

Tesi magistrale in ingegneria elettrica – A.A. 2021/2022

Analisi tecnico economica dei sistemi di conversione in una linea industriale



**Politecnico
di Torino**

**Neirotti Filippo
S275402**

Relatori

Prof. Paolo Di Leo

Relatore

Andrea Punta, Luca Garino

Relatori aziendali

Politecnico di Torino
28 Marzo 2022

Ringraziamenti

In primo luogo, volevo ringraziare il mio relatore che ha permesso la stesura della mia tesi il Professor. Paolo Di Leo e i miei due relatori aziendali che mi hanno accompagnato in questo percorso Andrea Punta e Luca Garino.

Ringrazio profondamente la mia famiglia, senza la quale non avrei potuto raggiungere un traguardo di questo tipo, in particolar modo mia mamma e mia nonna che mi hanno sempre sostenuto e spronato con tutto l'amore che solo queste due donne mi hanno saputo dare. Mio padre e mio fratello che sono stati silenziosi consiglieri e sostenitori nei momenti più critici durante il mio iter.

Ringrazio il mio amico Federico, con il quale ho condiviso tutto il mio percorso di studi al Politecnico e senza il quale non sarei sicuramente riuscito a terminarli per tutto il supporto e l'aiuto che è riuscito a darmi.

Ringrazio la mia fidanzata Alice con la quale, nell'ultimo periodo, ho trascorso momenti bellissimi, pieni di amore e complicità, che mi hanno permesso di essere più tranquillo e poter affrontare esami con l'approccio corretto.

Infine volevo ringraziare tutti i miei amici e in particolar modo le persone che mi sono state affianco in questi anni come: Andrea, Alessandro, William e Fabio, senza i quali avrei vissuto una vita e un percorso di studi più triste e malinconico rispetto a come è stato vissuto, grazie alla condivisione di momenti di svago, divertimento e allegria.

Spero siate molto orgogliosi dell'obiettivo che ho conseguito perché ai miei occhi era irraggiungibile, ma grazie a voi, alle vostre parole e gesti sono riuscito a realizzarlo.

Con affetto immenso,

Filippo Neirotti.

Sommario

Capitolo 1: Introduzione.....	1
Capitolo 2: Stato dell'arte della conversione industriale	4
Capitolo 3: Descrizione del caso studio.....	10
Capitolo 4: Implementazione di un caso parzialmente rigenerativo	25
Capitolo 5: Implementazione del caso non rigenerativo	39
Capitolo 6: Analisi tecnico economico delle possibili soluzioni prospettate	53
Capitolo 7: Conclusioni.....	56
Bibliografia.....	57

Elenco Tabelle

Tabella 1: Elenco motori presenti nella linea.....	24
Tabella 2: Elenco motori rigenerativi presenti nella linea	25
Tabella 3: Motori che mantengono drive S120	33
Tabella 4: Forze specifiche zone	42
Tabella 5: Tiro nelle diverse zone	44
Tabella 6: Analisi forze briglia 1	46
Tabella 7: Analisi forze briglia 2	46
Tabella 8: Analisi forze briglia 3	47
Tabella 9: Analisi forze briglia 4	47
Tabella 10: Costi finali linee.....	53

Elenco Figure

Figura 1: Schema convertitori statici cambiare immagine.....	2
Figura 2: schema elettrico rigenerativo dell'impianto	4
Figura 3: Basic feed	5
Figura 4: smart feed	6
Figura 5: active feed	7
Figura 6: elenco drive siemens.....	8
Figura 7: componenti fondamentali di corrente e tensione nel piano (α,β)......	11
Figura 8: piano di riferimento tipico (d,q) nel caso di convertitori connessi alla rete.	12
Figura 9: controllo motore asincrono.....	13
Figura 10: decoiling area vista 3D.....	15
Figura 11: Sezione primo svolgitore	16
Figura 12: Sezione secondo svolgitore.....	17
Figura 13: Sezione saldatrice e pulitura	18
Figura 14: sezione sistema di accumulo e forno.....	19
Figura 15: accumulatore di uscita e avvolgitore.....	21
Figura 16: coiling area.....	21
Figura 17: grafico prezzo performance convertitori Sinamic	26
Figura 18: Guida per la scelta Sinamic	28
Figura 19: Grafico potenza tempo servizio S1	30
Figura 20: Grafico potenza tempo servizio S3	30
Figura 21: Grafico potenza tempo servizio S9	31
Figura 22: Linea con rigenerazione parziale	32
Figura 23: grafico costo potenza drive S120 e G120.....	36
Figura 24: Percentuali di risparmio	37
Figura 25: schema elettrico non rigenerativo dell'impianto	40
Figura 26: Forze in una briglia	43

Abstract

I convertitori hanno un ruolo sempre più importante all'interno di una linea elettrica. Questo dovuto alla veloce progressione che sta subendo l'elettronica di potenza. La scelta dei tipi di convertitori all'interno dell'impianto è un tema sempre più attuale e trattato dall'azienda Prisma Impianti Spa con la quale si è svolta la stesura di questa tesi. Pertanto l'obiettivo di questa tesi è svolgere un'analisi tecnico economica di uno specifico impianto analizzando i diversi tipi di conversione che possono essere utilizzati per questa linea.

Capitolo 1: Introduzione

Nell'ultimo mezzo secolo il mondo ha conosciuto una rapida crescita nell'ingegnerizzazione degli impianti, soprattutto nella parte elettrica e nell'utilizzo di convertitori elettronici di potenza, per ottimizzare l'utilizzo delle macchine elettriche in ogni campo di applicazione. L'elettronica di potenza è una tecnologia abilitante che consentirà di raggiungere una bassa intensità energetica e un'elevata efficienza di processo per far crescere il mondo in modo sostenibile.

I circuiti elettronici di potenza, composti da dispositivi di potenza a semiconduttore con la funzione di interruttori, sono detti convertitori statici. Essi sono impiegati per la conversione delle grandezze elettriche (tensione e corrente) da una forma ad un'altra (da alternata a continua e viceversa) oppure, mantenendo la stessa forma, variando le loro caratteristiche come ampiezza e frequenza.

I convertitori statici possono essere suddivisi nelle seguenti quattro categorie:

- convertitori AC-DC (raddrizzatori non controllati, raddrizzatori controllati, convertitori a tiristori, raddrizzatori a commutazione forzata)
- convertitori DC-AC (invertitori, convertitori multilivello, convertitori cc-ca risonanti)
- convertitori DC-DC (buck, boost, buck-boost e loro corrispettivi isolati, chopper, convertitori cc-cc risonanti)
- convertitori AC-AC (cicloconvertitori, sincroconvertitori, convertitori a matrice, regolatori di tensione alternata).

La denominazione "statico" deriva dall'assenza di organi in movimento e si contrappone alla conversione rotante che utilizza macchine elettriche rotanti. L'attuale sviluppo di dispositivi elettronici di potenza ha portato ad un'ampia diffusione dei convertitori statici che, a parte casi molto particolari, hanno completamente soppiantato i convertitori rotanti a causa del miglior rendimento, della maggiore affidabilità e delle possibilità di controllo.

I convertitori possono essere a tensione impressa o a corrente impressa; come si evidenzia dai nomi, uno è alimentato in tensione e uno in corrente. Siccome è molto più

facile disporre di sorgente di tensione rispetto che una di corrente, i primi sono molto più diffusi rispetto ai secondi.

Se l'energia elettrica può fluire solo dall'ingresso all'uscita, il convertitore viene detto unidirezionale. Se invece l'energia elettrica può fluire sia dall'ingresso all'uscita che dall'uscita all'ingresso il convertitore è detto bidirezionale. Affinchè possa fluire energia anche dall'uscita all'ingresso il carico deve essere necessariamente attivo. Con il termine attivo si vuole intendere che il carico può diventare la sorgente in alcuni frangenti tramite la propria forza elettromotrice generata nel suo funzionamento. In questo caso la tensione non sarebbe imposta al carico ma verrebbe imposta dal carico.

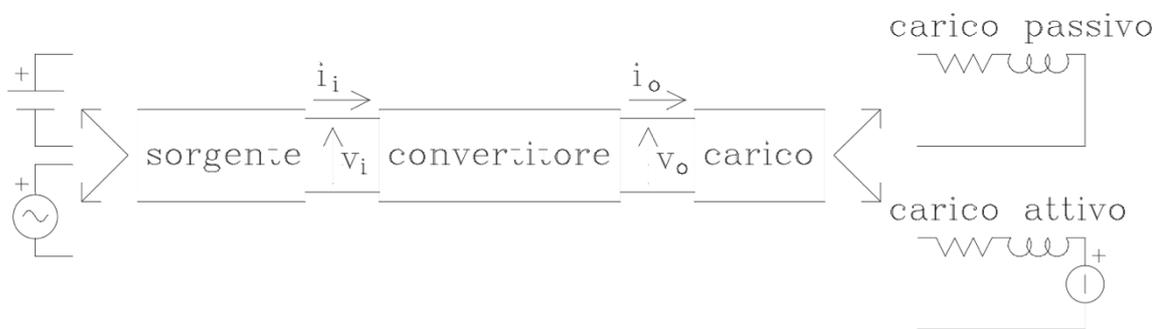


Figura 1: Schema convertitori statici cambiare immagine

L'oggetto in discussione in questa tesi è il confronto strutturale ed economico dei diversi tipi di conversione che potrebbero essere applicati a un impianto di ricottura metallica, per trovare, se è possibile delle soluzioni più sostenibili a livello economico con un occhio di riguardo al mantenimento di un alto livello di efficienza dell'impianto.

In questo studio si vuole rivolgere l'attenzione al fatto che, come detto precedentemente, lo sviluppo repentino nell'utilizzo dei convertitori ha dato un grosso aiuto all'ingegnerizzazione, ma soprattutto alla diminuzione delle perdite e all'aumento della rigenerazione di energia, che normalmente verrebbe dissipata e non sfruttata. Si vuole analizzare come i convertitori bidirezionali possano aiutare nel recupero di energia e nel diminuire il consumo di energia assorbito da rete. In questi impianti industriali l'obbiettivo dell'elettronica di potenza è quella di avvicinarsi a una efficienza energetica tendente a uno, cosa che sappiamo essere impossibile causa perdite.

A seconda di come viene pensata la costruzione dell'impianto e quali tipi di convertitori si decida di utilizzare si avrà una differenza tra energia prelevata dalla rete ed energia

rigenerata. Ovviamente se si pensa a un impianto totalmente rigenerativo sarà meno elevata l'energia richiesta da rete perchè avremo rigenerazione in tutti i motori in cui è permessa. Potrebbero esistere impianti totalmente non rigenerativi o parzialmente rigenerativi e qui l'energia assorbita da rete sarà sicuramente maggiore, ma in questo caso si avrà un vantaggio sull'investimento iniziale per la costruzione dell'impianto, poiché i drive unidirezionali sono molto meno costosi dei drive bidirezionali.

Negli impianti di svolgimento coil la rigenerazione può avvenire in due diversi procedimenti dell'impianto:

1. Una linea di ricottura continua si occupa dello svolgimento e del trasporto di una lamiera in modo continuativo. La rigenerazione in questo impianto viene ottenuta dai motori che tendono la lamiera e applicano una coppia resistente di verso opposto al movimento della linea, funzionando così da generatori.
2. La seconda fonte di rigenerazione è dovuta al movimento verticale che effettuano i sistemi di accumulo della lamiera. Questi quando si abbassano recuperano energia grazie all'energia potenziale del peso della lamiera che viene attirata verso terra.

Questo recupero di energia implica un costo, perchè ovviamente i convertitori rigenerativi sono più costosi rispetto a quelli non rigenerativi.

L'analisi condotta sarà cercare di avere rigenerazione, ma ridurre i costi con convertitori bidirezionali solo dove sono necessari e analizzare come la rigenerazione impatta su un impianto studiando un caso dell'impianto senza generazione.

La tesi proposta è stata svolta presso la Prisma Impianti Spa che cerca di rendere più semplice la progettazione e la messa in servizio dell'impianto, sviluppandone la parte elettro-strumentale e i sistemi di automazione; e cercando attraverso la conoscenza dei drives e il controllo del processo, di ottimizzare i consumi energetici. L'azienda utilizza materiali di moltissime altre imprese, ma predilige l'utilizzo di componenti Siemens per la grande sperimentazione effettuata sino ad ora. La trattazione dei drive in questa tesi verrà condotta con drive Siemens che sono anche quelli utilizzati nell'impianto reale.

Capitolo 2: Stato dell'arte della conversione industriale

In questo capitolo andremo ad analizzare i diversi tipi di struttura che possono essere utilizzati per il primo step di conversione negli impianti industriali e lo stato dell'arte che viene rappresentato.

Prima di analizzare i diversi tipi di conversione si cerca di fare chiarezza e osservare come sono utilizzati e connessi i drive in questo impianto grazie alla figura 12.

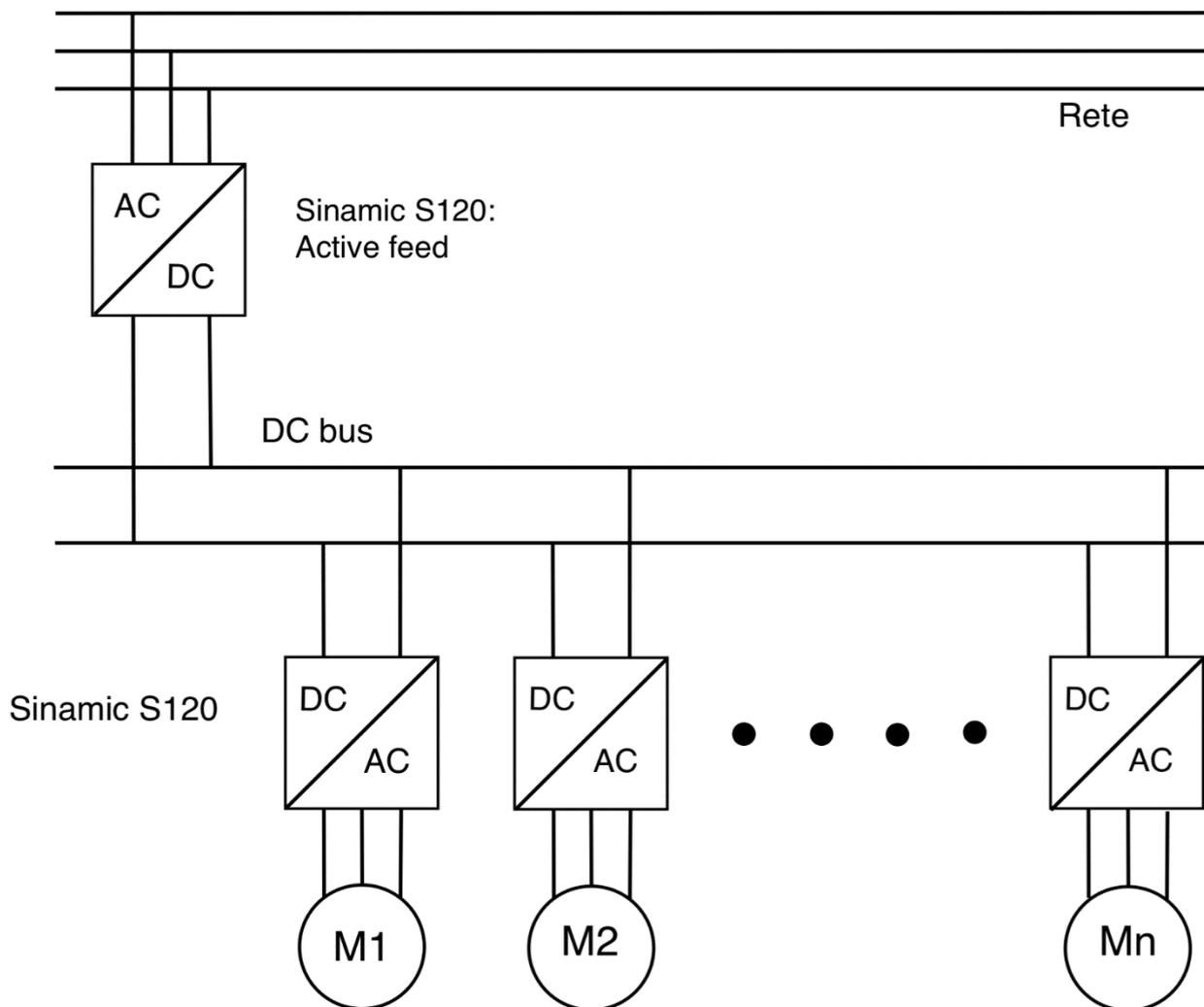


Figura 2: schema elettrico rigenerativo dell'impianto

Esistono diverse strutture di conversione, in questo caso avremo una conversione a due stadi, il primo è una conversione della rete da AC-DC e quindi si utilizza un raddrizzatore

e invece il secondo è una conversione da continua ad alternata DC-AC tramite inverter per alimentare tutti i motori della linea. Questo tipo di conversione viene attuata proprio per avere rigenerazione, grazie al primo livello di conversione, avremo un DC link comune, utile per accumulare energia sotto forma di campo elettrico per alimentare tutti i convertitori DC-AC. Dopo questo condensatore avremo un DC bus, ovvero un percorso sbarre dove potrà “muoversi” l’energia rigenerata dai motori ed essere utilizzata per diminuire la quantità di elettricità richiesta dalla rete.

Esistono moltissimi tipi di drive, ma come abbiamo detto nell’introduzione, utilizzeremo drive Siemens e per ora si andrà ad analizzare il drive di rete cioè il primo step di conversione da AC-DC (line module).

La Siemens per questo primo stadio offre tre livelli di qualità della conversione:

- Basic feed
- Smart feed
- Active feed

Il primo caso è il basic feed che consiste in un convertitore a due quadranti con conversione non regolata tramite diodi o tiristori a seconda del tipo di convertitore. È necessario sottolineare il fatto che, siccome questo convertitore è a due quadranti, è unidirezionale e di conseguenza sarà presente un chopper di frenatura nel caso in cui l’energia rigenerata arrivi per essere convertita dall’uscita.

La Siemens propone due soluzioni per il Basic: chassis SINAMICS G130 (con tiristori) e SINAMICS G150 (con tiristori fino a potenze di ≤ 2150 kW e con diodi per potenze superiori).

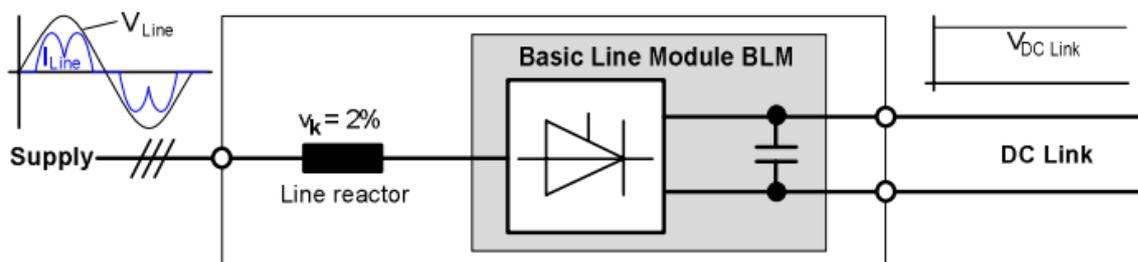


Figura 3: Basic feed

(Fonte: SINAMICS Low Voltage Engineering)

La soluzione intermedia è rappresentata dal convertitore smart feed che è composto da IGBT e non più da diodi o tiristori ed è possibile una regolazione a quattro quadranti quindi l'alimentazione può andare dall'ingresso al DC link e viceversa. Questo convertitore funziona con un controllo a onda quadra e non con il metodo del PWM (pulse width modulation). Con il controllo in onda quadra si avrà il valore efficace della fondamentale di tensione massimo in uscita, ma di conseguenza si avrà una massima distorsione di tensione e corrente in uscita. Come si può osservare avendo la bidirezionalità in questo convertitore non è necessario avere il chopper di frenatura.

Questa soluzione può essere ottenuta con un convertitore a sistema modulare del Sinamic S120 in forma chassis e in forma armadio.

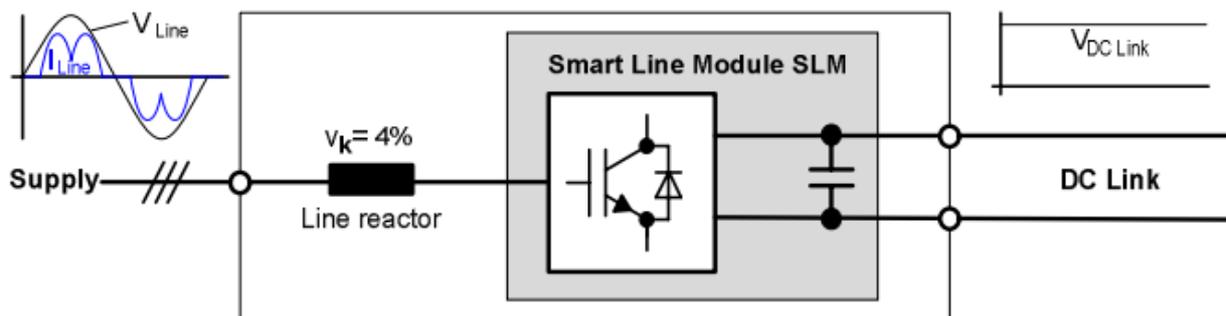


Figura 4: smart feed

(Fonte: SINAMICS Low Voltage Engineering)

La terza soluzione e la più performante è l'active feed che è formato da uno smart feed, ma comandato con la regolazione PWM e in più è dotato di un filtro in ingresso per avere, in caso di rigenerazione, una corrente idealmente sinusoidale lato rete e così facendo, ridurre il più possibile le armoniche dovute alla modulazione PWM.

Questo sistema è il più performante e la Siemens offre la possibilità di utilizzare il Sinamic S150 in forma cabinet oppure il Sinamic S120 forma cabinet oppure Chassis.

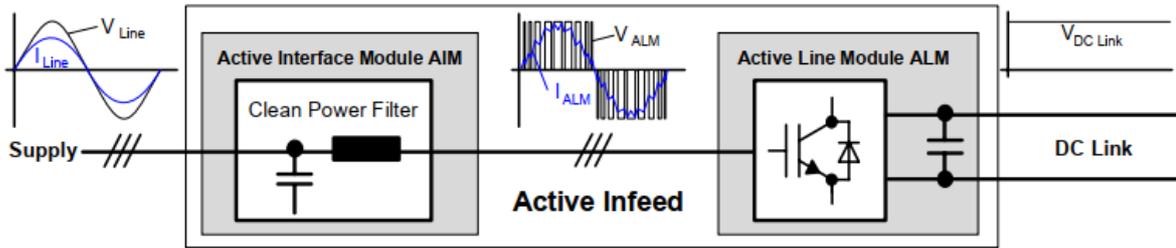


Figura 5: active feed

(Fonte: SINAMICS Low Voltage Engineering)

Queste sono le tre soluzioni prese in considerazione come primo stadio della linea per attuare una conversione AC-DC.

Queste sono le macro-diversità che si possono trovare in un impianto per il primo step di conversione.

Ora si cerca di analizzare le diverse soluzioni che si possono avere nel secondo step di conversione. Anche in questo caso la gamma di inverter esistenti è elevata, ma per conoscenza dei prodotti e le richieste del cliente finale utilizzeremo gli inverter proposti da Siemens.

Nella figura 16 si può vedere l'elenco dei drive che si possono usare:

Bassa tensione										Tensione continua	Media tensione
Basic Performance		General Performance					High Performance			Applicazioni in corrente continua	Applicazioni con elevata potenza
SINAMICS V20	SINAMICS V90	SINAMICS G120C G120 G120P G120P Cabinet	SINAMICS G110D G120D G110M SIMATIC ET 200pro FC-2	SINAMICS G130 G150	SINAMICS G180	SINAMICS S110	SINAMICS S210	SINAMICS S120 S120M	SINAMICS S150	SINAMICS DCM	SINAMICS GH150 GH180 GM150 SM150 GL150 SL150 SM120CM
da 0,12 kW fino a 30 kW	da 0,05 kW fino a 7 kW	da 0,37 kW fino a 630 kW	da 0,37 kW fino a 7,5 kW	da 75 kW fino a 2700 kW	da 2,2 kW fino a 6600 kW	da 0,55 kW fino a 132 kW	da 0,05 kW fino a 0,75 kW	da 0,55 kW fino a 5700 kW	da 75 kW fino a 1200 kW	da 6 kW fino a 30 MW	da 0,15 MW fino a 85 MW
Pompe, ventilatori, compressori, nastri trasportatori, miscelatori, mulini, macchine per filatura, macchine tessili, banchi frigo, attrezzature da palestra, sistemi di ventilazione	Manipolatori industriali, macchine per il confezionamento, dispositivi automatici di montaggio, macchine per la deformazione del metallo, macchine per la stampa, avvolgitori e svolgitori	Pompe, ventilatori, compressori, nastri trasportatori, miscelatori, mulini, estrusori, domotecnica, industria di processo, HVAC, applicazioni per posizionatori monoasse nella costruzione di macchine ed impianti	Tecnica dei trasporti industriali, applicazioni per posizionatori monoasse (G120D)	Pompe, ventilatori, compressori, nastri trasportatori, miscelatori, mulini, estrusori	Specifico del settore per pompe, ventilatori, compressori, nastri trasportatori, estrusori, miscelatori, mulini, impastatrici, centrifughe, separatori	Applicazioni per posizionatori monoasse nella costruzione di macchine ed impianti	Imballatrici, manipolatori, dispositivi di alimentazione e prelievo, impilatrici, sistemi di assemblaggio automatici, automazione di laboratorio, industria del legno, del vetro e della ceramica, macchine da stampa digitali	Macchine di produzione (per il confezionamento, macchine tessili, per la stampa, per la produzione di carta, per la lavorazione della plastica), macchine utensili, impianti, linee di processo e laminatoi, navi e banchi prova	Banchi prova, taglierine trasversali, centrifughe	Azionamenti per laminatoi, macchine trafile, estrusori e impastatrici, funivie e ascensori, azionamenti per banchi prova	Pompe, ventilatori, compressori, miscelatori, estrusori, mulini, frantumatori, laminatoi, tecnica dei trasporti industriali, escavatori, banchi prova, azionamenti navali, soffiatori per altiforni, retrofit

Figura 6: elenco drive siemens

(Fonte: Convertitori SINAMICS per azionamenti monoasse- Catalogo D31.1)

Come si può notare dalla figura ci sono molti tipi di convertitori divisi in base alla natura della tensione, alle performance dei diversi convertitori, alla potenza che possono sostenere e in base all'impiego che deve supportare la macchina elettrica comandata dal drive. La scelta dei convertitori che si prenderà in considerazione per questo impianto esclude la tensione continua e la media tensione poiché le macchine elettriche presenti nell'impianto sono tutte alimentate in alternata e a bassa tensione. Di conseguenza la scelta dei tipi di drive ricadrà nelle colonne che sono sotto la bassa tensione e nei seguenti capitoli andremo ad analizzare più nel dettaglio quali tipi sono più adatti o quali si potranno utilizzare a seconda della richiesta della linea. Come si può notare in base alla qualità c'è differenza nel nome dei convertitori; infatti, i convertitori V sono basic performance, i convertitori G (fatta eccezione per l'S110) sono General

performance, mentre i convertitori S sono high performance. In tutte e tre le applicazioni ci sono diversi tipi di convertitori in base all'impiego e alla potenza.

Capitolo 3: Descrizione del caso studio

Il progetto in considerazione prevede l'ingegnerizzazione di tutta la parte elettrica di un impianto di svolgimento di lamiera che vengono trasportate e ricotte in un forno a idrogeno.

Questo forno a idrogeno lavora a ciclo continuo quindi le lamiere non devono mai essere soggette a blocchi o a rallentamenti. Se le lamiere rimangono più tempo del dovuto nel forno possono rompersi o non completare il processo di ricottura, e questo comporterebbe un arresto dell'impianto e una perdita a livello economico per la mancata produzione, per l'attesa di raffreddamento del forno (che è un tempo piuttosto elevato) e per il periodo di manutenzione necessario prima di poter far ripartire il sistema.

Per studiare quali sistemi di drive siano più performanti con costi minori bisogna capire dove sono utilizzati i motori elettrici all'interno della linea e che funzione svolgono.

L'impianto è dotato di un totale di 72 motori elettrici. Per cercare di entrare maggiormente nel dettaglio funzionale divideremo l'impianto in parti per poter osservare meglio la struttura sia a livello grafico, sia per capire quale funzione svolgono i motori e di conseguenza capire se sono rigenerativi o meno.

Ora però si cerca di analizzare come i motori possono rigenerare in base al controllo che viene applicato a queste macchine elettriche. Nello studio delle macchine trifasi rotanti in corrente alternata, per rendere più facile lo studio di esse, si cerca di trasformarle in macchine più semplici ma equivalenti a quella reale dal punto di vista elettromeccanico e energetico. Ad esempio, una macchina bifase con 2 soli avvolgimenti sfasati di 90 gradi elettrici, può essere studiata in modo più agevole di una macchina che possiede 3 avvolgimenti sfasati di 120 gradi. Queste semplificazioni vengono effettuate grazie alle trasformate di Clark-Park che permettono di convertire un sistema trifase in bifase e di ruotare un sistema bifase. La manipolazione di Clark trifase bifase è attuata utilizzando questa trasformazione:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

questa trasformazione preserva le quantità elettriche di ampiezza a discapito di una espressione di potenza modificata:

$$P = \frac{3}{2} V_{\alpha\beta} \cdot I_{\alpha\beta} \quad (2)$$

Nella trasformata (α, β) , le grandezze di rete elettrica corrente e tensione sono rappresentate come un vettore spaziale che ruota nello spazio ad una certa velocità angolare dipendente dall'armonica considerata. Per la componente fondamentale, la tensione e la corrente ruotano nel piano $\alpha\beta$ a 60 Hz (si ricorda che l'impianto viene costruito in America dove la frequenza di fondamentale è 60 Hz non 50 come in europa) in senso antiorario con un certo sfasamento chiamato φ che determina la potenza attiva per la componente fondamentale.

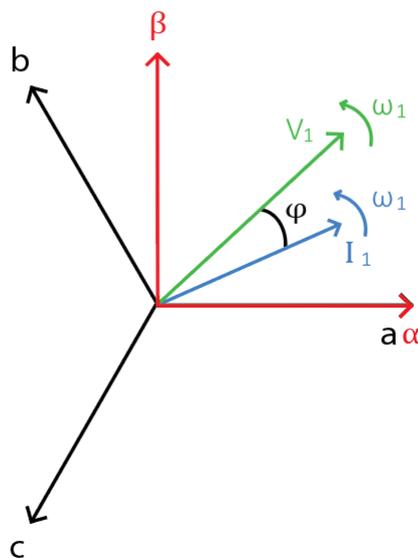


Figura 7: componenti fondamentali di corrente e tensione nel piano (α, β) .

Per semplificare il più possibile l'analisi della macchina elettrica, spesso viene eseguita un'altra trasformazione per passare da un sistema di riferimento statico ad uno rotante. Questo ulteriore cambio di quadro di riferimento porta molti vantaggi nel caso in cui il quadro sia sempre tenuto in fase con una grandezza elettrica, ed è composto da due assi ortogonali chiamati d e q. Nel caso di convertitore connesso alla rete, il riferimento rotante viene mantenuto con l'asse d in fase con la componente fondamentale della tensione di rete, facendo ruotare il riferimento sincrono con una velocità angolare di 60 Hz. La trasformazione da (α, β) a (d, q) viene eseguita utilizzando il seguente calcolo matriciale:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta(t) & \sin \vartheta(t) \\ -\sin \vartheta(t) & \cos \vartheta(t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

È importante sottolineare che questa trasformazione rotazionale richiede l'informazione di sfasamento della posizione richiesta dell'asse d rispetto all'asse α da applicare. Nel caso del convertitore connesso alla rete, l'angolo richiesto è la posizione angolare del vettore spaziale della tensione di rete rispetto all'asse α .

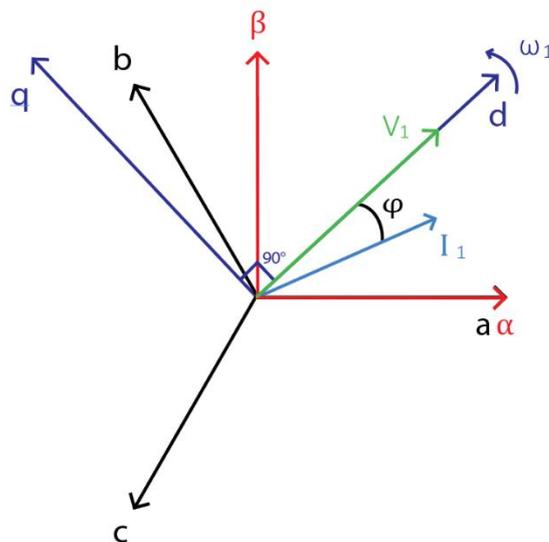


Figura 8: piano di riferimento tipico (d,q) nel caso di convertitori connessi alla rete.

Questa trasformata aggiuntiva è tipicamente giustificata dal fatto che nel sistema di riferimento (d,q) le grandezze elettriche alla frequenza fondamentale sono viste come valori costanti, quindi l'uso del regolatore integrale proporzionale (PI) è possibile per

qualsiasi schema di controllo che richieda zero come errore a regime per applicazioni AC.

La potenza in assi d,q può essere scritta come:

$$P = \frac{3}{2} p \cdot (\bar{i}_r \wedge \bar{\lambda}_r) \quad (4)$$

Utilizzando queste equazioni dei flussi di rotore e statore:

$$\bar{\lambda}_s = L_s \cdot \bar{i}_s + M \cdot \bar{i}_r \quad (5)$$

$$\bar{\lambda}_r = M \cdot \bar{i}_s + L_r \cdot \bar{i}_r \quad (6)$$

si possono ricavare diverse formule della potenza e in particolare di grande interesse:

$$P = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (k_r \cdot \bar{\lambda}_r \wedge \bar{i}_s) \quad (7)$$

Ora in questa formula avremo:

- p sono le coppie polari della macchina in considerazione
- k_r è una costante che viene calcolata come $\frac{M}{L_r}$

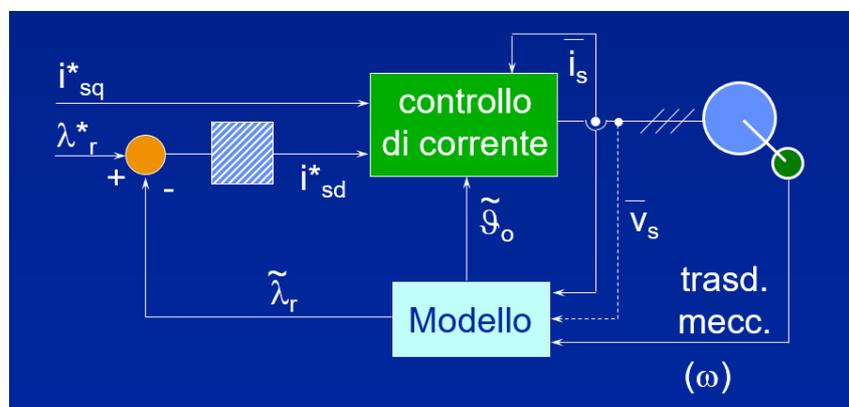


Figura 9: controllo motore asincrono

(Fonte: Azionamenti elettrici-poliTO)

Ora come si può osservare nell'immagine 4 il controllo della macchina asincrona field oriented si basa sul controllo di corrente di statore sui due assi d e q e sul flusso di rotore.

Come è noto dal controllo, per avere alta dinamica di coppia, si deve utilizzare l'ingresso i_{sq} , invece l'ingresso i_{sd} serve per variare il flusso λ_r e di conseguenza quando si vuole andare in deflussaggio. Si avrà alta dinamica di coppia con i_{sq} poiché non vi sono ritardi che invece si hanno con la corrente i_{sd} introdotto dalla costante di tempo τ_r :

$$\lambda_r = \frac{M \cdot i_{sd}}{1 + s \cdot \tau_r} \quad (8)$$

Dopo aver spiegato il controllo di una macchina a induzione si può capire come i motori in questione possano essere rigenerativi, ovvero, il carico diventa attivo e quindi impone lui stesso la tensione sul drive e di conseguenza la corrente i_{sq} verrà generata per ottenere la coppia desiderata negativa.

Ora si cerca di analizzare la struttura dell'impianto industriale più nel dettaglio. Nella figura 5 è illustrata la prima macroarea dell'impianto dove si può osservare la zona di svolgimento delle bobine. In questa area sono presenti:

- due rulli svolgitori per aumentare la velocità del processo e fare in modo che la linea non venga sottoposta a rallentamenti
- due rulli avvolgitori di una carta speciale con la quale viene avvolta la lamiera per fare in modo che non si rovini
- due spianatrici per rendere la lamiera meno curva e riuscire a imboccarla nel percorso che deve seguire
- cesoie per tagliare l'inizio del rotolo di lamiera poiché è la parte più rovinata e potrebbe dare problemi di imboccatura
- una saldatrice che unisce l'inizio e la fine delle due lamiere che vengono svolte per poter avere un processo continuativo.

Queste sono le principali funzionalità in questa area senza contare che non abbiamo considerato le funzionalità di movimento della linea e la messa in tensione della lamiera.

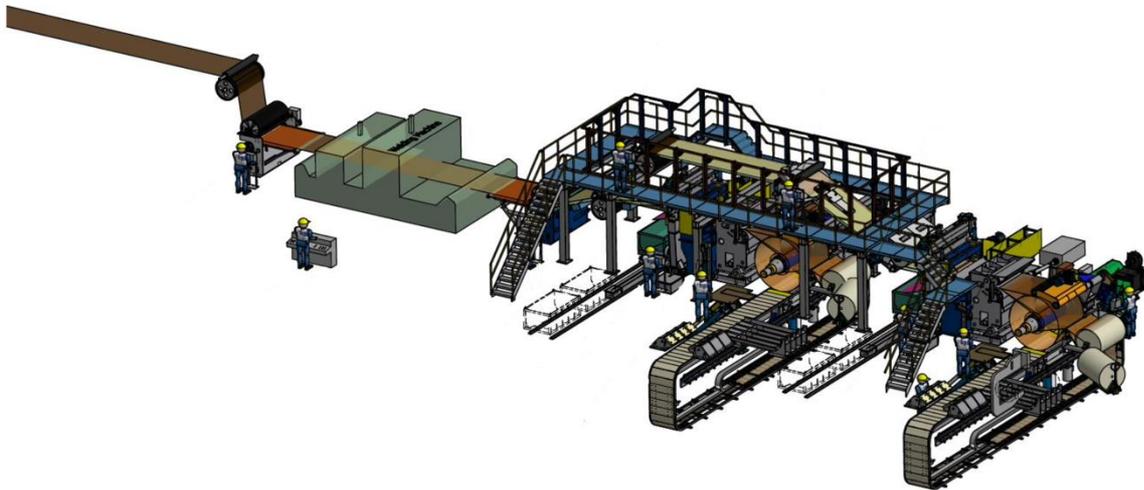


Figura 10: decoiling area vista 3D

Nell'immagine 6 si può osservare la sezione del primo svolgitore e analizzare più nello specifico i motori presenti in questa area. I motori presenti in questa zona sono:

- motore avvolgitore delle carte per protezione della lamiera
- motore svolgitore della lamiera
- il motore adibito al movimento per il ricambio della bobina
- motore per fare in modo che il coil non si alzi, ma venga imboccato nella spianatrice
- la spianatrice che è composta da due motori
- due rulli che bloccano la lamiera in posizione corretta per essere tagliata dalla cesoia
- un motore che muove un asse per rimuovere gli scarti tagliati dalla cesoia
- 3 motori per i tre rulli pinzatori che imboccano la lamiera
- 3 motori per muovere i tre tipi di tappeti quello pendente verso l'alto quello orizzontale e quello pendente verso il basso.

- Due motori per i due tappeti ausiliari per aiutare il processo di trasporto della lamiera quando abbiamo pendenze

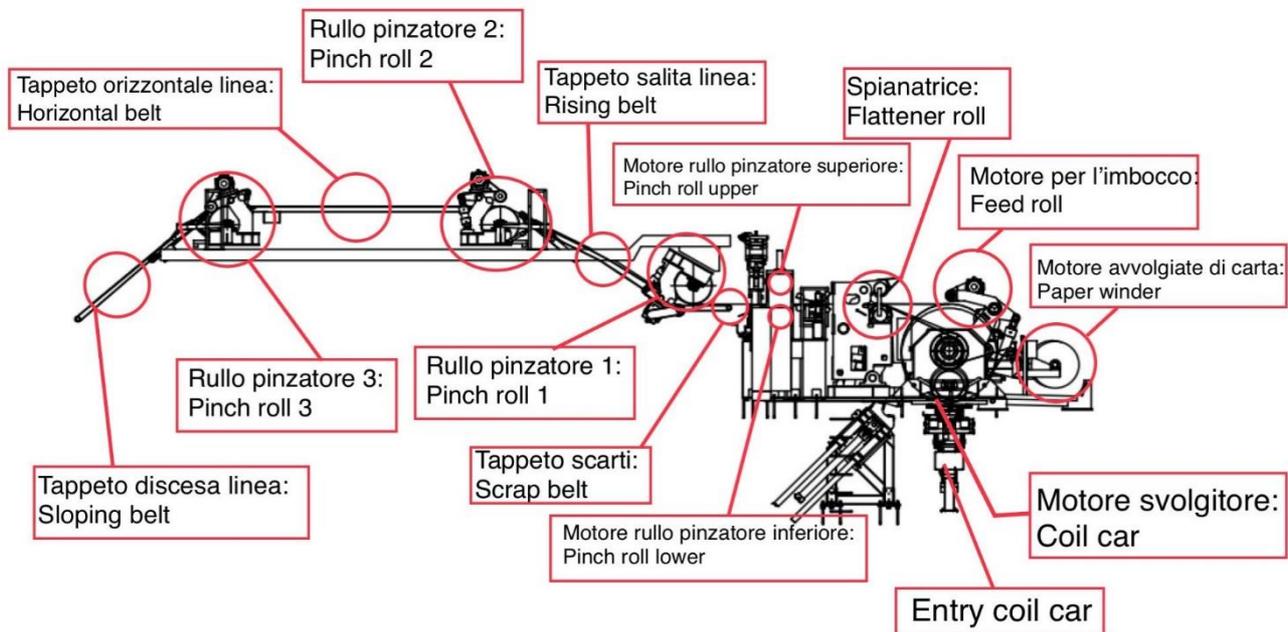


Figura 11: Sezione primo avvolgitore

La figura 7 rappresenta la sezione del secondo avvolgitore perché, come detto precedentemente, il processo deve essere continuativo e questo richiede la necessità di due assi avvolgitori. In questa zona i motori sono molto simili a quelli presenti nel primo avvolgitore, l'unica differenza è che la lamiera non scorre su una passerella rialzata e quindi non vi saranno 3 tappeti ma ne avremo solo uno che trasporta verso il basso la lamiera.

Quindi si avrà:

- motore avvolgitore delle carte per protezione della lamiera
- motore svolgitore della lamiera
- il motore adibito al movimento per il ricambio della bobina
- motore per fare in modo che il coil non si alzi ma venga imboccato nella spianatrice
- la spianatrice che è composta da due motori

- due rulli che bloccano la lamiera in posizione corretta per essere tagliata dalla cesoia
- un motore che muove un asse per rimuovere gli scarti tagliati dalla cesoia
- 1 motore per il rullo pinzatore che imbecca la lamiera
- 1 motore per muovere il tappeto che scorre verso il basso

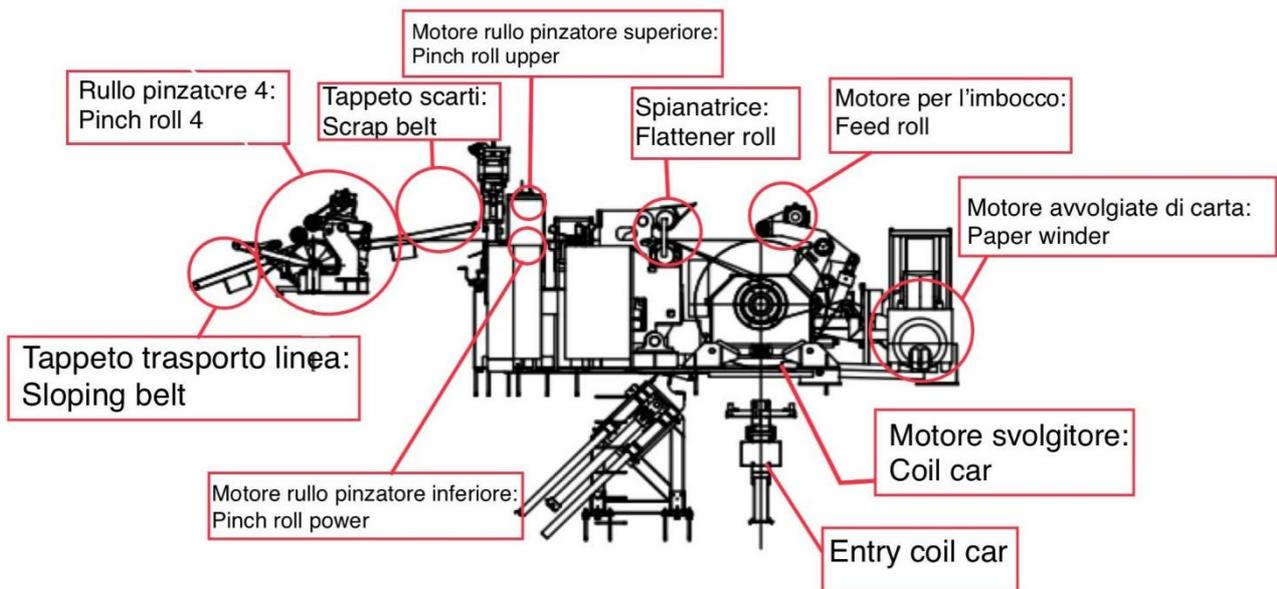


Figura 12: Sezione secondo svolgitore

Nella figura 8 si evidenzia la zona di saldatura e di pulitura della linea.

Questo processo è obbligatorio in quanto lo svolgimento della lamiera deve essere un movimento unico continuo. Dal momento in cui vengono svolte due bobine diverse bisogna unirle insieme saldandole. Parlando dei motori presenti in questa zona avremo:

- due rulli pinzatori in ingresso e in uscita della saldatrice per posizionare in modo corretto la parte di ingresso e di uscita della lamiera,
- un terzo pinch roll all'ingresso del processo di pulitura
- 10 motori per i 10 rulli adibiti al processo di pulitura della lamiera.

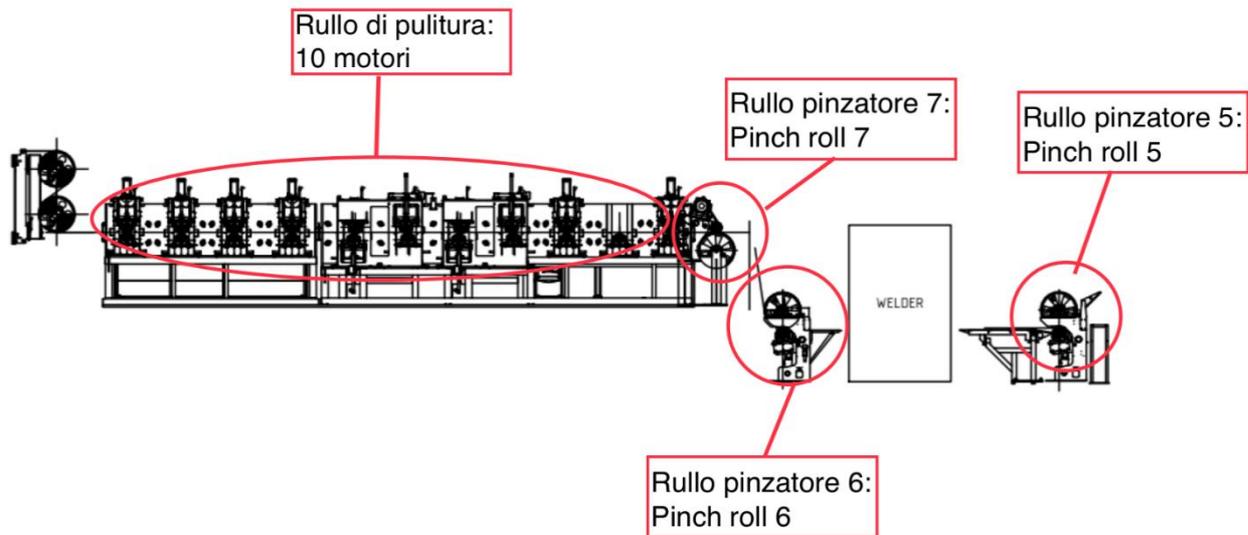


Figura 13: Sezione saldatrice e pulitura

Nella figura 9 è rappresentata parte del trascinamento, il sistema di accumulo della lamiera e il forno a idrogeno per la ricottura. La lamiera all'interno del forno non deve assolutamente fermarsi più del tempo stabilito per la ricottura, e per garantire ciò, il sistema di accumulo, che in fase di ingresso dovrà essere sempre nel punto più alto, viene utilizzato per questo motivo. Siccome il processo di saldatura e di taglio della prima parte del nastro ha un tempo di processo nel quale la lamiera non si muove, in questo periodo lo svolgimento del coil è bloccato. La linea non deve subire rallentamenti o fermate, poiché per riuscire a completare il trattamento del metallo nel forno, deve mantenere una velocità costante. Per questo motivo si attiva il sistema di accumulo. Si ha bisogno di questo sistema, per riuscire a far scorrere la lamiera nel forno ma tenerla ferma nelle parti precedenti al looper. Questo processo viene utilizzato anche in caso di guasto, infatti in questo caso, il sistema di accumulo si abbassa svolgendo la lamiera accumulata e l'impianto può rimanere fermo ed essere soggetto a manutenzione dagli operatori prima che il looper finisca la sua corsa e si abbassi completamente.

I motori presenti sono:

- una briglia composta da 4 motori adibita al movimento delle parti analizzate prima di queste

- un motore in cima al sistema di accumulo per abbassare e alzare il sistema di accumulo per rendere continuo il processo
- una seconda briglia composta da 4 motori per muovere la lamiera nel sistema di accumulo
- 1 motore in ingresso al forno
- 1 motore in cima al forno
- 1 motore in uscita dal forno
- Una briglia con 2 motori per trainare la linea quando è in movimento nel forno.

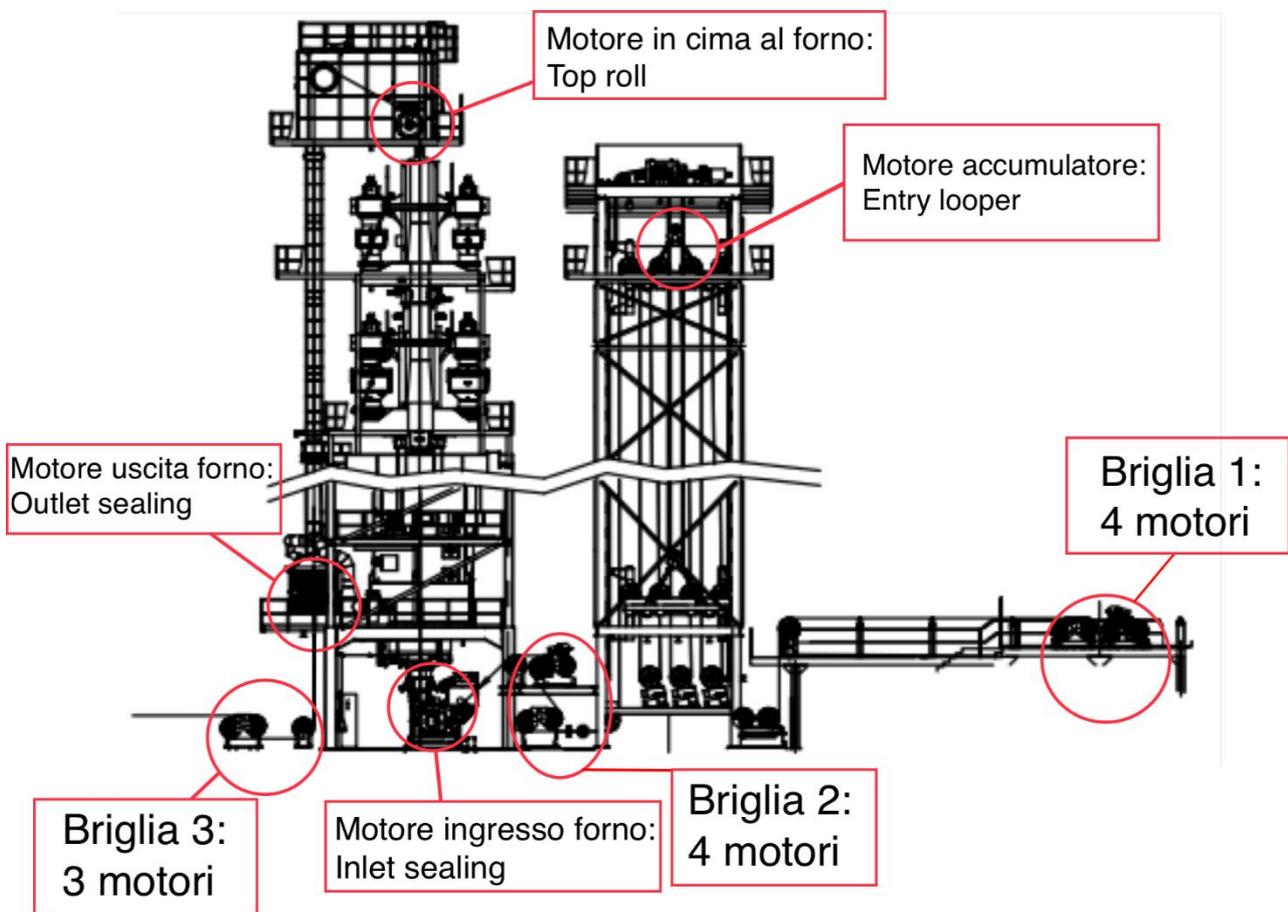


Figura 14: sezione sistema di accumulo e forno

Nelle figure 10 e 11 sono rappresentate le ultime parti dell'impianto che comprendono un sistema di accumulo analogo a quello precedentemente descritto, una cesoia per tagliare la lamiera e completare i coil, l'aspo avvolgitore che ha il compito di avvolgere la bobina di lamiera e tirare la linea e due rotoli di carte per avvolgere la lamiera e non

fare in modo che si rovini in analogia con i rotoli svolgitori a inizio linea. È da sottolineare il fatto che vi siano due rotoli per un solo rullo, questo perché una volta finito un rotolo di carta avvolgitore per cambiarlo ci vuole un tempo durante il quale non è possibile fermare il processo di riavvolgimento della linea ed è quindi necessaria una ridondanza di bobine per permettere la continuità del processo.

Il sistema di accumulo funziona in maniera analoga ma opposta rispetto a quella di ingresso, ovvero è sempre nella posizione più bassa e, quando la lamiera nella parte finale è bloccata, per i processi di taglio, si alza in modo da poter accumulare lamiera e fare in modo che la linea continui a scorrere nella parte antecedente al looper. Stesso funzionamento in caso di guasto nella parte finale della linea, il looper si alza in modo da poter accumulare lamiera e fare in modo che il guasto venga riparato dagli operatori prima che il sistema di accumulo sia nella sua posizione più alta.

Per quanto riguarda i motori sono presenti:

- un motore in cima al sistema di accumulo che permette il movimento dello stesso
- una briglia composta da 4 motori
- due motori per i rulli pinzatori all'ingresso e all'uscita della cesoia per mantenere in posizione la linea durante il taglio
- un motore per l'aspo avvolgitore
- il motore adibito al movimento per il ricambio della bobina
- due motori per i 2 avvolgitori di carta.

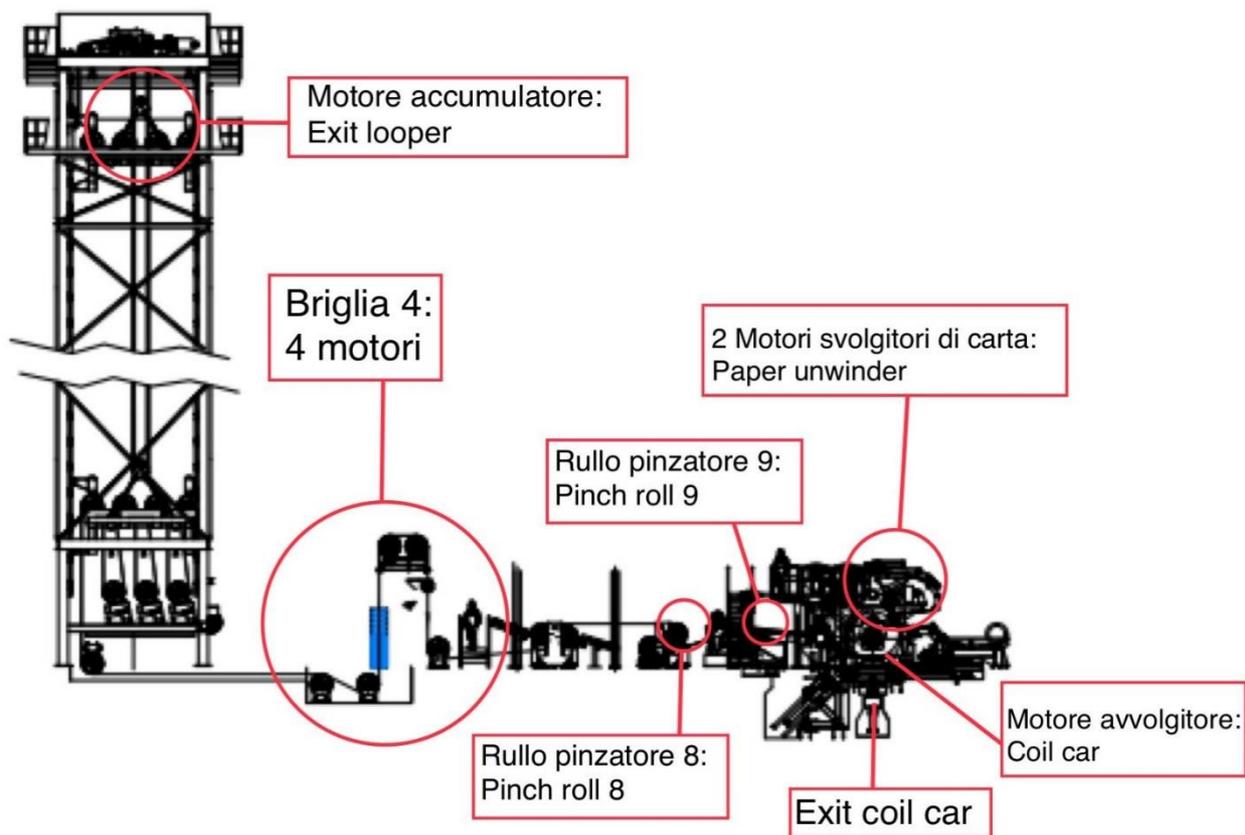


Figura 15: accumulatore di uscita e avvolgitore

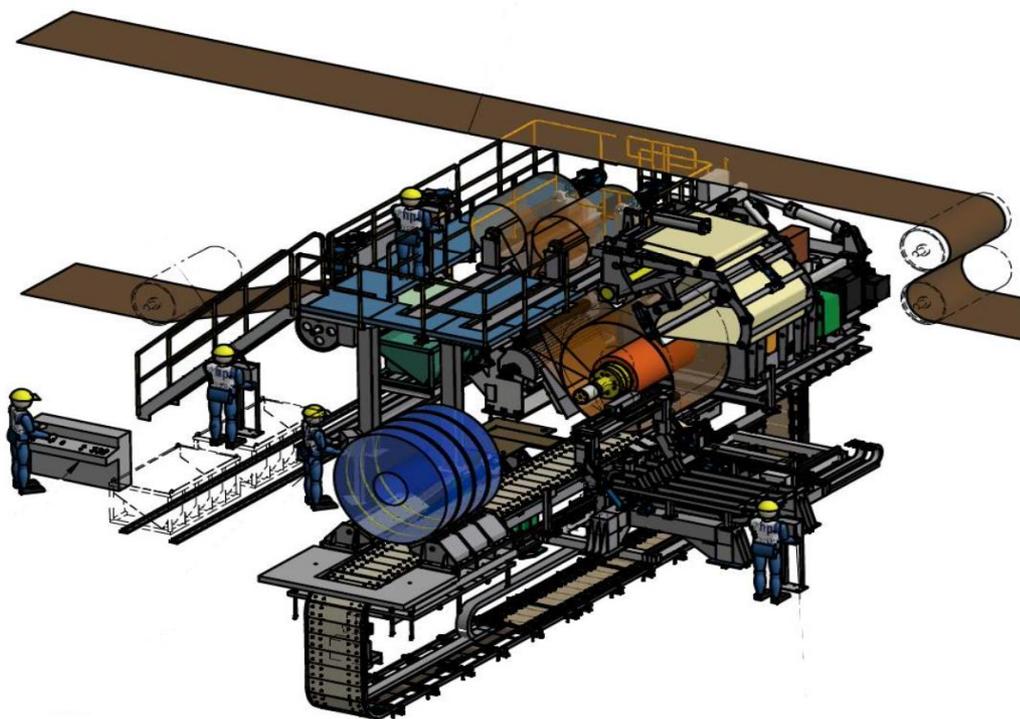


Figura 16: coiling area

L'analisi dell'impianto è molto importante per capire come funziona ogni macchina elettrica e di conseguenza sapere se questo motore sta trainando e quindi consumando energia elettrica o sta applicando una coppia resistente e di conseguenza generando energia. Dopo queste discriminazioni sarà necessario analizzare quali drive è più opportuno siano bidirezionali e quali no e analizzare un sistema completamente non rigenerativo per capire quanto i drive bidirezionali abbiano impattato sul mondo industriale.

Per completezza e per ricapitolare ciò che è stato detto in questo capitolo nella tabella seguente si elencheranno tutti i motori con i nomi utilizzati in questo capitolo e si scriverà se sono rigenerativi o meno:

Motore	Zona	Tipo motore	Potenza (kW)	Servizio
Coil car 1	Sezione primo svolgitore	Rigenerativo	200	s9
Entry coil car 1	Sezione primo svolgitore	non rigenerativo	11	s3
Paper winder 1	Sezione primo svolgitore	non rigenerativo	7,5	S1
Feed roll 1	Sezione primo svolgitore	non rigenerativo	7,5	S3
Spianatrice 1: roll drive	Macchina spianatrice	non rigenerativo	30	S1
Spianatrice 1: lean flattening roll	Macchina spianatrice	non rigenerativo	0,75	S3
pinch roll upper	Cesoia	non rigenerativo	7,5	S1
pinch roll lower	Cesoia	non rigenerativo	7,5	S1
dry driveaway scarp box 1	scrap box	non rigenerativo	0,75	S3
drive liftable 1	scrap box	non rigenerativo	1,46	s3
drive liftable 1	scrap box	non rigenerativo	1,46	s3
Rising conveyer belt	Trasporto lamiera	non rigenerativo	0,86	s3
conveyor belt horizontal	Trasporto lamiera	non rigenerativo	0,86	S3
sloping conveyer belt	Trasporto lamiera	non rigenerativo	0,86	S3
Pinch roll 1	Trasporto lamiera	non rigenerativo	7,5	S3
Pinch roll 2	Trasporto lamiera	non rigenerativo	7,5	S3
Pinch roll 3	Trasporto lamiera	non rigenerativo	7,5	S3
Movable conveyer belt	Trasporto lamiera	non rigenerativo	0,86	S3
Movable conveyer belt	Trasporto lamiera	non rigenerativo	0,86	S3
Coil car 2	Sezione secondo svolgitore	Rigenerativo	200	s9
Entry coil car 2	Sezione secondo svolgitore	non rigenerativo	11	s3
Paper winder 2	Sezione secondo svolgitore	non rigenerativo	7,5	S1

Feed roll 2	Sezione secondo svolgitore	non rigenerativo	7,5	S3
Spianatrice 2: roll drive	Macchina spianatrice	non rigenerativo	30	S1
Spianatrice 2: lean flattening roll	Macchina spianatrice	non rigenerativo	0,75	S3
pinch roll upper	Cesoia	non rigenerativo	7,5	S1
pinch roll lower	Cesoia	non rigenerativo	7,5	S1
dry driveaway scarp box 2	scrap box	non rigenerativo	0,75	S3
drive liftable 2	scrap box	non rigenerativo	1,46	s3
drive liftable 2	scrap box	non rigenerativo	1,46	s3
sloping conveyor belt	Trasporto lamiera	non rigenerativo	0,86	S3
Pinch roll 4	Trasporto lamiera	non rigenerativo	7,5	S3
Pinch roll 5	Saldatrice	non rigenerativo	7,5	S3
Pinch roll 6	Saldatrice	non rigenerativo	7,5	S3
Pinch roll 7	pulitura	non rigenerativo	7,5	S3
strip cleaning 1	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 2	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 3	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 4	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 5	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 6	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 7	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 8	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 9	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
strip cleaning 10	pulitura	non rigenerativo	1,5	S9
Briglia 1 motore 1	ingresso looper	Rigenerativo	45	S9
Briglia 1 motore 2	ingresso looper	Rigenerativo	30	S9
Briglia 1 motore 3	ingresso looper	non rigenerativo	22	S9
Briglia 1 motore 4	ingresso looper	non rigenerativo	15	S9
Entry looper	Sistema di accumulo In ingresso forno	Rigenerativo	37	S9
Briglia 2 motore 1	Uscita looper	non rigenerativo	15	S9
Briglia 2 motore 2	Uscita looper	Rigenerativo	7,5	S9
Briglia 2 motore 3	Uscita looper	non rigenerativo	5,5	S9
Briglia 2 motore 4	Uscita looper	non rigenerativo	4,55	S9
inlet seal box	Forno	Non rigenerativo	7,5	S9
top roll box	Forno	Non rigenerativo	7,5	S9
outlet seal box	Forno	Non rigenerativo	4,55	S9
Briglia 3 motore 1	Uscita forno	Rigenerativo	4,55	S9
Briglia 3 motore 2	Uscita forno	Non rigenerativo	7,5	S9
Exit looper	Sistema di accumulo in uscita dal forno	Rigenerativo	37	S9
Briglia 4 motore 1	Uscita looper	non rigenerativo	15	S9

Briglia 4 motore 2	Uscita looper	Rigenerativo	22	S9
Briglia 4 motore 3	Uscita looper	Rigenerativo	30	S9
Briglia 4 motore 4	Uscita looper	non rigenerativo	37	S9
Pinch roll 8	Cesoia	non rigenerativo	7,5	S3
Pinch roll 9	Cesoia	non rigenerativo	7,5	S3
dry driveaway scarp box 3	scrap box	non rigenerativo	0,75	S3
drive liftable 3	scrap box	non rigenerativo	1,46	xx
drive liftable 3	scrap box	non rigenerativo	1,46	xx
Paper unwinder 1	Sezione di uscita	non rigenerativo	7,5	S1
Paper unwinder 2	Sezione di uscita	non rigenerativo	7,5	S1
Coil car	Sezione di uscita	non rigenerativo	200	s9
Exit coil car	Sezione di uscita	non rigenerativo	11	s3

Tabella 1: Elenco motori presenti nella linea

Capitolo 4: Implementazione di un caso parzialmente rigenerativo

Ora dopo aver analizzato tutti i motori presenti sulla linea, si può osservare quali macchine elettriche funzionano in maniera continuativa da generatore. Di seguito si osserva l'elenco dei motori rigenerativi e si spiega come avviene il funzionamento da generatore:

Motore	Zona	Tipo motore	Potenza (kW)	Servizio
Entry coil car 1	Sezione primo svolgitore	Rigenerativo	200	S9
Entry coil car 2	Sezione secondo svolgitore	Rigenerativo	200	S9
Briglia 1 motore 2	ingresso looper	Rigenerativo	30	S9
Briglia 1 motore 4	ingresso looper	Rigenerativo	22	S9
Entry looper	Sistema di accumulo In ingresso forno	Rigenerativo	37	S9
Briglia 2 motore 2	Uscita looper	Rigenerativo	5,5	S9
Briglia 2 motore 4	Uscita looper	Rigenerativo	7,5	S9
Briglia 3 motore 2	Uscita forno	Rigenerativo	7,5	S9
Exit looper	Sistema di accumulo in uscita dal forno	Rigenerativo	37	S9
Briglia 4 motore 2	Uscita looper	Rigenerativo	22	S9
Briglia 4 motore 4	Uscita looper	rigenerativo	37	S9

Tabella 2: Elenco motori rigenerativi presenti nella linea

I seguenti undici rigenerano secondo due processi distinti che sono:

1. Applicazione di una forza (coppia) opposta al moto della lamiera
2. Trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale

Le macchine elettriche che recuperano energia tramite coppia resistente sono: i due assi svolgitori e i motori presenti nelle briglie. Questi motori elettrici hanno il compito di tendere la linea con una determinata tensione, e per questo motivo applicano una

coppia resistente alla lamiera. Per il secondo tipo di rigenerazione sono inclusi i due motori in cima ai sistemi di accumulo: l'entry looper e l'exit looper. Queste due macchine elettriche sfruttano l'energia potenziale gravitazionale generata dal movimento verticale dei sistemi di accumulo quando si abbassano.

Si precisa che i motori presenti nella tabella 1 sono tutti sotto azionamento elettrico, ma non sono i soli presenti nell'impianto, poiché sono presenti altre macchine elettriche non sotto azionamento.

Nell'impianto reale per il primo step si utilizzeranno due convertitori, Active line Module Sinamic S120 da 300 kW l'uno in parallelo. Invece per il secondo step, si usano dei Motor Modules Sinamic S120 con le taglie richieste da ogni motore sulla linea.

Questo tipo di conversione è la più costosa e la più performante che si possa avere perché come mostrato nella figura 17 il Sinamic S120 ha un costo maggiore a fronte di performance maggiori:

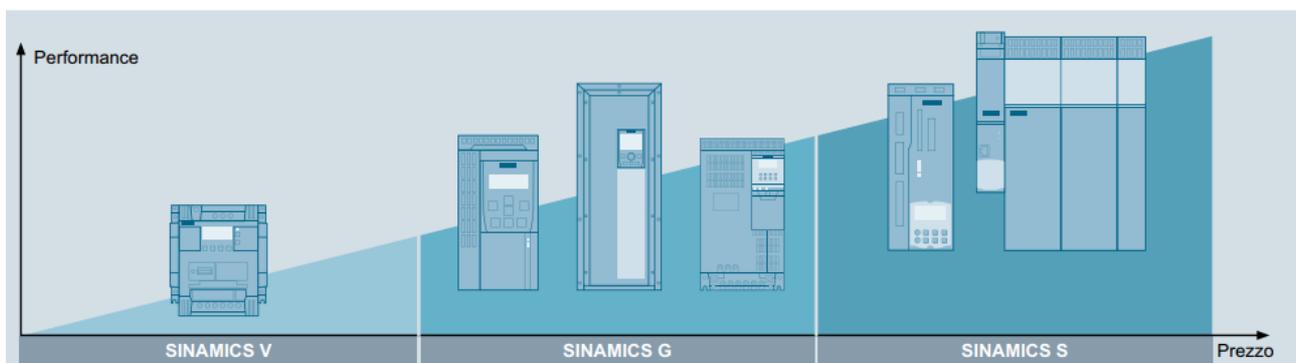


Figura 17: grafico prezzo performance convertitori Sinamic

(Fonte: Convertitori SINAMICS per azionamenti monoasse- Catalogo D31.1)

Ora però si cerca di capire se queste funzionalità così elevate siano necessarie per tutti le macchine elettriche che necessitano di un drive, e se, come scritto precedentemente, è necessario inserire drive bidirezionali anche in convertitori che non recuperano energia.

Le 62 macchine elettriche che funzionano come motori e che di conseguenza non rigenerano energia possono essere abbinate a drive non rigenerativi. Quindi l'analisi che si affronta vede due diversi motivi per cambiare un drive:

1. La bidirezionalità
2. Le performance troppo elevate per motori che non ne richiedono

Ora si cerca di minimizzare il costo e ottenere performance sufficienti al funzionamento della linea.

Gli inverter per natura possono lavorare su quattro quadranti e di conseguenza avere correnti e tensioni sia positive che negative. In questa trattazione il termine bidirezionale non simboleggia che il funzionamento dell'inverter è limitato a due quadranti, ma che l'energia che verrebbe recuperata sarà dissipata su un chopper di frenatura.

La scelta avviene quando si decide o meno di utilizzare tutti e quattro i quadranti scegliendo moduli di potenza diversi a seconda di una funzionalità o meno. Questo va tenuto in conto anche con le CU che controllano il convertitore poiché variano a seconda della funzionalità del convertitore e impattano anche queste nel computo del prezzo totale. Una volta scelti quali sono i drive rigenerativi e quali non analizzati in tabella 2 per essere sicuri di poter utilizzare dei drive non rigenerativi, bisogna analizzare se le funzionalità di ogni motore sono elevate da richiedere un drive Sinamic S120 che è rigenerativo, o uno meno performante.

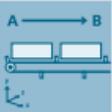
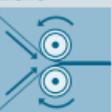
Impiego	Requisiti di precisione di coppia / precisione di velocità / precisione di posizionamento / coordinamento assi / funzionalità					
	Movimento continuo			Movimento non continuo		
	Semplici	Medi	Elevati	Semplici	Medi	Elevati
Pompaggio, ventilazione, compressione 	Pompe centrifughe Ventilatori radiali/assiali Compressori V20 G120C G120P	Pompe centrifughe Ventilatori radiali/assiali Compressori G120P G130/G150 G180 ¹⁾	Pompe eccentriche a coclea S120	Pompe idrauliche Pompe di dosaggio G120	Pompe idrauliche Pompe di dosaggio S110	Pompe disincrostanti Pompe idrauliche S120
Movimento 	Nastri trasportatori, trasportatori a rulli, trasportatori a catena V20 G110D G110M G120C ET 200pro FC-2 ²⁾	Nastri trasportatori, trasportatori a rulli, trasportatori a catena elevatori/discensori, ascensori, scale mobili/tapis roulant, carriponte, azionamenti navali, funivie G120 G120D G130/G150 G180 ¹⁾	Ascensori, gru per container, trasportatori da miniera, escavatori per miniera a cielo aperto, banchi prova S120 S150 DCM	Nastri trasportatori a velocità variabile, trasloelevatori V90 G120 G120D	Nastri trasportatori a velocità variabile, trasloelevatori, taglierine trasversali, sistemi di cambio bobina S110 S210 DCM	Trasloelevatori, robotica, Pick & Place, tavole rotanti indicizzate, taglierine trasversali, alimentatori a rulli, introduttori/espulsori S120 S210 DCM
Trasformazione 	Mulini, miscelatori, impastatrici, frantumatori, agitatori, centrifughe V20 G120C	Mulini, miscelatori, impastatrici, frantumatori, agitatori, centrifughe, estrusori, forni rotativi G120 G130/G150 G180 ¹⁾	Estrusori, avvolgitori/svolgitori, azionamenti master/slave, calandre, azionamenti principali di presse, macchine per la stampa S120 S150 DCM	Insacchettatrici, Motion Control monoasse come • Profili di posizione • Traiettorie V90 G120	Insacchettatrici, Motion Control monoasse come • Profili di posizione • Traiettorie S110 S210	Servopresse, azionamenti per laminatoi, Motion Control multiasse come • Posizionamenti multiasse • Camme elettroniche • Interpolazioni S120 S210 DCM
Lavorazione 	Azionamenti principali per • Tornitura • Fresatura • Foratura S110	Azionamenti principali per • Foratura • Seghe S110 S120	Azionamenti principali per • Tornitura • Fresatura • Foratura • Dentatura • Rettifica S120	Azionamenti assi per • Tornitura • Fresatura • Foratura S110	Azionamenti assi per • Foratura • Seghe S110 S120	Azionamenti assi per • Tornitura • Fresatura • Foratura • Laser • Dentatura • Rettifica • Roditura e punzonatura S120

Figura 18: Guida per la scelta Sinamic

(Fonte: Convertitori SINAMICS per azionamenti monoasse- Catalogo D31.1)

La figura 18 è esplicativa del fatto che il convertitore Sinamic S120 viene utilizzato per tutti i tipi di impiego: pompaggio, ventilazione, compressione, movimento, trasformazione, lavorazione e per movimenti elevati continui e non.

Ora come si può osservare dall'elenco di motori presenti nella tabella 1 la maggior parte dei motori non sono rigenerativi e per queste macchine elettriche si può utilizzare un drive meno costoso che non permette la rigenerazione. Invece per quanto riguarda i

requisiti di precisione di coppia, velocità, posizionamento e funzionalità bisogna analizzare il compito che va a compiere il motore.

Per poter scegliere i nuovi drive è necessario studiare i funzionamenti delle macchine elettriche a cui sono collegate, e per capire quale drive può dare la massima resa con il costo minore. La funzione della macchina elettrica viene definita in base a due parametri:

1. Impiego
2. Movimento

Ora bisogna capire le metodologie di scelta dei drive in base a questi parametri.

I tipi di impiego sono quattro:

1. Pompaggio, ventilazione, compressione
2. Movimento
3. Trasformazione
4. Lavorazione

Nella linea in considerazione la maggior parte dei motori, se non quasi tutti, servono per il movimento della lamiera. Quindi in questa scelta dei convertitori la riga di cui dovremmo occuparci sarà la seconda di figura 18.

Ora bisogna capire cosa si intende con movimento continuo o non continuo per poter assegnare un convertitore a questi motori con un metodo di scelta comune.

Si può ricondurre questa differenza analizzando i diversi tipi di servizi delle macchine elettriche. Nell'impianto in considerazione vedremo principalmente tre tipi di servizio:

1. Servizio continuo S1:

questo tipo di servizio è a carico costante sufficiente per raggiungere l'equilibrio termico, come vediamo nella figura 19

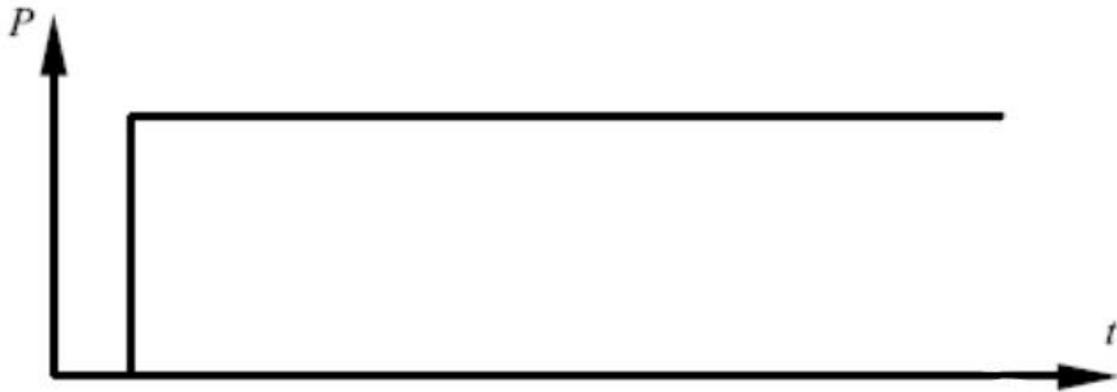


Figura 19: Grafico potenza tempo servizio S1

2. Servizio intermittente S3:

funzionamento di servizio secondo un ciclo intermittente dove avremo un periodo a carico costante Δt_p e un periodo di riposo Δt_R

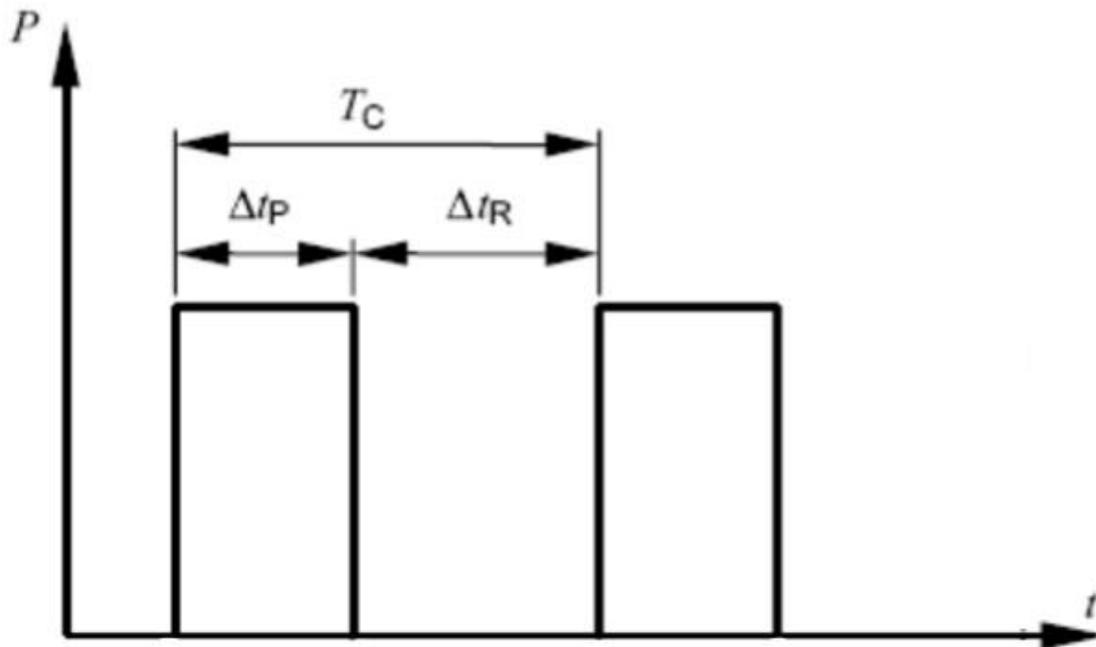


Figura 20: Grafico potenza tempo servizio S3

3. Servizio S9 con variazioni non periodiche di carico e velocità:

in questo servizio abbiamo che il carico e la velocità cambiano in modo non periodico nel campo di funzionamento ammissibile



Figura 21: Grafico potenza tempo servizio S9

Dopo l'analisi di questi servizi si può affermare che i movimenti continui di tutti i tipi ricadono nel servizio S1 invece i movimenti di tipo non continuo, semplici e medi possono essere ricondotti al servizio intermittente S3 e infine il servizio S9 solo quando si ha un movimento non continuo elevato. Si precisa che questa analisi è un consiglio per avere un funzionamento migliore della macchina e del convertitore e non una regola assoluta e si potrebbero utilizzare dei drive G120 con motori con un funzionamento S9 e avere il funzionamento della linea.

Dopo aver stabilito come si possono scegliere i diversi tipi di drive abbinati alla linea osserviamo nell'immagine 21 come cambierebbe il nostro sistema di drive rispetto a quello originale:

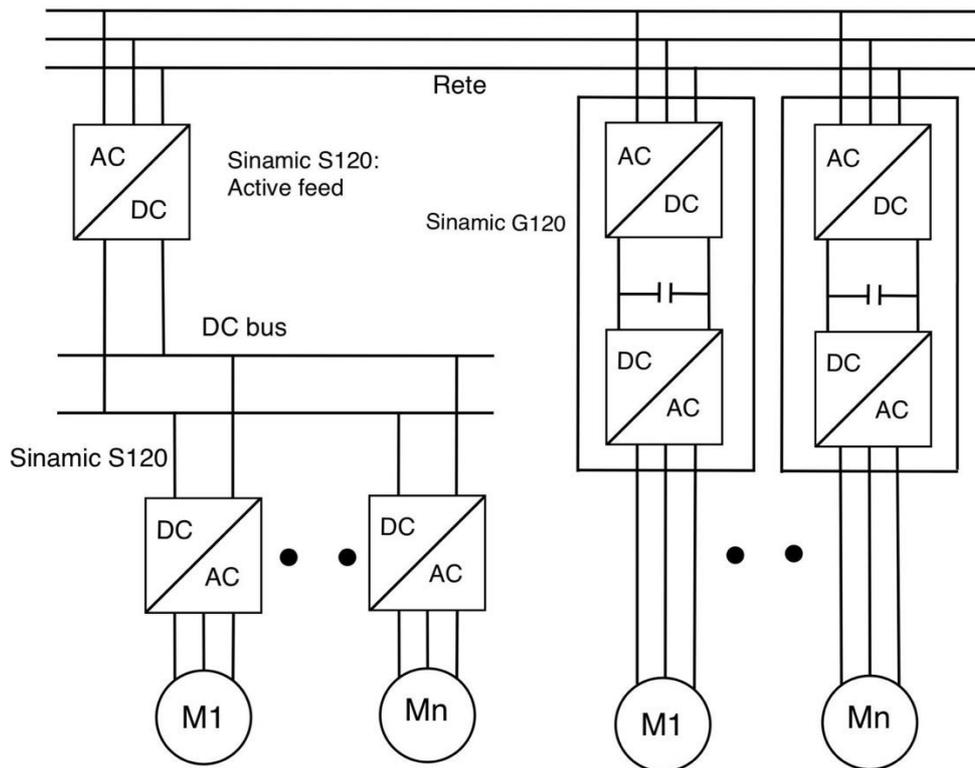


Figura 22: Linea con rigenerazione parziale

Per avere la rigenerazione totale e un costo diminuito dell'impianto si decide di utilizzare una conversione "mista", se così si può chiamare. Questa modalità consiste nell'utilizzare sia convertitori a due stadi separati, come nella configurazione reale, sia i convertitori stand-alone ovvero i convertitori comprensivi dei due stadi di conversione in un unico convertitore. La conversione a due stadi verrà utilizzata per tutti i motori rigenerativi per poter recuperare l'energia e per alcuni motori con un funzionamento a velocità e coppia variabile S9 come l'aspo avvolgitore che ha un funzionamento particolare e consuma grosse quantità di energia che si possono risparmiare utilizzando l'energia recuperata.

I convertitori che non verranno cambiati sono quelli nella tabella 2:

Motore	Zona	Tipo motore	Potenza (kW)	Servizio
Entry coil car 1	Sezione primo svolgitore	Rigenerativo	200	S9
Entry coil car 2	Sezione secondo svolgitore	Rigenerativo	200	S9
Briglia 1 motore 1	ingresso looper	non rigenerativo	45	S9
Briglia 1 motore 2	ingresso looper	Rigenerativo	30	S9
Briglia 1 motore 3	ingresso looper	non rigenerativo	22	S9
Briglia 1 motore 4	ingresso looper	Rigenerativo	15	S9
Entry looper	Sistema di accumulo In ingresso forno	Rigenerativo	37	S9
Briglia 2 motore 1	Uscita looper	Non rigenerativo	4,55	S9
Briglia 2 motore 2	Uscita looper	Rigenerativo	5,5	s9
Briglia 2 motore 3	Uscita looper	Non rigenerativo	15	s9
Briglia 2 motore 4	Uscita looper	Rigenerativo	7,5	S9
Briglia 3 motore 1	Uscita forno	Non rigenerativo	4,55	s9
Briglia 3 motore 2	Uscita forno	Rigenerativo	7,5	S9
Exit looper	Sistema di accumulo in uscita dal forno	Rigenerativo	37	S9
Briglia 4 motore 1	Uscita looper	Non rigenerativo	15	S9
Briglia 4 motore 2	Uscita looper	Rigenerativo	22	S9
Briglia 4 motore 3	Uscita looper	non rigenerativo	30	S9
Briglia 4 motore 4	Uscita looper	rigenerativo	37	S9

Tabella 3: Motori che mantengono drive S120

Per quanto riguarda i convertitori che effettueranno la conversione del primo step si evidenzia che questi hanno una dimensione ridotta rispetto alla somma della potenza di tutti i motori sotto azionamento elettrico. Per comprendere come si è arrivati al valore di dimensionamento dei convertitori, sono stati utilizzati dei fattori di utilizzazione e contemporaneità su tutta la linea, in quanto queste macchine elettriche non lavorano tutte contemporaneamente e alla massima potenza. Per descrivere questo funzionamento si utilizzano i coefficienti di contemporaneità e utilizzazione.

La potenza complessiva dei motori è: 734 Kw di cui 598 sono motori rigenerativi e invece i rimanenti 136 sono motori non rigenerativi che richiedono sempre energia. La differenza così elevata ma la potenza effettiva generata è molto simile a quella consumata per diversi motivi:

- I fattori di utilizzazione e contemporaneità diminuiscono la quantità di energia rigenerata
- Tra l'energia recuperata e quella che raggiunge i motori che consumano sono presenti molte perdite che vanno a diminuire questo valore

Questi valori sono di interesse per la scelta delle dimensioni del primo step di conversione, per il quale dobbiamo utilizzare i fattori di contemporaneità e utilizzazione di queste macchine elettriche per poter scegliere la dimensione del convertitore a monte della linea che attua la conversione AC-DC.

Per iniziare con questa analisi bisogna definire questi due coefficienti:

- Coefficiente di utilizzazione è il rapporto tra la potenza media utilizzata e la potenza nominale della macchina elettrica
- Coefficiente di contemporaneità è un coefficiente di riduzione dell'impianto utilizzato per diminuire il consumo di energia elettrica ipotizzando che tutte le macchine non funzionino contemporaneamente.

I coefficienti di utilizzazione di tutte i motori appartenenti alle briglie sono ben rappresentati da un valore simile a 1 poiché funzionano sempre con una potenza nominale. Gli unici fattori di utilizzazione diversi da 1 sono quelli delle due macchine svolgatrici poiché utilizzano solo il 5-10 % della loro potenza.

I fattori di contemporaneità della linea sono per la maggior parte uguali a 1 poiché le macchine elettriche lavorano in maniera continuativa, tranne per i motori delle briglie 1 e 4 che non funzionano quando entrano in azione le cesoie e la saldatrice quindi solo per un breve periodo non si avrà la contemporaneità massima e perciò possiamo utilizzare un coefficiente pari a 0,95.

Invece per quanto riguarda i motori dell'entry looper e dell'exit looper sono stati analizzati separatamente poiché sono meno utilizzati rispetto a una briglia. Questo è dovuto al fatto che si mettono in movimento ogni volta che la saldatrice o la cesoia entrano in funzione per permettere alla linea di continuare a funzionare come spiegato a pagina 17 capitolo 2. In considerazione per quanto detto sino ad ora utilizzeremo per questi motori un coefficiente di utilizzazione pari a 1 poiché quando entrano in funzione

utilizzano la potenza nominale e un fattore di contemporaneità veramente basso di circa 0,05. Si precisa inoltre che questi motori funzionano sia da generatore che da motore e l'energia rigenerata è molto simile a quella che viene consumata per riportare il sistema di accumulo alla posizione di partenza e per semplicità della trattazione aggiungiamo lo stesso valore sia alla potenza rigenerata che a quella consumata.

Ora si può calcolare le dimensioni dei drive del primo stadio di conversione utilizzando la formula:

$$P_{drive} = \sum_i^{N. \text{ motori}} P_{Nom,i} \cdot K_{u,i} \cdot K_{c,i} \quad (9)$$

Dopo aver svolto questo calcolo si ottiene la potenza di dimensionamento necessaria per poter alimentare gli inverter S120. Il primo convertitore AC-DC deve avere una potenza di circa 300 kW e dopo aver consultato le diverse taglie dei degli Active Line Module si osserva l'esistenza della taglia da 300 kW che è la potenza necessaria da poter erogare ai convertitori per non avere problemi sull'alimentazione degli inverter. I restanti motori vengono alimentati con drive Sinamic G120 che permettono prestazioni simili e un costo minore.

Ora si procede con un'analisi di costo per osservare il guadagno percentuale e totale tra una linea e l'altra.

Il costo totale dell'impianto con drive Sinamic S120 ha un costo totale di: 554045 €.

Ora si cerca di spiegare come vengono calcolati questi costi che non possono essere analizzati nel dettaglio a causa della privacy imposta dall'azienda che non vuole che siano resi pubblici prezzi di listino. Si potrà però analizzare i costi totali e di conseguenza fare rapporti o percentuali sulla totalità delle spese.

Questo costo totale è la somma degli inverter più le CU, control unit, che comandano e controllano la conversione. In più c'è da aggiungere un costo molto elevato che sono i due convertitori, Active Line, in parallelo perché attuano la conversione da alternata a continua per tutta la linea, quindi, sostengono una potenza molto elevata e in più sono

presenti filtri molto costosi per potere avere una pulizia di rete sia in ingresso sia in uscita.

Invece per quanto riguarda il costo con un sistema rigenerativo ma con drive G120 per ottimizzare prezzo e prestazioni è di: 351119 €

Come previsto il costo dell'impianto misto ha un costo minore dovuto all'inserimento di convertitori Sinamic G120 in sostituzione degli S120 però ora si cerca di approfondire con dati numerici queste differenze di costo.

La differenza di costo tra un convertitore stand-alone come il nostro G120 e un inverter rigenerativo S120 dipende molto dalla potenza, poiché incrementando questa il costo cresce esponenzialmente rispetto i G120 come si può notare nella figura 23:

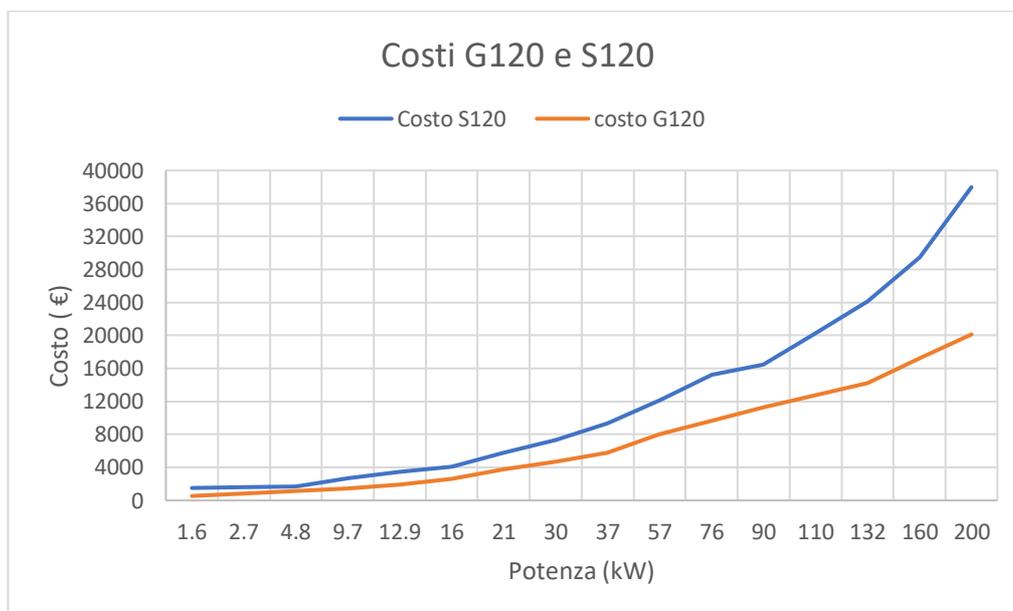


Figura 23: grafico costo potenza drive S120 e G120

Molti motori di grossa portata sono rigenerativi ma, anche con il solo cambio dei motori già citati precedentemente si può avere un risparmio sul costo dei drive della linea elevato. Questo confronto viene attuato tra un inverter S120 e un convertitore stand-alone G120 e non prendiamo in considerazione il primo stadio di conversione comune degli S120 che ha un costo molto elevato e che andrebbe aggiunto ai convertitori DC-AC S120. Questo per farci comprendere ancora meglio la differenza di prezzo molto elevata tra S120 e G120.

Nella figura 24 si può analizzare a livello percentuale come vengono divisi i risparmi della linea utilizzando i due tipi di drive:

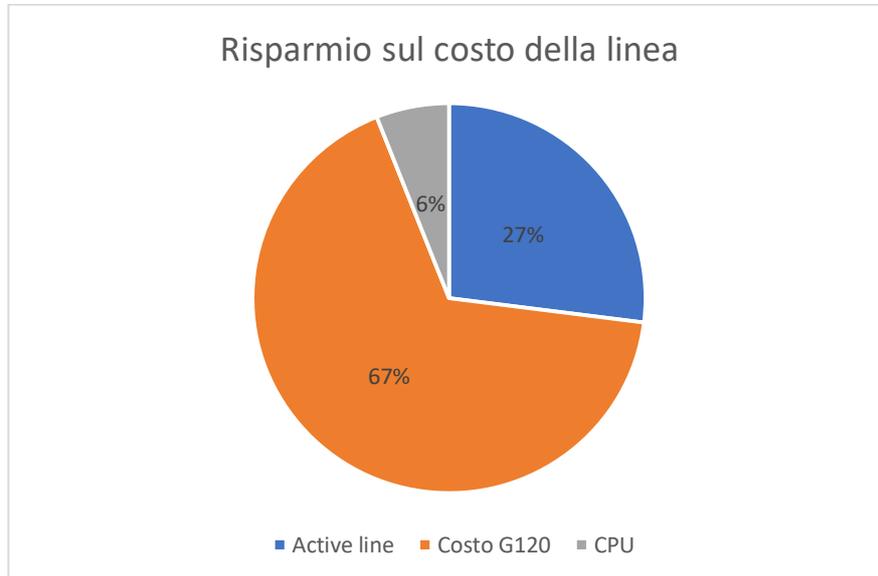


Figura 24: Percentuali di risparmio

Come da previsione la maggior parte del risparmio si è ottenuto modificando i drive S120 a G120 utilizzando la conversione stand-alone dove è possibile utilizzare questi drive. Un'altra fonte di risparmio deriva dal sottodimensionamento del primo step di conversione dovuto alla presenza di un minor numero di inverter S120 da alimentare. Il risparmio su questa parte di conversione è pari al il 27% sulla differenza dei costi.

Con un approccio di questo genere si potrebbe arrivare a risparmiare circa duecento mila euro che per l'azienda rappresentano un'ingente cifra, però bisogna tenere in considerazione molti fattori come, ad esempio, lo spazio e i collegamenti.

Infatti, i convertitori stand-alone G120 hanno dimensioni più elevate rispetto agli inverter S120 e se non si ha lo spazio necessario per poterli inserire tutti ci si imbatte in problemi che però non dipendono dall'azienda che organizza la conversione, ma dall'azienda committente; in quanto è quest'ultima a decidere le dimensioni dello stabile e di conseguenza lo spazio adibito per la conversione.

Invece per quanto riguarda i collegamenti, siccome la struttura fisica del DC bus si mantiene per ottenere la rigenerazione il problema sussiste solo per i convertitori stand-alone. In questo caso bisognerebbe capire se serve una maggior quantità di lunghezza dei cavi per collegare questi convertitori con la rete e con la macchina elettrica.

Si può però affermare che questi sono problemi secondari e con costi sicuramente meno rilevanti rispetto a quelli presi in considerazione in questa trattazione.

Capitolo 5: Implementazione del caso non rigenerativo

L'azienda vuole dimostrare come, dal punto di vista del costo di investimento iniziale, avere un impianto rigenerativo, sia più costoso ma sulla durata media della vita dell'impianto (10-15 anni) l'energia che non viene consumata grazie alla rigenerazione sopperisce ad un costo iniziale maggiore. Questo viene fatto per rendere più consapevoli clienti che magari cercano un modo per avere costi iniziali più bassi, senza rendersi conto dell'energia che verrebbe recuperata e trascurando un discorso ambientale, tema molto attuale, poiché con questo approccio del problema si andrebbe a dissipare una grande quantità di energia recuperabile.

L'impianto in considerazione ha una conversione in due stadi AC-DC e poi DC-AC. Il primo stadio viene usato esclusivamente per avere una fase intermedia comune da poter usare per recuperare l'energia, il secondo viene utilizzato per controllare i motori elettrici. Per analizzare una conversione non rigenerativa questo stadio non è più necessario per l'impianto e per questo motivo si possono togliere i due convertitori di grossa taglia (300 kW) che modificano la tensione di rete da alternata a continua. Questi due convertitori sono dei Active Line Module S120, hanno un costo molto elevato, possiamo dire tra 50 e 55 mila euro.

È necessario distinguere i due casi con uno schema elettrico semplificato per fare chiarezza su come e cosa cambia da un sistema all'altro. Il sistema completamente rigenerativo si può osservare nella figura 12 invece si rappresenta il sistema non rigenerativo qui sotto nell'immagine 25:

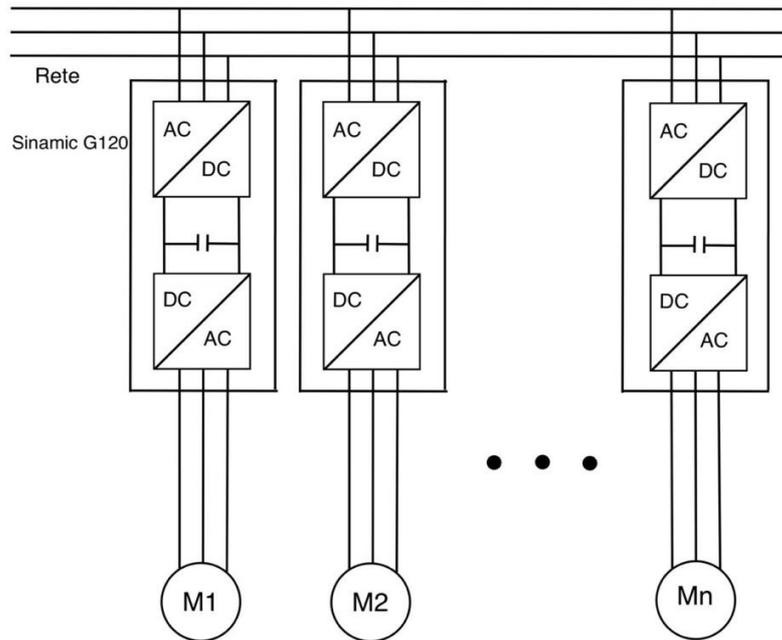


Figura 25: schema elettrico non rigenerativo dell'impianto

Dopo aver tolto il primo stadio di conversione, ovviamente, bisogna rivalutare quali convertitori possono essere utilizzati perché i Motor Module Sinamic S120 sono drive DC-AC e avendo tolto il primo stadio di conversione si inseriscono dei drive AC-AC stand-alone con stadi intermedi all'interno di ogni convertitore. La scelta di questi drive cambia a seconda dell'impiego e dei requisiti di coppia, di velocità, di posizionamento e del tipo di movimento continuo o non del motore come abbiamo già analizzato nel capitolo 4.

I motori che non rigenerano sono già stati trattati nel capitolo 4 e sono stati inseriti dei convertitori Sinamic G120. Ora si deve prendere in considerazione i motori elettrici che sono stati mantenuti con una conversione a due stadi e inserire anche per questi motori una conversione stand-alone con convertitori G120 che sono AC-AC non rigenerativi e collegati direttamente alla rete. Questi motori elettrici sono elencati in tabella 2.

Dopo aver stabilito i drive che verranno utilizzati in questa ipotetica linea non rigenerativa è necessario sottolineare che i costi iniziali saranno sicuramente inferiori per due ragioni principali:

1. La rimozione del primo stadio di conversione

2. Il cambio dei convertitori da S120 in G120

Si deve ora prendere in considerazione che l'energia che non viene rigenerata è un costo aggiuntivo per l'azienda in quanto quest'energia dovrà essere assorbita dalla rete. Quello che si analizza nella seguente trattazione è il calcolo dell'energia recuperata per poi convertirla in un costo, attraverso i dovuti parametri, per confrontare la differenza di investimenti iniziali dei due impianti e il costo dell'energia non rigenerata. Da questo confronto si potrà stabilire se conviene utilizzare una linea completamente rigenerativa o non rigenerativa.

Ora si procede cercando di calcolare l'energia recuperata e si inizia elencando alcuni dati fondamentali per arrivare a questo dato:

- velocità della linea massima: 100 m/min
- velocità della linea minima: 70 m/min
- diametro interno coil: 610 mm
- diametro esterno coil minimo: 813 mm
- diametro esterno coil massimo: 2032 mm
- spessore coil minimo: 0,178 mm
- spessore coil massimo: 2,54mm
- larghezza coil massima: 1575 mm
- larghezza coil minima: 762 mm

Questi sono dati della linea che servono per poter calcolare la forza o coppia che le macchine elettriche dovranno applicare alla linea. Molto importante è anche essere a conoscenza della forza specifica di ogni zona che corrisponde a quella che dovrà applicare ogni motore rigenerativo per tendere la lamiera con una tensione adeguata. Queste tensioni sono stabilite dall'azienda committente e queste coppie sono divise in 5 zone:

1. Zona di svolgimento della bobina
2. Zona del sistema di accumulo in ingresso del forno
3. Zona del forno nel punto più caldo
4. Zona del sistema di accumulo in uscita dal forno
5. Zona di avvolgimento della bobina

Si può notare come queste zone siano delimitate da nastri svolgitori e briglie che sono i motori che trainano e tendono la lamiera, infatti:

- la zona 1 è delimitata dai coil svolgitore e la briglia 1
- la zona 2 è delimitata dalla briglia 1 e 2
- la zona 3 è delimitata dalla briglia 2 e 3
- la zona 4 è delimitata dalla briglia 3 e 4
- la zona 5 è delimitata dalla briglia 4 e il coil avvolgitore

Nella tabella 3 si inseriscono i diversi tiri specifici di ogni zona:

ZONA	FORZA SPECIFICA
svolgimento della bobina	$15 \frac{N}{mm^2}$
sistema di accumulo in ingresso del forno nella posizione più alta	$6 \frac{N}{mm^2}$
forno nel punto più caldo, materiale ad alta densità e incluso il peso della lamiera	$5 \frac{N}{mm^2}$
forno nel punto più caldo, materiale a bassa densità e incluso il peso della lamiera	$4,8 \frac{N}{mm^2}$
sistema di accumulo in uscita dal forno nella posizione più bassa	$5,4 \frac{N}{mm^2}$
avvolgimento della bobina	$25 \frac{N}{mm^2}$

Tabella 4: Forze specifiche zone

Prima di calcolare le forze applicate si deve comprendere il funzionamento delle briglie così da poter poi calcolare le forze resistenti dei motori che veramente sono interessati nella rigenerazione della rete. Le briglie hanno il compito di funzionare da traino e da freno per trascinare e tendere la lamiera quando è necessario a seconda della zona in considerazione.

In particolare, nel nostro impianto abbiamo 4 briglie di cui 3 con 4 motori e una con due motori. Nella figura 24 vediamo come è strutturata una briglia con 4 motori.

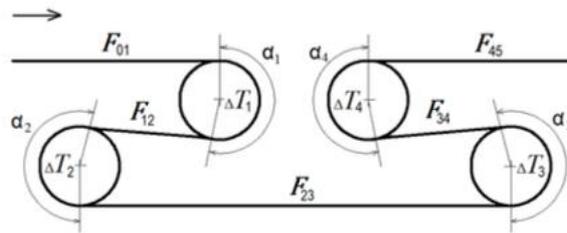


Figura 26: Forze in una briglia

(Fonte: *Distribution of the Strip Tensions with Slip Control in Strip Processing Lines*)

La differenza tra la forza in ingresso F_{01} e quella in uscita F_{45} come spiegato nell'articolo: "Distribution of the Strip Tensions with Slip Control in Strip Processing Lines" si può calcolare utilizzando la formula:

$$F_{45} = F_{01} + F_{12} + F_{23} + F_{34} \quad (10)$$

Ora questa è una somma di forze ma a seconda di come ruota la macchina elettrica si può avere una forza positiva o negativa e di conseguenza coppie del segno imposto dal motore per avere la tensione desiderata tra le zone, infatti, la differenza tra la in uscita e in ingresso è la differenza delle coppie dei motori divise per il raggio del motore:

$$F_{45} = \frac{\tau_1}{R} + \frac{\tau_2}{R} + \frac{\tau_3}{R} + \frac{\tau_4}{R} \quad (11)$$

Con quest'analisi si potrà studiare le forze delle briglie come un oggetto separato e invece per l'impianto utilizzeremo solo le forze in ingresso e in uscita dalle briglie.

Ora si parte calcolando il tiro specifico delle diverse zone:

$$F_{tiro} = F_{Spec} \cdot larghezza \cdot spessore \quad (12)$$

Ora però avendo delle dimensioni massime e minime si decide con buona approssimazione di utilizzare una media aritmetica per calcolare la larghezza del coil

$$Larghezza_{media} = \frac{Larghezza_{max} + Larghezza_{min}}{2} = \frac{1575 + 762}{2} = 1168,5 \text{ mm} \quad (13)$$

Stesso ragionamento lo facciamo per lo spessore e la velocità della linea e troviamo un valore medio:

$$Spessore_{medio} = \frac{Spessore_{max} + Spessore_{min}}{2} = \frac{2,54 + 0,178}{2} = 1,359 \text{ mm} \quad (14)$$

$$V_{med} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} = \frac{100 + 70}{2} = 85 \frac{\text{m}}{\text{min}} \quad (15)$$

Dopo queste semplificazioni si può ottenere il tiro che deve essere applicato al nastro per portarlo in tensione nelle diverse zone utilizzando la formula xx:

ZONA	TIRO
svolgimento della bobina	23,82 kN
sistema di accumulo in ingresso del forno nella posizione più alta	9,51 kN
forno nel punto più caldo, materiale ad alta densità e incluso il peso della lamiera	7,94 kN
forno nel punto più caldo, materiale a bassa densità e incluso il peso della lamiera	7,62 kN
sistema di accumulo in uscita dal forno nella posizione più bassa	8,58kN
avvolgimento della bobina	23,82kN

Tabella 5: Tiro nelle diverse zone

Nella tabella 4 possiamo osservare il tiro a cui deve essere sottoposta la lamiera nelle diverse zone. Ora si procede calcolando questo tiro come la somma tra la forza dell'ultima macchina elettrica della zona, nonché il primo della seguente e il motore iniziale. Ad esempio, per quanto riguarda la zona di svolgimento del motore avremo che i due motori interessati sono, il coil car come primo motore e il primo motore della briglia 1. Il motore svolgitore, che è il motore con dimensioni maggiori della linea, deve le sue dimensioni al primo tratto di linea poiché fino al raggiungimento della saldatrice deve spingere la lamiera a velocità massima ed è l'unica fonte di spinta. Dopo questo primo tratto transitorio la lamiera si salda alla lamiera già svolta precedentemente e il coil inizia a svolgersi grazie al traino e alla forza delle briglie. Dopo questa presa di carico il coil car smette di funzionare da motore e inizia a funzionare da generatore. In questo caso il compito dello svolgitore diventa quello di fare in modo che la lamiera non si accumuli e che abbia la tensione indicata in tabella 4. Per calcolare la forza che deve applicare il motore svolgitore utilizziamo la formula:

$$F_{tiro} = F_{mot_1Briglia1} + F_{mot_svolgitore} \quad (16)$$

La forza di tiro è stata calcolata nella tabella 4 mentre per quanto riguarda la forza del primo motore della briglia 1 si può calcolare utilizzando la formula:

$$F_{mot_1Briglia1} = \frac{P_{nom}}{v_{med}} = \frac{45 \text{ kW}}{\frac{85 \text{ m}}{60 \text{ s}}} \sim 31,8 \text{ kN} \quad (17)$$

Dopo aver calcolato la forza trainante del primo motore della briglia 1 attraverso la formula xx possiamo ricavare la forza rigenerata dall'aspo svolgitore:

$$F_{mot_svolgitore} = 23,8 - 31,8 = 8 \text{ kN} \quad (18)$$

Questo conclude il calcolo del tiro della prima zona dell'impianto e quindi si può procedere con il calcolo delle rimanenti parti. Le zone seguenti sono più complesse rispetto alla prima e all'ultima, poiché bisogna sviluppare il calcolo relativo alla briglia

iniziale e calcolare il tiro del primo motore della briglia successiva, la somma delle due forze, la somma delle forze della briglia 1 e la forza del primo motore della briglia 2 dovrà fornirci il tiro necessario definito in tabella 4. Utilizzando le potenze nominali e la velocità, che abbiamo ipotizzato costante, si ottengono le seguenti forze dalla briglia 1:

Briglia 1	Assorbimento	Potenza kW	Forza kN
Motore 1	Non rigenerativo	45	31,8
Motore 2	Rigenerativo	30	-20,5
Motore 3	Non rigenerativo	15	10,5
Motore 4	Rigenerativo	22	-15,5

Tabella 6: Analisi forze briglia 1

Dopo aver calcolato le diverse forze in tabella 6, grazie alla formula 17 si può calcolare la forza in uscita dalla briglia 1, come somma delle forze applicate dai diversi motori. Si osserva come la forza di tiro sia soddisfatta dalla briglia 1 e dal motore 1 della briglia 2 calcolando:

$$F_{tiro} = F_{usc_briglia_1} + F_{mot_1_briglia_2} \sim 6,3 + 3,2 \sim 9,5 \text{ kN} \quad (19)$$

Ora si può procedere calcolando le restanti forze con lo stesso procedimento:

Briglia 2	Assorbimento	Potenza kW	Forza kN
Motore 1	Non rigenerativo	4,55	3,2
Motore 2	Rigenerativo	5,5	-3,9
Motore 3	Non rigenerativo	15	10,6
Motore 4	Rigenerativo	7,5	-5,3

Tabella 7: Analisi forze briglia 2

$$F_{tiro} = F_{usc_briglia_2} + F_{mot_1_briglia_3} \sim 4,6 + 3,2 \sim 7,8 \text{ kN} \quad (20)$$

Questa forza di tiro è quella compresa tra la briglia 2 e la briglia 3 dove, tra queste due, c'è il forno e come visto in tabella 3 e 4 abbiamo due forze a seconda della densità presente all'interno. Si è deciso di utilizzare la media delle due forze per semplicità e il valore medio di forza è circa 7,8 come si può calcolare dalla tabella 5.

Briglia 3	Assorbimento	Potenza kW	Forza kN
Motore 1	Non rigenerativo	4,55	3,2
Motore 2	Rigenerativo	7,5	-5,2

Tabella 8: Analisi forze briglia 3

$$F_{tiro} = F_{usc_briglia_3} + F_{mot_1_briglia_4} = -5,2 + 10,58 \sim 8,58 \text{ kN} \quad (21)$$

Questa forza di tiro è quella compresa tra la briglia 3 e la briglia 4.

Infine, l'ultima analisi è quella che prevede l'analisi delle forze comprese tra la briglia 4 e l'aspo avvolgitore:

Briglia 4	Assorbimento	Potenza kW	Forza kN
Motore 1	Non rigenerativo	15	10,58
Motore 2	Rigenerativo	22	-15,53
Motore 3	Non rigenerativo	30	21,17
Motore 4	Rigenerativo	37	-26,12

Tabella 9: Analisi forze briglia 4

Dopo aver calcolato le forze dell'ultima briglia non prendiamo in considerazione l'aspo avvolgitore poichè è una macchina che non rigenera, ma funziona solo come motore e quindi non di interesse per il nostro calcolo.

Ora si cerca di evidenziare l'energia recuperata durante un anno. Per ottenere questa energia recuperata si sommano tutte le potenze rigenerate e le si moltiplicano per 24 che sono le ore presenti in un giorno e per 365 che sono i giorni presenti in un anno. Prima di calcolare questo valore bisogna tenere conto anche dei rendimenti che hanno un impatto negativo sull'energia recuperata. In questa linea si avrà in serie la trasmissione meccanica, il motore e per ultimo l'inverter. Considerando che avremo un elevato numero di questi tre componenti e che lavorando per una durata media di 10 15 anni sarà presente usura dei componenti, ipotizziamo come rendimenti medi di questi tre componenti: 0,92 per la trasmissione meccanica, 0,9 per i motori e 0,9 per i drive.

$$E_{briglia} = P_{tot_rig} \cdot tempo \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 141 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,92 = 920,441 \text{ MWanno} \quad (22)$$

Altro discorso deve essere fatto per i due motori che stanno in cima ai due sistemi di accumulo, perché in questo caso l'energia recuperata non deriva dall'applicazione di una forza resistente per tendere la lamiera, ma dall'energia potenziale che si crea facendo scendere il sistema di accumulo da una altezza maggiore a una minore. La potenza che viene recuperata dipende da una forza peso; siccome la massa del sistema di accumulo sarà contro bilanciata da un contrappeso dello stesso valore, l'unico dato che influirà sul funzionamento della macchina elettrica quando scende, sarà la forza peso della lamiera. Quindi per calcolare questo valore si deve analizzare quanta lamiera è accumulata nel looper e questo si può capire grazie alla formula:

$$Peso = Spessore_{medio} \cdot Larghezza_{media} \cdot Lunghezza \cdot Peso \text{ specifico} \quad (23)$$

Lo spessore medio e la larghezza sono già stati calcolati nell'equazione 13 e 14 invece i valori di lunghezza accumulata e del peso specifico non sono stati ancora trattati. Questi valori si possono ottenere facilmente; la lunghezza accumulata sapendo che la capacità

del sistema di accumulo è di 34 metri e che la lamiera compie 8 volte il percorso di salita e discesa quindi la lunghezza totale è di 272 metri, mentre per il valore del peso specifico si deve comprendere come è composto il coil che viene svolto. Questa bobina è composta per l'80% da ferro e per il restante 20% da titanio, che è il materiale che deve essere sottoposto al processo di ricottura. Avendo due pesi specifici diversi, per cercare di rappresentare al meglio la situazione della linea, si utilizza una media pesata per ottenere un peso specifico che tenga in considerazione la presenza dei due materiali. Il peso specifico del titanio è di $4507 \frac{kg}{m^3}$ invece il peso specifico del ferro corrisponde a $7860 \frac{kg}{m^3}$ quindi ora si può calcolare il peso specifico con la media pesata:

$$PS_{Linea} = \frac{w_{Fe} \cdot PS_{Fe} + w_{Ti} \cdot PS_{Ti}}{w_{Fe} + w_{Ti}} = \frac{0,8 \cdot 7860 + 0,2 \cdot 4507}{1} \cong 7189 \frac{kg}{m^3} \quad (24)$$

In questa formula PS simboleggia il peso specifico e con la lettera w si rappresenta il peso dei diversi valori. Si è utilizzata la formula della media ponderata per ottenere il risultato riportato nella formula 24 e per completezza se ne ricorda la formula:

$$Media_{ponderata} = \frac{\sum p_i \cdot x_i}{\sum p_i} \quad (25)$$

Ora si può calcolare il valore della massa della lamiera immagazzinata nel sistema di accumulo:

$$M = 1168,4 \cdot 10^{-3} m \cdot 1,359 \cdot 10^{-3} m \cdot 272 m \cdot 7189 \frac{kg}{m^3} \cong 3105 kg \quad (26)$$

Ora per poter calcolare la potenza recuperata abbassando il looper si deve analizzare a che velocità e per quanto tempo dura la discesa del sistema di accumulo. Per prima cosa si devono analizzare i processi per i quali la lamiera viene fermata e, il sistema di accumulo deve abbassare la sua posizione per poter far continuare a scorrere la lamiera nel forno. Questi processi presi in considerazione sono due: la saldatura e il taglio della lamiera con la cesoia. La saldatura come processo non è un processo lungo, ma la preparazione e la messa in posizione della parte finale e iniziale dei due coil svolti è

quella che richiede un tempo maggiore, in quanto sia all'ingresso che all'uscita della saldatrice avremo un pinch roll che bloccherà il movimento della lamiera e la posizionerà correttamente per essere saldata; si stima un tempo di blocco della lamiera di circa due minuti. Ora sapendo che il looper ha un'altezza di 34 metri e che per far abbassare il looper dalla posizione più alta alla posizione più bassa il tempo di discesa totale è di 5 minuti, si può calcolare la velocità con cui scende il sistema di accumulo calcolando spazio diviso il tempo e ottenendo una velocità di circa $7 \frac{m}{min}$. Ora si può calcolare quanti metri scende l'altezza del looper per poter calcolare il Δh necessario e per poter calcolare l'energia potenziale gravitazionale:

$$U_1 = M \cdot g \cdot \Delta h = 3105 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot (34 - 20) \text{ m} = 426441 \text{ J} \quad (27)$$

Come spiegato nel capitolo 2 il primo sistema di accumulo in ingresso al forno ha una posizione di riposo nel punto più alto e quindi il Δh e il peso sono stati calcolati in base a questa posizione di riposo. Diverso invece sarà il calcolo per il sistema di accumulo in uscita dal forno poiché la posizione di riposo del looper è nel punto più basso, motivo per cui anche il peso della lamiera sarà inferiore. Si procede con il calcolo dell'energia recuperata per il secondo sistema di accumulo iniziando a calcolare il peso della lamiera.

$$M = 1168,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 1,359 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 168 \text{ m} \cdot 7189 \frac{kg}{m^3} \cong 1918 \text{ kg} \quad (28)$$

Il peso specifico, la larghezza e lo spessore rimangono invariati, ciò che cambia è la lunghezza di lamiera presente nel looper, e quindi di conseguenza il peso e l'energia recuperata. La posizione iniziale non è zero ma circa 7 metri, la lunghezza presente nel sistema di accumulo dopo due minuti di movimento sarà 21 metri ovvero l'altezza raggiunta per 8 che sono il numero di volte che viene piegata la lamiera. Una volta osservato il peso si può calcolare l'energia recuperata:

$$U_2 = M \cdot g \cdot \Delta h = 1918 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot (21 - 7) \text{ m} = 263418 \text{ J} \quad (29)$$

Ora per poter calcolare l'energia recuperata totale si possono sommare le energie calcolate e moltiplicarle per il fattore di conversione da Joule a kWh e moltiplicare per i rendimenti come è stato osservato per i motori rigenerativi precedenti:

$$E_{loop} = (U_1 + U_2) \cdot k \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 689859 \text{ J} \cdot 2,7 \cdot 10^{-7} \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,92 = 0.14 \text{ kWh} \quad (30)$$

Per calcolare l'energia annuale recuperata dobbiamo moltiplicare l'energia per le ore e i giorni presenti in un anno.

Dopo aver analizzato la quantità di energia e il costo che si recupera con drive bidirezionali si deve osservare le differenze di costi tra una linea completamente rigenerativa e una completamente non rigenerativa.

$$0.14 \cdot 24 \cdot 365 = 1,226 \text{ MWanno} \quad (31)$$

Ora dopo aver calcolato tutta l'energia recuperata dai tutti i motori si può osservare l'energia totale recuperata annuale:

$$E_{tot} = E_{loop} + E_{briglie} = 1,226 + 920,441 = 921,667 \text{ MWanno} \quad (32)$$

Si può notare che il contributo delle briglie è molto più elevato rispetto a quello dei sistemi di accumulo, ma questo è comprensibile poiché i motori che fanno parte del movimento della linea sono in continuo utilizzo, e si fermano solo nei momenti in cui si attivano i motori dei sistemi di accumulo.

Questo dato andrà poi moltiplicato per il prezzo dell'energia elettrica. Solitamente in media tensione dipende dai tipi di contratti che si hanno, ma siccome stiamo parlando di uno stabilimento che richiede una quantità di energia elevata si può ipotizzare un costo dell'energia di 0,07 euro al kWh.

$$921667 \text{ kWh} \cdot 0,07 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 64516 \text{ €} \quad (33)$$

Dopo aver trovato questo prezzo lo possiamo confrontare con la differenza di costo iniziale che avremo tra un impianto totalmente rigenerativo e uno non rigenerativo.

Per prima cosa bisogna analizzare la differenza di costo iniziale tra i due casi di impianto. Come analizzato nel capitolo 4, il costo iniziale in una linea completamente rigenerativa è di 552.121 € invece modificando tutti i drive con Sinaminc G120 e rimuovendo la conversione a due stadi, il costo iniziale dell'impianto è di 209.318 €.

La differenza di costo iniziale tra i due impianti è di: 342.803 €.

Nell'ultimo capitolo e nelle conclusioni si analizzerà se conviene utilizzare questo tipo di conversione.

Capitolo 6: Analisi tecnico economico delle possibili soluzioni prospettate

Per quanto analizzato nei capitoli precedenti, si può osservare come il costo dei drive influisca sul costo iniziale di un impianto di ricottura del metallo. A seconda del tipo di conversione che si vuole attuare e del controllo che si vuole avere, il costo può oscillare di parecchio. Nella seguente tabella si riepiloga i diversi costi iniziali e si discute di come possono impattare sull'impianto:

Linea	Costo
Totalmente rigenerativa	552121 €
Parzialmente rigenerativa	351119 €
Non rigenerativa	209318 €

Tabella 10: Costi finali linee

Il costo iniziale della linea totalmente rigenerativa è più elevato degli altri, ma a questo corrispondono elevate performance della linea, la possibilità di controllo massimo e l'utilizzo di un solo tipo di drive per l'intera linea. Il sistema parzialmente rigenerativo invece mantiene la rigenerazione del sistema utilizzando i convertitori S120 solo per i motori che hanno la possibilità di rigenerare sul DC bus comune. I restanti motori che non hanno questa possibilità vengono controllati tramite drive Sinamic G120. Questa modalità di conversione è ottimale per rapporto qualità prezzo in quanto con un prezzo minore rispetto alla totalmente rigenerativa si ha la rigenerazione completa di tutta l'energia dell'impianto. Ora si cerca di analizzare i problemi che si possono riscontrare con questo tipo di conversione:

- Il primo è la presenza di due tipi di drive differenti che quindi implicano l'esistenza di un magazzino più ampio e costoso, in questo caso l'azienda committente dovrà affrontare un doppio esborso per avere un sistema di stoccaggio adeguato per la linea.
- Secondo problema che può sorgere per la presenza di due tipi di drive è il controllo software, che per quanto possano essere simili e della stessa casa costruttrice implica una maggiore conoscenza e preparazione da parte delle persone che andranno, se necessario, ad analizzare problemi futuri sul controllo delle macchine.
- Terza problematica che potrebbe sorgere è a livello strutturale, in quanto i convertitori Sinamic G120 sono molto più ingombranti rispetto ai Sinamic S120, e, se la struttura non lo permettesse, i drive non potrebbero avere lo spazio necessario per essere installati.

L'ultimo tipo di impianto è totalmente non rigenerativo. Questo tipo di linea è il migliore dal punto di vista del costo iniziale però i drive sono tutti dotati di frenatura di resistenza e l'energia che verrebbe recuperata tramite inverter verrebbe dissipata sulle resistenze dei chopper di frenatura. Con la seguente analisi si cerca di comprendere se questa scelta possa essere applicata su una linea reale. La differenza di costo iniziale tra un impianto totalmente rigenerativo e uno no è di circa 342803 €. Si prenda in considerazione dopo quanto tempo questo costo iniziale venga coperto dall'energia che si recupererebbe grazie alla rigenerazione dei motori. Il costo dell'energia rigenerata annuale ammonta a circa 64516 € quindi dividendo la differenza tra i costi iniziali per il guadagno annuo troviamo che i costi iniziali verrebbero ammortizzati in circa 5 anni e mezzo. Ora sapendo che questi impianti in media hanno una vita compresa tra i 10 e i 15 anni non conviene cercare di risparmiare sul costo iniziale, per poi andare in perdita successivamente per l'energia elettrica dissipata sulle resistenze. Questa energia potrebbe essere reindirizzata e utilizzata per aumentare la temperatura del sistema di riscaldamento e di conseguenza risparmiare sui costi di questo. Questo però, non andrebbe a colmare al divario di costo tra l'investimento iniziale e l'energia recuperata. Inoltre, non si è considerato il

fattore della sostenibilità ambientale poiché con questo tipo di conversione viene dissipata una elevata quantità di energia che potrebbe essere recuperata e non prodotta nuovamente. Oltre a questa componente di enorme importanza si aggiungono, come nel caso precedente, i problemi per l'ingombro che occupano tutti drive Sinamic G120, anche se non sussiste il problema di stoccaggio di magazzino e di software poiché in questa linea sono presenti solo un tipo di drive. Dopo questa trattazione si può concludere come l'impianto non rigenerativo non convenga sotto molti punti di vista e qui si cerca di spiegarlo a chi magari vorrebbe cercare di risparmiare sul costo iniziale a discapito di un guadagno futuro. Per quanto riguarda la scelta per i primi due tipi di conversione, se l'azienda installatrice è sicura di conoscere tutti i tipi di software e di risolvere con sicurezza i problemi, qualora ci fossero, nei drive la situazione ottimale è con una rigenerazione parziale. In caso contrario la rigenerazione totale è la più sicura e affidabile. Inoltre, molte aziende committenti non lasciano questa libertà di scelta poiché questa differenza di costi tra rigenerazione totale o parziale è un divario di prezzo meno impattante rispetto al costo di tutto l'investimento dell'impianto. Per questo motivo molte volte vengono richieste dall'azienda committente il top di gamma dei convertitori.

Capitolo 7: Conclusioni

Nello svolgimento di questo elaborato è stata presa in considerazione l'analisi di un caso studio; si è analizzata una linea di svolgimento industriale costruita per trasportare lamine di metallo e sottoporle al processo di ricottura. È stata valutata nei dettagli la composizione della linea, per capire il funzionamento di ogni motore sotto azionamento elettrico e per poter studiare quale potesse essere la scelta migliore dal punto di vista economico e funzionale. In particolare, sono stati messi a confronto tre tipi diversi di conversione che possono essere realizzati tramite il differente utilizzo dei convertitori. Il primo tipo di conversione rappresenta lo stato dell'arte per la conversione industriale ed è l'utilizzo di due step di conversione con tutti i drive che possono rigenerare energia qualora un motore elettrico applichi una coppia resistente frenante.

Questo tipo di conversione viene confrontato a livello economico e specifico con altri due tipi di configurazione, una parzialmente rigenerativa e una completamente non rigenerativa. La prima utilizza convertitori rigenerativi solo per le macchine elettriche che applicano una forza resistente alla linea, quindi possono rigenerare energia; per le macchine elettriche che funzionano solamente da motori, si inseriscono drive non rigenerativi. La seconda utilizza solamente drive non rigenerativi, l'energia che normalmente verrebbe recuperata viene assorbita dalla rete. Questo consumo non è presente negli altri due casi, ma con questo tipo di conversione il costo iniziale è notevolmente minore rispetto agli altri due. Dopo aver calcolato l'energia che verrebbe rigenerata dall'ultimo sistema analizzato in un anno, si è calcolato dopo quanto tempo il minore costo iniziale verrebbe superato dal costo dell'energia richiesta da rete. Dopo questi calcoli si è giunti alla conclusione che un impianto non rigenerativo sia conveniente nel caso in cui la vita media di queste strutture industriali siano di circa 5 anni, ma invece queste hanno una vita media di 10-15 anni. Per quanto riguarda il confronto tra lo stato dell'arte è la conversione parzialmente rigenerativa sicuramente l'investimento iniziale è minore nel secondo caso, ma non così tanto da indurre le aziende committenti a cambiare lo stato dell'arte.

Bibliografia

[1] SINAMICS-Low Voltage Engineering

[2] D. Magura, K. Kyslan, S. Padmanaban, V. Fedàk “Distribution of the Strip Tensions with Slip Control in Strip Processing Lines”

[3] Convertitori SINAMICS per azionamenti monoasse- Catalogo D31.1

[4] M. Pastorelli, dispense azionamenti elettrici