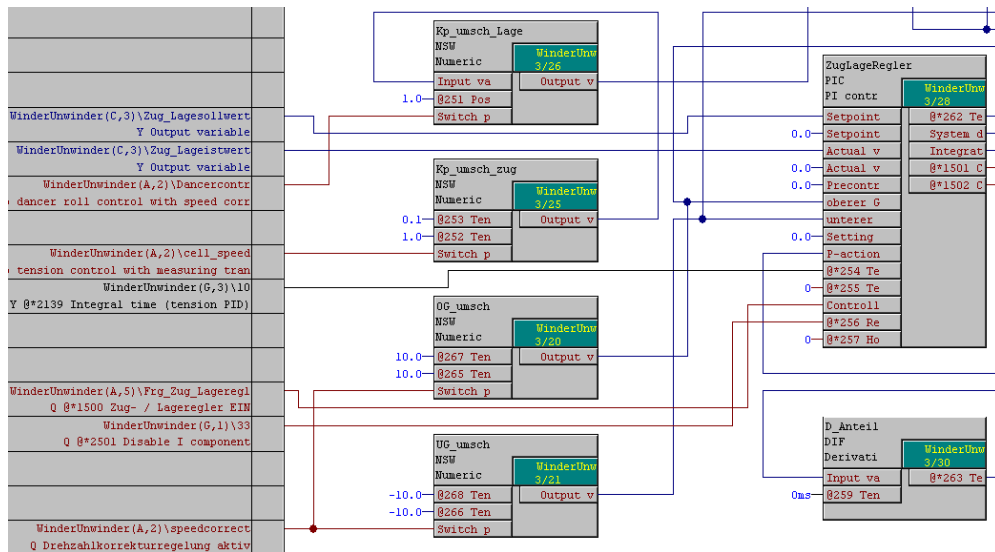


Figura 6.14 Schema a blocchi del regolatore PID per il controllo della tensione

Pur mantenendo l'intento di conservare la libreria il più possibile fedele alla versione originale sviluppata da Siemens, le funzioni disponibili sono state modificate per aumentare la flessibilità del sistema, per esempio collegando un numero maggiore di variabili al telegramma di comunicazione con il PLC. Considerata la complessità nella lettura degli algoritmi delle funzioni winder implementate mediante una programmazione con schemi a blocchi, una volta sviluppato il programma standard, si è cercato di agevolare il compito nello sviluppo di successivi progetti mantenendo il progetto chiuso e visualizzando solamente i parametri necessari per adattare le funzioni alle possibili soluzioni. È stato inoltre creato un documento per definire l'associazione dei parametri alle diverse funzioni e agevolare il programmatore nella loro individuazione secondo la numerazione assegnata da Siemens.

Oltre alle funzioni presenti nella libreria ne è stata implementata una aggiuntiva per eseguire il calcolo del diametro iniziale tramite lo spostamento del ballerino (§Cap.4.2): tramite i blocchi di programmazione vengono memorizzati gli impulsi dell'encoder in corrispondenza di due determinate posizioni del rullo mobile del danzatore, al 20% e al 40%, e calcolato poi il numero di giri effettuati dal motore durante tale spostamento. Si ottiene quindi il diametro come rapporto tra la distanza periferica e la rotazione angolare realizzati.

Tutte le funzioni descritte sono elaborate in un task di esecuzione a tempo fisso che, in base al carico della Control Unit, viene impostato a 4ms oppure 6ms, consentendo un aggiornamento dei valori estremamente rapido. L'unica limitazione sulle performance del sistema deriva dall'aggiornamento lento del riferimento di velocità della linea da parte del PLC che naturalmente influisce sui risultati del controllo della tensione e sul calcolo dell'accelerazione per la compensazione dei carichi.

6.3. Caso di studio: RCX-J/16

6.3.1. Descrizione della macchina

Nell'ambito dello sviluppo e del collaudo di progetti nella configurazione senza controllore dedicato agli azionamenti, un caso di studio significativo è stato quello della macchina RCX-J/16. Si tratta di una tagliaribobinatrice per bobine di grandi diametri, adatta a lavorare una varietà di materiali: film plastico, carta, cartone e laminati di carta e alluminio. È caratterizzata da un avvolgimento assiale-periferico a stazioni indipendenti, le cui bobine si sviluppano a contatto con un tamburo centrale di contrasto [16]. Può essere progettata con svolgitori singolo oppure con torretta per il cambio automatico delle bobine (Fig.6.15), con o senza un rullo di traino nella zona centrale e il sistema di automazione può essere implementato a seconda delle esigenze.

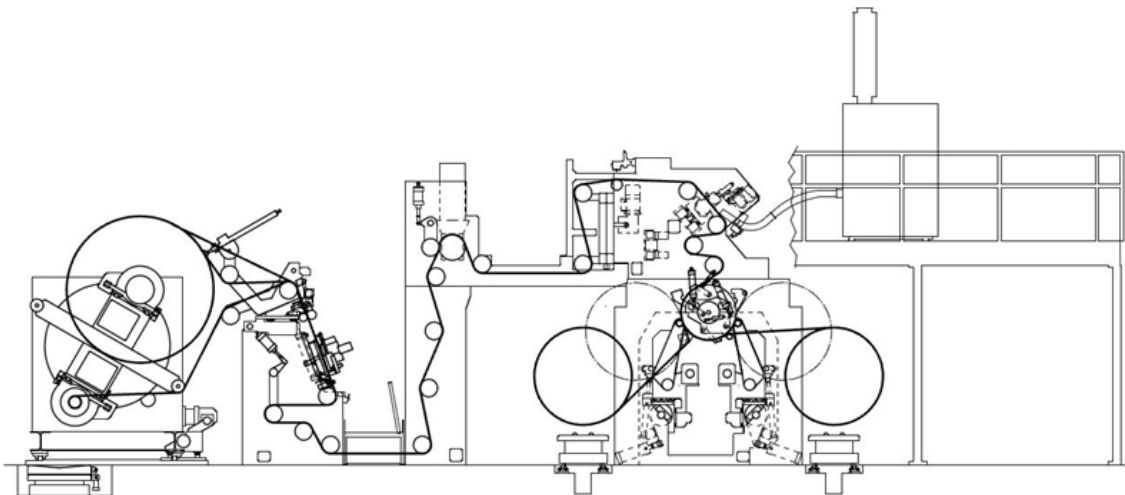


Figura 6.15 - Layout della tagliaribobinatrice RCX-J/16

La macchina sviluppata con il sistema di azionamenti Sinamics S120 possiede, oltre al tamburo di contrasto che funge da traino per gli avvolgitori, anche un rullo di traino nella zona intermedia e può quindi essere suddivisa in tre aree a tensione controllata:

1. Lo svolgitore possiede sull'asse due motori che, lavorando in ripartizione di coppia, permettono di movimentare bobine da 1800mm di diametro e 1650mm di larghezza. Il tiro del materiale, stabilito in un intervallo tra 400N e 2000N, è controllato tramite ballerino, azionato da membrane pneumatiche.

2. La zona centrale è compresa tra il traino intermedio e il tamburo di contrasto degli avvolgitori ed include celle di carico per il controllo della tensione, effettuata mediante una regolazione della velocità del traino intermedio.
3. Nella zona di avvolgimento sono presenti nove stazioni (Fig.6.16), suddivise tra lato interno ed esterno rispetto al tamburo di contrasto in modo che le bobine siano prodotte alternativamente sui due lati. Ogni stazione è dotata di un motore assiale, sul quale sono sviluppate bobine dalla larghezza massima 320mm e diametro 1200mm. La tensione sul materiale è controllata in anello aperto ed è impostata ad un valore massimo di circa 100N a diametro massimo.



Figura 6.16 - Stazioni di avvolgimento

La macchina è progettata per lavorare ad una velocità lineare massima di 1200m/min ed è dotata di sistemi automatici per il posizionamento del sistema di taglio e dello scarico delle bobine prodotte. Inoltre sono presenti due dispositivi per l'allineamento automatico del bordo del materiale ad una posizione fissa sulla larghezza della macchina.

6.3.2. Configurazione hardware

Il sistema di automazione è architettato in modo che il controllore centrale sia collegato a tutte le apparecchiature periferiche mediante due reti PROFIBUS distinte, configurate con velocità di trasmissione dati differenti (Fig.6.17). Al bus impostato a 1,5Mbit/s sono collegati i dispositivi collocati a bordo macchina: espansioni decentralizzate del PLC per la gestione di I/O, batterie pneumatiche per il comando di elettrovalvole, un termoregolatore, sensori per la lettura analogica di potenziometri lineari, la centralina per la gestione del sistema per il controllo del bordo del materiale e i pannelli operatore. La rete interna al quadro è invece configurata a 12Mbit/s ed è utilizzata per la comunicazione con gli azionamenti elettrici ed un display per la visualizzazione dei dati sul consumo elettrico.

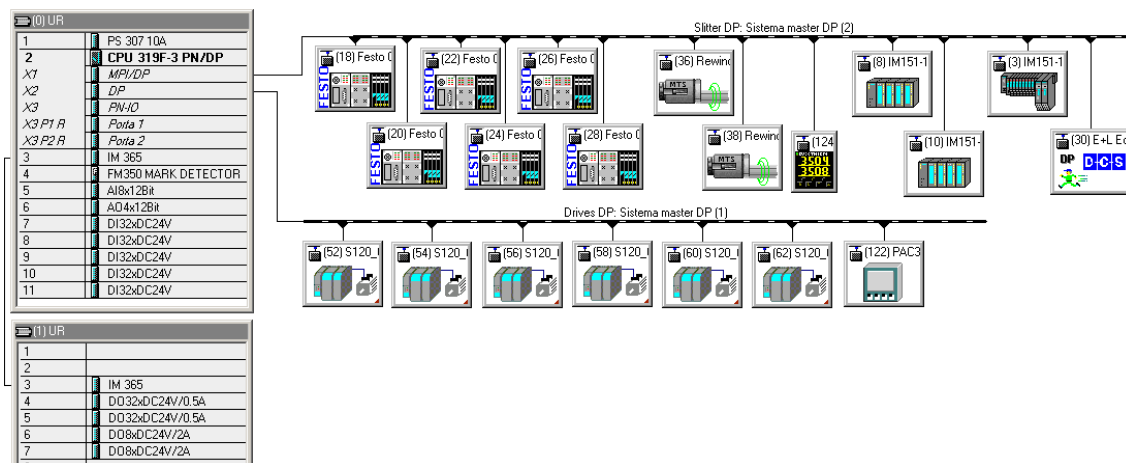


Figura 6.17 - Configurazione delle reti di comunicazione

In totale sono previsti 21 azionamenti elettrici, la cui gestione è suddivisa in 6 Control Units sulla base dell'analisi del carico di elaborazione che ciascuno richiede per il tipo di regolazione impostato, le funzioni aggiuntive abilitate e l'entità del programma dedicato. Poiché regole di progettazione indicate dal costruttore stabiliscono che ogni tipologia di configurazione di un azionamento sia associabile ad un punteggio e che la somma totale dei punteggi di dispositivi collegati alla stessa unità di controllo non debba superare un valore massimo, già in fase di preparazione dell'hardware è necessario definire le funzionalità e la classe di applicazione di ogni asse. In tal modo è stato possibile organizzare il sistema come riportato nelle seguenti tabelle.

Control Unit 1

Motore	Regolazione	Funzioni aggiuntive	Classe di applicazione
Svolgitore lato sx	vettoriale: Servo	Scheda analogica per ballerino	Winder
Svolgitore lato dx	vettoriale: Servo	-	Velocità con encoder
Traino intermedio	vettoriale: Servo	Scheda analogica per celle di carico	Winder
Tamburo avvolgimento	vettoriale: Servo	Safety: rilevamento velocità di sicurezza	Velocità con encoder

Control Unit 2

Motore	Regolazione	Funzioni aggiuntive	Classe di applicazione
Rotazione coltelli	vettoriale: Servo	-	Velocità con encoder
Posizionamento coltelli	vettoriale: Servo	Posizionatore semplice	Posizionatore
Posizionamento contro coltelli	vettoriale: Servo	Posizionatore semplice	Posizionatore
Avvolgitore 1	vettoriale: Servo	-	Winder

Control Unit 3

Motore	Regolazione	Funzioni aggiuntive	Classe di applicazione
Avvolgitore 2	vettoriale: Servo	-	Winder
Avvolgitore 3	vettoriale: Servo	-	Winder
Fotocellula guida bordo 1	vettoriale: Servo	Posizionatore semplice	Posizionatore
Fotocellula guida bordo 1	vettoriale: Servo	Posizionatore semplice	Posizionatore

Control Unit 4

Motore	Regolazione	Funzioni aggiuntive	Classe di applicazione
Avvolgitore 4	vettoriale: Servo	-	Winder
Avvolgitore 5	vettoriale: Servo	-	Winder
Carro scarico lato interno	scalare: v/f	Generatore rampa di velocità	Velocità senza encoder
Carro scarico lato esterno	scalare: v/f	Generatore rampa di velocità	Velocità senza encoder

Control Unit 5

Motore	Regolazione	Funzioni aggiuntive	Classe di applicazione
Avvolgitore 6	vettoriale: Servo	-	Winder
Avvolgitore 7	vettoriale: Servo	-	Winder
Timbratore per bobine scaricate	vettoriale: Servo	Posizionatore semplice	Posizionatore

Control Unit 6

Motore	Regolazione	Funzioni aggiuntive	Classe di applicazione
Avvolgitore 8	vettoriale: Servo	-	Winder
Avvolgitore 9	vettoriale: Servo	-	Winder

6.3.3. Programmazione degli azionamenti

Considerando la suddivisione della macchina in aree distinte a tensione controllata, si possono identificare tre differenti configurazioni delle funzioni winder: svolgitore, traino intermedio ed avvolgitore.

Lo svolgitore effettua un controllo del tiro in anello chiuso mediante ballerino. Il diametro viene calcolato mediante il rapporto tra gli integrali della velocità periferica e quella angolare, e viene impostato alla partenza mediante il valore ottenuto dal calcolo dello spostamento del danzatore. Una particolarità dell'asse riguarda la parametrizzazione della funzione legata al calcolo del diametro: poiché la macchina è stata testata per lavorare materiale accoppiato di carta e alluminio con spessore piuttosto significativo, compreso tra 200 μ m e 500 μ m, il cambiamento del diametro nell'intervallo di integrazione delle velocità è elevato; di conseguenza i parametri che limitano la variazione del diametro tra determinazioni consecutive, utili per evitare errori grossolani nel calcolo, che si possono verificare in particolare durante i gradienti di velocità, sono impostati a valori più ampi, a differenza della maggioranza dei materiali lavorati in macchine per Converting in cui, essendoci spessori piccoli, è importante impostare limiti più stringenti.

Caratteristica fondamentale è inoltre la presenza di due motori che operano in parallelo sui due lati della bobina: poiché entrambi devono essere movimentati necessariamente alla stessa

velocità per evitare la generazione di effetti di torsione sull'albero di collegamento, il programma per l'elaborazione delle funzioni winder è unico ed è implementato solo su uno dei due azionamenti. Il riferimento di velocità, risultante dalla somma dei contributi della velocità lineare della macchina e della correzione in uscita al regolatore di posizione del ballerino, rapportato al diametro della bobina, è trasmesso ad entrambi gli azionamenti simultaneamente con lo stesso valore. Invece il termine di coppia, che si ottiene dal calcolo dei carichi di inerzia, si ipotizza che possa essere suddiviso equamente tra i due motori ed è quindi moltiplicato per un fattore che dimezza il riferimento di coppia aggiuntiva all'uscita del regolatore di velocità (Fig.6.18).

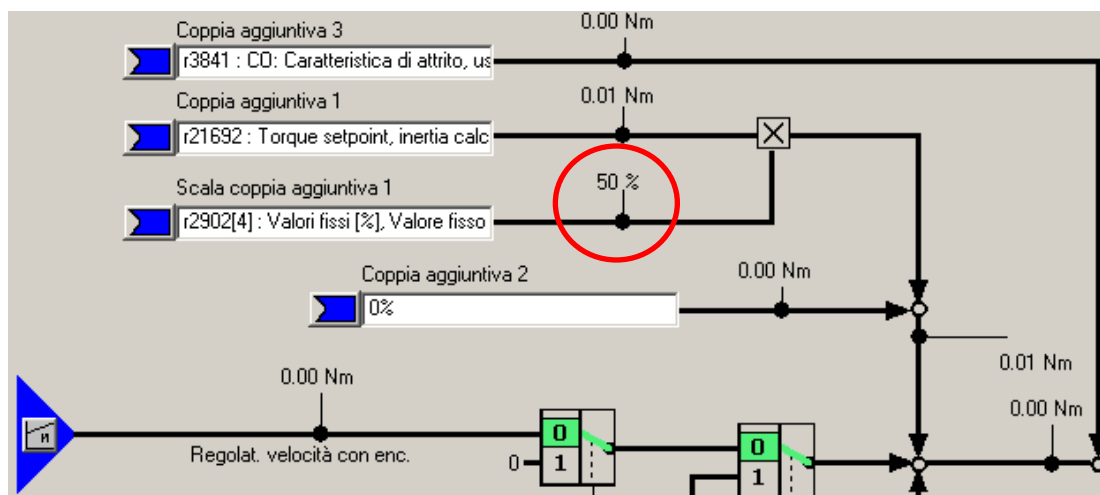


Figura 6.18 - Impostazione della coppia aggiuntiva negli azionamenti dello svolgitore

Nella zona centrale il controllo della tensione è affidato alla regolazione di velocità del traino intermedio mediante la valutazione dell'errore rilevato sulle celle di carico. La scelta di effettuare la correzione di velocità su tale asse e mantenere un riferimento fisso sul tamburo di avvolgimento è motivata dalla necessità di garantire un'alimentazione di materiale il più possibile costante sugli avvolgitori, i quali, operando in anello aperto, effettuano un controllo migliore se le loro condizioni di riferimento sono più stabili. Al contrario, il comportamento dello svolgitore non è eccessivamente penalizzato da una velocità di trascinamento variabile poiché il ballerino permette di compensare piccole e rapide oscillazioni del materiale. L'implementazione delle funzioni winder per il traino non ha richiesto l'attivazione del calcolo del diametro, che è fissato al valore di progetto del rullo; sono state invece attivate la regolazione PID della tensione e il calcolo per la compensazione dei carichi inerziali.

Ciascuno dei nove avvolgitori è dotato del programma per l'esecuzione delle funzioni winder e, poiché le caratteristiche meccaniche e di processo sono identiche, i parametri sono configurati con gli stessi valori. Analogamente allo svolgitore, il diametro è calcolato mediante il rapporto tra l'integrazione della velocità periferica e quella angolare, mentre l'impostazione del valore di partenza viene effettuata mediante la rilevazione della posizione delle leve di supporto delle bobine che, mediante azionamento oleodinamico, vengono poste in contatto contro il tamburo di contrasto. Il controllo della tensione in anello aperto permette di escludere l'abilitazione del regolatore PID, ma richiede una maggiore accuratezza nell'individuazione dei parametri per la stima dei carichi resistenti per attrito e inerzia, per effettuare un calcolo più preciso del limite di coppia.

Per tutti gli altri assi la configurazione dell'azionamento consiste nell'inserimento e nella compilazione del programma relativo alla corrispondente classe di applicazione, senza effettuare alcuna modifica; essi sono stati infatti sviluppati per essere chiusi in un progetto che, ricevendo i valori di ingresso dal telegramma del PLC ed abbinando automaticamente quelli in uscita ai parametri dell'azionamento, non necessita di alcuna ulteriore programmazione. Le specifiche applicazioni sono quindi configurate definendo i valori da assegnare ai parametri relativi alle funzioni aggiuntive abilitate per il posizionamento o la generazione della rampa di velocità.

Si prenda come esempio l'azionamento associato alla funzione del timbratore, che consiste in un asse lineare che permette di posizionare un timbro utilizzato per porre dei marchi sulle bobine in corrispondenza di difetti. Il motore è dotato di encoder incrementale che necessita di un ripristino ad ogni riaccensione del sistema elettronico; viene perciò configurata la funzione che effettua l'azzeramento dell'encoder, la quale prevede un movimento in velocità per la ricerca di un sensore esterno, l'inversione del movimento sul fronte positivo del segnale del sensore e l'arresto in corrispondenza di una tacca di zero interna all'encoder. La procedura viene configurata per stabilire le velocità e i sensi di marcia dei movimenti e per definire l'ingresso tramite il quale avviene la lettura del segnale esterno (Fig.6.19).

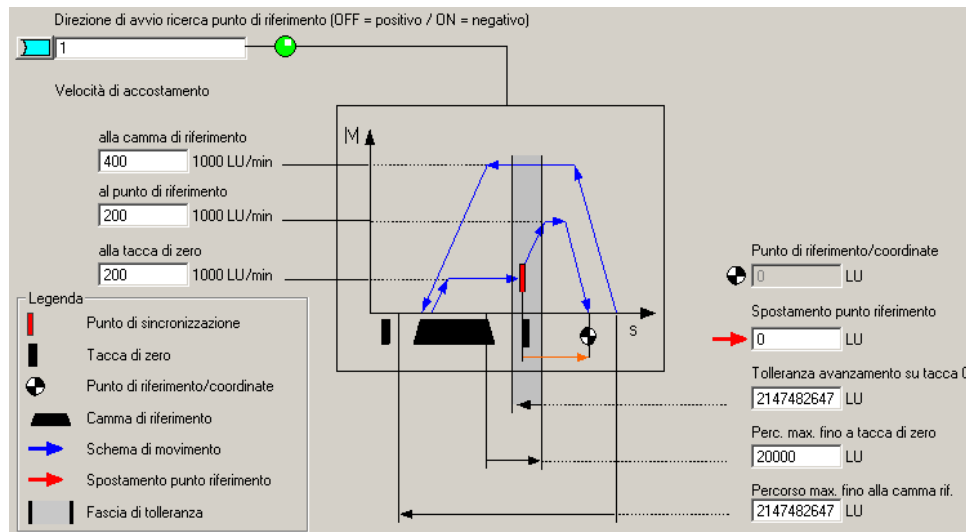


Figura 6.19 - Configurazione della ricerca del sensore di ripristino dell'encoder

Dell'asse viene definito il rapporto di trasmissione per determinare lo spazio percorso dal timbro per ogni giro del motore: a valle della trasmissione con rapporto 7:1 sono poste pulegge con sviluppo pari a 110mm.

Inoltre sono specificate le limitazioni sulla legge di moto per quanto riguarda posizione, velocità, accelerazione e jerk; in particolare l'impostazione delle posizioni limite dell'asse è effettuata sia mediante la definizione dei valori massimi stabiliti a livello software sia tramite la rilevazione dei segnali di finecorsa hardware, che garantiscono maggiore sicurezza nei movimenti in caso di anomalie dell'encoder.

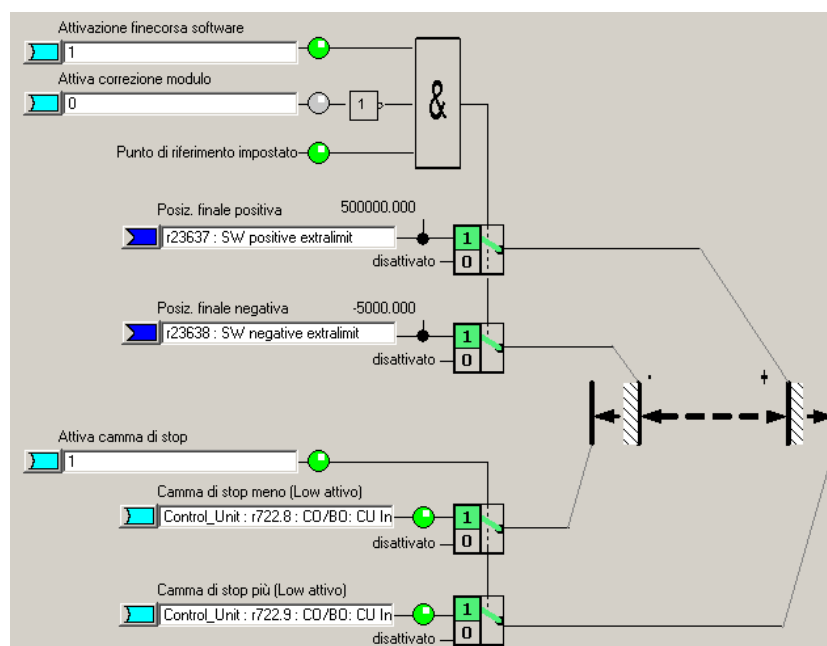


Figura 6.20 - Limitazioni di posizione dell'asse

7. IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA CON CONTROLLORE DEDICATO

7.1. Caratteristiche del controllore

7.1.1. Panoramica hardware

Il controllore di Motion Control preso in esame è prodotto da Siemens in tre varianti sviluppate su hardware dalla concezione notevolmente diversa (Fig.7.1):

- Il sistema Simotion P è costituito da un PC industriale con tecnologia Intel e sistema operativo Windows XP, sul quale è possibile utilizzare contemporaneamente le applicazioni Simotion ed i tipici eseguibili di un PC. È quindi adatto per applicazioni che richiedono compatibilità con l'universo del PC, per implementare per esempio funzioni di gestione, valutazione e registrazione dei dati.
- La variante C è caratterizzata da una tecnica costruttiva analoga a quella dei PLC Siemens s7-300, garantendo modularità delle schede I/O e di conteggio encoder, ed offre quindi una soluzione finalizzata alla fusione di Motion Control, funzionalità PLC e funzioni tecnologiche (regolazioni idrauliche e di temperatura).
- La versione D infine, utilizzata nelle macchine per Converting analizzate, è dedicata ad operare in associazione agli azionamenti elettrici ed è sviluppata a partire dalla famiglia Sinamics S120.



Figura 7.1 - Le tre varianti del controllore Simotion

Simotion D si compone del modulo di runtime Simotion e della regolazione azionamento Sinamics, il quale comanda e regola il raggruppamento assi mediante la scheda CU320 Integrated che, analogamente alla Control Unit già analizzata nel capitolo precedente, può essere collegata a diversi moduli azionamento Sinamics S120 (moduli Line e Motor) mediante interfaccia DRIVE-CLiQ. All'interno della famiglia D è necessario distinguere la variante D410 per le applicazioni monoasse e le versioni D4x5 per quelle multi asse, disponibili in tre classi di performance: D425 Basic, D435 Standard, D445 High (Fig.7.2). Dal punto di vista pratico quest'ultime si differenziano principalmente per il numero di assi controllabili e vengono scelte in base alle caratteristiche della macchina da progettare.

Apparecchio SIMOTION		D410	D425 / D435		D445
Memoria utente	Disco RAM per dati utente	17 MB	11 MB	23 MB	
	Memoria di lavoro (RAM utente)	25 MB	15 MB	30 MB	
	Variabili utente ritenitive (variabili Retain)	7 KB	320 KB		
Supporto memoria per dati utente ritenitivi: CompactFlash-Card (CF-Card)		512 MB			
Dimensione di memoria disponibile per l'utente sul supporto di memoria (memoria persistente)		300 MB			
Area indirizzi	Immagine di processo impostata in modo fisso per il BackgroundTask (variabili I/O)	64 byte			
	Immagine di processo progettabile supplementare per i task ciclici (variabili I/O)	sì			
	Area indirizzi I/O logica	16 KB			
	Area indirizzi I/O fisica per PROFIBUS (max. per ramo est. per ingressi/uscite rispettivamente)	1 KB			
	Area indirizzi I/O fisica per PROFINET (max. per ramo per ingressi/uscite rispettivamente)	4 KB			
	Area indirizzi per ciascuna stazione PROFIBUS DP	244 byte			
	Area indirizzi per ciascuna stazione PROFINET Device	1400 byte			
Oggetti tecnologici	Numero massimo assi	1	D425 = 16 D435 = 32	64	
	Regolazione azionamento integrata (in combinazione con SINAMICS S120); In D435 e D445 altri assi possibili mediante CX32	1 (Servo/Vector)	1 ... 6 (Servo) 1 ... 4 (Vector)		
	Numero di tastatori di misura (tastatore di misura onboard - per azionamenti integrati)	3	6		
	Uscite onboard per camme	4	8		
Clock e tempi	Clock PROFIBUS DP	2 ... 8 ms	D425 = 2 ... 8 D435 = 1 ... 8	1 ... 8 ms	
	Clock PROFINET	in passi di 0,125 ms: 0,5 ... 4 ms			
	Clock minimo del regolatore di posizione	2 ms	D425 = 2 ms D435 = 1 ms	0,5 ms	

Figura 7.2 - Caratteristiche del controllore Simotion

7.1.2. Funzionalità del sistema

Le funzionalità di Motion Control vengono eseguite mediante l'utilizzo di Oggetti Tecnologici (TO – Technological Objects), tools di sistema che permettono di gestire in un unico pacchetto tutte le variabili relative ad un singolo azionamento, encoder esterno, camma o tastatore di misura. Gli Oggetti Tecnologici del tipo Asse per esempio vengono configurati secondo le caratteristiche dell'asse da movimentare e possiedono tutti i dati rilevati a motore e sistema di misura perché collegati secondo canali preferenziali all'azionamento. Per ognuno di essi sono disponibili wizard e finestre di dialogo per la configurazione e i dati di processo sono accessibili nei programmi o nelle finestre I/O tramite la corrispondente istanza.

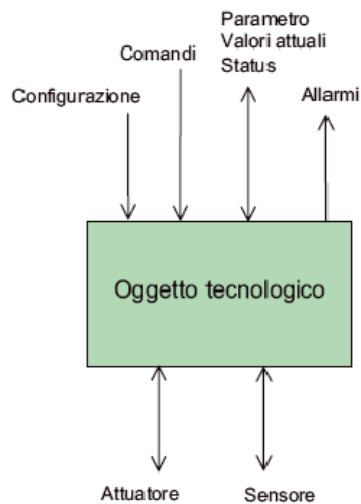


Figura 7.3 - Possibili interfacce verso gli oggetti tecnologici

A seconda delle applicazioni è possibile scegliere tra quattro diverse tipologie di Oggetti Tecnologici Asse:

1) A velocità impostata.

Viene utilizzato quando la posizione dell'asse non ha rilevanza; gli unici valori regolati e sorvegliati sono il numero di giri o la velocità dell'asse.

Può svolgere le seguenti funzioni:

- Impostazione del numero di giri secondo un generico profilo di velocità
- Avanzamento con limitazione di coppia

2) Di posizionamento.

È impiegato per definire, regolare e sorvegliare la posizione dell'asse. L'asse viene spostato in una posizione di destinazione programmata che può essere indicata in

modo relativo o assoluto. Può essere configurato mediante la definizione del modulo, che permette di stabilire un campo di movimento che si ripete in continuazione; ciò risulta particolarmente utile per esempio per assi rotanti aventi modulo 360°.

Oltre alle funzioni disponibili per gli assi a velocità impostata supporta:

- Impostazione della posizione secondo un generico profilo di velocità
- Avanzamento su riscontro fisso
- Ricerca del punto di riferimento o sincronizzazione dell'encoder

3) Sincrono.

Viene utilizzato per definire un valore di riferimento dell'asse da un Asse master, che genera in tal caso l'Oggetto Tecnologico Sincrono, in base a una regola di trasmissione. L'Oggetto Sincrono e l'Oggetto Asse slave sono distinti ma, una volta abbinati, generano un unico Asse sincrono. I due Oggetti si condizionano reciprocamente, sia per quanto riguarda i rispettivi stati operativi che per l'efficacia dei comandi: i guasti sull'Oggetto Tecnologico master hanno quindi ripercussioni immediate sulle funzionalità del sincronismo.

In aggiunta alle funzioni dell'asse di posizionamento sono disponibili:

- Cambio elettronico
- Sincronismo di camme elettroniche
- Sincronismo di velocità
- Sincronizzazione/disaccoppiamento dinamico

4) Vettoriale.

Viene impiegato per poter eseguire un percorso con almeno un ulteriore Asse Vettoriale sull'Oggetto Vettoriale. Gli Oggetti Tecnologici "Asse Vettoriale" e "Oggetto Vettoriale" si condizionano reciprocamente sia per quanto riguarda i rispettivi stati operativi sia per l'efficacia dei comandi: gli errori dell'Oggetto Tecnologico "Asse Vettoriale" hanno quindi ripercussioni immediate sulla generazione del movimento sull'Oggetto Vettoriale.

Oltre alle funzioni dell'asse di posizionamento supporta:

- Interpolazione vettoriale lineare
- Interpolazione vettoriale circolare
- Interpolazione vettoriale polinomiale

Funzione	Asse a velocità impostata	Asse di posizionamento	Asse sincrono	Asse vettoriale
Preimpostazione del numero di giri o della velocità	X	X	X	X
Avanzamento con limitazione di coppia	X	X	X	X
Spostamento secondo preimpostazioni sull'interfaccia MotionIn	X	X	X	X
Posizionamento		X	X	X
Avanzamento su riscontro fisso		X	X	X
Ricerca del punto di riferimento		X	X	X
Funzioni ampie				
Tastatore di misura		X	X	X
Camma		X	X	X
Traccia camma		X	X	X
Cambio elettronico			X	X
Sincronismo curve			X	X
Interpolazione vettoriale				X

Figura 7.4 - Panoramica delle funzioni degli assi

Tutti i tipi di Asse possono essere impostati come: elettrico, se associato ad un azionamento elettrico con interfaccia encoder, idraulico, se utilizzato per controllare un pistone con regolazione di pressione e/o portata, oppure virtuale. In quest'ultimo caso l'asse è dotato della funzione di generazione delle grandezze pilota, ma non dispone di regolazioni o di interfacce azionamento o encoder e, ovviamente, i valori di riferimento e i valori attuali sono sempre uguali; l'asse virtuale viene generalmente impostato come ausiliario, ad esempio per creare i valori di riferimento come asse master per più assi reali.

L'Oggetto Tecnologico Asse collegato ad azionamento elettrico digitale è predisposto alla comunicazione tramite i telegrammi standard PROFIdrive, attraverso reti PROFIBUS o PROFINET, disponibili nell'ambiente Sinamics S120 e già presentati nel precedente capitolo. Nell'atto della configurazione dell'Asse viene effettuato l'accoppiamento con l'azionamento mediante la definizione della tipologia di telegramma; di conseguenza tutti i comandi di controllo e di movimento, gli stati ed i valori attuali sono automaticamente connessi alle variabili di sistema dell'Oggetto Tecnologico ed accessibili all'utente tramite programmi. Sono inoltre disponibili i collegamenti ad eventuali espansioni dei telegrammi standard, contenenti dati per il controllo di coppia e informazioni sullo stato delle funzioni di sicurezza dell'azionamento.

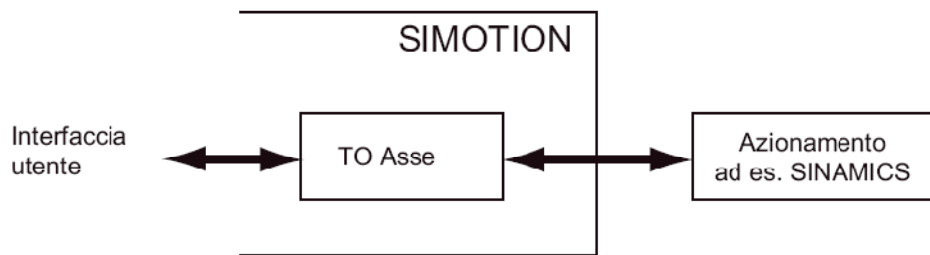


Figura 7.5 - Interfaccia tra controllore e azionamenti

A differenza del sistema di automazione senza controllore dedicato agli azionamenti, con la presenza di Simotion, il quale si fa carico dell'elaborazione delle funzioni specifiche per le varie applicazioni, non è necessario trasmettere agli azionamenti tutti i dati riguardanti il processo di lavorazione ma soltanto le informazioni strettamente relative ai regolatori interni. I telegrammi sono perciò configurati nel modo più semplice possibile secondo le definizioni standard già predisposte.

È necessario però implementare un servizio di comunicazione aggiuntivo piuttosto articolato tra Simotion e PLC per la trasmissione dei dati di processo e di tutti i parametri specifici per il funzionamento di ogni asse. Il sistema di comunicazione può essere architettato a piacimento rispettando i limiti del Fieldbus in uso, PROFIBUS o PROFINET, ed attivato mediante le funzioni di sistema disponibili.

7.1.3. Programmazione del controllore

Le funzioni di controllo vengono implementate nel programma utente, all'interno del quale, indipendentemente dalla piattaforma hardware, possono venire realizzati PLC, Motion Control e tecnologia. In un progetto possono essere utilizzati programmi creati con i seguenti linguaggi di programmazione:

- Linguaggio MCC (Motion Control Chart): consente una programmazione mediante diagrammi di flusso utili per la definizione di una procedura a stati. È dotato di blocchi per la gestione degli azionamenti, come per esempio l'abilitazione del motore o l'avviamento di posizionamenti parametrizzabili, facilitando l'implementazione di sequenze di movimento (Fig.7.6).

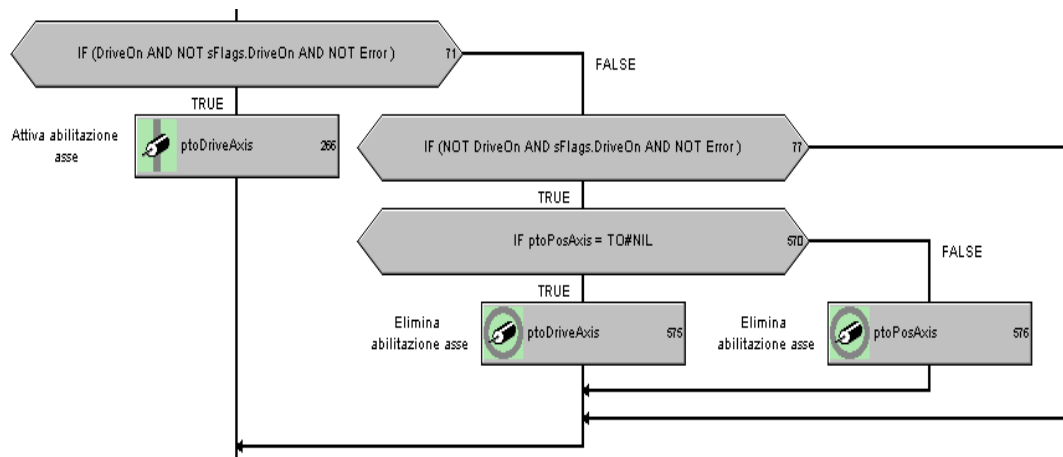


Figura 7.6 - Esempio di linguaggio MCC

- Linguaggio ST (Structured Text): è un linguaggio ad alto livello conforme a IEC 61131-3 orientato al PASCAL. Favorisce l'elaborazione di dati e la scrittura di calcoli matematici, garantendo una grande libertà di programmazione (Fig.7.7).

```

644 IF (enable_E_stop AND NOT E_stop_on) OR (enable_Q_stop AND NOT Q_stop_on)
645 IF enable_E_stop THEN
646     Total_Ramp_Time := Setpoint_E_Stop_time;
647     E_stop_on       := TRUE;
648     Q_stop_on       := TRUE;
649     N_stop_on       := TRUE;
650     Actual_stop_activated := 1;
651
652 ELSIF enable_Q_stop AND NOT E_stop_on THEN
653     Total_Ramp_Time := SetPoint_Q_Stop_time;
654     Q_stop_on       := TRUE;
655     N_stop_on       := TRUE;
656     Actual_stop_activated := 2;
657
658 ELSIF enable_N_stop AND NOT E_stop_on AND NOT Q_stop_on THEN
659     Total_Ramp_Time := SetPoint_N_Ramp_time;
660     N_stop_on       := TRUE;
661     Actual_stop_activated := 4;
662
663 END_IF;
664 Speed_Rfgjerk := 0.0;
665 Activated_stop := TRUE;

```

Figura 7.7 - Esempio di linguaggio ST

- Schemi logici FUP e a contatti KOP: sono linguaggi di programmazione grafici conformi a IEC 61131-3 che permettono di descrivere un flusso di segnale tra bande di corrente attraverso ingressi, uscite e operazioni basate sulle regole della logica booleana (Fig.7.8).

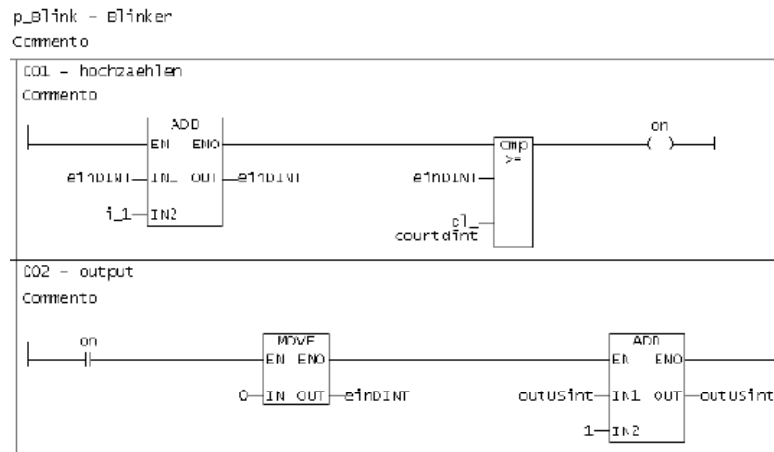


Figura 7.8 - Esempio di linguaggio KOP

- Diagramma DCC (Drive Control Chart): analogamente al linguaggio di programmazione disponibile negli azionamenti Sinamics S120, consiste in una programmazione di tipo grafico a blocchi, selezionabili da una libreria che mette a disposizione funzioni logiche, matematiche o tecnologiche, come per esempio regolatori PI. L'elaborazione di una Drive Control Chart è possibile attraverso un Editor DCC esterno (Fig.7.9).

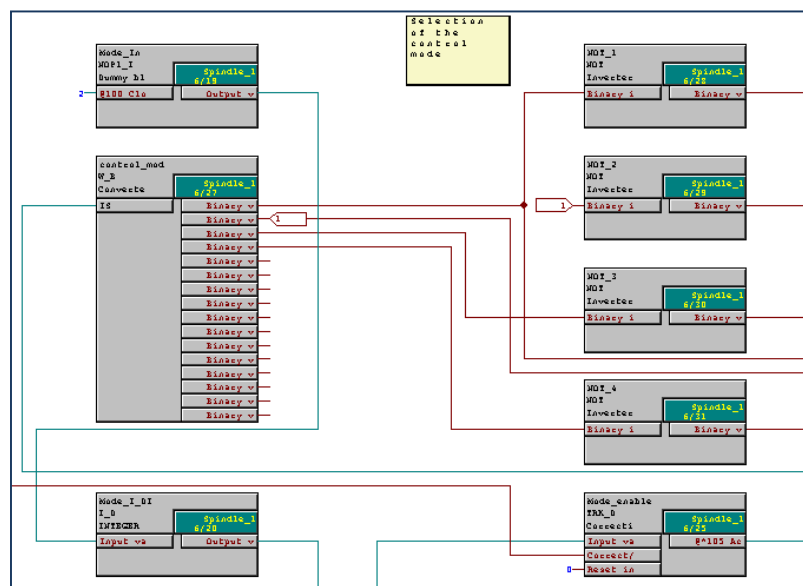


Figura 7.9 - Esempio di linguaggio DCC

Il sistema esecutivo Simotion mette a disposizione diversi task per l'elaborazione dei programmi utente, differenziando quindi la priorità di esecuzione, il comportamento di esecuzione (sequenziale/ciclico) e l'inizializzazione delle variabili. È possibile assegnare uno o più programmi utente a ogni task e definire al suo interno le relative sequenze; in particolare

se ad un task sono associati più programmi, l'esecuzione del primo deve essere terminata affinché possa essere avviato il programma successivo. I task disponibili per l'esecuzione dei programmi utente sono:

- **Startup Task:** viene eseguito un'unica volta al passaggio dallo stato operativo STOP o STOPU a RUN. Questo task serve per le inizializzazioni e il ripristino degli Oggetti Tecnologici.
- **Motion Tasks:** sono avviati dai programmi utente ed eseguiti una sola volta. Sono concepiti per la programmazione di processi, per il comando del movimento programmato o per altre elaborazioni sequenziali.
- **Background Task:** viene avviato dopo lo Startup Task ed è elaborato ciclicamente in modo indipendente. È concepito per la programmazione di processi ciclici senza griglia temporale fissa.
- **Task temporizzati:** sono richiamati ciclicamente in una determinata griglia temporale e riavviati automaticamente dopo l'esecuzione dei programmi assegnati.
- **Task comandati su eventi:** sono eseguiti una sola volta al verificarsi di un evento e poi terminati.
- **Shutdown Task:** viene eseguito solo durante il passaggio dallo stato operativo RUN a STOP o STOPU.

Sono definiti indipendenti i Motion Tasks e il Background Task poiché elaborati nel tempo residuo dopo l'elaborazione dei task utente a priorità maggiore, ossia quelli temporizzati o ad interrupt. La suddivisione del tempo tra i task indipendenti avviene con la procedura Round-Robin: negli intervalli in cui non sono elaborati i task prioritari, i Motion Tasks e il Background Task sono eseguiti ciclicamente ed il passaggio tra di loro avviene se sopraggiunge una condizione di attesa, se il task è terminato (entrambe le condizioni possono verificarsi solo per i Motion Tasks) oppure se richiedono un tempo di esecuzione maggiore di un limite impostato dal sistema.

Accanto ai task del programma utente sono presenti anche diversi task di sistema, il cui contenuto e la cui sequenza esecutiva non possono essere modificati dall'utente. I task di sistema svolgono i seguenti compiti:

- **Comunicazione:** task di sistema per il collegamento con un PROFIBUS equidistante, con PROFINET IO con IRT o con il clock di sistema e per l'elaborazione della periferia.

- Controllo del movimento (Motion Control):
 - Clock di base / clock del bus
Il clock del bus (clock DP o clock PN) si ottiene dal ciclo del bus a sincronismo di clock e definisce le distanze temporali con cui deve avvenire lo scambio di dati con la periferia DP/PN. Il clock di base/clock del bus viene utilizzato come base per l'impostazione degli altri clock.
 - Clock servo
Nel segmento temporale del clock servo avvengono tra le altre cose la regolazione della posizione e i monitoraggi degli assi, la comunicazione con l'azionamento e l'elaborazione della periferia. Il ciclo del clock servo determina la distanza temporale tra due clock del regolatore di posizione. Il clock servo può essere impostato come multiplo del clock di base/clock del bus ed il rapporto di clock tipicamente è 1:1.
 - Clock IPO
Il segmento temporale del clock dell'interpolatore serve tra l'altro a calcolare le grandezze pilota. Il ciclo del clock dell'interpolatore determina la distanza temporale tra due clock dell'interpolatore. All'avvio di uno o più job può essere necessario un tempo maggiore per questo segmento temporale. Il clock IPO può essere impostato come multiplo del clock servo ed il rapporto di clock tipicamente è 1:1.
 - Clock 2 IPO2
Il clock dell'interpolatore 2 svolge le stesse funzioni del clock dell'interpolatore e può essere utilizzato per oggetti tecnologici con priorità inferiore. Il clock IPO2 può essere impostato come multiplo del clock IPO.

Rapporti di trasmissione regolabili fra Bus Task, Servo e IPO consentono una distribuzione dei carichi ragionevole e un utilizzo del sistema ottimale.

7.2. Sviluppo del progetto

7.2.1. Organizzazione del progetto

La struttura del progetto sviluppato nel software di lavoro del controllore Simotion è stata ideata con l'obiettivo di ottenere un programma flessibile che potesse essere adattato facilmente alle varie applicazioni presenti nelle macchine per Converting e di agevolare il compito dei tecnici nelle fasi di sviluppo di nuove commesse e debug dei programmi.

Con tale proposito sono state individuate le seguenti funzionalità necessarie alla creazione del progetto:

- Elaborazione del riferimento di velocità: per effettuare il coordinamento dei motori della linea viene elaborato il riferimento di velocità impostato tramite PLC, generando la corretta legge di moto in base alle situazioni di funzionamento della macchina ed eseguendo una logica di controllo per verificare le condizioni di arresto.
- Gestione delle applicazioni specifiche degli assi: per ognuno è necessario implementare una gestione dello stato del motore e del comando dei movimenti, verificando le condizioni di lavoro mediante una continua diagnostica. In base alla tipologia di asse vengono attivati specifici comandi e controlli; per esempio per gli avvolgitori è inserita la gestione delle funzioni winder.
- Funzioni complementari al processo di lavoro: sono funzioni indispensabili per il funzionamento degli azionamenti, come per esempio il controllo del convertitore AC/DC comune, e la gestione della comunicazione tra Simotion e PLC.

Sulla base di tali considerazioni si è cercato di organizzare la struttura del progetto intorno a blocchi funzionali che potessero fungere da capisaldi per lo sviluppo di tutte le commesse. In particolare la gestione dei singoli assi è stata realizzata creando funzioni parametrizzabili che potessero coprire la gamma di operazioni utili per le diverse tipologie di applicazioni; analogamente a quanto effettuato per i programmi negli azionamenti Sinamics S120, sono state suddivise quattro classi di azionamenti, in modo da distinguere: assi winder, motori con encoder controllati in velocità, motori senza encoder e posizionatori.

Inoltre, con l'obiettivo di garantire una maggiore flessibilità, il progetto è organizzato in modo da racchiudere la gestione di ogni asse all'interno di una sola scheda di programmazione, nella quale sono presenti la dichiarazione delle variabili e il richiamo delle funzioni corrispondenti solo allo specifico azionamento. Ciò agevola innanzitutto la creazione di nuovi progetti poiché,

a seconda dell'entità del sistema di automazione, viene aggiunto un numero di schede pari alla quantità di assi da controllare; inoltre sono facilitate le operazioni di debug poiché all'interno di ognuna si possono individuare solamente i parametri relativi ad un determinato azionamento.

La costruzione del progetto si è fondata sull'utilizzo di alcune librerie standard messe a disposizione da Siemens, impiegate per esempio per il controllo del convertitore oppure per l'attivazione dei comandi di movimento degli assi. Tali programmi, non essendo generati per un'applicazione specifica, prevedono un'ampia gamma di varianti della stessa funzione e, mediante la loro parametrizzazione, si è potuto ottenere la versatilità ricercata. L'utilizzo delle librerie Siemens ha consentito di cominciare nella stesura dei programmi da una base già collaudata e documentata, anche se durante l'evoluzione del progetto c'è stata comunque la necessità di apportare al loro interno qualche modifica per adattarle alle necessità di impiego.

La scelta del linguaggio di programmazione è stata effettuata in base all'esigenza. Nella maggior parte dei casi è stato impiegato il linguaggio ST poiché più flessibile ed adatto per la gestione di dati ed operazioni matematiche. Per alcune funzioni è stato però adottato il linguaggio MCC, in generale più semplice e comprensibile; in particolare è risultato utile per l'implementazione di operazioni sequenziali, ben rappresentate mediante linguaggio a blocchi. Non è stato invece necessario l'utilizzo del linguaggio a contatti poiché la logica per la gestione di sensori o comandi digitali per azionamenti pneumatici e oleodinamici è effettuata interamente nel PLC.

7.2.2. Descrizione delle funzioni

Elaborazione del riferimento di velocità

Il progetto è stato sviluppato a cominciare dalla funzione che elabora la velocità, impostata nel pannello operatore e trasmessa al controllore dal PLC, per generare il riferimento per tutti gli assi appartenenti alla linea di produzione. Poiché essa permette di effettuare il coordinamento tra i motori viene richiamata nel task temporizzato più rapido, generalmente impostato a 3ms, in modo da garantire il comportamento ottimale di sincronismo degli assi.

Il blocco si compone di tre parti principali, visualizzate nel diagramma di Fig.7.10 dall'alto al basso: l'aggiornamento dei contatori del metraggio di materiale lavorato, il controllo delle condizioni per l'arresto della macchina e la generazione di rampa per raggiungere il riferimento di velocità.

Come visualizzato nella parte superiore del grafico, sono previsti tre distinti contatori della quantità di materiale lavorato: totale giornaliero (Trip_counter), relativo allo svolgitore (Metercount_Unw) e all'avvolgitore (Metercount_Rew). Essi vengono aggiornati con la posizione rilevata mediante l'encoder montato sul motore del traino (o eventualmente con un encoder montato su un rullo folle, se non è presente il traino), poiché è garantito che il suo spostamento periferico rileva esattamente la quantità di materiale in avanzamento. Il contatore giornaliero esegue un conteggio progressivo dei metri di materiale che percorrono la macchina: il calcolo è eseguito come la differenza tra la posizione attuale ed il valore memorizzato all'ultimo ripristino del conteggio; il valore ottenuto è utilizzato come dato di produzione visualizzato sul pannello di lavoro. I contatori di svolgitore e avvolgitore eseguono invece un conto alla rovescia rispetto ad un valore di riferimento che rappresenta il target di produzione al quale arrestare la macchina; l'aggiornamento del valore viene effettuato solamente durante la marcia della linea e a condizione che sia abilitata la funzione di controllo per l'arresto al raggiungimento dei metri lavorati.

Il settore intermedio del grafico è relativo alle verifiche sulla presenza delle condizioni che comportano una modifica del riferimento di velocità. Le condizioni sono controllate in ordine di priorità e possono essere distinte in tre categorie: richiesta di arresto comandata attraverso pulsantiera, controllo delle condizioni di fermata per il raggiungimento di un target di produzione oppure il cambiamento del riferimento di velocità impostato sul pannello operatore.

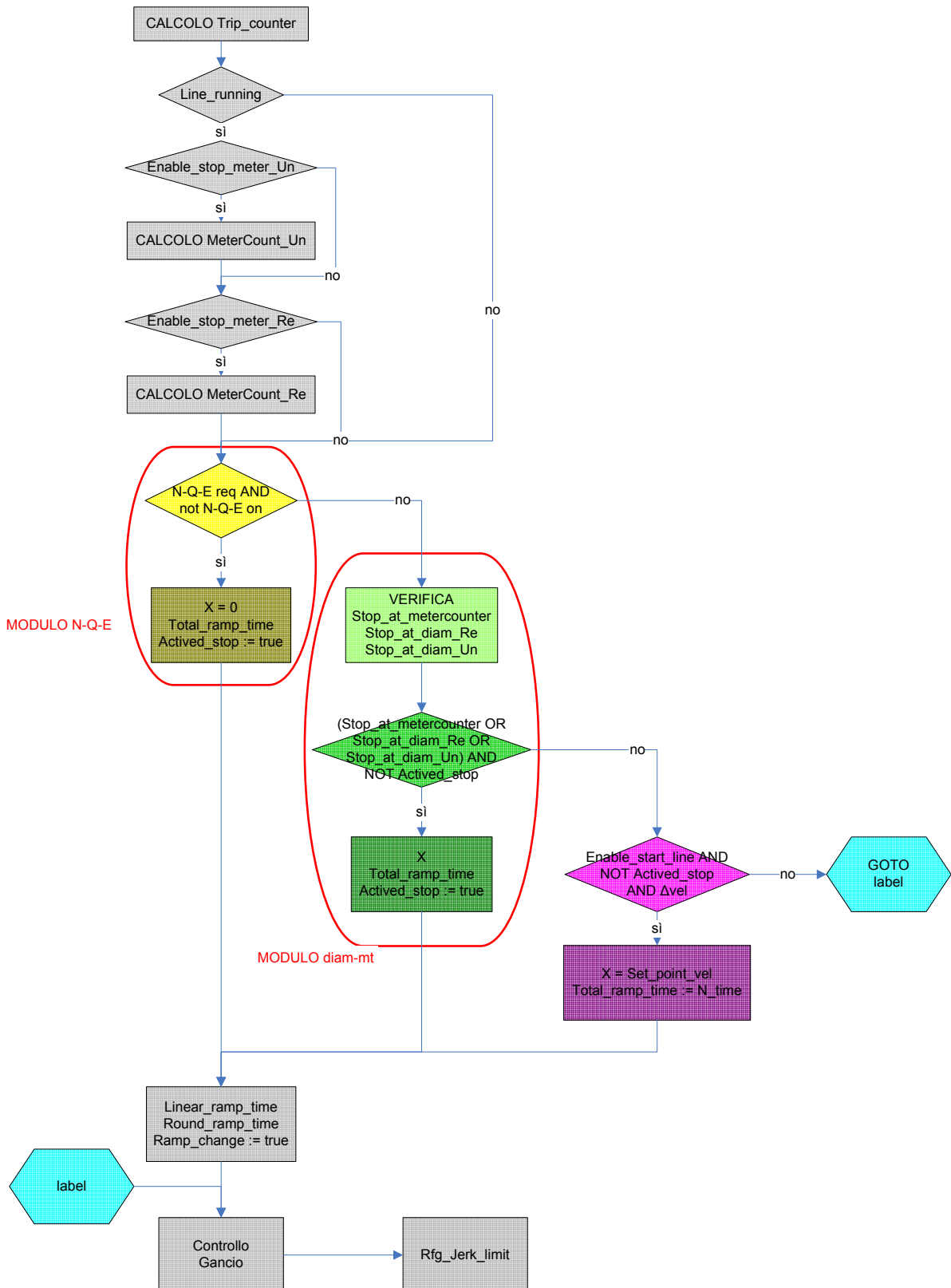


Figura 7.10 - Rappresentazione grafica del blocco per la generazione del riferimento di velocità

Innanzitutto viene verificato se è attiva una richiesta di arresto tramite pulsantiera, garantendo anche in questo caso l'ordine di priorità: emergenza (Enable_E_Stop), arresto rapido (Enable_Q_Stop) e normale (Enable_N_Stop). In Fig.7.11 è visualizzato un dettaglio dello schema generale di Fig.7.10 relativo agli arresti comandati, in cui si può osservare che in seguito a tali condizioni viene impostato a zero il riferimento di velocità e determinato l'opportuno tempo di decelerazione; sono inoltre attivate le segnalazioni di arresto in corso sia mediante un segnale binario (Activated_stop) sia tramite una word (Actual_stop_activated) che permette di definire la tipologia di condizione verificata.

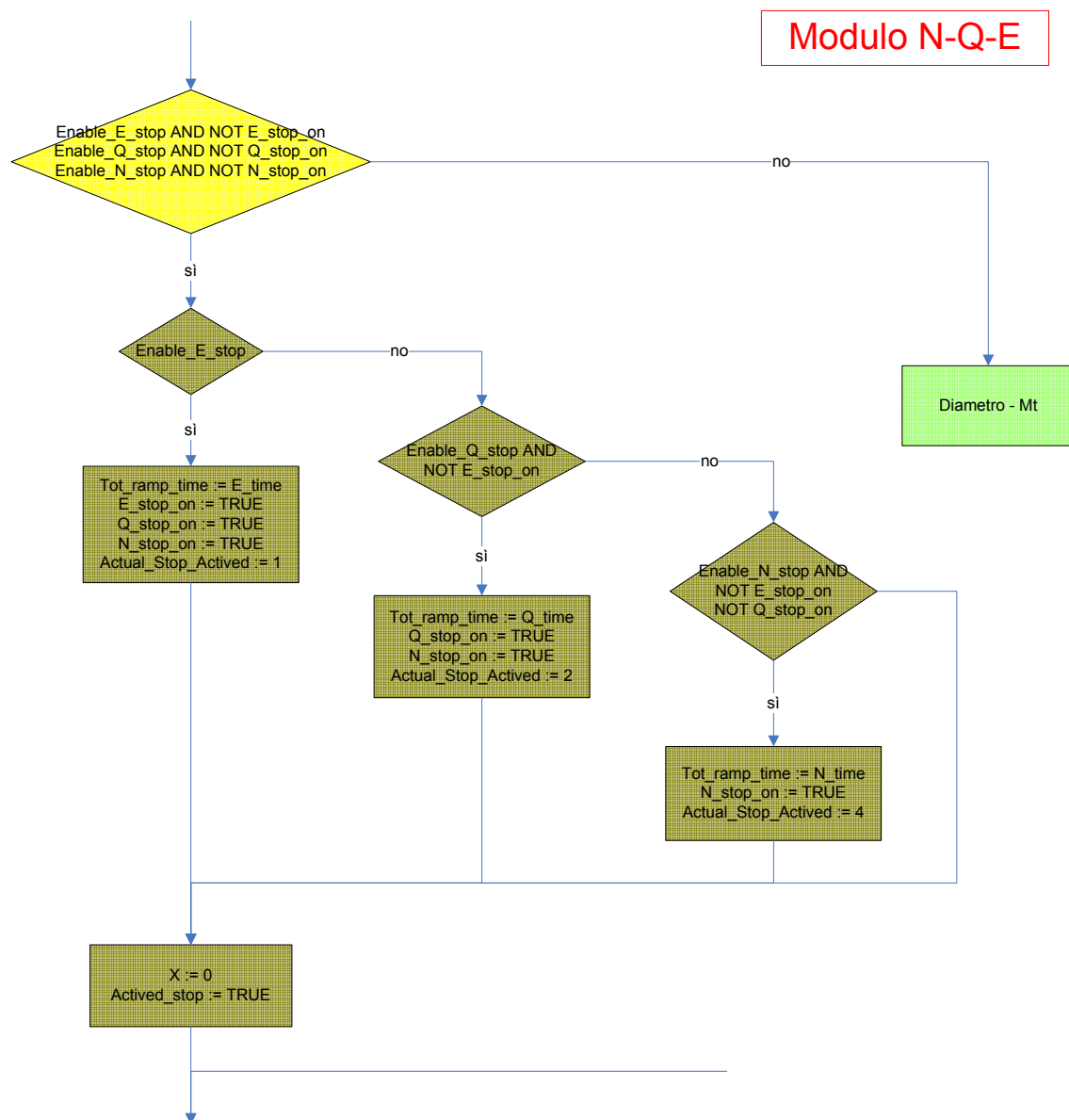


Figura 7.11 - Dettaglio relativo agli arresti comandati da pulsantiera

Se non c'è alcuna richiesta di arresto da pulsantiera sono verificate le condizioni per il raggiungimento dei target di produzione (Fig.7.12): metraggio di materiale e target di diametro su svolgitore o avvolgitore. Inoltre viene controllato l'avvicinamento ai valori limite del diametro: massimo per l'avvolgitore, per evitare il superamento dei limiti imposti nella progettazione meccanica dell'asse, e minimo per lo svolgitore, in modo da arrestare la macchina prima dello strappo del materiale in corrispondenza dell'anima.

La verifica di tali condizioni consiste nel confronto tra i metri necessari per l'arresto e lo spazio residuo per il raggiungimento del target. Considerando la velocità istantanea della macchina V_{att} [m/min] e il tempo N_{time} [sec] per l'arresto normale dalla velocità massima V_{max} [m/min], la distanza di arresto (*braking_length*) è calcolata come:

$$braking_length = \frac{\frac{V_{att}}{60} \cdot \left(N_{time} \cdot \frac{V_{att}}{V_{max}} \right)}{2} [m]$$

Per la verifica del target a metri tale valore è confrontato con il conteggio di materiale lavorato su svolgitore o avvolgitore. Il controllo della condizione di raggiungimento del diametro è invece effettuato mediante il confronto con lo spazio residuo calcolato mediante il diametro attuale d_{att} , il target $d_{setpoint}$ e lo spessore del materiale:

$$Spazio\ residuo = \frac{\pi \cdot (d_{att}^2 - d_{setpoint}^2)}{4 \cdot spessore}$$

Se la condizione è verificata vengono impostati i segnali che indicano l'attivazione dell'arresto ed è determinato il nuovo riferimento di velocità, il quale viene azzerato per tutte le casistiche citate tranne il caso in cui sia raggiunto il diametro minimo dello svolgitore. In tal caso infatti la velocità viene impostata al valore minimo per permettere di sfruttare tutto il materiale presente sulla bobina e lasciare all'operatore l'incarico di arrestare il movimento per evitare lo strappo del materiale. Viene inoltre calcolato il tempo di decelerazione, il quale viene calcolato tenendo conto dello spazio residuo all'arresto:

$$Tempo_{rampa} = \frac{2 \cdot Spazio}{\left(\frac{Velocità_{attuale}}{60} \right)} \cdot \left(\frac{Velocità_{max}}{Velocità_{setpoint} - Velocità_{attuale}} \right)$$

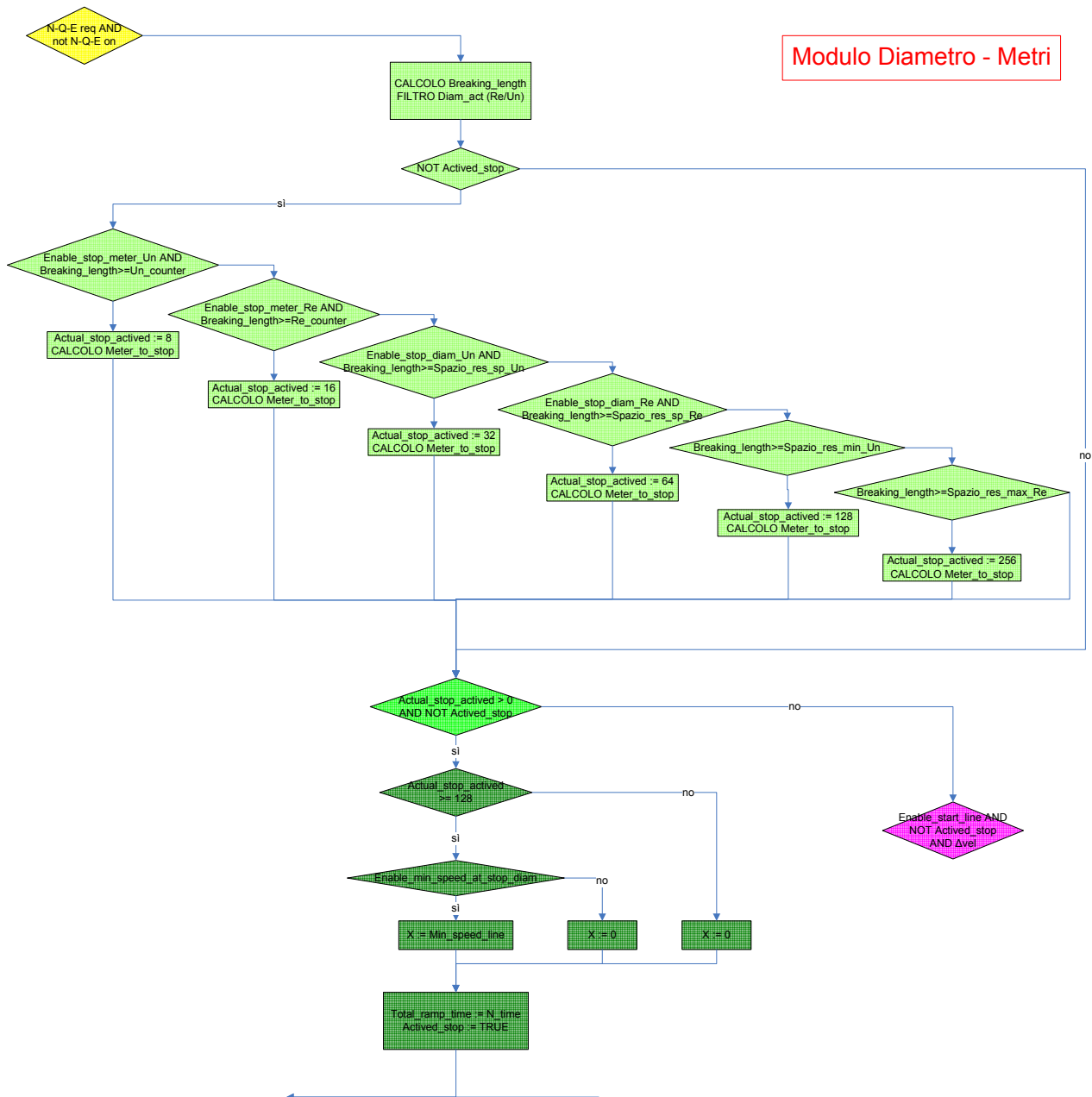


Figura 7.12 - Dettaglio relativo agli arresti comandati da pulsantiera

Se non si è verificata alcuna condizione di arresto viene controllato se è stato modificato il riferimento di velocità; in tal caso il nuovo valore è impostato come target da raggiungere e stabilendo un tempo di rampa pari a quello di arresto normale.

In seguito viene effettuato il controllo sulla compatibilità del riferimento di velocità rispetto al numero di giri massimo ammissibile sui motori di svolgitore ed avvolgitore stabilito in fase di progetto. La velocità della linea viene quindi limitata al valore massimo raggiungibile dagli assi

V_{max} considerando il diametro attuale di lavoro d_{att} , la rotazione massima rpm_{max} ed il rapporto di trasmissione τ :

$$V_{max} = \frac{rpm_{max} \cdot \pi \cdot d_{att}}{\tau}$$

Ottenuti tutti i dati utili per la costruzione della legge di moto viene richiamata una funzione, creata da Siemens e opportunamente modificata, per eseguire la generazione di rampa di velocità. In uscita dal blocco sono resi disponibili il valore di velocità istantaneo, trasmesso come riferimento per gli azionamenti della linea, e l'accelerazione, utilizzata per il calcolo dei carichi inerziali degli assi winder.

Gestione delle applicazioni specifiche degli assi

Indipendentemente dalla tipologia di applicazione dell'azionamento i programmi dedicati ai singoli assi sono organizzati mediante il richiamo di tre funzioni che svolgono le seguenti operazioni:

- Gestione del modo di funzionamento dell'asse
- Esecuzione dei comandi di movimento
- Diagnostica per il controllo di guasti dell'azionamento

Tali funzioni sono richiamate nel Background Task poiché non richiedono la priorità massima di esecuzione. Una volta comandato il movimento infatti il sistema esegue automaticamente l'interpolazione per realizzare la legge di moto in un Task temporizzato, dedicato a tale funzione con elaborazione a 3ms.

Solamente per svolgitori e avvolgitori viene aggiunto un ulteriore blocco, specifico per le funzioni winder, elaborato in task ciclico rapido (§Cap.7.2.3).

La gestione dei modi di funzionamento è eseguita con programmi dedicati alla classe di applicazione dell'azionamento. Sono stati creati quattro programmi in linguaggio MCC per distinguere la gestione degli assi winder, in velocità appartenenti alla linea, in velocità senza encoder e posizionatori. Lo schema generale dei quattro programmi è identico: indipendentemente dalla funzione dell'azionamento, il modo operativo è selezionato tramite un byte di comando proveniente dal PLC. Per ogni suo valore è associata una tipologia di

movimento e, per ciascuna, è stato creato un modulo (Fig.7.13) all'interno del quale vengono eseguiti in sequenza i seguenti comandi:

- 1) abilitazione del motore
- 2) acquisizione dei parametri per il movimento
- 3) comando di attivazione di un determinato movimento

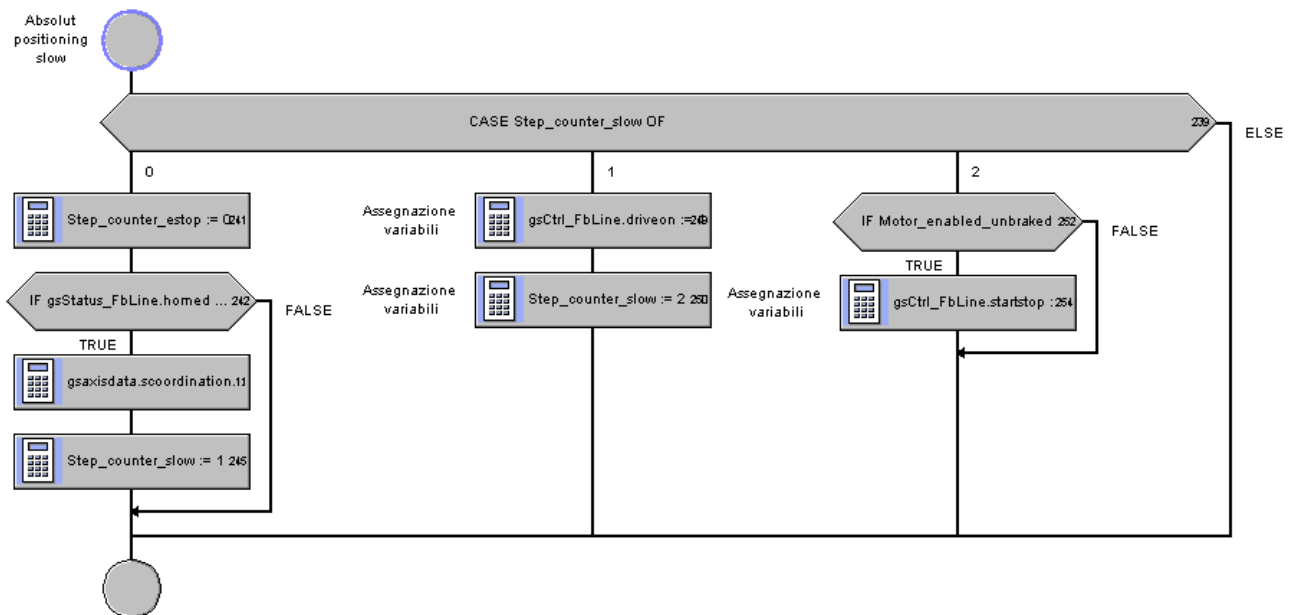


Figura 7.13 - Esempio di modulo per l'impostazione dei comandi di movimento

Quando il byte di comando è azzerato viene eseguita una sequenza di arresto del motore:

- 1) decelerazione dell'asse
- 2) disattivazione del comando di movimento
- 3) disabilitazione del motore

A seconda della classe di applicazione dell'asse i significati associati ai valori del byte di comando cambiano. I modi operativi implementati per gli assi winder sono (Fig.7.14):

- 1 Run: il motore segue il master di linea eseguendo il controllo del tiro
- 8 Jog avanti: movimento in velocità in direzione positiva senza controllo del tiro
- 16 Jog indietro: movimento in velocità in direzione negativa senza controllo del tiro
- 32 Shaft homing: sequenza di jog e arresto controllato rispetto ad una posizione angolare definita.

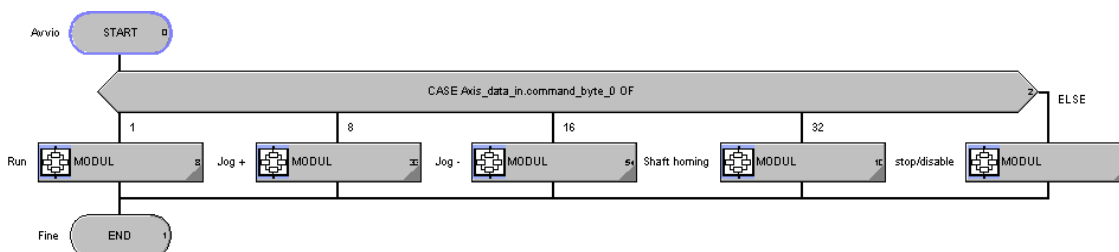


Figura 7.14 - Selezione del modo operativo dell'asse winder tramite byte di comando

Per tutti gli altri assi appartenenti alla linea sono comandati movimenti in velocità per seguire il riferimento comune. Sono previsti due modi operativi per distinguere due situazioni di funzionamento della macchina differenti:

- 1 Marcia automatica: il motore segue il riferimento di velocità ottenuto mediante generazione della legge di moto analizzata in precedenza
- 8 Jog: modalità comandata tramite pedaliera dall'operatore, utilizzata nelle fasi di preparazione del materiale nella macchina, in cui il riferimento di velocità è fisso al valore minimo di progetto. I motori seguono il riferimento comandato dal master definito come Asse virtuale.

I posizionatori effettuano movimenti in velocità o regolati in posizione. Sono previsti i seguenti modi operativi:

- 1 Posizionamento assoluto lento
- 2 Posizionamento assoluto veloce
- 4 Ricerca del punto di riferimento: il motore esegue una sequenza di ricerca di un sensore esterno che segnala la posizione di ripristino dell'encoder incrementale
- 8 Jog avanti: movimento in velocità in senso positivo
- 16 Jog indietro: movimento in velocità in senso negativo
- 32 Posizionamento relativo
- 64 Posizionamento con attivazione di tracce elettroniche: durante il posizionamento assoluto vengono emessi dei segnali in corrispondenza di determinati intervalli di posizione dell'asse.

La funzione è stata utilizzata per il comando di elettrovalvole per l'emissione di colla: un asse lineare sospeso a pochi millimetri dalla superficie delle bobine avvolte attraversa la macchina trasversalmente rispetto alla direzione di marcia e, in corrispondenza delle bobine, spruzza il materiale incollante per chiudere il lembo finale di materiale.

128 Posizionamento sincronizzato: un asse segue la legge di moto di un master in modalità di sincronismo.

Gli assi in velocità senza encoder infine sono impiegati nelle aree esterne alla linea e sfruttano sensori per il rallentamento e l'arresto dei movimenti in due posizioni fisse. Gli unici modi operativi possibili sono quindi movimenti in velocità nei due sensi di marcia, controllando lo stato dei sensori per determinare il riferimento della velocità di lavoro.

A seguito dell'impostazione degli opportuni modi operativi viene effettuato il richiamo del blocco che esegue il comando di movimento, la cui istanza è indipendente dalla tipologia di applicazione dell'azionamento. La funzione è stata importata dal catalogo delle librerie Siemens e, per facilità di comprensione, è stata generata in linguaggio MCC. Tramite tale blocco è possibile eseguire il controllo di un asse singolo, realizzando tutte le operazioni descritte in precedenza:

- Abilitazione/disabilitazione asse
- Controllo del freno integrato nel motore
- Comandi in modalità manuale: in velocità oppure posizionamenti
- Attivazione della sequenza di ripristino dell'encoder incrementale
- Comando in modo operativo automatico che, a seconda dell'asse, può essere:
 - o Sincronismo, con rapporto di trasmissione fisso o variabile
 - o Sincronismo a camme elettroniche, relativo ad un andamento di camma predeterminato
 - o Controllo esterno, mediante il quale l'asse viene gestito tramite una funzione specifica esterna, come per esempio è il caso degli avvolgitori
- Gestione degli allarmi relativi all'Oggetto Tecnologico mediante la creazione di un buffer contenente lo storico dei guasti dell'asse.

Al termine della scheda relativa all'asse viene richiamata la funzione che esegue la diagnostica dell'azionamento, rilevando direttamente dalla lista dei parametri le informazioni relative allo stato di moduli Sinamics. Il blocco, anch'esso importato dal catalogo delle librerie Siemens, consente di leggere ed eseguire la tacitazione di:

- Anomalie (Faults), che determinano l'arresto immediato dell'asse mediante decelerazioni più o meno rapide a seconda della rilevanza dell'anomalia.
- Avvisi (Alarms), i quali non hanno alcun effetto sull'apparecchio di azionamento ma segnalano irregolarità non determinanti per il funzionamento del motore.
- Messaggi relativi alle funzioni di sicurezza integrate dell'azionamento.

Le informazioni sono memorizzate in una struttura complessa dalla quale vengono estratti in particolare i codici relativi all'anomalia attiva.

Comunicazione tra Simotion e PLC

Il trasferimento di dati dal PLC al Simotion comprende le impostazioni di processo per il controllo degli azionamenti e, da Simotion a PLC, le informazioni di diagnostica riguardo allo stato degli assi, le quali sono poi inviate come visualizzazione al pannello operatore.

Le problematiche affrontate in fase di sviluppo del sistema di comunicazione sono legate ai limiti stabiliti dal bus di campo adottato, PROFIBUS, il quale prevede un massimo di 244 byte per ogni canale di comunicazione. La mole di informazioni da trasmettere è infatti notevolmente maggiore, dato che include sia i dati relativi al processo di lavoro sia quelli inerenti alla gestione di ciascun asse, e soprattutto l'entità è estremamente variabile per ogni commessa, poiché, a seconda dei casi, può includere dai 2 fino ai 30 azionamenti. È stato perciò ideato un sistema di comunicazione flessibile suddividendo innanzitutto i dati comuni, ai quali sono stati assegnati 96byte, da quelli specifici per ogni asse, per i quali sono stati considerati 128byte; in totale si tratta quindi di 224byte, inferiori al limite imposto dalla rete. La trasmissione delle informazioni legate ai singoli azionamenti viene effettuata mediante un sistema multiplexer, basato su un contatore (*index*) che, ogni volta che viene aggiornato, trasferisce solo i dati dell'asse associato al suo valore (Fig.7.15).

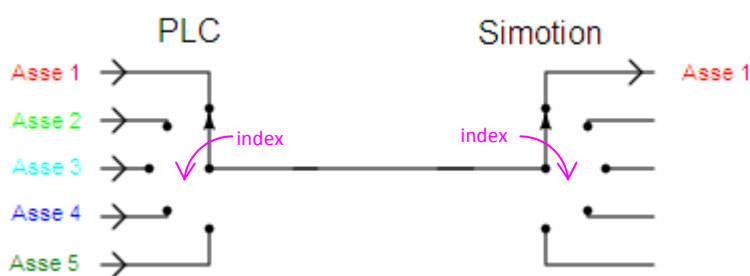


Figura 7.15 - Schema della comunicazione con multiplexer

Ciò ha permesso innanzitutto di aumentare la quantità di dati trasmissibili oltre i 244byte poiché in un ciclo di aggiornamento del contatore vengono scambiati:

$$n^{\circ}_{byte} = 96byte(comuni) + n^{\circ}_{assi} \cdot 128byte(per\ asse)$$

Inoltre agevola il compito dei tecnici nelle fasi di sviluppo di nuovi progetti perché, aggiungendo un nuovo azionamento nella progettazione, non bisogna riconfigurare l'area di comunicazione ma, mantenendo la stessa struttura, è sufficiente aggiungere un elemento alle funzioni legate al multiplexer.

Il grande svantaggio è però che l'aggiornamento dei valori relativi agli assi è piuttosto lento, nell'ordine dei 500ms nel caso siano programmati 20 azionamenti, poiché avviene ad ogni ciclo del contatore. Ciò non ha comunque comportato grosse problematiche poiché le informazioni trasmesse consistono in dati di configurazione, che non richiedono un rapido aggiornamento; dati importanti come il segnale di emergenza della macchina o il riferimento di velocità della linea sono trasmessi invece attraverso la struttura dei dati comuni.

Un'ulteriore problematica è legata al limite delle funzioni di sistema (SFC14 e SFC15) che attivano la comunicazione nei programmi del PLC: esse consentono di trasmettere al massimo 32byte per ogni invio/ricezione; è stato quindi necessario suddividere i due gruppi di 96byte e 128byte in pacchetti da 32byte e richiamare più volte nei programmi del PLC tali funzioni. Analogamente nel Simotion i programmi di comunicazione sono stati adattati per la lettura e la scrittura di più blocchi di dati, coerentemente con la suddivisione imposta nel PLC.

Una volta strutturata la comunicazione, sono state definite le variabili associate alle aree dei dati scambiati. I 128byte relativi agli assi sono stati organizzati in due tipologie di strutture, in modo da distinguere i parametri inerenti agli azionamenti gestiti in velocità e quelli in posizione.

```
PROGRAM Reading_Interface_PLC_D435

IF dp_index_in <> dp_index_out THEN
CASE dp_index_in OF
0: Unwinder_data_IN          :=Velocity_GetStruct (B_array_zero, D_array_zero_0, D_array_zero_1, D_array_zero_2, D_array_zero_3);
V_Master_data_IN            :=Position_GetStruct (B_array_zero, D_array_zero_0, D_array_zero_1, D_array_zero_2, D_array_zero_3);
Pull_Unit_data_IN           :=Velocity_GetStruct (B_array_zero, D_array_zero_0, D_array_zero_1, D_array_zero_2, D_array_zero_3);
Rewinder_IS_data_IN         :=Velocity_GetStruct (B_array_zero, D_array_zero_0, D_array_zero_1, D_array_zero_2, D_array_zero_3);
Rewinder_OS_data_IN         :=Velocity_GetStruct (B_array_zero, D_array_zero_0, D_array_zero_1, D_array_zero_2, D_array_zero_3);
Reel_Handling_IS_data_IN    :=Position_GetStruct (B_array_zero, D_array_zero_0, D_array_zero_1, D_array_zero_2, D_array_zero_3);
Reel_Handling_OS_data_IN    :=Position_GetStruct (B_array_zero, D_array_zero_0, D_array_zero_1, D_array_zero_2, D_array_zero_3);
main_data_IN                :=Main_GetStruct (B_array_zero, main_D_array_zero_0, main_D_array_zero_1, main_D_array_zero_2);
1: Unwinder_data_IN          :=Velocity_GetStruct (dp_b_input, dp_d_input_0, dp_d_input_1, dp_d_input_2, dp_d_input_3);
2: V_Master_data_IN          :=Position_GetStruct (dp_b_input, dp_d_input_0, dp_d_input_1, dp_d_input_2, dp_d_input_3);
3: Pull_Unit_data_IN         :=Velocity_GetStruct (dp_b_input, dp_d_input_0, dp_d_input_1, dp_d_input_2, dp_d_input_3);
4: Rewinder_IS_data_IN       :=Velocity_GetStruct (dp_b_input, dp_d_input_0, dp_d_input_1, dp_d_input_2, dp_d_input_3);
5: Rewinder_OS_data_IN       :=Velocity_GetStruct (dp_b_input, dp_d_input_0, dp_d_input_1, dp_d_input_2, dp_d_input_3);
6: Reel_Handling_IS_data_IN  :=Position_GetStruct (dp_b_input, dp_d_input_0, dp_d_input_1, dp_d_input_2, dp_d_input_3);
7: Reel_Handling_OS_data_IN  :=Position_GetStruct (dp_b_input, dp_d_input_0, dp_d_input_1, dp_d_input_2, dp_d_input_3);
END_CASE;
END_IF;

main_data_IN                := Main_GetStruct (dp_main_B_input, dp_main_d_input_0, dp_main_d_input_1, dp_main_d_input_2);

END_PROGRAM
```

Figura 7.16 - Programma per la lettura dei dati nel Simotion

7.2.3. Integrazione delle funzioni winder

L'applicazione winder è stata implementata mediante un blocco importato in linguaggio ST dal catalogo delle librerie Siemens, la cui istanza è richiamata nella scheda dedicata a svolgitore e avvolgitore nel task temporizzato più rapido, aggiornato ogni 3ms.

A meno di piccole differenze, le funzioni sono le stesse della libreria utilizzata per la programmazione degli azionamenti Sinamics:

- Calcolo del diametro
- Caratteristica sulla tensione di lavoro
- Controllo della tensione
- Adattamento del guadagno per il controllo della tensione
- Compensazione dei carichi inerziali

In aggiunta è eseguito il calcolo dello spessore del materiale, che viene utilizzato come parametro per la stima dello spazio residuo nel controllo dell'arresto della macchina al raggiungimento di un diametro target.

```
// Functionblock input
fbUnwinder_Control(
    run                := TRUE,
    enable              := boenable_Unwinder,
    winderaxis         := Unwinder,
    lineaxis           := TO#NIL,
    controlmode        := DANCER_CONTROL_SPEED_SETPOINT_ADAPTION,
    taskmode            := IPO_SYNCHRONOUS_TASK,
    setpointswitchss    := TENS_SP_MAIN,
    selectdiammode      := DIAM_CALC_INTEGRAL_INTERPOLATION_2,
    selectmeasuremode   := MEASURE_METRIC_DRIVE_AXIS,
    tensiontapermode    := TAP_CHAR_NO_TAPER,
    kpadaptionmode      := LINEAR_ADAPTION,
    fbmode              := AXIS_CONTROL,
    enablepositionrfg   := Unwinder_data_in.enable_pid,
    enabletensionrfg    := FALSE,
    ctrlenable         := Unwinder_data_in.enable_pid,
    setpointonss        := FALSE,
    setdiamcalc         := Unwinder_data_in.enable_preset_diameter,
    holddiamcalc        := Unwinder_data_in.enable_hold_diameter,
    tensionsetpoint     := Unwinder_data_in.setpoint_web_tension,
    positionsetpoint    := Unwinder_data_in.setpoint_pid,
    diamsetval          := Unwinder_data_in.setpoint_preset_diameter,
    actvaluepid         := Dancer_Roll_Unwinder_Scaled,
    swinderconfig       := gsConfig_FbWinder_Unwinder,
    latchdiamcalc       := Latch_Diam_Unwinder
);
```

Figura 7.17 - Istanza della Function Block per le funzioni winder

Nonostante le funzioni disponibili nella libreria per Simotion siano pressoché identiche a quella per Sinamics, le possibilità di parametrizzazione sono notevolmente maggiori. Ad ognuna è infatti associata una struttura di dati nella quale è possibile individuare le variabili d'ingresso della funzione ed i prodotti dei calcoli effettuati, così da poter svolgere un'analisi approfondita del processo. Ciò può essere notato facilmente per il regolatore PID che esegue il controllo della tensione del materiale: la regolazione può essere ottimizzata più efficacemente grazie all'introduzione di un numero maggiore di elementi, come filtri e bande morte; inoltre può essere studiata più dettagliatamente poiché sono forniti parametri di calcoli intermedi, come per esempio i contributi separati delle tre azioni proporzionale, integrale e derivativo. Una volta individuati i valori ottimali per i parametri di configurazione delle varie funzioni, essi sono inseriti in programmi di inizializzazione delle variabili, eseguiti nello Startup Task.

```
// Tension setpoint generation
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sTensionConfig.setpointSSAdjust := 0.1;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sTensionConfig.setpointSS       := 2;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sTensionConfig.rampDownTime      := 5000.0;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sTensionConfig.rampUpTime        := 5000.0;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sTensionConfig.upperLimitRFG     := 5000.0;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sTensionConfig.lowerLimitRFG     := 0.0;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sTensionConfig.nominalValRFG     := 5000.0;

// Kp-Adaption
gsConfig_FbWinder_Unwinder.skpAdaptionConfig.kpAbscissa1    := 0.080;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.skpAdaptionConfig.kpAbscissa2    := 1.300;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.skpAdaptionConfig.kp1            := 0.003;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.skpAdaptionConfig.kp2            := 0.0008;

// PID
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sdatasetPID.integtime            := 200000;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sdatasetPID.derivativetime       := 0;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sdatasetPID.seticontroller       := TRUE;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sdatasetPID.manualMode           := FALSE;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sdatasetPID.upperlimit            := 20;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sdatasetPID.lowerlimit            := -20;
gsConfig_FbWinder_Unwinder.sdatasetPID.actvaluefactor        := 1.0;
```

Figura 7.18 - Inizializzazione di alcune variabili di configurazione nello Startup Task

Oltre alla versione standard della libreria, ne è stata creata una nuova per implementare l'applicazione winder con doppio motore montato sull'asse della bobina. In tal caso la funzione esercita il controllo su due Oggetti Tecnologici, anziché uno solo, eseguendo controlli incrociati sullo stato dei motori e calcolando i riferimenti di velocità e coppia di entrambi. In particolare la stima dei carichi inerziali viene dimezzata considerando una ripartizione di coppia uguale tra i due motori.

Esternamente alla funzione è stato inoltre implementato il procedimento di calcolo del diametro tramite spostamento del ballerino, non incluso nella libreria. Analogamente a quanto effettuato con la programmazione a blocchi degli azionamenti Sinamics, mediante linguaggio ST, è stato svolto il controllo degli impulsi misurati tramite l'encoder montato sul motore dell'asse per calcolare la rotazione angolare della bobina corrispondente allo spostamento del rullo mobile del danzatore tra due posizioni fisse. Il diametro è ottenuto tramite il rapporto tra la misura lineare e quella angolare.

7.3. Caso di studio: RU6

7.3.1. Descrizione della macchina

Tra i casi di studio analizzati nella configurazione con Simotion, quello più significativo è stato sicuramente quello della tagliaribobinatrice RU6. Tale macchina è progettata per lavorare film di alluminio di spessore massimo $600\mu\text{m}$ e produrre bobine di larghezza minima 10mm e diametro massimo 1800mm. Il processo di avvolgimento assiale avviene su due alberi indipendenti che scorrono su guide lineari per mantenere una forza di contatto costante tra le bobine e il tamburo di contrasto (Fig.7.19).

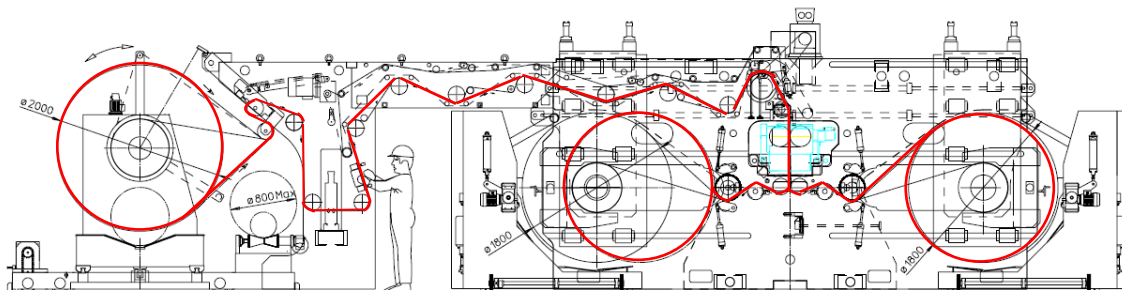


Figura 7.19 - Layout della tagliaribobinatrice RU6

La macchina è costituita da quattro zone distinte a tensione controllata.

La prima, regolata tramite lo svolgitore mediante celle di carico, è delimitata dal rullo di traino posizionato nella zona mediana della linea, il quale funge da riferimento di velocità per tutti gli altri assi.

Seguendo il percorso del nastro a valle del traino si può individuare il sistema di taglio, indicato in azzurro in Fig.7.19, caratterizzato da un funzionamento a cesoia circolare. Esso è costituito da due alberi sui quali sono montati anelli metallici che, durante il lavoro, vengono maschiati per deformare l'alluminio e realizzare il taglio longitudinale del materiale. Per distanziare tali lame sono interposti anelli gommati che, operando in contatto tra loro, creano l'effetto di trascinamento, separando la tensione sul materiale a cavallo degli alberi. Poiché non c'è alcun sistema di rilevazione del tiro fra traino e coltelli, la regolazione viene effettuata in anello aperto agendo sui limiti di coppia dell'azionamento che effettua la rotazione degli alberi dei coltelli.

Il materiale tagliato viene poi separato a bende alternate ed avvolto su due alberi di avvolgimento indipendenti, i quali regolano la tensione ognuno mediante la relativa cella di

carico. Il controllo non è quindi effettuato sui singoli nastri, come nella macchina RCX-J/16 presentata nel Cap.6.3, ma la tensione viene regolata mediante un unico azionamento per tutte le bende avvolte sul medesimo albero.

Nel panorama delle macchine per Converting, RU6 si distingue per le performance elevate in termini di velocità ed entità delle masse movimentate. In condizioni di lavoro favorevoli, ossia con materiale di ottima qualità e spessore non superiore ai $200\mu\text{m}$, la linea può infatti effettuare produzione fino a 1500m/min , valore che costituisce il limite prestazionale massimo per le macchine costruite dall'azienda IMS Deltamatic. Il dato assume una rilevanza maggiore se si considera che tale velocità è applicata a bobine che possono raggiungere i 18000kg : sullo svolgitore è infatti possibile caricare bobine di alluminio di diametro massimo pari a 2000mm e larghezza 2100mm . Inoltre la qualità del processo deve essere ottimale per garantire sui due avvolgitori una produzione di bobine di larghezza minima 10mm e diametro massimo 1800mm .

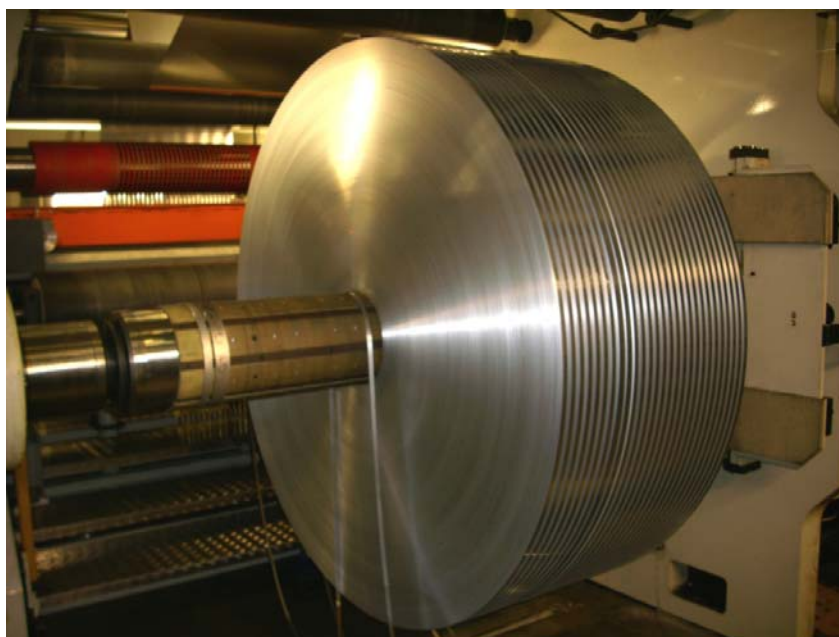


Figura 7.20 - Produzione di bobine larghezza 10mm e diametro 1800mm

Per movimentare masse così imponenti e sviluppare tensioni sul materiale fino a 4000N sono necessari motori in grado di generare coppie estremamente elevate. In particolare le situazioni di arresti rapidi e di emergenza, garantiti rispettivamente in 40 e 10 secondi, risultano le più critiche e richiedono coppie fino a 2800Nm . La potenza dei motori di conseguenza risulta elevata: i due motori montati sull'asse dello svolgitore e quelli degli avvolgitori hanno ciascuno una potenza nominale di 155kW .



Figura 7.21 - Vista laterale della tagliaribobinatrice RU6

La macchina è inoltre dotata di sistemi automatici per effettuare le seguenti operazioni:

- Caricamento della bobina sullo svolgitore
- Scarico delle bobine dagli avvolgitori
- Cambio degli alberi di avvolgimento
- Cambio del “cassetto” di taglio
- Movimentazione per effettuare la compenetrazione delle lame di taglio



Figura 7.22 - Vista dall'alto della tagliaribobinatrice RU6

7.3.2. Configurazione hardware

Il sistema di automazione è gestito tramite un PLC principale, il quale svolge la funzione di master su tre reti PROFIBUS distinte. La prima è dedicata alla comunicazione con Simotion: considerato l'alto numero di assi, ciò garantisce un trasferimento dei dati più veloce, compensando in parte il ritardo di aggiornamento dei parametri dovuto all'implementazione della procedura con multiplexer. Alla seconda appartengono apparecchiature decentrate collocate a bordo macchina, come espansioni I/O del PLC e batterie pneumatiche, un PLC secondario dedicato alla gestione delle logiche per le funzioni di sicurezza e i dispositivi per l'accoppiamento con reti PROFIBUS di terze parti. Infine la terza, richiesta appositamente dal cliente, è predisposta per il collegamento ad un PC remoto ed è collegata alle centraline delle celle di carico. Quest'ultima connessione permette di accedere al valore rilevato sui trasduttori mediante bus di campo, anziché segnale analogico, e soprattutto di modificare dinamicamente la parametrizzazione delle celle di carico nel caso di modifica dell'angolo di lettura della tensione a causa di inserimento del materiale all'interno della macchina secondo percorsi differenti.

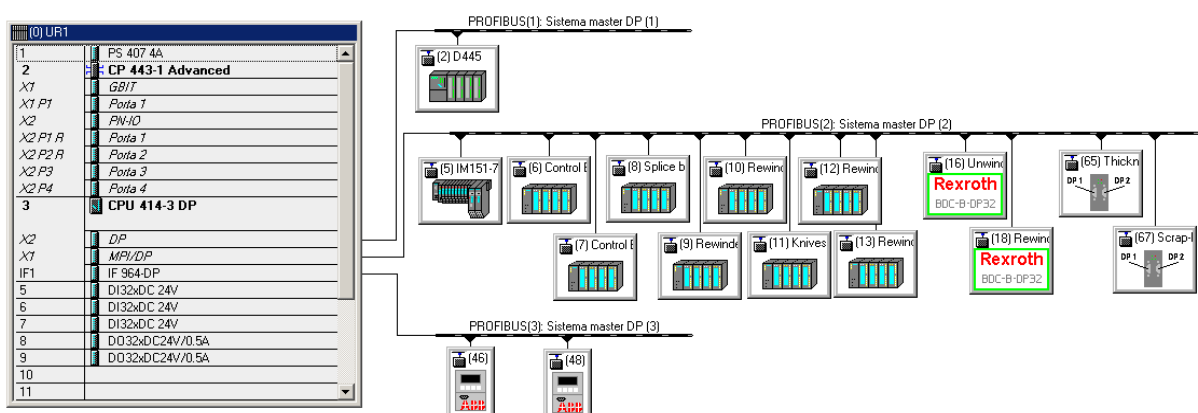


Figura 7.23 - Configurazione delle reti di comunicazione

Il processo di lavorazione è supervisionato da un sistema SCADA, il cui controllore è collegato in Ethernet con il PLC principale, che permette all'operatore di gestire le impostazioni di processo e diagnostica e trasferisce i dati di produzione al software gestionale aziendale.

Sono presenti 22 azionamenti elettrici Sinamics S120 assegnati a 5 Control Unit, di cui una integrata nell'apparecchio del Simotion D445. Considerata la dimensione dei motori principali della linea (svolgitori, avvolgitori, traino e coltelli), sono previsti due convertitori AC/DC: uno di potenza 500kW alimenta i 6 azionamenti di taglia maggiore e un altro da 80kW alimenta tutti i

drive ausiliari di potenza minore. Poiché all'interno degli azionamenti non vengono abilitate funzioni aggiuntive e non sono inseriti programmi, i quali sono elaborati interamente al controllore, il sistema relativo ai Sinamics S120 è progettato considerando che il carico di elaborazione richiesto per ogni azionamento sia quello minimo; è quindi possibile assegnare ad ogni Control Unit il numero massimo di assi gestibili (6 assi con regolazione Servo). Questi ultimi sono suddivisi con una logica di funzionalità all'interno della macchina, come riportato nelle seguenti tabelle.

Control Unit integrata in Simotion

Motore	Regolazione
Svolgitore lato sx	vettoriale: Servo
Svolgitore lato dx	vettoriale: Servo
Traino	vettoriale: Servo

Control Unit 1

Motore	Regolazione
Rotazione coltelli	vettoriale: Servo
Avvolgitore interno	vettoriale: Servo
Avvolgitore esterno	vettoriale: Servo

Control Unit 2

Motore	Regolazione
Carro cambio coltelli: movimento verticale	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine interno: movimento verticale	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine esterno: contenimento bobine sx	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine esterno: contenimento bobine dx	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine esterno: movimento verticale	vettoriale: Servo

Control Unit 3

Motore	Regolazione
Carro cambio coltelli: movimento orizzontale	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine interno: movimento orizzontale	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine interno: contenimento bobine sx	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine interno: contenimento bobine dx	vettoriale: Servo
Carro scarico bobine esterno: movimento orizzontale	vettoriale: Servo

Control Unit 4

Motore	Regolazione
Carro carico bobine svolgitore	vettoriale: Servo
Movimento compenetrazione lame taglio sx	vettoriale: Servo
Movimento compenetrazione lame taglio dx	vettoriale: Servo
Leve infilamento materiale sx	vettoriale: Servo
Leve infilamento materiale dx	vettoriale: Servo
Ventilatore per aspirazione scarti di produzione	scalare: v/f

7.3.3. Programmazione del controllore

Lo sviluppo del progetto avviene innanzitutto con la definizione delle caratteristiche hardware dei 22 azionamenti Sinamics ed i corrispondenti Oggetti Tecnologici. Per ognuno sono inseriti i dati di configurazione: tipo di regolazione, rapporto di trasmissione, limitazioni sulla legge di moto ed eventualmente i parametri di regolazione e sorveglianza di posizione. Viene inoltre inserito un Asse virtuale, nominato *Virtual Master* e definito come posizionario, utilizzato come riferimento di velocità teorico per gli assi della linea. Mentre gli assi winder sono gestiti in velocità, l'Oggetto Tecnologico relativo al traino è definito come Asse sincronizzato a quello virtuale in modo che possa seguire fedelmente la legge di moto impostata; per tale motivo il master virtuale è sfruttato anche come contatore dei metri di materiale lavorato.

Tutti gli assi relativi ai carri di carico bobine, scarico e cambio coltelli sono configurati come posizionatori. Caso particolare è costituito dal sistema che effettua la compenetrazione delle lame di taglio, movimentato da due motori brushless che agiscono su due viti a ricircolo di sfere parallele; poiché il moto deve essere sincronizzato, i due azionamenti sono utilizzati

come master e slave ed i corrispondenti Oggetti Tecnologici sono definiti rispettivamente come Asse in posizione e Asse in sincronismo.

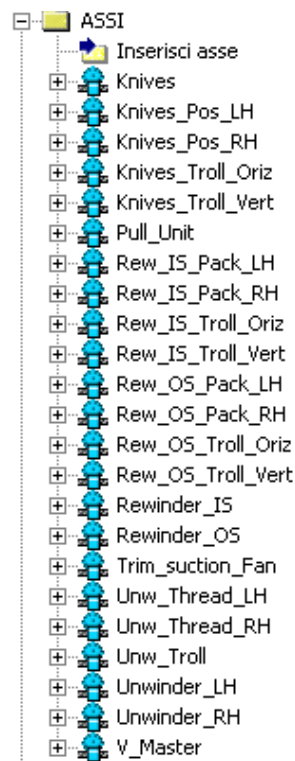


Figura 7.24 - Definizione degli Oggetti Tecnologici

La programmazione viene effettuata a partire dall'inserimento delle schede (*Unit*) che contengono le librerie Siemens ed i blocchi standard sviluppati, i quali garantiscono le seguenti funzioni:

- Gestione convertitore AC/DC
- Elaborazione riferimento di velocità e logiche per arresti della macchina
- Gestione dei modi operativi di funzionamento per gli assi
- Esecuzione dei comandi di movimento
- Applicazione winder

Viene quindi inserita e configurata la Unit contenente i due programmi relativi alla lettura e scrittura delle aree di comunicazione tra Simotion e PLC. Per adattare il sistema multiplexer all'applicazione è necessario definire per ogni Oggetto Tecnologico una struttura di comunicazione per i parametri di ingresso ed una per quelli in uscita; ad ognuno viene inoltre assegnato un numero in modo che siano aggiornati i dati dell'azionamento solamente quando il contatore assume il corrispondente valore.

```

CASE dp_index IN OF
1: Unwinder_LH_data_IN
2: Unwinder_RH_data_IN
3: Unw_Troll_data_IN
4: Unw_Thread_LH_data_IN
5: Unw_Thread_RH_data_IN
6: V_Master_data_IN
7: Pull_Unit_data_IN
8: Knives_data_IN
9: Knives_Pos_LH_data_IN
10: Knives_Pos_RH_data_IN
11: Knives_Troll_Oriz_data_IN
12: Knives_Troll_Vert_data_IN
13: Rewinder_IS_data_IN
14: Rew_IS_Pack_LH_data_IN
15: Rew_IS_Pack_RH_data_IN
16: Rew_IS_Troll_Oriz_data_IN
17: Rew_IS_Troll_Vert_data_IN
18: Rewinder_OS_data_IN
19: Rew_OS_Pack_LH_data_IN
20: Rew_OS_Pack_RH_data_IN
21: Rew_OS_Troll_Oriz_data_IN
22: Rew_OS_Troll_Vert_data_IN
23: Trim_suction_Fan_data_IN
END_CASE;

```

Figura 7.25 - Assegnazione dei valori del contatore multiplexer

In seguito vengono configurate le Unit dedicate ad ogni Oggetto Tecnologico, all'interno delle quali sono richiamate le funzioni dedicate alle diverse classi di applicazione degli assi. Indipendentemente dalla specificità dell'azionamento i programmi, stesi in linguaggio ST, sono strutturati nel medesimo modo. Il software di sviluppo richiede innanzitutto che la Unit sia suddivisa in due macroaree: INTERFACE e IMPLEMENTATION.

La prima (Fig.7.26) contiene il richiamo, eseguito mediante l'istruzione *USE* di sorgenti esterne contenenti blocchi funzionali o variabili utilizzati nella Unit. Sono quindi dichiarate per esempio le librerie Siemens LConLib, specifica per l'applicazione per Converting, e LDPV1, che include funzioni legate alla comunicazione tramite PROFIBUS ed utilizzata per la diagnostica degli azionamenti Sinamics. Tra le altre sorgenti richiamate c'è da notare soprattutto ST_Profibus, in cui sono dichiarate le strutture delle variabili inviate e ricevute dal PLC e che servono in particolare per la parametrizzazione delle funzioni implementate.

```

INTERFACE
// ----- Import -----
USEPACKAGE CAM_EXT;
USELIB LConLib, LDPV1 ;
USES ST_Profibus, ST_Global_Types, Std_FB_Ax, ST_Global_Var, ST_Ramp_Management, MCC_Axis_Management;
// ----- Device Global Constants -----
VAR_GLOBAL CONSTANT
END_VAR

//----- Device Global Type Definitions -----
TYPE
END_TYPE

//----- Device Global Variables -----
VAR_GLOBAL
    FbRewinder_IS_Control          : FBWinder;
    FB_Line_Rewinder_IS           : FBLineAxis;
    FB_Rewinder_IS_management     : fb_winder_management;
    gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS     : StructControl_FB_Line;
    gsStatus_FbLine_Rewinder_IS   : StructStatus_FB_Line;
    gsStatus_FbWinder_Rewinder_IS : StructStatus_FB_Winder;
    gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS : sWinderConfigStruct;
    boenable_Rewinder_IS         : BOOL := FALSE;
    LoadCell_Rewinder_IS_Scaled  : REAL;
    Rewinder_IS_getfaults_sinamics : fbldpvlgetdriveobjectalarmsandfaults;

    Rewinder_IS_TecData_disable_req : BOOL:= FALSE;
    Rewinder_IS_RT_disable_TecData  : r_trig;
END_VAR

```

Figura 7.26 - Area INTERFACE della Unit Asse

All'interno dell'area INTERFACE viene inoltre inserita la dichiarazione di variabili o tipi di variabili globali. Nello sviluppo del progetto si è scelto, a meno di casi particolari, di non effettuare alcuna dichiarazione di variabili locali in modo che tutte siano disponibili per l'utilizzo al di fuori della Unit all'interno della quale sono dichiarate, evitando di imporre eventuali vincoli nella programmazione. Nell'area sono dichiarate le istanze dei blocchi funzionali, per esempio FBWinder per le funzioni winder e FBLineAxis per l'esecuzione dei comandi di movimento, e le relative strutture di controllo e di stato, configurate in modo da includere rispettivamente le variabili di ingresso e uscita dei blocchi. Ciascuna variabile viene dichiarata includendo il nome dell'Oggetto Tecnologico a cui si riferisce in modo da facilitare l'individuazione dei parametri in fase di debug e agevolare lo sviluppo dei programmi: Unit di assi differenti con le medesime funzionalità sono facilmente generate modificando solamente il nome dell'Oggetto contenuto nelle variabili.

L'area IMPLEMENTATION contiene invece il codice dei programmi specifici per l'Oggetto Tecnologico. Per rendere più comprensibile il progetto i programmi sono suddivisi in base al task all'interno del quale sono richiamati. Per tutti gli assi sono quindi presenti il programma di StartUp e di Background.

All'interno del programma di StartUp sono inizializzate le variabili; in particolare nelle Unit degli Assi winder sono assegnati i valori ai parametri di configurazione dell'asse, suddivisi per categorie: calcolo del diametro, compensazione della coppia, taper, regolazione PID,

elaborazione del riferimento per il regolatore. In Fig.7.27 è visualizzata parte del codice relativo al programma di uno dei due avvolgitori: sono impostate le velocità minime per l'elaborazione del calcolo del diametro (7.5m/min e 3.0rpm sull'asse lento), i limiti sul valore ottenuto (minimo 0.25m e massimo 1.8m), le variabili di controllo sulla variazione del diametro tra calcoli consecutivi ed i parametri per l'integrazione della velocità lineare e quella angolare; sono inoltre assegnati i dati per il calcolo della massa della bobina, larghezza e densità, e quelli per la stima del momento d'inerzia, suddivisa nelle componenti relative al motore e al carico.

```
PROGRAM StartUp_Rewinder_IS
  // Config Diameter calculator
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.minLineSpeed      := 7.5;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.minWinderSpeed     := 3.0;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.diamMax            := 1.800;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.diamMin            := 0.250;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.webThickness       := 0.2;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.adjustWebThickness := 4.0;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.smoothingTimeLayerJump := 30.0;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.selectDiamIntegrationDirection := DONTCARE;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sDiamConfig.measuringRevolutionCount := 5.0;

  // Torque Precontrol calculation
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sMomentConfig.density          := 2700.0;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sMomentConfig.width            := 1.091;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sMomentConfig.jFix             := 0.0;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sMomentConfig.jMandrel         := 35.0;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sMomentConfig.jMot             := 1.93;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sMomentConfig.dndtAdjust       := 0.0;
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.sMomentConfig.tensionAdjust    := 1.0;
```

Figura 7.27 - Inizializzazione delle variabili nel programma StartUp per avvolgitore

Il programma Background è quello principale poiché in esso vengono eseguite le logiche di gestione dei movimenti e la loro esecuzione. Per tutti gli Assi le funzioni sono implementate in base alla seguente sequenza:

- Aggiornamento dei dati in ingresso dal PLC: vengono utilizzati per parametrizzare i blocchi ed impostare le caratteristiche delle leggi di moto. Solitamente tali dati sono collegati a variabili presenti nel pannello di lavoro, disponibili alla modifica da parte dei tecnici durante la messa in servizio della macchina oppure dell'operatore come ricette di lavoro.

In Fig.7.28 è riportato un esempio di aggiornamento dei dati relativi ad un avvolgitore, che consistono in: selezione della direzione di avvolgimento, parametri del regolatore PID per il controllo della tensione, informazioni sulle dimensioni della bobina in lavoro.

```
// Winding mode selection
IF Rewinder_IS_data_in.enable_overwind THEN
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.typeofwinder := REWIND_FROM_ABOVE;
ELSE
  gsConfig_FbWinder_Rewinder_IS.typeofwinder := REWIND_FROM_BELOW;
END_IF;

gsconfig_fbwinder_Rewinder_is.skpadaptionconfig.kp1 := LREAL_TO_REAL (Rewinder_IS_data_in.setpoint_pid_kp1);
gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.skpadaptionconfig.kp2 := LREAL_TO_REAL (Rewinder_IS_data_in.setpoint_pid_kp2);
gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.sdatasetpid.seticontroller := Rewinder_IS_data_in.enable_i_component;
gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.sdatasetpid.integtime := LREAL_TO_DINT (Rewinder_IS_data_in.setpoint_i_component);
gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.sdatasetpid.upperlimit := LREAL_TO_REAL (Rewinder_IS_data_in.setpoint_pid_limit);
gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.sdatasetpid.lowerlimit := LREAL_TO_REAL (~Rewinder_IS_data_in.setpoint_pid_limit);
gsconfig_FbWinder_Rewinder_IS.sdiamconfig.webthickness := LREAL_TO_REAL (main_data_in.setpoint_webthickness);
gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.smomentconfig.density := LREAL_TO_REAL (main_data_in.setpoint_webdensity);
gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.smomentconfig.width := LREAL_TO_REAL (Rewinder_IS_data_in.setpoint_websize_width);
```

Figura 7.28 - Aggiornamento tramite i dati provenienti dal PLC

- Richiamo dell'istanza del blocco che esegue la gestione delle logiche per determinare il modo operativo dell'Oggetto Tecnologico. Viene richiamata una specifica funzione a seconda della classe di applicazione, ossia per assi winder (Fig.7.29), posizionatori (Fig.7.30), assi in velocità appartenenti alla linea e assi in velocità con gestione di arresto in corrispondenza di sensori.

```
FB_Rewinder_IS_management(
  gsctrl_fbline      := gsctrl_fbline_Rewinder_IS
  ,to_axis           := Rewinder_IS
  ,axis_data_in      := Rewinder_IS_data_in
  ,gsstatus_fbline   := gsstatus_fbline_Rewinder_IS
  ,gsstatus_fbwinder := gsstatus_fbwinder_Rewinder_IS
  ,gsaxisdata        := gsaxisdata_Rewinder_IS
  ,actual_diameter   := Latch_Diam_Rewinder_IS
  ,shaft_homing_signal := FALSE
);
```

Figura 7.29 - Istanza per la gestione del modo operativo dell'asse winder

```
FB_Rew_OS_Troll_Oriz_management(
  TO_Axis      := Rew_OS_Troll_Oriz
  ,gsaxisdata  := gsaxisdata_Rew_OS_Troll_Oriz
  ,gsctrl_fbline := gsctrl_fbline_Rew_OS_Troll_Oriz
  ,axis_data_in := Rew_OS_Troll_Oriz_data_in
  ,gsstatus_fbline := gsstatus_fbline_Rew_OS_Troll_Oriz
  ,enable_cam     := FALSE
  ,homing_signal  := Rew_OS_Troll_Oriz_homing_signal
  ,emergency      := Main_data_in.emergency
);
```

Figura 7.30 - Istanza per la gestione del modo operativo dell'asse posizionatore

- Richiamo della libreria FbLineAxis per l'attivazione del modo operativo richiesto e l'esecuzione dei comandi di movimento. L'istanza del blocco funzionale, uguale per tutti gli assi, riceve in ingresso i dati compilati all'interno della funzione precedente e fornisce in uscita lo stato dell'Oggetto Tecnologico gestito.

```
//Instance of FBLINE
fb_Line_Rewinder_IS(
    saxisdata                := gsaxisdata_Rewinder_IS,
    stechfaultdata           := gstechfaultdata,
    driveon                  := gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS.driveon,
    startstop                := gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS.startstop,
    stopmode                 := gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS.stopmode,
    jogpos                   := gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS.jogpos,
    jogneg                   := gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS.jogneg,
    fixedendstop             := FALSE,
    openbrake                := FALSE,
    enablephasesynchronisation := FALSE,
    changeshiftpositionpositive := FALSE,
    changeshiftpositionnegative := FALSE,
    ackerror                 := gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS.ackerror,
    opmode                   := gsCtrl_FbLine_Rewinder_IS.opmode
);

gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.clampingstate := fb_Line_Rewinder_IS.clampingstate;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.drivestatus   := fb_Line_Rewinder_IS.drivestatus;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.homed         := fb_Line_Rewinder_IS.homed;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.done         := fb_Line_Rewinder_IS.done;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.error        := fb_Line_Rewinder_IS.error;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.firsterrornumber := fb_Line_Rewinder_IS.firsterrornumber;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.errorobjid   := fb_Line_Rewinder_IS.errorobjid;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.insync       := fb_Line_Rewinder_IS.insync;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.run          := fb_Line_Rewinder_IS.run;
gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.operation    := fb_Line_Rewinder_IS.operation;
```

Figura 7.31 - Istanza della libreria FBLineAxis

- Richiamo della libreria per eseguire la diagnostica dell'azionamento Sinamics: l'istanza (Fig.7.32) richiede la dichiarazione dell'Oggetto Tecnologico sul quale eseguire l'analisi dello stato di funzionamento. In uscita fornisce una struttura dati contenente un report dettagliato sui fault e gli avvisi attivi e tacitati.

```
Rewinder_IS_getfaults_sinamics(
    enable := TRUE
    ,reset := FALSE
    // ,bufferidentifier := -1
    ,jobidentifier := 0
    ,ack := main_data_in.alarms_reset
    ,filteredalarminfo := TRUE
    ,typeofdo := DO_WITH_TO
    ,axis := Rewinder_IS
    // ,logaddress := -1
    // ,ioid := INPUT
    // ,donumber := 255
    // ,iovariablezsw1 := 65535
    // ,restartdelay := T#0ms
    ,checksessages := by_do_address
    ,meessagesactiveexternal := TRUE
    // ,done =>
    // ,busy =>
    // ,commandaborted =>
    // ,error =>
    // ,errorid =>
    // ,changesinoutputstruct =>
    // ,faultsandalarms =>
);
```

Figura 7.32 - Istanza della libreria di diagnostica dell'azionamento

- Aggiornamento dei dati da trasmettere al PLC: tramite la lettura delle variabili di stato delle funzioni riguardanti l'Oggetto Tecnologico è possibile ricavare i dati di funzionamento dell'azionamento e salvarli nella struttura dei dati trasmessi dal Simotion al PLC.

In Fig.7.33 sono visualizzati i parametri riguardanti l'avvolgitore, che comprendono segnali booleani che indicano lo stato dell'asse, come per esempio le condizioni di abilitazione del motore o la presenza di guasti, analogici, come la velocità e la coppia istantanei, e i codici di guasti e allarmi attivi. Inoltre sono comunicati dati riguardanti il processo di avvolgimento, quindi il valore attuale rilevato dal regolatore di tensione, il diametro e lo spessore calcolati.

```
// Feedback
Rewinder_IS_data_out.status_running      := gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.drivestatus;
Rewinder_IS_data_out.status_zero_speed   := Rewinder_IS.motionstatedata.motionstate = STANDSTILL;
Rewinder_IS_data_out.status_drive_error   := gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.error;
Rewinder_IS_data_out.status_drive_ok      := NOT gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.error;
Rewinder_IS_data_out.Actual_error_simotion_number := gsStatus_FbLine_Rewinder_IS.firsterrornumber;
Rewinder_IS_data_out.actual_motor_current := Rewinder_IS.actualtorque.value;
Rewinder_IS_data_out.actual_motor_speed   := Rewinder_IS.actordata.actualspeed;
Rewinder_IS_data_out.actual_pid            := gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.sdatasetpid.numericactvalue;
Rewinder_IS_data_out.actual_diameter       := gsstatus_fbwinder_Rewinder_IS.diameter;
Rewinder_IS_data_out.actual_webthickness   := gsconfig_fbwinder_Rewinder_IS.calculatedwebthickness;
Rewinder_IS_data_out.Actual_fault_sinamics_code := Rewinder_IS_getfaults_sinamics.faultsandalarms.au16faultcode[0];
Rewinder_IS_data_out.Actual_fault_sinamics_info := Rewinder_IS_getfaults_sinamics.faultsandalarms.ai32faultinfo[0];
```

Figura 7.33 - Aggiornamento dei dati da trasmettere al PLC

Solamente nelle Unit di avvolgitore e svolgitore viene aggiunto il programma elaborato nel task a tempo, all'interno del quale viene aggiornato il riferimento di velocità dell'asse e richiamata l'istanza della libreria dedicata alle funzioni winder.

Particolarità nel progetto della macchina RU6 è l'utilizzo della libreria nella variante per motori che operano in ripartizione di coppia, utilizzata per lo svolgitore; in tal caso nell'istanza vengono dichiarati i due Oggetti Tecnologici da gestire. Come si può notare confrontando Fig.7.17 e Fig.7.33 gli altri parametri di ingresso sono gli stessi della libreria standard: parte sono di configurazione e stabiliscono le tecniche di utilizzo delle varie funzioni incluse, altri sono i segnali digitali e analogici di controllo, come per esempio l'abilitazione della regolazione PID ed i valori riferimento di tensione e di rilevazione sulle celle di carico.

```
// Functionblock input
fbUnwinder_LH_Control(
    run                                     := TRUE,
    enable                                 := boenable_Unwinder_LH,
    winderaxis_lh                         := Unwinder_LH,
    winderaxis_rh                         := Unwinder_RH,
    lineaxis                             := TO#nil, //V_Master,
    controlmode                           := TENSION_CONTROL_SPEED_SETPOINT_ADAPTION,
    taskmode                              := IPO_SYNCHRONOUS_TASK,
    setpointswitchss                      := TENS_SP_MAIN,
    selectdiammode                        := DIAM_CALC_INTEGRAL_INTERPOLATION_2,
    selectmeasuremode                     := MEASURE_METRIC_DRIVE_AXIS,
    tensiontapermode                      := TAP_CHAR_NO_TAPER,
    kpadaptionmode                        := LINEAR_ADAPTION,
    fbmode                                := AXIS_CONTROL,
    enablepositionrfg                     := FALSE,
    enabletensionrfg                     := Unwinder_LH_data_in.enable_pid,
    ctrlenable                            := Unwinder_LH_data_in.enable_pid,
    setpointonss                          := FALSE,
    setdiamcalc                           := Unwinder_LH_data_in.enable_preset_diameter,
    holddiamcalc                          := Unwinder_LH_data_in.enable_hold_diameter,
    tensionsetpoint                       := LREAL_TO_REAL (Unwinder_LH_data_in.setpoint_web_tension),
    positionsetpoint                      := LREAL_TO_REAL (Unwinder_LH_data_in.setpoint_pid),
    //diamextval                           :=
    diamsetval                            := LREAL_TO_REAL (Unwinder_LH_data_in.setpoint_preset_diameter),
    actvaluePID                           := load_cell_unwinder_Scaled,
    swinderconfig                         := gsConfig_FbWinder_Unwinder_LH,
    latchdiamcalc                         := Latch_Diam_Unwinder_LH
);
```

Figura 7.33 - Istanza della libreria winder per svolgitore con doppio motore sull'asse

Una volta generati tutti i programmi nel progetto deve essere compilata la lista del Sistema Esecutivo, che consiste nell'assegnazione dei vari Task (Fig.7.34). Per quelli temporizzati sono impostati i tempi di esecuzione: nonostante l'elevato numero di assi l'utilizzo della versione di Simotion D445, la più performante tra le varianti disponibili, ha permesso di impostare i tempi ciclo a 3ms.

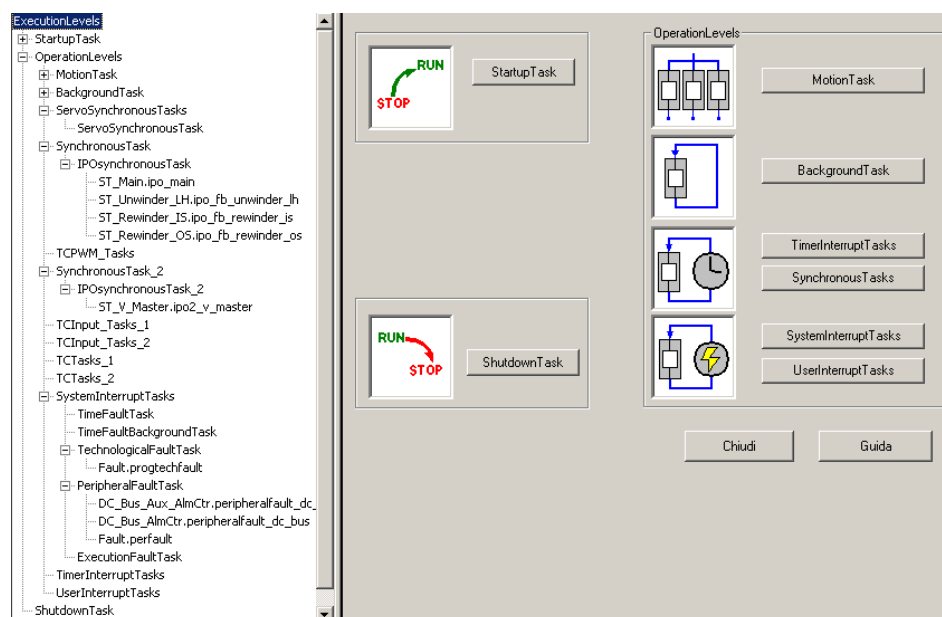


Figura 7.34 - Configurazione del Sistema Esecutivo

8. RILIEVI SPERIMENTALI

I progetti sviluppati nelle due configurazioni sono stati testati sperimentalmente, verificando la validità di tutte le funzionalità implementate e tarando parametri e regolazioni per ottimizzare il processo. Le analisi delle variabili di lavoro vengono effettuate tramite tools messi a disposizione dal software di programmazione, che rilevano l'andamento dei segnali durante il runtime.

I tracciati hanno permesso innanzitutto di constatare la validità dello studio teorico relativo ai carichi agenti sul sistema (§Cap.3.5.2): tramite il calcolo delle coppie di attrito, inerziali e del contributo necessario per la generazione della tensione sul materiale viene fornito un riferimento pari al valore di coppia sviluppata dal motore. Ciò risulta particolarmente evidente nell'osservazione delle variabili relative agli azionamenti gestiti tramite il controllore Simotion; quest'ultimo infatti, grazie a tempi di elaborazione estremamente rapidi, esegue un aggiornamento dei parametri tale per cui non sono introdotte discontinuità significative sui valori di riferimento.

In Fig.8.1 è rappresentato il comportamento dello svolgitore di una macchina per materiale accoppiato (velocità massima 1200m/min, tensione massima/minima 2400N/1000N e diametro 1600mm/150mm) durante la marcia della linea in cui la velocità, rilevata tramite l'encoder montato sul motore del traino (marrone), compie variazioni da 0 a 300m/min. Si nota che la coppia reale (azzurro), ricavata nell'azionamento dalla corrente assorbita dal motore, e quella di riferimento (blu), calcolata mediante l'analisi teorica dei carichi, coincidono durante la marcia della macchina.

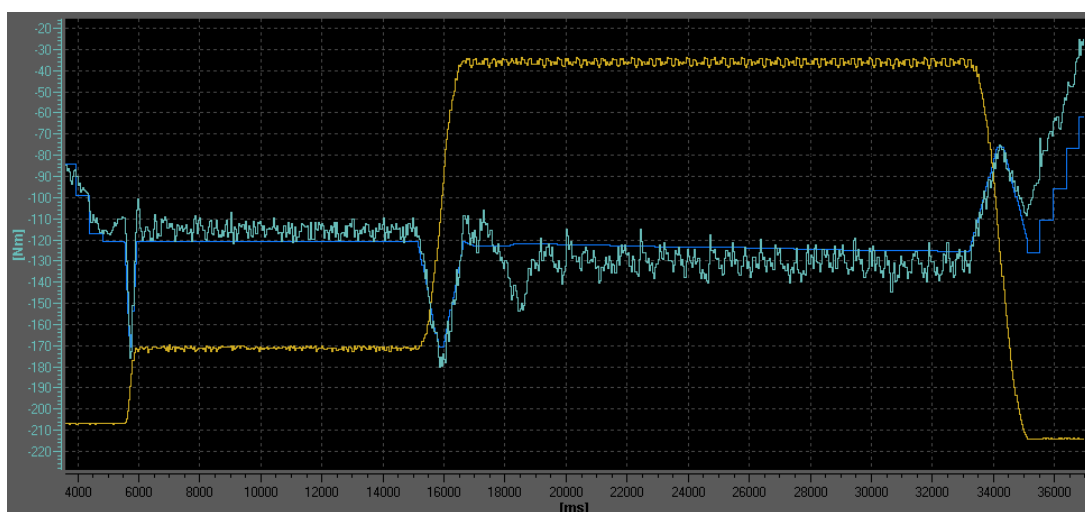


Figura 8.1 – Confronto tra coppia teorica e coppia reale

Il feed-forward di coppia (§Cap.4.5.1) permette al sistema di regolazione di conoscere in tempo reale i carichi agenti sul sistema, anticipando la reazione del motore di fronte a variazioni di velocità. Ciò comporta una diminuzione dell'errore sul numero di giri e quindi una minore correzione di coppia a carico del regolatore di velocità.

In Fig.8.2 è visualizzato, sullo stesso asse e nel medesimo arco temporale di Fig.8.1, l'andamento del valore di coppia in uscita dal regolatore di velocità (arancione) al variare della velocità (marrone). Si può notare che tale valore è sempre mantenuto ad un valore costante prossimo allo zero.

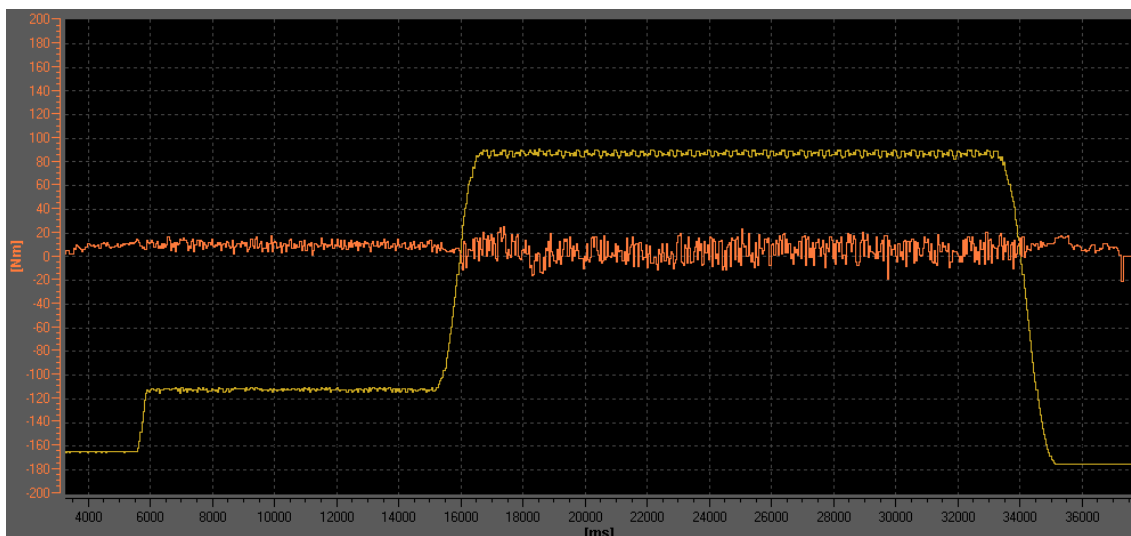


Figura 8.2 – Valore di coppia in uscita dal regolatore di velocità

L'effetto pratico che deriva da una compensazione ottimale delle coppie è un migliore controllo sulla tensione del materiale in tutte le fasi di lavoro. Tutto ciò, abbinato ad un'opportuna taratura del regolatore PID per il controllo del tiro e ad un adeguato calcolo del diametro, permette di mantenere la tensione in un intervallo compreso tra $\pm 5\%$, accettabile per ottenere lavorazioni ottimali e prodotti soddisfacenti.

In Fig.8.3 è possibile osservare il comportamento di regolazione della tensione con celle di carico (rosso) effettuata sullo svolgitore di Fig.8.1. Una volta raggiunto il valore di riferimento all'inizio della marcia la tensione è sempre mantenuta entro il range di accettabilità. Solamente nella fase di accelerazione iniziale c'è una variazione di tensione maggiore dovuta ad un valore di diametro della bobina non correttamente impostato alla partenza e non opportunamente aggiornato nelle prime fasi di marcia.

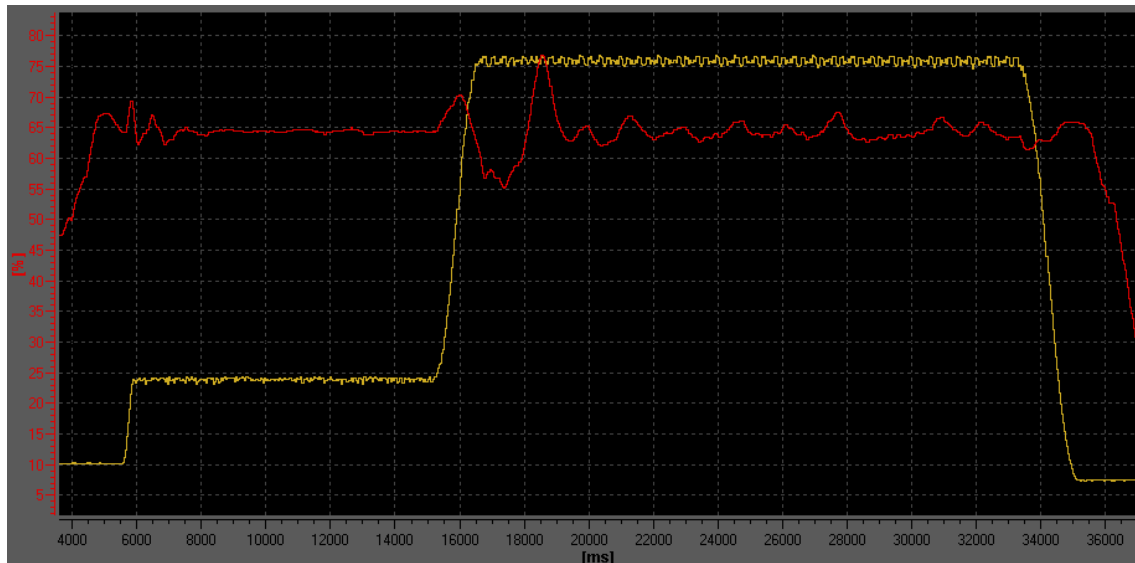


Figura 8.3 – Regolazione della tensione con celle di carico

Risultato analogo si può osservare in Fig.8.4, in cui è visualizzata la regolazione di tensione tramite ballerino su uno svolgitore di una macchina per la lavorazione della carta (velocità massima 1200m/min, tensione massima/minima 600N/200N e diametro 1200mm/120mm). Si nota che la posizione del rullo danzatore (giallo) si mantiene ampiamente all'interno del range di accettabilità durante la marcia della macchina da zero a 500m/min, rappresentata tramite la curva di velocità teorica del Master virtuale (arancione). Solamente nella fase di accelerazione iniziale c'è una variazione maggiore, anche qui dovuta ad un valore di diametro non corretto alla partenza.

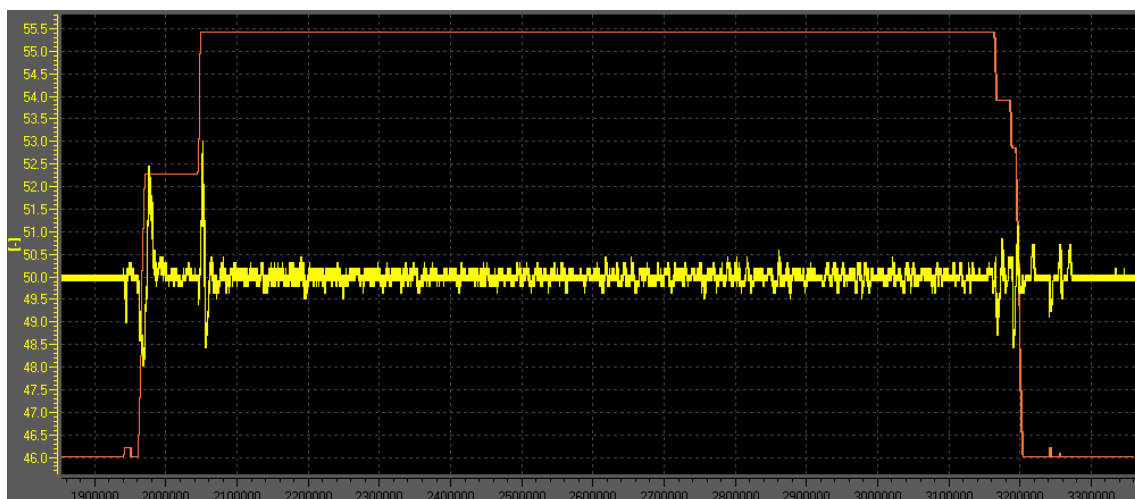


Figura 8.4 - Regolazione della tensione con ballerino

Tali rilevazioni dimostrano l'importanza, nel processo di svolgimento/avvolgimento, di effettuare correttamente il calcolo del diametro della bobina e, in particolare, di ottenere alla partenza un valore esatto. Per questo motivo è stata introdotta la tecnica di calcolo del diametro alla partenza mediante l'analisi della rotazione del motore durante lo spostamento del ballerino (§Cap.4.2); essa permette di effettuare in automatico un calcolo molto accurato.

In Fig.8.5 è visualizzato l'andamento della posizione del ballerino (blu) durante la procedura di calcolo, che prevede lo spostamento del rullo danzatore tra il 10% e il 50%. Viene rilevato il parametro corrispondente al valore istantaneo della posizione angolare della bobina in corrispondenza delle quote 20% (rosso) e 40% (marrone). I valori sono quindi elaborati in modo da ottenere il diametro attuale, il quale, al termine della procedura, viene impostato al valore corretto (giallo).

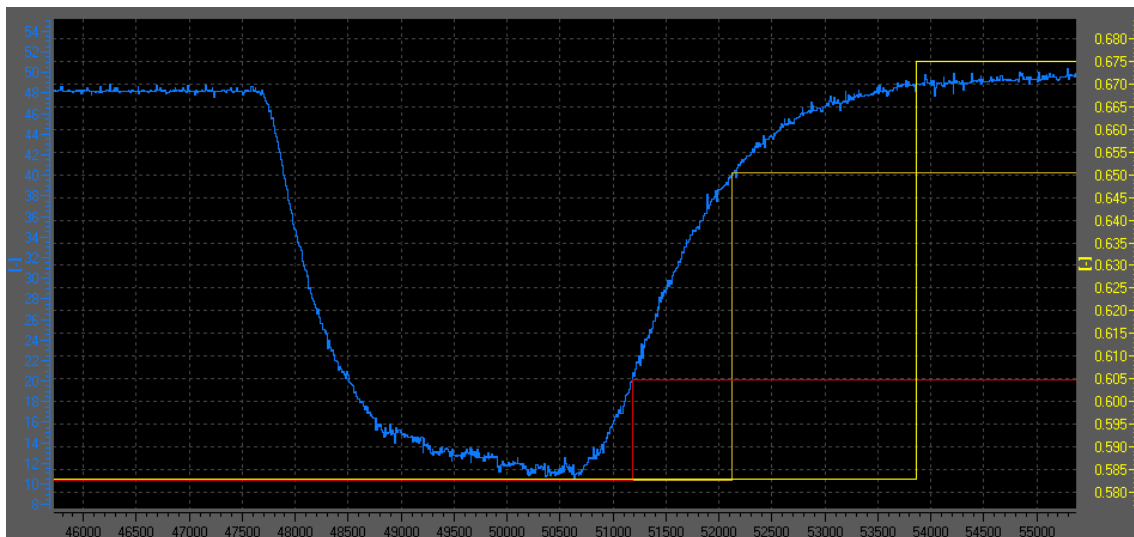


Figura 8.5 – Procedura di calcolo iniziale del diametro tramite spostamento del ballerino

Ciò consente di mantenere la regolazione della tensione sempre all'interno del range di accettabilità, in qualsiasi fase di funzionamento della macchina.

In Fig.8.6 è evidente che, dopo la procedura di calcolo del diametro (giallo), la posizione del rullo danzatore (blu) viene mantenuta sempre pressoché costante al 50% in tutte le fasi di accelerazione iniziali da 0 a 1000m/min (azzurro).

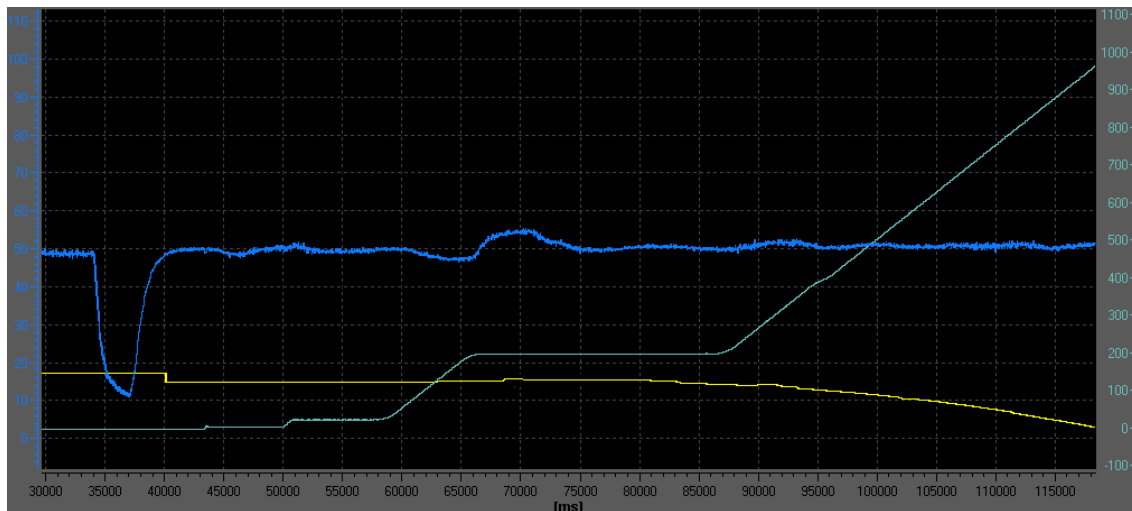


Figura 8.6 – Regolazione della tensione con ballerino con calcolo iniziale del diametro

I rilievi effettuati sulle variabili elaborate dagli azionamenti gestiti tramite PLC confermano ugualmente le analisi teoriche ma, confrontandoli con i tracciati eseguiti in presenza del controllore Simotion, evidenziano le differenze di prestazioni delle due configurazioni (§Cap.5.3.1).

Nel caso sia il PLC ad elaborare il valore del riferimento di velocità della linea, le scansioni di esecuzione dei programmi avvengono in tempi maggiori ed il riferimento viene aggiornato con discontinuità più marcate. Ciò risulta evidente in Fig.8.7, dove si osserva che, durante una decelerazione, la velocità subisce variazioni di circa 2m/min ad ogni aggiornamento, effettuato ogni 100ms. Inoltre poiché il PLC risulta inadatto a computazioni algebriche complesse, la variazione del riferimento viene effettuata secondo una curva di decelerazione senza jerk, aumentando la generazione di oscillazioni di velocità sui motori.

In Fig.8.8 è visualizzato invece il riferimento di velocità elaborato da Simotion secondo una legge di moto con jerk. In questo caso non sono apprezzabili le discontinuità nell'aggiornamento del valore, il quale viene elaborato ogni 3ms; ne consegue una maggiore stabilità di funzionamento dei motori.

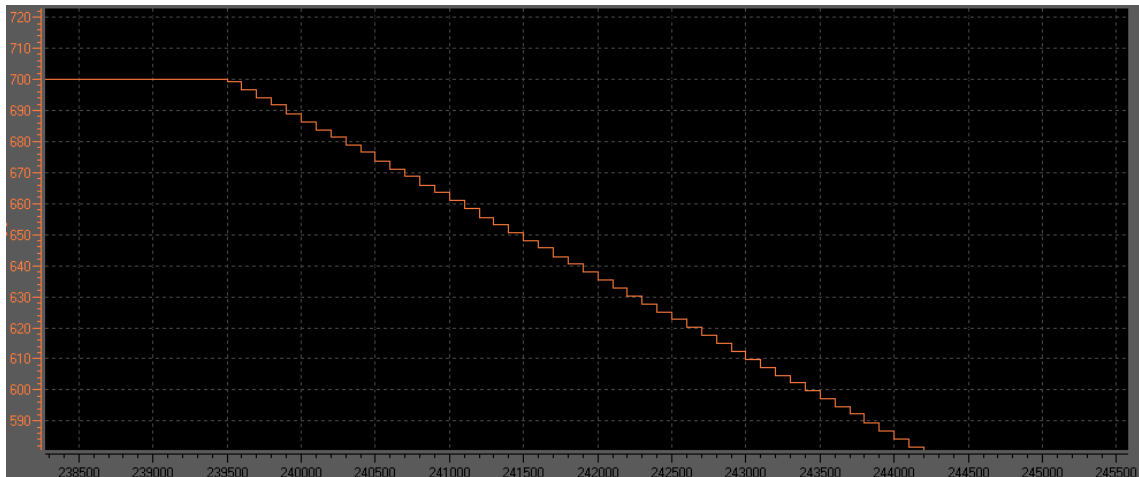


Figura 8.7 – Riferimento di velocità proveniente da PLC

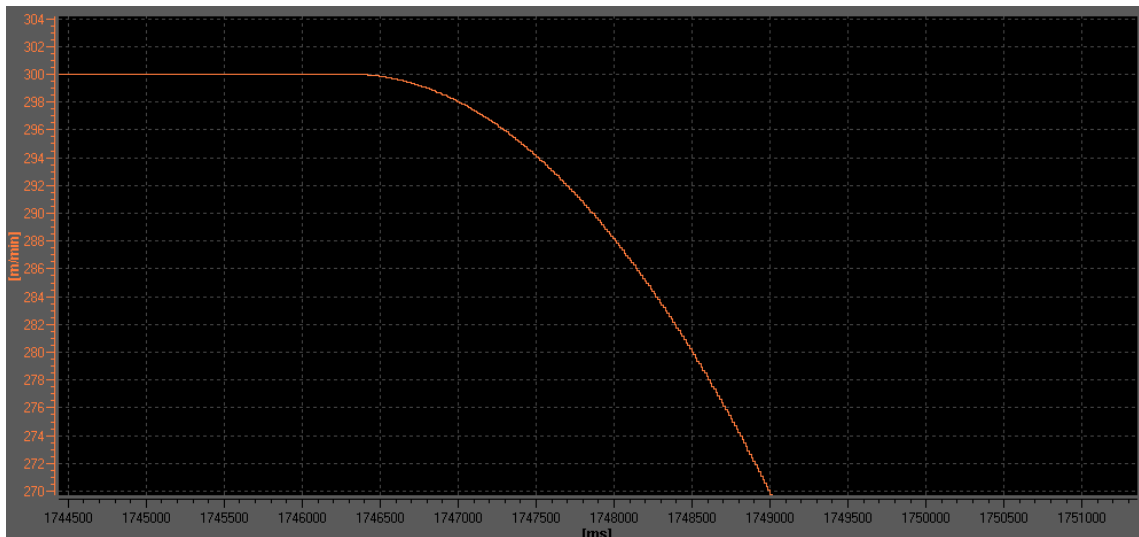


Figura 8.8 – Riferimento di velocità elaborato nel controllore Simotion

Un'ulteriore differenza si può osservare nel calcolo della coppia per la compensazione del momento d'inerzia del carico. Poiché il PLC non fornisce il valore di accelerazione teorica, senza Simotion la coppia inerziale è calcolata mediante derivazione della velocità istantanea rilevata tramite encoder. Ciò aumenta ulteriormente l'oscillazione nel comportamento del motore perché il riferimento di coppia calcolato risulta soggetto alle normali variazioni del sistema di misura della velocità.

In Fig.8.9 è visualizzato l'andamento della coppia inerziale calcolata (marrone) durante il funzionamento della linea in cui il riferimento di velocità subisce una serie di variazioni. Confrontando tale curva con quella relativa al sistema di calcolo con Simotion (curva blu Fig.8.1) risulta evidente l'oscillazione maggiore del riferimento calcolato nel sistema gestito da PLC.

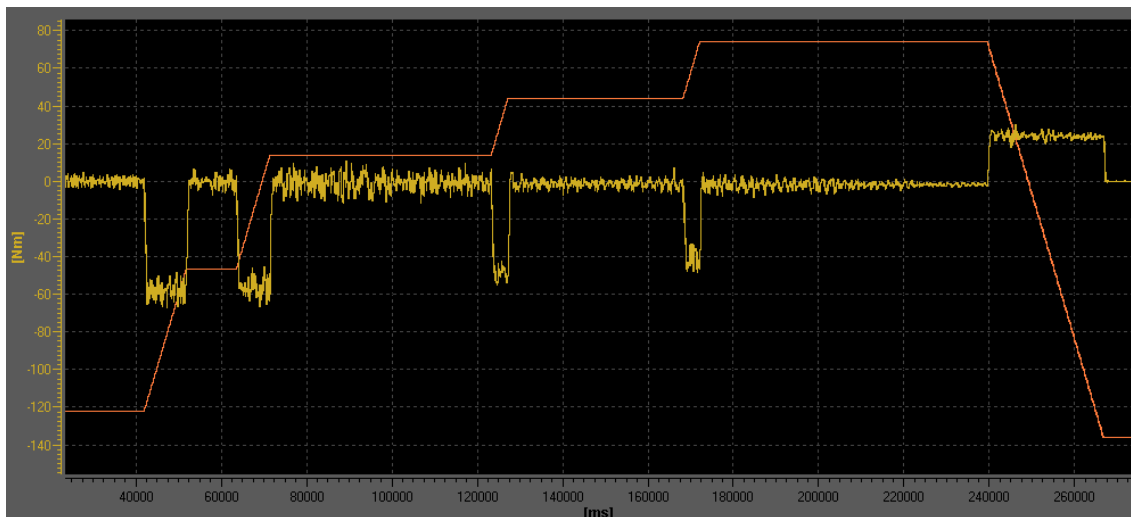


Figura 8.9 – Coppia inerziale calcolata nell’azionamento mediante derivazione della velocità rilevata

Tramite un’opportuna taratura dei regolatori di tensione e di velocità, oltre alla corretta parametrizzazione delle funzioni winder, il risultato finale sul controllo della tensione risulta comunque soddisfacente anche mediante la gestione degli azionamenti senza controllore dedicato. In Fig.8.10 si può infatti notare che la posizione del ballerino controllata tramite lo svolgitore della macchina RCX-J/16 (§Cap.6.3) è mantenuto in tutte le fasi di lavoro all’interno del range di accettabilità.

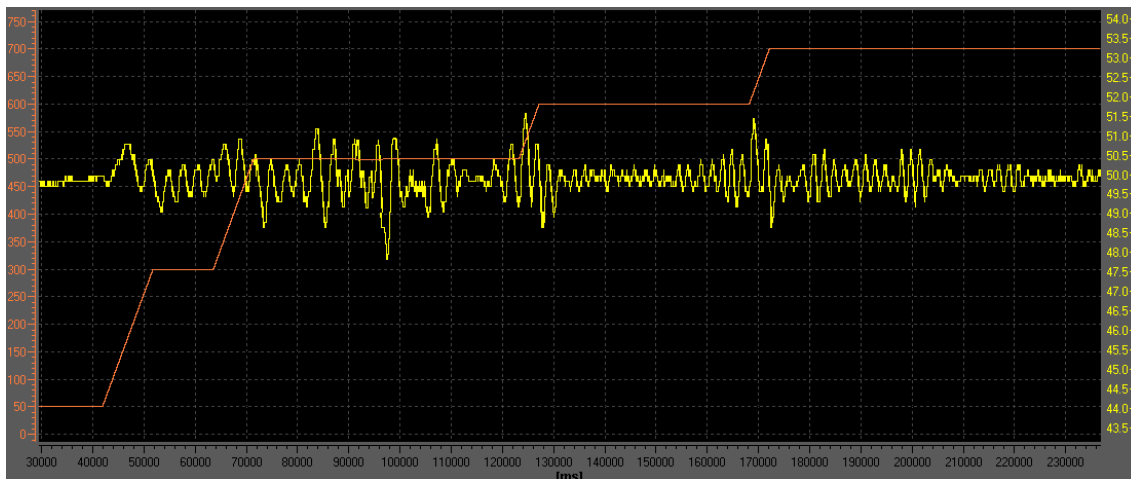


Figura 8.10 - Regolazione della tensione con ballerino nella configurazione senza controllore

La differenza più evidente nel funzionamento della macchina nelle due configurazioni si riscontra nelle condizioni critiche di funzionamento, in cui sono richiesti arresti rapidi o d’emergenza. In tali situazioni il sistema gestito tramite PLC genera delle discontinuità ancora più marcate sul riferimento di velocità, che arrivano anche a 15m/min per ogni aggiornamento

del valore, comportando un rischio maggiore di instabilità del sistema di regolazione della tensione, giungendo talvolta alla rottura del materiale. In presenza del controllore Simotion invece è garantito sempre un ottimo controllo del tiro in modo tale che, anche in condizioni critiche, venga arrestata correttamente la macchina senza perdere il materiale e permettendo il ripristino del normale funzionamento senza alcun intervento sul materiale in lavorazione.

9. CONCLUSIONI

Nell'ambito del presente lavoro di tesi sono state analizzate le funzionalità di macchine per Converting e le relative tecniche di controllo del processo di lavoro, che consiste essenzialmente nella trasformazione di nastri avvolti in bobine. Questa operazione può essere suddivisa in tre fasi: svolgimento, lavorazione e/o eliminazione dei difetti del nastro ed infine avvolgimento in una o più bobine. L'obiettivo finale del processo è quello di ottenere bobine compatte e senza difetti, in modo che rispettino i canoni di accettabilità normalmente riconosciuti a livello industriale (§Cap.2).

Si individuano tre parametri che permettono di regolare la compattezza dei prodotti di avvolgimento, nominati comunemente TNT (§Cap.3): carico di trazione sul materiale (*Tension*), pressione sulla superficie periferica della bobina (*Nip*) e differenza di coppia applicata tra l'asse della bobina e quello di un rullo in appoggio (*Torque*). Mentre la componente Torque è applicata raramente, solo in presenza di una particolare configurazione della stazione di avvolgimento, il contributo del Nip viene ampiamente sfruttato. Sulle macchine che sono state oggetto di analisi il Nip è regolato mediante l'azione di cilindri oleodinamici che movimentano il rullo di contrasto della bobina in avvolgimento. Dall'analisi della configurazione geometrica del sistema è stato stabilito il legame tra la pressione nelle camere dei cilindri e la forza di contatto. In questo modo il sistema di regolazione è in grado di garantire una pressione di contatto appropriata. Tra i tre parametri di controllo quello principale è però la tensione sul materiale poiché una sua efficace regolazione, oltre a migliorare la compattezza della bobina finale, garantisce che le altre operazioni, effettuate nelle diverse aree della macchina, vengano effettuate correttamente. È indispensabile quindi determinare la tensione del nastro ottimale per ogni lavorazione e garantire che essa sia mantenuta ad un valore pressoché costante in tutte le fasi di lavoro; tale regolazione viene effettuata sugli assi di svolgimento e avvolgimento mediante l'implementazione delle cosiddette funzioni winder nel sistema di controllo dell'azionamento elettrico che movimentano la bobina (§Cap.4).

Gli algoritmi delle funzioni winder sono stati integrati in progetti per la gestione degli azionamenti elettrici delle macchine dell'azienda IMS Deltamatic. In particolare sono state esaminate ed implementate due soluzioni di controllo degli assi. La prima configurazione (§Cap.6) prevede la gestione degli azionamenti tramite un PLC, il quale oltre a farsi carico dell'automazione di processo effettua il coordinamento dei motori mediante la generazione del riferimento di velocità e il controllo sul loro stato di funzionamento; le funzioni relative alla

gestione del movimento e delle specifiche applicazioni degli assi sono invece implementate negli azionamenti. Il lavoro è consistito nell'integrazione dei nuovi dispositivi in progetti già sviluppati dall'azienda con modelli di azionamento diversi: sono state create interfacce di comunicazione su bus di campo tra drive e PLC e sviluppati programmi dedicati all'interno degli azionamenti. La seconda configurazione (§Cap.7) è invece caratterizzata dalla presenza di un controllore dedicato alla gestione degli azionamenti, all'interno del quale è stato sviluppato uno standard di programmazione nuovo per l'azienda. Nell'intento di creare un progetto flessibile che potesse essere facilmente adattato alle varie tipologie di macchine per Converting, sono state individuate le funzionalità comuni e messi a punto, anche con l'ausilio di librerie standard Siemens, blocchi di programmazione parametrizzabili per garantire una facilità di sviluppo dei progetti da parte dei tecnici dell'azienda. La gestione delle applicazioni specifiche degli assi è stata per esempio sviluppata mediante una suddivisione in quattro classi: assi winder, motori con encoder regolati in velocità, senza encoder e posizionatori; per ognuna è stata sviluppata una funzione personalizzata e parametrizzata, all'interno della quale sono stati previsti specifici comandi e sequenze di controllo dei movimenti.

Lo sviluppo dei progetti nelle due configurazioni, dopo un lungo periodo iniziale di ideazione e creazione, ha subito una rapida e continua evoluzione mediante la loro applicazione alle commesse dell'azienda, le quali si sono susseguite richiedendo tempi ridotti per la progettazione e il collaudo. Sono stati quindi tutti testati sperimentalmente, verificando la correttezza delle implementazioni effettuate nei sistemi di controllo e validando le teorie note sul processo di lavoro. La messa in servizio ha permesso inoltre di confrontare i due sistemi mettendo in luce le loro differenze prestazionali (§Cap.8): la maggior velocità di elaborazione dei programmi e la predisposizione all'implementazione di logiche più complesse nel controllore dedicato agli azionamenti permettono di eseguire regolazioni più efficaci, un aggiornamento del riferimento di velocità più rapido ed una compensazione dei carichi più corretta. Questi vantaggi comportano un migliore controllo della tensione in tutte le fasi di lavoro della macchina. Nel caso della configurazione di gestione degli azionamenti mediante PLC si è ottenuto comunque un funzionamento soddisfacente, garantendo un buon controllo di tensione, anche se, durante le situazioni di arresto rapido si può raggiungere un'instabilità che aumenta il rischio di rottura del materiale. Considerando però la maggior facilità di progettazione di quest'ultimo sistema l'azienda ha ritenuto valide entrambe le soluzioni di configurazione, adottando quella con il controllore dedicato per macchine più complesse e

prestazionali e la soluzione con la gestione tramite il PLC dove non sono richieste performance e dinamiche particolarmente elevate.

Una possibile evoluzione del presente lavoro potrebbe riguardare l'approfondimento di metodologie di taratura del regolatore PI per il controllo della tensione nelle due varianti con celle di carico e ballerino. Per lo sviluppo di tale attività sarebbe indubbiamente utile mettere a punto il modello del processo di avvolgimento all'interno di una macchina tipo, che includa anche un'analisi delle caratteristiche di deformabilità dei materiali in lavorazione; potrebbe essere infatti la soluzione per ottimizzare in modo analitico i regolatori prima dell'approccio sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.S.Dudzinski, "Undertanding center-driven web winders – Part 1", Power transmission design, 1995
- [2] D.Roisum, "The mechanics of winding", Tappi press, 1994
- [3] D.Roisum, "Making a quality roll product – Intro to winding", www.roisum.com
- [4] Pfeiffer, J.David, "The mechanics of a rolling nip on paper webs", Tappi J., 1968
- [5] Good, J.Keith, Pfeiffer, "Tension losses during centerwinding", Tappi Finishing and Converting Conference, 1992
- [6] DuBois G.B., "Selecting proper winding tension for various web substrates", Tappi J., Maj 1993
- [7] Jones J.P., "Determining Tension Values", Converting Mag., Nov 1989
- [8] ABB Force measurements, "Web tension systems with tension electronics PFEA 111/112", www.abb.com
- [9] Siemens, "Standard application winder with Simotion", Apr 2008
- [10] N.A.Ebler e altri, "Tension control: dancer rolls or load cells", IEEE Transactions on industry applications, Aug 1993
- [11] D.Roisum, "Nip induced defects of wound rolls", Finishing and Converting Conference, 1994
- [12] K.Ishihara e altri, "AC Drive system for tension reel control", IEEE Transactions on industry applications, Feb 1985
- [13] Siemens, "Motori asincroni 1PH7 – Manuale di progettazione", Apr 2009
- [14] Siemens, "Methods of diameter determination for center driven unwinds & rewinds", www.siemens.com/converting
- [15] G.Diana, F.Resta, "Controllo di sistemi meccanici", Polipress, 2011
- [16] IMS Deltamatic, www.imsdeltamatic.com
- [17] Siemens, Documentazione Simotion, 2009

Ringraziamenti

Nel passaggio dalla meccanica alla mecatronica ho percorso un lungo cammino che mi ha permesso di abbracciare orizzonti più ampi, ho allargato le mie conoscenze raggiungendo mondi e culture lontane... diventando un ingegnere e un uomo più completo.

Ringrazio il Professor Riccardo Riva, presidente della scuola di dottorato in Meccatronica e cattedratico di grande spessore umano, per avermi dato la possibilità di far parte del contesto accademico.

Un ringraziamento va anche al Professor Paolo Righettini che ha avviato e inquadrato il mio lavoro fornendomi utili ed efficaci strategie metodologiche di carattere scientifico.

Rivolgo un sentito ringraziamento al Professor Roberto Strada che ancora una volta ha mostrato grande disponibilità nel rileggere accuratamente la mia Tesi, soprattutto nelle sue parti più spigolose, fornendomi preziosi suggerimenti e peculiarità senza i quali non avrei potuto sviluppare una coscienza critica rispetto alla mia ricerca.

Ringrazio il signor Raffaele Ghilardi, proprietario della IMS Deltamatic, che mi ha accolto tre anni fa in una grande azienda permettendomi di crescere professionalmente e dandomi l'opportunità di frequentare realtà lavorative estese a contesti internazionali.

Tengo a ringraziare profondamente l'ingegnere Daniele Vaglietti per aver per primo sostenuto il mio progetto, per aver contribuito alla mia formazione e per aver creduto nelle mie capacità e nella mia curiosità intellettuale, affidandomi responsabilità di grande rilievo che mi auguro di ricompensare adeguatamente con costante serietà e dedizione.

Rivolgo un particolare ringraziamento a Valentino Vavassori che, grazie alla sua conoscenza tecnica e al suo rigore metodologico, in ogni momento mi ha dato idee, elementi di discussione e piste grazie alle quali ho potuto riflettere seriamente sul modo in cui conducevo il mio lavoro.

Ringrazio tutti i miei colleghi della IMS, in particolare Diego, Paolo, Massimo, Riccardo e Luca con i quali ho condiviso giornate di grande impegno, ma soprattutto piacevolissime risate che ci hanno tenuti uniti anche fuori dal contesto lavorativo.

Un grazie di cuore alla mia famiglia: ai miei fratelli Nicoletta e Marco per i loro consigli e il grande affetto con il quale mi sono sempre stati vicini, a mia mamma per la grande pazienza e l'immenso sostegno morale che sa darmi e a mio papà per il continuo incoraggiamento e la smisurata fiducia che ha riposto in tutte le mie scelte, personali e lavorative. A loro devo tutto quello che sono e che sarò.

In ultimo, ma non per importanza, un gigantesco ringraziamento a Claudia per gli innumerevoli consigli che mi ha saputo dare e soprattutto perché riesce a donarmi ogni giorno tanta serenità e allegria. Nel suo grande amore per la ricerca ho trovato un forte stimolo a credere nel lavoro che stavo portando a termine... poiché nella ricerca, così come nella vita, i risultati si ottengono solo attraverso grande passione, umanità e dedizione.