

1222·2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE INDUSTRIALE
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica

Analisi di misure effettuate su un impianto elettrico industriale e ottimizzazione energetica di un settore di impianto

Candidato:

Amos Dalla Libera

Matricola 1170173

Relatore:

Ch.mo Prof. Giuseppe Chitarin

Indice

1	Richiami Teorici	4
1.1	Sistema Sinusoidale	4
1.2	Potenza Sistema Sinusoidale	6
1.3	Sistema Trifase	9
1.4	Compensazione Potenza Reattiva	11
2	Compensazione Elettronica	17
2.1	SCR	17
2.2	Static Var Compensator	19
2.2.1	TCI	20
2.2.2	TSC	21
2.2.3	Istantaneous VAR	23
2.3	Considerazioni	23
3	Impianto	25
3.1	Panoramica	25
3.2	Impianto Elettrico	29
4	Analisi Dati	36
4.1	Analisi Dati	39
4.1.1	Impianto non Rifasato	43
4.1.2	Magazzino automatico non Rifasato	45
5	Analisi finali	49
5.1	Considerazioni Finali	51
	Bibliografia	55

Introduzione

Il presente elaborato si prefigge l'obiettivo di utilizzare gli insegnamenti acquisiti durante il percorso universitario per analizzare in modo pratico un sistema elettrico già realizzato; in più, grazie alle conoscenze acquisite negli ambiti elettrotecnici ed elettronici, di proporre varie soluzioni innovative meccatroniche.

La motivazione alla base della scelta di questo obiettivo è trasformare concretamente le conoscenze teoriche acquisite negli anni in un progetto pratico e reale, senza semplificazioni teoriche ingegneristiche, ma con problematiche reali e con proposte di soluzioni altrettanto reali.

La struttura dell'elaborato è formata da:

1. Un'introduzione teorica che fornisca le basi per la comprensione ottimale;
2. Un secondo capitolo prettamente teorico sulle tecnologie su cui si basano le soluzioni prese in esame;
3. Un terzo capitolo che introduce l'impianto analizzato e lo analizza;
4. Un quarto capitolo dove viene effettuata l'analisi dei dati;
5. Infine un quinto capitolo dove vengono proposte le varie soluzioni.

Capitolo 1

Richiami Teorici

L'impianto analizzato è un sistema elettrico trifase in corrente alternata, cioè un apparato che prevede una terna di grandezze elettriche sinusoidali simmetriche sfasate tra loro di 120° . Questa tecnologia, apparentemente molto complessa e di difficile analisi, prevede, invece, degli ottimi vantaggi:

- la potenza dissipata sulla linea è ridotta, se i carichi sono equilibrati tra loro;
- con un unico sistema di distribuzione, si possono alimentare più utenze, anche con un apparato diverso (impianti monofasi, tipicamente civili);
- la potenza istantanea è costante nel tempo;
- permette la realizzazione di campi elettromagnetici rotanti, i quali sono alla base delle principali macchine elettriche dinamiche.

La base su cui si basa il sistema trifase è il regime sinusoidale, che andremo ad analizzare qui sotto.

1.1 Sistema Sinusoidale

Una rete elettrica in regime sinusoidale è un sistema nel quale tutte le grandezze elettriche presenti sono funzioni sinusoidali isofrequenziali, cioè le tensioni e correnti presenti sono funzioni trigonometriche a carattere sinusoidale o cosinusoidale, tutte alla stessa frequenza. Questa particolare tecnologia è ampiamente utilizzata nei sistemi di generazione e distribuzione dell'energia elettrica, proprio in virtù delle proprietà elencate sopra; in più i sistemi sinusoidali sono utilizzati negli apparati di generazione, elaborazione e trasmissione del segnale.

Una funzione sinusoidale [1] è formata dalle seguenti caratteristiche:

$$a(t) = A_M \sin(\omega t + \alpha)$$

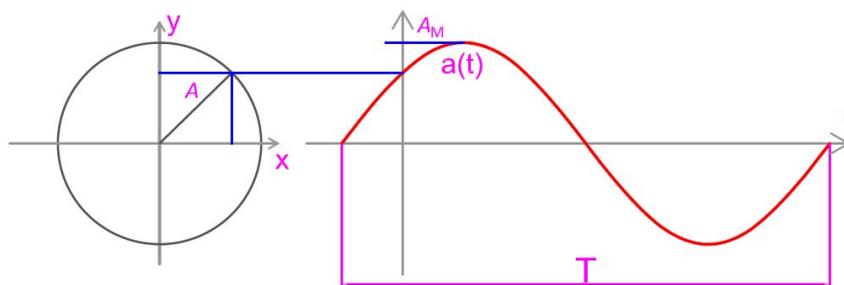


Figura 1.1: Funzione Sinusoidale

Dove:

Ampiezza l'ampiezza è data come: A_M ed è il valore massimo o di picco;

Velocità Angolare la velocità angolare è ω , misurata in [rad/s], che è legata alla frequenza e al periodo della funzione tramite le seguenti relazioni:

1. frequenza $f = \frac{\omega}{2\pi}$;
2. periodo $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$;

Fase Iniziale è la fase o angolo iniziale α , misurato in [rad];

Valore medio il quale è nullo sul periodo, poiché è dato dalla relazione:

$$A_m \triangleq \frac{\int_T a(t) dt}{T} = 0$$

allora si prende il valore medio in una semionda:

$$A_m \triangleq \frac{\int_T |a(t)| dt}{T}$$

Valore Efficace il quale è la media quadratica della funzione in un periodo:

$$A_{\text{eff}} \triangleq \sqrt{\frac{\int_T a(x)^2 dt}{T}} = \frac{A_M}{\sqrt{2}}$$

Nel caso in cui ci siano due grandezze elettriche in gioco alla stessa frequenza, si pervengono alle seguenti relazioni date dalla seguente figura [1]:

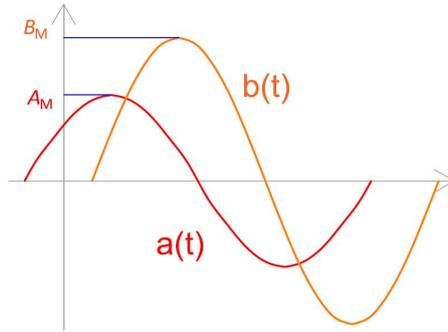


Figura 1.2: Funzioni Sinusoidali Isofrequenziali

Sfasamento dato come: $\varphi \triangleq (\omega t + \alpha) - (\omega t + \beta) = \alpha - \beta$ e può essere:

- in fase, quando lo sfasamento è nullo, allora $\alpha = \beta$;
- quadratura in anticipo di fase, quando lo sfasamento è pari a $\pi/2$;
- opposizione di fase, quando lo sfasamento è pari a $\pm\pi$;
- quadratura in ritardo, l'opposto della quadratura in anticipo, lo sfasamento è $-\pi/2$;

Ritardo Temporale che è pari a $\Delta t = \frac{\varphi}{\omega}$.

1.2 Potenza Sistema Sinusoidale

Dato un impianto in regime sinusoidale [1], si ottiene:

$$\begin{cases} v(t) = V_M \text{sen}(\omega t + \alpha) = \sqrt{2} V \text{sen}(\omega t + \alpha) & \text{con } V = V_{\text{eff}} \\ i(t) = I_M \text{sen}(\omega t + \beta) = \sqrt{2} I \text{sen}(\omega t + \beta) & \text{con } I = I_{\text{eff}} \end{cases}$$

La potenza istantanea [1] che un componente scambia con la rete è data:

$$\begin{aligned} p(t) &= V_M \text{sen}(\omega t + \alpha) I_M \text{sen}(\omega t + \beta) \\ &= \sqrt{2} V \text{sen}(\omega t + \alpha) \sqrt{2} I \text{sen}(\omega t + \beta) \\ &= \frac{V_M I_M}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{V_M I_M}{2} \text{sen}(2\omega t + \alpha + \beta) \\ &= V I \cos(\varphi) - V I \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

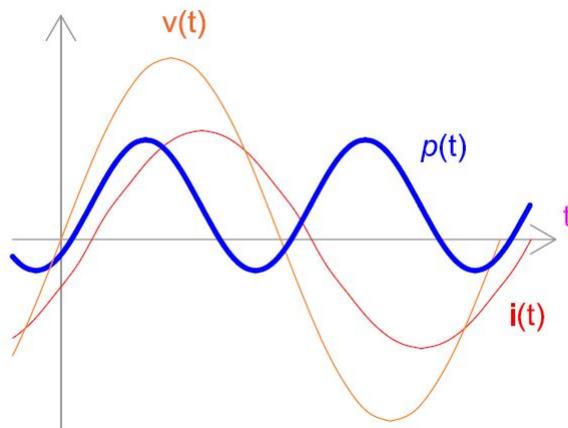


Figura 1.3: Grafico della Potenza

Essa è formata da due parti [1]:

- una parte costante, data da $V I \cos(\varphi)$;
- una parte fluttuante, con carattere con carattere sinusoidale e pulsazione doppia rispetto alle grandezze elettriche $-V I \cos(2\omega t - \varphi)$.

Quindi la potenza è una funzione periodica, per lo più positiva in un periodo, con frequenza doppia, formata dalla somma di queste due componenti.

Si può definire il valore medio della potenza istantanea in un periodo ed è pari a:

$$P \triangleq \int_T \frac{p(t)dt}{T} = V I \cos(\varphi)$$

Ed è pari alla potenza attiva, misurata in Watt ed è:

- massima se le grandezze sono in fase;
- nulla se le grandezze sono in quadratura;
- minima se sono in opposizione di fase.

Riprendendo la formula della potenza istantanea e rimaneggiandola con le proprietà della trigonometria si ottiene:

$$\begin{aligned} p(t) &= V I \cos(\varphi) - V I \cos(2\omega t) \cos(\varphi) - V I \sin(2\omega t) \sin(\varphi) \\ &= V I \cos(\varphi) [1 - \cos(2\omega t)] - V I \sin(2\omega t) \sin(\varphi) \end{aligned}$$

E definendo [1]:

$$p(t) = a(t) + b(t) \begin{cases} a(t) = VI \cos(\varphi)[1 - \cos(2\omega t)] = P [1 - \cos(2\omega t)] \\ b(t) = -VI \sin(2\omega t)\sin(\varphi) = Q \sin(2\omega t) \end{cases}$$

Da cui si definisce potenza reattiva, misurata in Volt-Ampere reattivi, non ha significato fisico di lavoro scambiato, poiché è nulla nel periodo, ha significato di potenza scambiata tra componente o impianto e rete di distribuzione, poiché rappresenta l'energia scambiata tra campo elettrico e campo magnetico all'interno di componenti, quali induttanze o capacitanze, la quale è:

- massima se le grandezze sono in quadratura in anticipo;
- nulla se le grandezze sono in fase od opposizione di fase;
- minima se sono in quadratura in ritardo.

Allora la potenza istantanea si può rappresentare come segue:

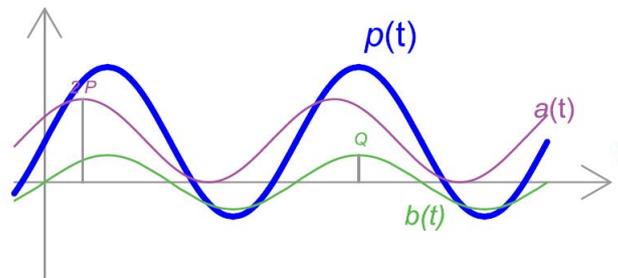


Figura 1.4: Diagramma delle Potenze

Infine si definisce la potenza complessa, pari al prodotto del fasore della tensione per il coniugato della corrente (il coniugato di un numero complesso è comunque un numero complesso avente lo stesso modulo, ma fase opposta) ed è pari a:

$$\dot{S} = \overline{V} \hat{I} = V e^{j\alpha} I e^{-j\beta} = VI e^{j\varphi}$$

E ricordando le definizioni di Potenza Attiva e Potenza Reattiva, si ottiene:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= VI \cos(\varphi) + j VI \sin(\varphi) = P + jQ \\ P &= \Re(\dot{S}) \quad Q = \Im(\dot{S}) \quad A = |\dot{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = VI \end{aligned}$$

Da cui si notano le relazione delle tre potenza messe insieme, soprattutto nel piano di Gauss:

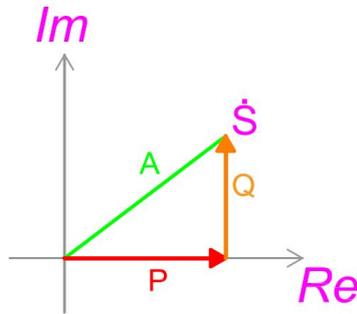


Figura 1.5: Triangolo delle Potenze

1.3 Sistema Trifase

Nel caso del sistema trifase, le grandezze elettriche [1] sono così formate:

$$\begin{cases} e_1(t) = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t) & \bar{E}_1 = E_1 \\ e_2(t) = \sqrt{2} E_2 \sin(\omega t + 2\pi/3) & \bar{E}_2 = E_2 e^{j2\pi/3} \\ e_3(t) = \sqrt{2} E_3 \sin(\omega t + 4\pi/3) & \bar{E}_3 = E_3 e^{j4\pi/3} \end{cases}$$

La somma delle tre grandezze, in ogni istante di tempo è nulla, come pure la somma dei loro fasori. Il sistema è formato da un collegamento che prevede quattro fili: tre generatori sono collegati con un punto in comune, denominato neutro o centro stella:

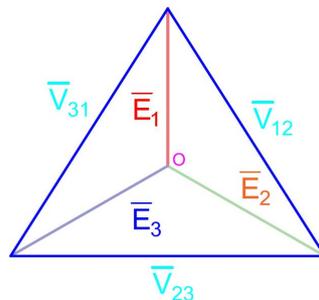


Figura 1.6: Stella delle Tensioni

Le tensioni dei generatori si definiscono tensioni concatenate, mentre la tensione che si misura tra conduttore e neutro si definiscono stellata, infatti esse sono reciprocamente legate dalle seguenti relazioni:

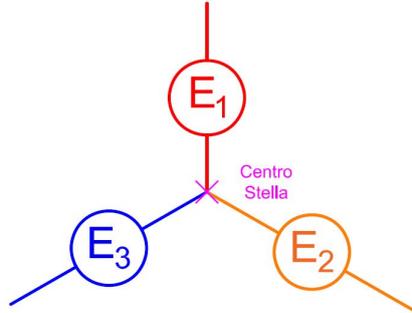


Figura 1.7: Trinagolo delle Tensioni: Stellate e Concatenate

$$\bar{V}_{12} = \bar{E}_1 - \bar{E}_2 \quad \bar{V}_{23} = \bar{E}_2 - \bar{E}_3 \quad \bar{V}_{31} = \bar{E}_3 - \bar{E}_1$$

Se sono collegate delle impedenze, allora si avrà luogo ad una circolazione di corrente elettrica, definita corrente di linea [1], tramite le seguenti formule:

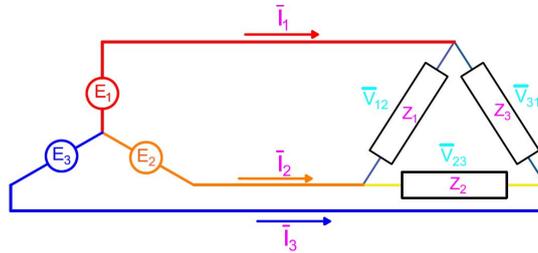


Figura 1.8: Circuito Regime Trifase: Tensioni Stellate - Impedenze Concatenate

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \sqrt{2} I_1 \text{sen}(\omega t + \beta) & \bar{I}_1 &= I_1 e^{j\beta} & \bar{I}_1 &= \frac{\bar{E}_1}{\dot{Z}_1} \\ i_2(t) &= \sqrt{2} I_2 \text{sen}(\omega t + \beta) & \bar{I}_2 &= I_2 e^{j\beta} & \bar{I}_2 &= \frac{\bar{E}_2}{\dot{Z}_2} \\ i_3(t) &= \sqrt{2} I_3 \text{sen}(\omega t + \beta) & \bar{I}_3 &= I_3 e^{j\beta} & \bar{I}_3 &= \frac{\bar{E}_3}{\dot{Z}_3} \end{aligned}$$

A questo punto è intuitivo ritornare ai vantaggi esposti all'inizio, per cui la corrente sul neutro è nulla per le Leggi di Kirchhoff delle correnti, se il sistema è equilibrato, allora la potenza dissipata è minore.

La potenza in un sistema trifase è data dalla somma delle potenze istantanee delle tre fasi:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= e_1(t) i_1(t) + e_2(t) i_2(t) + e_3(t) i_3(t) = \\
 &= 2 E I [\sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) + \sin(\omega t - 2\pi/3) \sin(\omega t - \varphi - 2\pi/3) + \\
 &\quad + \sin(\omega t - 4\pi/3) \sin(\omega t - \varphi - 4\pi/3)] = \\
 &= E I [3 \cos \varphi - \cos(2\omega t) - \cos(2\omega t - 4\pi/3) - \cos(2\omega t - 8\pi/3)] = \\
 &= 3 E I \cos \varphi
 \end{aligned}$$

Come si vede è costante nel tempo e coincide con la potenza attiva, scompare la componente oscillante che era presente nel sistema sinusoidale monofase, anche se la potenza reattiva è comunque presente, ma viene “palleggiata” tra i vari generatori.

1.4 Compensazione Potenza Reattiva

Uno dei problemi principali nello studio o nella sintesi di un progetto elettrico in una rete trifase, è la compensazione della potenza reattiva [1] [2]: considerato che la maggior parte dei componenti all'interno di un impianto ha un comportamento resistivo - induttivo (un esempio lampante è dato dai motori elettrici), la loro potenza reattiva è positiva e, come si è visto dal triangolo delle potenze, questo comporta una riduzione della potenza attiva. Questo aumento porta ad una perdita di potenza sull'impianto, poiché la potenza utile ne risente; in più, l'ente di distribuzione, pone delle clausole per ridurre la potenza reattiva:

1. un aumento della potenza reattiva prevede un aumento delle grandezze elettriche in gioco, in particolare della corrente, che comporta delle dispersioni per effetto Joule, quindi maggiori perdite;
2. per ottenere maggior potenza, che è richiesta dall'utilizzatore, l'ente deve fornire maggior tensione;
3. un aumento della potenza comporta un sovradimensionamento dei conduttori e dei generatori;
4. la potenza reattiva non porta a nessun lavoro utile, né meccanico né di qualsiasi altra natura, oltretutto questo non verrà pagato dall'utente (si paga solo la potenza attiva circolante sul contatore).

Le tariffe penali poste dal distributore di energia elettrica variano in base all'energia attiva prelevata mensilmente sul contatore; però, nel caso in cui un sistema che assorbe potenza reattiva solo per un periodo limitato giornalmente e venga attuato un processo di compensazione su tutto il giorno, il bilancio a fine mese sarà che la potenza reattiva media mensile assorbita sia nulla, quando nella realtà non è così. Per questo, il distributore impone anche che la compensazione sia contemporanea.

La compensazione è legata indissolubilmente dall'angolo tra tensione e corrente di linea, tramite la relazione del fattore di potenza [2]:

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

Il metodo più facile per effettuare una riduzione dell'angolo di sfasamento consiste nel porre in parallelo un carico capacitivo oppure un banco di carichi, se la linea è monofase o trifase rispettivamente [2]:

$$Q_n = Q_0 - Q_1 = P(\tan \varphi_0 - \tan \varphi_1)$$

Quando si voglia portare il circuito da φ_0 a φ_1 e Q_n è la potenza reattiva nominale alla tensione U_n .

Esistono varie modalità per rifasare il carico (si analizza un sistema trifase, poiché rispecchia l'impianto preso in considerazione) [2]:

rifasamento distribuito è il metodo più puntuale possibile, consiste nel rifasare ogni singolo carico, siano essi motori, forni ad arco, lampade a scarica, etc. ; i principali vantaggi sono:

- sopprime le penalità del consumo di potenza reattiva, date dal distributore di energia elettrica;
- ottimizza la rete elettrica;
- riduce la potenza apparente e quindi le dimensioni dei conduttori e la potenza dissipata nella cabina;
- riduce le perdite per effetto Joule nelle condutture interne;
- permette l'utilizzo di interruttori più economici.

mentre la penalità che si riscontra è l'elevato costo eccessivo, però c'è da notare che un confronto solo economico istantaneo non è corretto, poiché un'ottimizzazione della rete così creata porta a innumerevoli vantaggi a lungo termine.

rifasamento per gruppi consiste nel suddividere l'impianto in vari gruppi di utilizzatori con caratteristiche simili, per esempio raggruppando tutti i forni ad arco dell'azienda, così si riducono i costi, ma si ottimizza comunque una parte dell'impianto; i vantaggi principali sono:

- sopprimere le penalità date dal distributore;
- ottimizza una parte della rete, per esempio se quella parte è formata principalmente da motori, essi saranno ottimizzati, quindi avranno una durata maggiore e una manutenzione minore;
- riduce la potenza apparente, solo su quel tratto di linea, e quindi la potenza dissipata dalla cabina di trasformazione localizzata di quel gruppo;
- diminuiscono le perdite Joule, solo su quella suddivisione.

gli svantaggi principali che fornisce, invece, sono dati:

- le perdite nelle condutture a monte del banco non sono diminuite, quindi su tutta la restante parte del sistema;
- esiste il rischio di sovracompensazione a seguito di variazione dei carichi, ma può essere eliminato utilizzando la compensazione automatica.

rifasamento misto un metodo che utilizza tutti o in parte i metodi visti finora, in modo da ottenere i maggiori vantaggi del rifasamento distribuito, ma con l'economicità del rifasamento per gruppi, un possibile esempio è suddividere l'impianto elettrico in aree con maggiori assorbimenti di potenza reattiva e minori, nelle maggiori si rifasano i carichi in modo distribuito, mentre nelle minori si suddividono in gruppi.

rifasamento centralizzato questo caso il banco di condensatori viene posto in un unico punto della rete, in genere sulla cabina di MT/BT oppure a valle dei contatori; è il metodo più economico e con il ritorno immediato, poiché la potenza reattiva viene immediatamente assorbita. i principali vantaggi sono:

- sopprime le penalità date dal distributore della rete;
- riduce la potenza apparente che transita nella cabina, se posto a monte di essa, e le dimensioni dei conduttori, sempre a monte;
- permette l'utilizzo di interruttore generale più economico a monte del banco;
- un rapido, quasi istantaneo, ammortamento dei costi.;
- nel caso di carico costante, è il metodo ottimale per ridurre la potenza reattiva assorbita.

mentre gli svantaggi principali sono:

- la parte a valle dal punto centralizzato, cioè tutto l'impianto, non trae vantaggio dall'installazione dei condensatori;
- le perdite per effetto Joule, non diminuiscono;
- esiste il rischio di sovracompensazione e può essere annullato con la compensazione automatica.

compensazione automatica nel caso in cui ci siano variazioni considerevoli del carico, si ritiene più consono frazionare la batteria di condensatori in gradini, in modo che segua l'andamento temporale del carico, ovviamente in modo discreto:

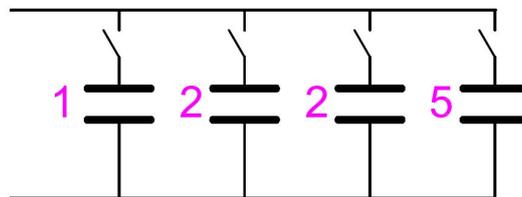


Figura 1.9: Tecnica delle "Pesiere"

il metodo illustrato rappresenta il metodo delle "pesiere", dove il banco può inseguire un carico da uno a dieci, in base a quale interruttore sia aperto o chiuso. Un'altra possibilità può essere un banco con tre condensatori con lo stesso valore o con batterie di condensatori che hanno valore doppio rispetto la precedente. La gestione dell'inserimento delle batterie di condensatori avviene tramite un dispositivo, che grazie ad una rilevazione varimetrica, permette l'inserimento di esse, mantenendo così costante il fattore di potenza dell'impianto.

compensazione elettronica un altro metodo, che si sta sviluppando principalmente negli ultimi anni, è dato dall'utilizzo dei componenti di elettronica di potenza, chiamati Static Var Compensator, uno schema unifilare è rappresentato qui sotto: L'assorbimento della corrente del reattore, viene controllata dai due tiristori, che nella totalità si comportano come un induttore variabile, nel senso che la corrente può essere variata per mezzo del controllo della fase dei tiristori; un esempio del funzionamento è qui esposto:

- a carico nullo i due tiristori si comportano come un cortocircuito, facendo circolare la corrente tutta sull'induttore; la reattanza induttiva e capacitiva hanno lo stesso valore, così facendo si annullano completamente l'uno con l'altra.

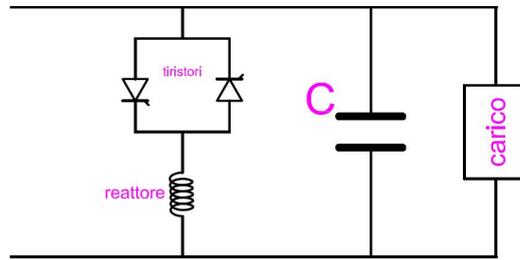


Figura 1.10: Schema monofase per la Compensazione Continua

- supposto che il carico cresca gradualmente, il controllo dei tiristori parzializzerà il ramo dell'induttore, così complessivamente verrà assorbita potenza reattiva, poiché la reattanza induttiva sarà diminuita; c'è da rendere noto che la variazione è ritardata, in modo tale da diminuire la corrente sul reattore.
- a carico completo, i tiristori faranno in modo che il ramo dell'induttore sia completamente aperto.

In definitiva, il componente si comporta come una capacità variabile ad altissima risposta. C'è da notare un'ultima cosa: l'utilizzo dell'elettronica di potenza comporterà una generazione di armoniche, che verranno immesse sulla rete, che dovranno essere opportunamente filtrate; nel caso trifase, questo componente può essere collegato a triangolo per eliminare già a priori la terza armonica e i multipli di tre, mentre in figura è rappresentata una possibile soluzione in sistema trifase con un opportuno filtro.

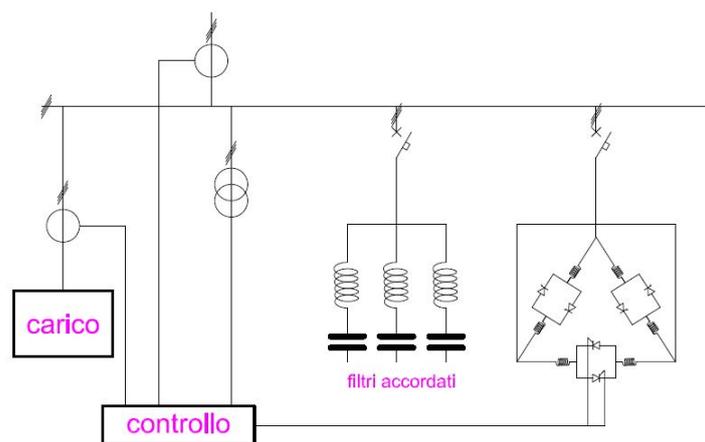


Figura 1.11: Schema Trifase di Compensazione Continua

Un'ultima nozione riguardante il rifasamento del carico è sulla sicurezza [2]: come ben si sa dalle regole fondamentali, quando una batteria di condensatori viene scollegata, inizia un percorso di scarica dall'energia immagazzinata nel tempo; per ragioni di sicurezza degli operatori, questo tempo dovrebbe essere effettuato il più velocemente possibile, allora si ritiene opportuno incorporare all'interno del banco di condensatori una resistenza di scarica, in modo tale da ridurre la tensione, a valori non pericolosi, ai capi dei condensatori in un lasso di tempo, quasi istantaneo:

$$U_c = \sqrt{2} U_n e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Data dalla legge di scarica del condensatore e con $\tau = RC$

$$R \leq \frac{t}{k C \ln\left(\frac{\sqrt{2} U_n}{U_r}\right)}$$

Dove:

- t è il tempo di scarica misurato, tipicamente in s;
- R è il valore della resistenza che si vuole calcolare;
- C è il valore della capacità nominale;
- k è una costante adimensionale che dipende dalla tipologia di collegamento tra banco di condensatori e resistenze;
- U_n tensione nominale che circola nel circuito;
- U_r tensione residua ammessa dalle norme CEI, in genere si prende un valore intorno ai 75 V dopo tre minuti.

Capitolo 2

Compensazione Elettronica

2.1 SCR

Il tiristore o SCR (Silicon Controlled Rectifier) è un componente elettronico formato da quattro strati alternati p-n-p-n ed è unidirezionale, similmente a come accade con il diodo [3]. La differenza sostanziale che differisce tra i due è che la conduzione diretta avviene solamente in seguito all'applicazione di un opportuno segnale di innesco su un terzo terminale, denominato gate. La rappresentazione del componente è mostrata in figura, insieme alla sua caratteristica $i-v$ [3]:

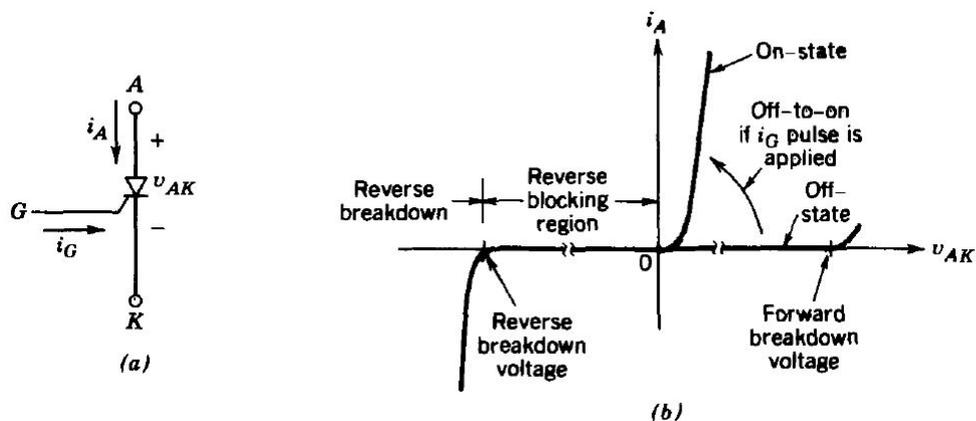


Figura 2.1: Caratteristica $i-v$

La corrente principale scorre dall'anodo (A) al catodo (K). Allo stato spento, il tiristore può bloccare una tensione positiva e non condurre. Può essere attivato allo stato ON applicando un impulso di corrente positiva al gate per una breve durata. La caduta di tensione allo stato ON è solo di pochi volt (tipicamente 1-3 V a seconda della tensione di blocco del dispositivo).

Una volta che il dispositivo inizia a condurre corrente elettrica, si definisce “agganciato” (Latch-up). Il tiristore rimane in conduzione anche se la corrente di gate viene rimossa. Infatti, non può essere spento dal gate e si comporta come un diodo. Solo quando la corrente anodica cerca di andare in negativo, sotto l’influenza del circuito in cui il tiristore è collegato, il tiristore si spegne e la corrente va a zero. Questo permette al gate di riprendere il controllo per riaccendere il dispositivo, ma solo dopo un tempo controllato. Da notare che, in polarizzazione inversa, conduce solo una piccola corrente di dispersione, come mostrato in figura, come accade nei diodi. Usando le analogie con i diodi, il tiristore può essere rappresentato dalle caratteristiche idealizzate mostrate in figura [3]:

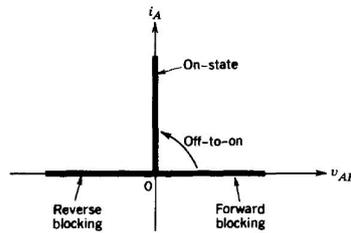


Figura 2.2: Caratteristica idealizzata

In un’applicazione come il semplice circuito mostrato in Fig. 2.3, il controllo può essere esercitato solo sul mezzo ciclo positivo della tensione sorgente, poiché quando la corrente del tiristore tenderebbe a cambiare di segno (cioè quando la tensione sorgente tenderebbe in negativo) il tiristore idealizzato smette di condurre corrente, ponendola nulla immediatamente dopo $t = 1/2T$, come mostrato [3]:

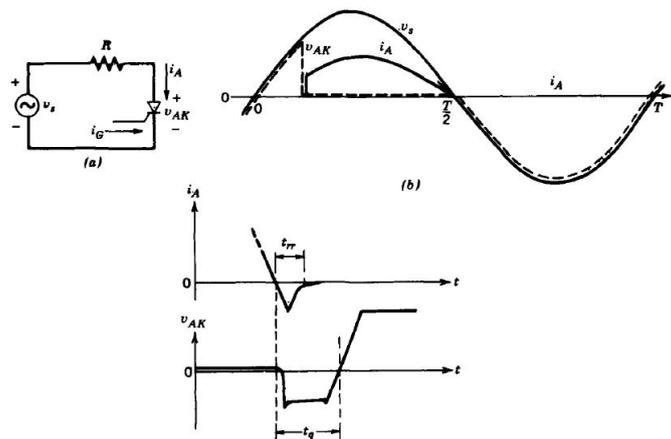


Figura 2.3

Tuttavia, come specificato nelle schede tecniche dei tiristori, in un caso reale la corrente del tiristore si inverte prima di diventare zero. Il parametro che controlla questo processo, tuttavia, non è il tempo necessario alla corrente per diventare zero (definito come t_{rr}), ma il tempo di applicazione di una tensione negativa, che permette alla corrente di diventare nulla ed è definito come t_q . Se una tensione venisse applicata al tiristore prima che questo intervallo sia passato, il dispositivo potrebbe accendersi prematuramente e potrebbero verificarsi danni al dispositivo e/o al circuito, per questo t_q è talvolta chiamato tempo di "recovery" commutato del tiristore. A seconda dei requisiti dell'applicazione, sono disponibili varie tipologie [3]:

- Tiristori a controllo di fase: chiamati anche tiristori di conversione, sono usati principalmente per raddrizzare tensioni e correnti a frequenza di linea in applicazioni come azionamenti di motori DC e AC e nella trasmissione di potenza DC ad alta tensione. I requisiti principali del dispositivo sono la capacità di gestire tensioni e correnti elevate e una bassa caduta di tensione nello stato di acceso;
- Tiristori per inverter: sono progettati per avere piccoli tempi di spegnimento t_q oltre a basse tensioni on-state, generalmente nell'intervallo da pochi microsecondi a 100 microsecondi a seconda dei loro valori di tensione e delle cadute di tensione nello stato on;
- Tiristori attivati dalla luce: questi possono essere attivati da un impulso di luce guidato da fibre ottiche in una speciale regione sensibile del tiristore. L'uso primario di questi tiristori è in applicazioni ad alta tensione come la trasmissione di corrente continua ad alta tensione.

2.2 Static Var Compensator

I controllori VAR statici (Static Var Compensator) sono dei dispositivi che implementano l'elettronica di potenza per effettuare la compensazione. Le principali tipologie sono [3]:

- Induttori controllati da tiristori TCI;
- Condensatori commutati a tiristori TSC;
- Convertitori a commutazione con elementi minimi di immagazzinamento dell'energia;
- Disposizione ibrida di un TCI con un TSC per minimizzare le perdite a vuoto.

2.2.1 TCI

Gli induttori controllati da tiristori (TCI Thyristor-Controlled Inductors) agiscono come induttori variabili dove la potenza reattiva induttiva fornita può essere variata molto rapidamente. Il sistema, però, può richiedere sia potenza reattiva induttiva che reattiva capacitiva, a seconda delle condizioni del sistema. Ciò può essere ottenuto semplicemente mettendo in parallelo un TCI con un banco di condensatori [3].

Il principio di base di un TCI può essere compreso considerando il circuito in figura, dove un induttore L è collegato alla sorgente attraverso un interruttore bidirezionale, costituito da due tiristori collegati back-to-back. Se si assume che la componente resistiva dell'induttore sia trascurabilmente piccola, la corrente attraverso l'induttore in stato stazionario può essere ottenuta come funzione dell'angolo di ritardo dei tiristori α (il quale è l'angolo del ritardo dell'innesco, cioè dell'accensione del tiristore), che è identico per entrambi i tiristori, come rappresentato in figura :

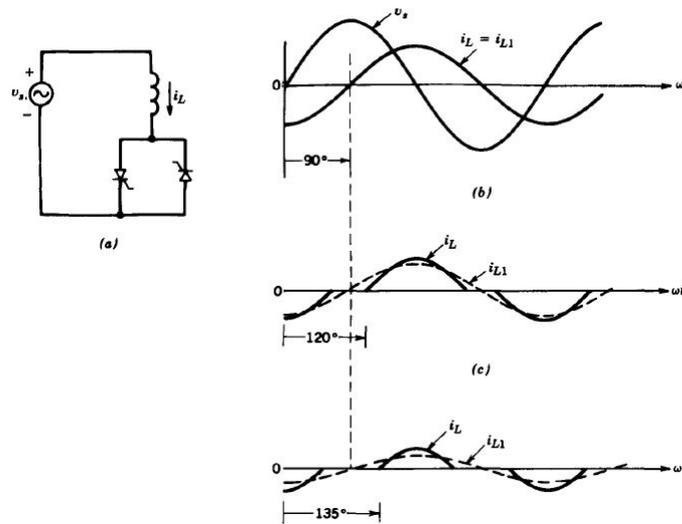


Figura 2.4: Esempio di TCI

Si denota come caso base la forma d'onda della corrente in cui gli impulsi di gate dei tiristori sono sempre presenti (corrispondenti a valore di $\alpha = 0$), come se i tiristori fossero sostituiti da diodi. Con $\omega = 2\pi f$, questo risulta in una corrente sinusoidale i_L il cui valore efficace è uguale a:

$$I_L = I_{L1} = \frac{V_s}{\omega L} \quad (\omega = 2\pi f)$$

Dove la corrente dell'induttore consiste solo nella componente di frequenza fondamentale senza alcuna armonica. Poiché la corrente è in ritardo rispetto alla tensione di 90° , l'angolo di ritardo α in un intervallo di $0 - 90^\circ$ non ha alcun controllo su di essa e il suo valore efficace rimane lo stesso dato dall'equazione precedente. Se si aumenta α oltre 90° , la corrente può essere controllata come è mostrato per valori corrispondenti di α pari a 120° e 135° , rispettivamente. Chiaramente all'aumentare di α , la corrente si riduce, permettendo così un controllo sul valore effettivo della potenza reattiva. Data dalla seguente relazione [3]:

$$L_{eff} = \frac{V_s}{\omega I_{L1}}$$

Che per Fourier viene:

$$I_{L1} = \frac{V_s}{\pi \omega L} (2\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha) \quad \text{con } \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$$

Pertanto, la potenza reattiva in ritardo assorbita dal TCI alla frequenza base è:

$$Q_1 = \frac{V_s}{I_{L1}} = \frac{V_s^2}{\omega L_{eff}}$$

Per valori di α maggiori a 90° , la corrente dell'induttore non è un'onda sinusoidale pura. Infatti un'analisi di Fourier della forma d'onda della corrente d'induttore mostra che essa consiste di armoniche dispari dell'ordine 3, 5, 7, 9, 11, 13, ... le cui ampiezze sono date come rapporto della corrente dell'induttore I_{L1} e dipendono da α . Per evitare armoniche e multipli del terzo ordine, una pratica comune è collegare TCI trifase a triangolo, in modo che queste armoniche circolino attraverso gli induttori e non entrino nel sistema. Il condensatore, posto in parallelo con il TCI, permette di soddisfare i requisiti di compensazione data dalla seguente relazione:

$$Q_f = 377 C_f V_S^2$$

Oltretutto, un condensatore ben accordato filtra le armoniche ad alta frequenza e, se sono posti più condensatori in serie, filtrano la quinta e la settima armonica.

2.2.2 TSC

Il sistema TSC, ovvero un sistema di capacitori controllati da tiristori (Thyristor-Switched-Capacitors) come raffigurato in figura, ha diversi condensatori (tre o quattro) che sono collegati alla tensione di alimentazione attraverso un interruttore bidirezionale, costituito da tiristori collegati back-to-back. A differenza del controllo di fase usato nei TCI per variare il valore effettivo dell'induttore, i TSC impiegano un controllo integrale a metà ciclo in cui

il condensatore può essere completamente inserito oppure completamente disinserito nel circuito, come rappresentato in figura [3]:

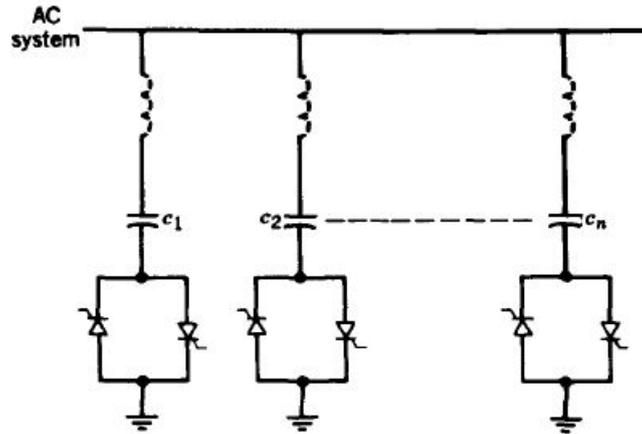


Figura 2.5: Esempio di TSC

Il banco di condensatori può essere spento bloccando gli impulsi di gate di entrambi i tiristori. Il flusso di corrente si ferma all'istante nel suo attraversamento nello zero, il quale corrisponde anche alla tensione massima del sistema di alimentazione. All'accensione, il tiristore deve essere attivato nell'istante appropriato della massima tensione d'alimentazione per evitare grandi sovracorrenti. Inoltre, le induttanze sono usate per limitare le sovracorrenti all'accensione. Usando un gran numero di piccoli banchi di condensatori commutati a tiristori, è possibile variare la potenza reattiva Q_c in piccoli, ma discreti passi.

2.2.3 Istantaneous VAR

Si è analizzato che per i circuiti raddrizzatori e convertitori si ottengono delle ottime migliorie attuando un controllo diretto sulla corrente. Uno schema per il controllo è rappresentato in figura [3].

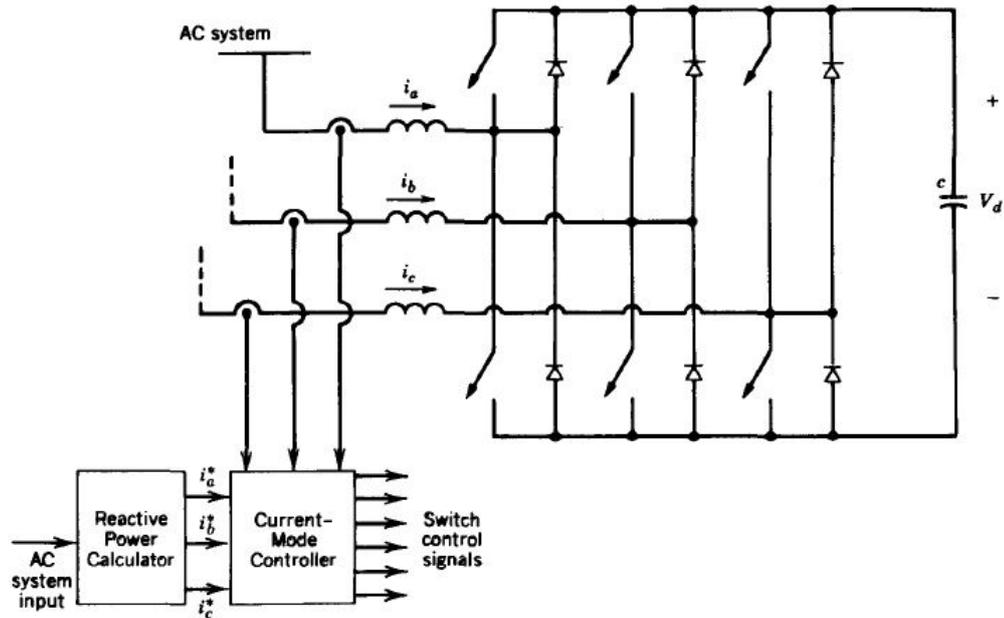


Figura 2.6: Esempio di Istantaneous VAR

Vengono prelevate le correnti in ingresso al sistema e immesse in un calcolatore, dove vengono analizzate e viene calcolata la potenza reattiva, trovando la soluzione più conveniente, sottoforma di correnti di riferimento. A questo punto, vengono immesse nel sistema di controllo della corrente, dove mette in relazione le correnti di riferimento con le correnti reali, fornendo degli impulsi che andranno a controllare gli interruttori che vanno a collegare il condensatore per la compensazione.

2.3 Considerazioni

In definitiva si può dire:

TCI I principali vantaggi dell'utilizzo dei TCI, per il controllo della potenza reattiva, sono:

- Velocità di commutazione quasi istantanea e controllo flessibile del carico;

- Manutenzione quasi nulla e costi economici rispetto alle apparecchiature convenzionali, dunque unico costo iniziale ammortizzato quasi istantaneamente;
- Prevenzione di sfarfallii di tensione e condizioni di squilibrio per un sistema trifase.

L'unica pecca di questo sistema è la sua scarsa progressività di regolazione.

TSC I controllori TSC, invece, presentano simili vantaggi, ma hanno analogie con sistemi elettromeccanici, nei quali viene regolata la potenza reattiva e il controllo dei condensatori tramite relè. Questa sua analogia, pertanto, lo penalizza per i seguenti motivi:

- Il controllo TSC ottiene risultati migliori rispetto a un sistema elettromeccanico aumentando il risparmio energetico, ma il costo iniziale è nettamente superiore, poiché necessita di implementare un'interfaccia elettronica, cosa che non succede nel sistema tradizionale;
- Il sistema TSC fornisce un aumento della tensione, che va a compromettere determinate apparecchiature del sistema, come per esempio i sensori induttivi.

Istantaneous VAR Infine, il sistema instantaneous VAR è il sistema migliore possibile, ma ha un costo iniziale elevato e presenta una complessità elettronica che, però, è facilmente risolvibile nei seguenti modi:

- Utilizzando un sistema PI per il controllo delle correnti, in modo da avere un controllo quasi istantaneo, e utilizzare i banchi di condensatori già presenti, nel caso in cui si abbia un impianto già realizzato;
- Utilizzare un dispositivo all-in-one commercializzato dove sono presenti tutti i controlli e i condensatori, inseribile direttamente nella rete o nel settore dell'impianto.

Il suo svantaggio, come già detto, riguarda il costo elevato.

Si può infine dire che in base ai carichi e alla possibilità di investimento, si può scegliere o il metodo TCI o Instantaneous VAR, per una conformazione ideale si potrebbe addirittura ipotizzare un sistema misto delle due metodologie ponendo un rifasamento istantaneo direttamente sul carico e un TCI a monte di tutto l'impianto; ovviamente lo svantaggio è di natura puramente economica, ma con dei vantaggi energetici e di progettazione non indifferenti.

Capitolo 3

Impianto

3.1 Panoramica

Lo stabilimento preso in analisi è la sede di *DFV* situata a Meolo, posta poco fuori l'uscita omonima dell'autostrada A4. Il processo produttivo dell'azienda non prevede la realizzazione di prodotti finiti, ma la produzione di un semilavorato. Partendo, infatti, da un profilato in alluminio grezzo – barre o lamine che siano – viene verniciato, in modo da ottenere delle prestazioni chimico-fisiche migliori, ma soprattutto per ottenere un prodotto esteticamente più accattivante. Il processo di attuazione di tali prodotti si è evoluto negli anni: dalla classica verniciatura con colori RAL, alla verniciatura effetto legno, fino alla verniciatura ad alta resistenza alla corrosione, sempre con un occhio di riguardo all'estetica. La pianta semplificata dell'azienda è rappresentata nella figura proposta, all'inizio della pagina seguente.

Il prodotto grezzo arriva imballato all'accettazione ed è posto subito all'entrata dello stabilimento dove viene controllato, preso in comanda (quindi fornito di un codice interno) e posto nel magazzino verticale in attesa di essere lavorato.

Il magazzino verticale è il reparto a più alta automazione e occupa circa un quinto di tutto lo stabilimento. È formato da due scaffalature, poste ai lati della stanza, dove nel mezzo scorrono due macchinari per il trasporto e lo stoccaggio dei semilavorati. Questi sono formati da un telaio in metallo, simile a una gru a ponte, nei quali sono installati dei “lettucci” di metallo che scorrono sul telaio, in modo da eseguire due movimentazioni (verticale e orizzontale), per attuare il processo di immagazzinamento. Oltretutto, come già detto, il sistema è formato da due macchinari, i quali si possono muovere in avanti o indietro, tramite delle ruote.

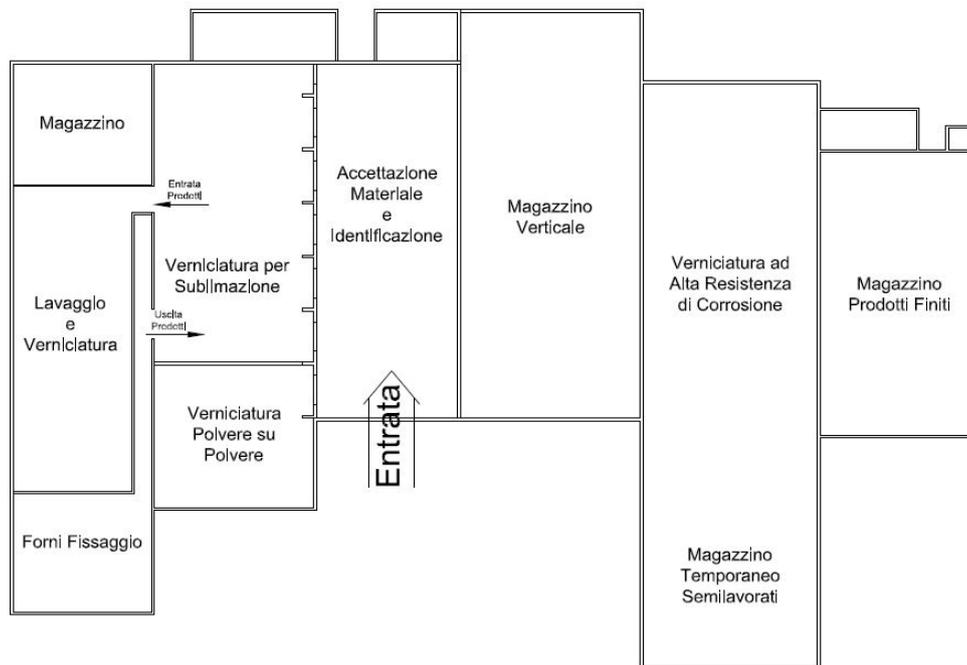


Figura 3.1: Pianta

L'interfaccia di interscambio tra l'accettazione e il magazzino verticale è anch'essa automatica. È formata da una coppia del sistema di immagazzinamento, cioè da una coppia di “lettucci”, uno per caricare il magazzino, l'altro per scaricare:

- Nel caso di immagazzinamento arriva un carrello vuoto che viene caricato da dei nastri trasportatori e viene immesso nuovamente nel magazzino una volta caricato;
- Nel caso di scarico, invece, arriva il carrello pieno che viene scaricato dal sistema di movimentazione e posato sui nastri, infine viene prelevato dagli operatori, mentre il carrello vuoto ritorna al magazzino.

Ci sono due osservazioni da fare: la prima è che il materiale non viene disimballato per prevenire che si rovini durante la movimentazione, la seconda è che nella coppia di macchinari i due “lettucci” sono separati, in modo che si possa lavorare su entrambe le operazioni contemporaneamente. In più, ci sono due postazioni di carico-scarico, sviluppate in due piani, proprio in virtù del fatto che ci sono due macchinari. Questo accorgimento permette di aumentare la portata del magazzino e, di conseguenza, dello stabilimento.

Dopo aver passato la fase di ricevimento e accertamento, il semilavorato viene tolto dall'imballaggio e viene posizionato sulla linea di produzione, dove viene caricato nella movimentazione automatica che lo porterà nelle varie fasi:

1. La prima fase è il lavaggio, che prevede oltre al lavaggio anche la rimozione dell'eventuale zincatura, in modo che il prodotto sia pronto per essere verniciato;
2. La seconda è la verniciatura vera e propria, che avviene tramite spruzzatori di vernice, che viene effettuata su apposite camere isolate, per evitare la propagazione delle polveri;
3. La terza è il fissaggio che viene effettuato attraverso dei forni;
4. L'ultima fase vede il prodotto finito e fissato che arriva all'imballaggio, dove viene diviso e imballato.

Il sistema può prevedere alcune modifiche nel processo standard di produzione in base al prodotto completato che si vuole ottenere. Per esempio, si possono prevedere dei forni di preriscaldamento prima del forno vero e proprio, oppure, se la lavorazione prevede l'effetto legno, a prodotto ultimato dopo verniciatura e fissaggio, non viene subito imballato, ma passa al reparto di verniciatura per sublimazione, dove viene applicato l'effetto legno. È un processo completamente automatico dove il materiale passa nei vari settori nei quali le lavorazioni agiscono in modo autonomo, quindi un processo ad altissima intensità (la stima è di circa 5'000 pezzi al turno, su tre turni circa 15'000 prodotti finiti). In genere un semilavorato impiega solo quattro ore a completare tutto il ciclo produttivo della verniciatura RAL.

In un'altra sezione dello stabilimento c'è la verniciatura polvere su polvere, procedimento innovativo dell'azienda, che oltre a dare un effetto legno superficiale, aumenta notevolmente le caratteristiche estetiche e anti corrosive. Questo reparto prevede che dopo l'accettazione del semilavorato, il prodotto venga posto direttamente sulla postazione di verniciatura. In questo caso, però, la movimentazione è manuale, dopodiché viene posto immediatamente nel forno per il fissaggio e imballato. Non è un reparto ad altissima intensità poiché non è completamente automatico ma semiautomatico, poiché le lavorazioni sono automatiche, ma il pezzo si muove grazie all'uomo.

L'ultimo reparto, anch'esso semiautomatico, è il reparto orizzontale per prodotti ad alta resistenza alla corrosione, soprattutto per uso navale. Il materiale arriva dall'accettazione, viene controllato, preparato, immerso nelle vasche dove, tramite tecnologia DFV, viene verniciato e spostato nei forni per il fissaggio in modo automatico; infine viene imballato, sempre nello stesso reparto. Questi ultimi due reparti sono stati idealizzati da DFV nel corso

degli anni e nel corso dell'esperienza, infatti sono diventati i loro marchi di fabbrica.

Analizzando il processo produttivo ci si accorge che il reparto più utilizzato, nonché più sotto pressione, è il magazzino e l'identificazione. Proprio per questo la scelta di un magazzino verticale, completamente automatico, apporta dei vantaggi enormi allo stabilimento. D'altro canto ci sono alcune difficoltà non ancora del tutto risolte, tra le quali proprio la sua ottimizzazione dal punto di vista energetico. Un settore dello stabilimento così progettato è formato da molti carichi ohmico-induttivi (motori elettrici) e induttivi puri (sensori), che comportano un aumento della potenza reattiva, a scapito della potenza attiva. In particolare all'interno del sistema di stoccaggio i due sistemi di movimentazione sono formati nel seguente modo:

- Un motore asincrono trifase di grossa taglia, per la movimentazione orizzontale di tutto il sistema, potenza nominale di circa 50 kW ;
- Un motore asincrono trifase di grossa taglia, per la movimentazione verticale del sistema di immagazzinamento, potenza nominale di circa 50 kW ;
- Due motori asincroni trifase di piccola-media taglia, per la movimentazione del carrello simile al "lettuccio", potenza nominale di circa 20 kW ;
- La presenza di un quadro generale di rilievo, a significare che il sistema ha una natura elettrica significativa;
- La presenza di una centralina di controllo e di svariati sensori induttivi per il controllo del sistema stesso.

Quindi ogni sistema ha un impatto abbastanza significativo sulle caratteristiche elettriche di tutto il reparto, nonché di tutto l'impianto, contando anche che i motori elettrici non hanno un sistema di controllo elettronico per migliorare le prestazioni, quindi sono collegati direttamente alla rete tramite il quadro. Oltre a questi due sistemi, tutto il sistema di nastri automatici e la movimentazione è azionata da motori elettrici brushless o servomotori, i quali, per quanto siano azionati e controllati tramite degli opportuni azionamenti e già ottimizzati dal punto di vista elettro-dinamico, costituiscono comunque dei carichi che penalizzano l'efficienza energetica.

3.2 Impianto Elettrico

L'analisi effettuata sull'impianto parte dalla cabina di trasformazione MT/BT posta fuori, vicino a dove arrivano i cavi di alimentazioni del fornitore. È una cabina privata, quindi una cabina terminale della linea, modernizzata recentemente con le nuove norme in vigore. È costituita da tre locali distinti:

Locale di Consegna locale dove arrivano i cavi della distribuzione, in cui sono installate le apparecchiature di manovra da parte dell'ente distributore e rappresenta il punto di confine tra la connessione di distribuzione e la rete d'utenza;

Locale Misure locale dove sono collocati i gruppi di misura, per esempio il contatore;

Locale dell'Utente locale destinato a contenere le apparecchiature di manovra e il o i trasformatore/i, con anche le apparecchiature di protezione e di pertinenza all'utente.

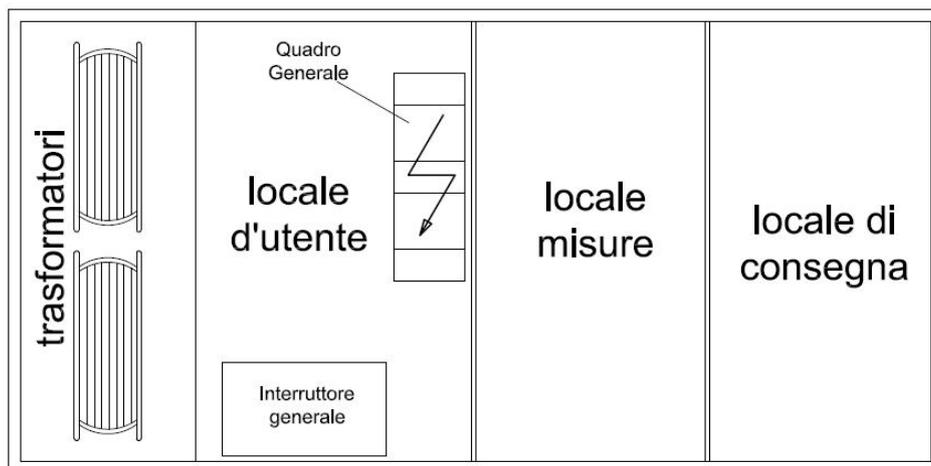


Figura 3.2: Interruttore Generale

I componenti presenti nel locale utente sono i seguenti:

- L'interruttore generale;
- I trasformatori MT/BT;
- Il quadro generale.

Dalla cabina poi partono i cavi per i quadri generali dei vari settori i quali, però, fanno capo a un quadro già realizzato, non presente nella cabina, nel quale è stato posto la compensazione centralizzata della potenza reattiva.

I cavi arrivano all'interruttore generale come visualizzato in foto:



Figura 3.3: Cabina

I trasformatori sono collegati a triangolo nel primario e a stella nel secondario. Sono trasformatori a colonna in resina con i seguenti dati di targa:

- Tipo di macchina: *Trasformatore in resina*;
- Numero della norma a cui fa riferimento: *EN60076-11 UE548/2014*;
- Numero di serie: *7-2017-24*;
- Anno di costruzione: *2017*;
- Numero delle fasi: *3*;
- Potenza nominale (facendo riferimento a $S_n = \sqrt{3}U_{n1}I_{n1} = \sqrt{3}U_{n2}I_{n2}$): *800 kVA*;
- Frequenza nominale: *50 Hz*;

- Tensione nominale primario: 20000 V;
- Corrente nominale primario: 23,09 A;
- Tensione nominale secondario: 400 V;
- Corrente nominale secondario: 1154,7 A;
- Simbolo di collegamento: $D - yn - 11$;
- Tensione di cortocircuito in %: 6,41%;
- Massa totale: 2400 kg;
- Perdite a vuoto: 1'209 W;
- Perdite a carico: 7'808 W;
- Grado di protezione: IP 00;
- Varie classi:
 - Classe isolamento: F;
 - Classe ambientale: E2;
 - Classe climatica: C2;
 - Classe protezione al fuoco: F1;

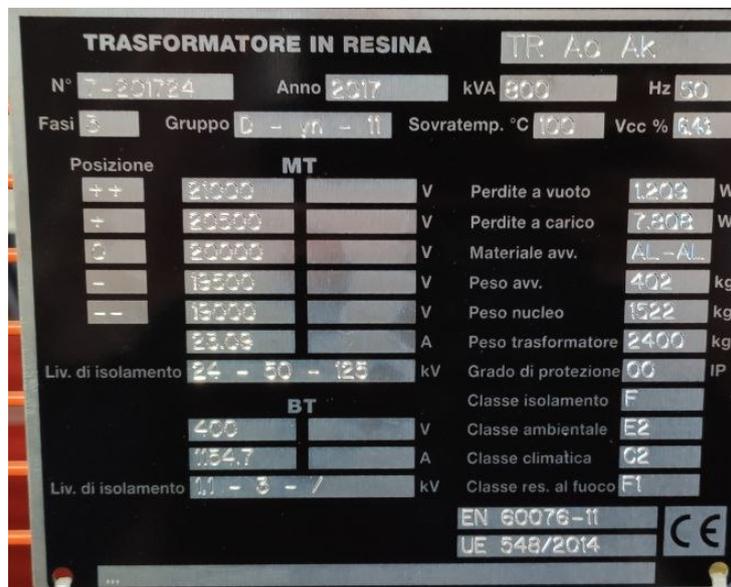


Figura 3.4: Dati di Targa

Con particolare attenzione al tipo di collegamento: la sigla $D - y_n - 11$ sta a significare le seguenti caratteristiche:

D collegamento a triangolo al primario;

y collegamento a stella nel secondario;

n neutro disponibile al secondario;

11 codice numerico del gruppo di appartenenza dove, moltiplicato per 30° (in questo caso $11 * 30^\circ = 330^\circ$), fornisce la rotazione in senso ORARIO del fasore della tensione stellata del primario per portarsi alla stessa fase del secondario.

Le classi di appartenenza sono riferite ai materiali isolanti di cui è composto il trasformatore, all'inquinamento e all'umidità, alla temperatura minima di esercizio e al suo comportamento in caso di incendio. In più, come si nota dalla pianta della cabina, ci sono due trasformatori collegati in parallelo, che permettono di conseguire:

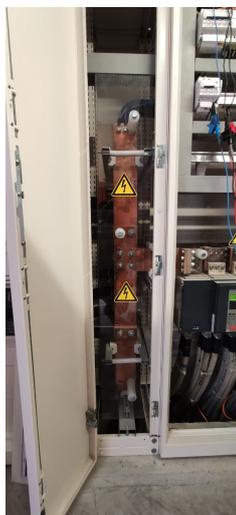
- Un'elevata continuità di servizio della distribuzione;
- La possibilità di prevedere degli incrementi nella potenza;
- Una possibile graduazione della potenza al variare del carico.

Il primo caso si verifica quando si prevede una manutenzione ordinaria o un possibile guasto, senza compromettere tutte le attività in corso; il secondo prevede la possibilità di far aumentare la richiesta di potenza, qualora ci sia da aggiungere dei carichi aggiuntivi; infine il terzo caso permette la variazione della potenza istantanea in presenza di picchi. In più, prevedere due trasformatori in parallelo permette la progettazione e realizzazione di due macchine elettriche di minori dimensioni rispetto a una macchina singola. Questo, oltre a un risparmio economico, ha degli enormi vantaggi in ambito di affidabilità. Per fare ciò, come in questo caso, i due trasformatori devono soddisfare i seguenti requisiti:

1. Devono essere costruiti per la stessa tensione nominale;
2. La connessione in parallelo è possibile solo se vi è piena concordanza di ampiezza e fase, quindi identico gruppo di appartenenza, cioè stesso rapporto di trasformazione complesso;
3. Stessa tensione in cortocircuito, per avere la corretta ripartizione della potenza;
4. Stesso fattore di potenza in cortocircuito, per ottimizzare le correnti di carico.



(a) Quadro Sensori



(b) Collegamento Interno



(c) Vista Interna

A valle del trasformatore da media a bassa tensione, viene collegato il quadro generale, dove vengono monitorate le grandezze elettriche e i dati termici tramite dei sensori e della strumentazione apposita, per evitare eventuali incidenti oppure per intervenire in modo efficace a possibili guasti.

Come si denota dalle immagini, il cablaggio interno del quadro è realizzato con barrature rigide di rame e con le stesse si realizza il parallelo nel circuito del secondario. Da queste barre vengono derivati componenti elettrici di sicurezza, che poi andranno al quadro generale all'interno dell'azienda, rappresentata qui sotto:



Figura 3.5: Quadro Interno dell'Azienda

Il rifasamento di tutti i dispositivi utilizzatori necessari per il processo produttivo viene effettuato tramite un sistema di rifasamento automatico centralizzato posizionato nel quadro di distribuzione posto all'interno dell'azienda non in quello della cabina: in base al carico, la centralina inserisce o meno il pacco di condensatori collegati alla linea, in modo da inseguire il carico lungo l'arco produttivo e viene compensato tutto l'impianto.



(a) Compensazione Automatica



(b) Sistema Aperto

Come si vedrà dall'analisi effettuata, questo sistema è più che sufficiente per non incorrere nelle penali date dalla società di distribuzione, però ne risulta un circuito non ottimizzato. Per questo sarebbe ideale lasciare lo stesso rifasamento, ma porne uno automatico-elettronico solo sul reparto del magazzino automatico, il che potrebbe aiutare a ottimizzare i costi e l'efficienza energetica nell'impianto attualmente più sofisticato e utilizzato.

Capitolo 4

Analisi Dati

Prima di discutere l'analisi dei dati che sono stati rilevati, si andrà a introdurre lo strumento utilizzato, che è il *GSC60* della *HT Instruments* [4], il quale presenta le seguenti modalità d'uso:

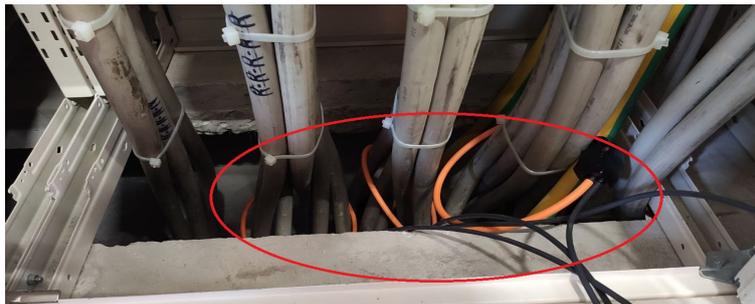
- Analisi delle *Resistenza di Isolamento*;
- Permette di eseguire test agli *Interruttori Differenziale*;
- Permette la *Calibrazione dei Conduttori di Protezione*, fino ai 200mA;
- Analizza la *Dispersione a Terra* e il *Conduttore di Terra*;
- Misura le *Correnti di Dispersione*;
- Permette anche la rilevazione di *Grandezza Ambientali*, quali la temperatura, l'umidità dell'aria, l'illuminazione;
- Misura l'*Impedenza di Linea* e verifica le *Protezioni Magnetotermiche*;
- Verifica la *Protezione dei Cortocircuiti*;
- Analisi ***Completa della Rete***, con nove possibili configurazioni della rete (in base al collegamento dei fili), permette di immagazzinare fino a 632 parametri in due mesi, permette l'analisi in Real Time di tutte le grandezze elettriche (forma d'onda, armoniche, funzioni vettoriali e funzioni di sintesi sulle fasi), cattura le anomalie di tensione con una risoluzione di 20ms, analizza il risparmio energetico della rete.

Oltretutto, grazie l'utilizzo di una app dedicata sui sistemi Android o IOs, permette l'esportazione dei dati in foglio di calcolo Excel, i quali sono stati utilizzati per l'analisi dei dati.

Le misurazioni sono state effettuate nella cabina di trasformazione, quella posta fuori dallo stabilimento e di cui si è discusso nel capitolo precedente. Sono stati posizionati dei morsetti direttamente negli interruttori per misurare le tensioni:



Invece per le correnti sono state usate delle pinze amperometriche, che usano la *legge di Ampere*, tale per cui una corrente che circola in un conduttore, dà luogo ad un campo magnetico:



Come si evince dalla foto, sono stati posizionati solo questi due componenti per le misurazioni, perché tutte le altre grandezze verranno calcolate dallo strumento, quindi saranno misurate indirettamente.



Le misurazioni sono state effettuate dal 21/04 al 05/05, circa due settimane, con un reinserimento dello strumento, per misurare l'impianto con il sistema di rifasamento spento, dal 16/07 al 25/07.

Durante la prima serie di misurazioni, in aprile, ci sono state alcune complicazioni, poiché, nelle due settimane in cui lo strumento era posizionato, ci sono stati dei giorni di chiusura dell'azienda, quindi i dati erano un po' compromessi. Per questo motivo, l'analisi è stata effettuata per il periodo tra il 27/04 e il 29/04, in modo da avere un andamento medio; in più è stato analizzato il giorno 27/04 in modo approfondito, per avere un'idea giornaliera dell'azienda.

Per quanto riguarda la seconda serie di misurazioni, non ci sono state difficoltà, ma si è deciso di prendere i dati che vanno dal 18/07 al 22/07, in modo da avere il trend di una settimana lavorativa.

Le analisi che verranno fatte tengono conto delle seguenti considerazioni:

1. In base all'intervallo di tempo considerato, ci sono varie "richieste" di carico e quindi varie tipologie;
2. La richiesta su un tempo medio dai 15-30 minuti, fa riferimento ai fini fiscali;
3. La richiesta istantanea fa riferimento alla progettazione e dimensionamento dei componenti e dei conduttori;
4. La richiesta media è significativa per i bilanci energetici.

Tenendo conto di ciò, lo strumento è stato posizionato estrapolando i dati ogni dieci minuti (in modo da dare un quadro che sia il più preciso possibile), ma l'analisi eseguita sarà solo sui valori medi nel tempo, con particolare attenzione alle informazioni relativi alla potenza.

4.1 Analisi Dati

Nella prima campagna di misure, lo strumento è stato collegato al sistema per circa due settimane, ottenendo circa una mole di dati ragguardevole (circa un migliaio). Analizzando il trend medio delle correnti, si sono notati i problemi sopra detti, dati dalla chiusura dell'impianto; per ovviare a ciò, si sono presi solo tre giorni, in cui il trend medio era abbastanza costante.

Prima di parlare del trend, si è analizzato il giorno 27/04 singolarmente, ottenendo i seguenti risultati per le tensioni e le correnti:

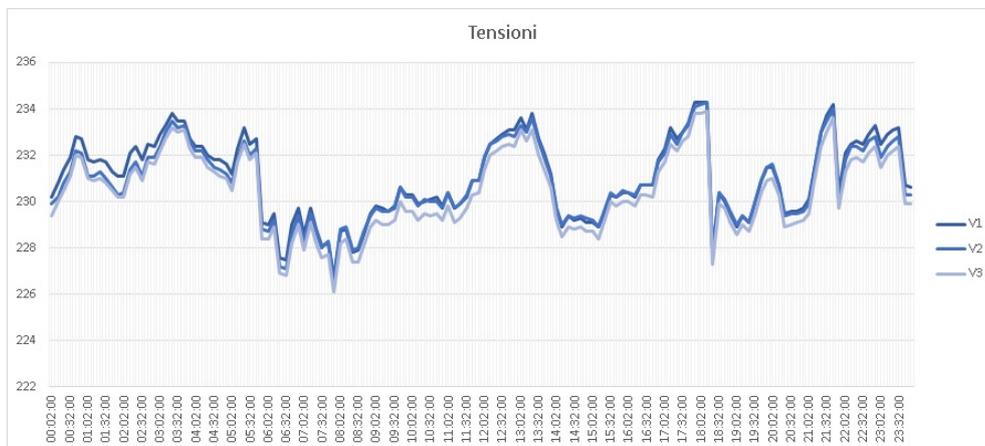


Figura 4.1: Tensioni

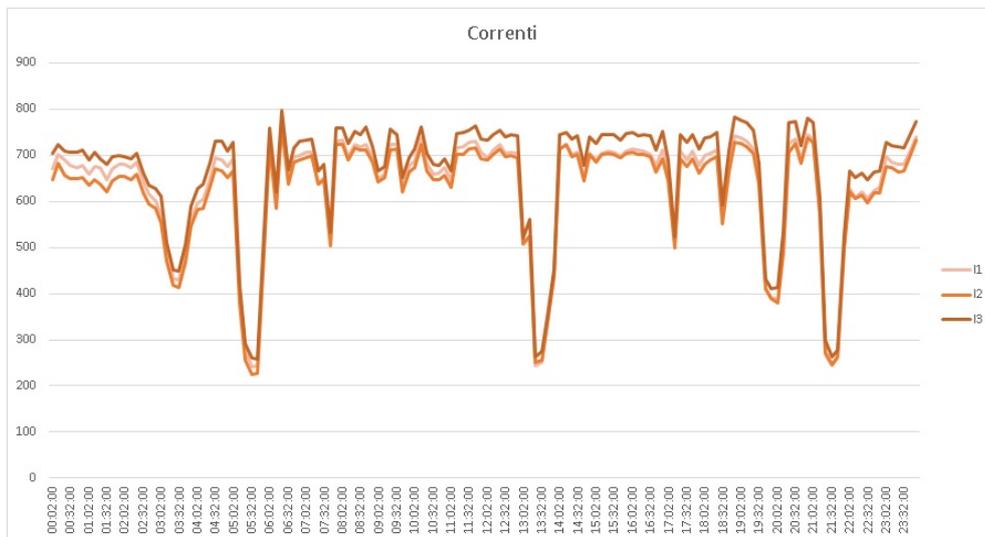


Figura 4.2: Correnti

Mentre per le potenze e il fattore di potenza:

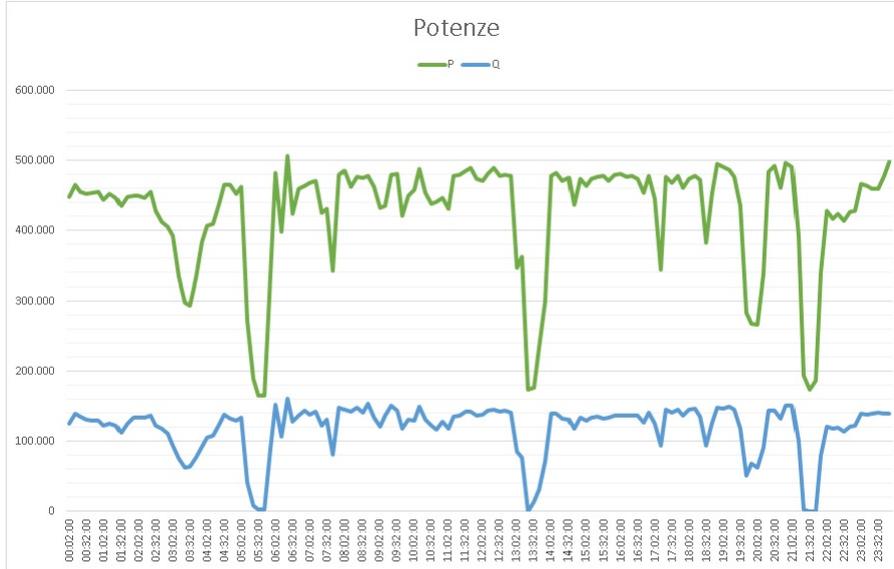


Figura 4.3: Potenze

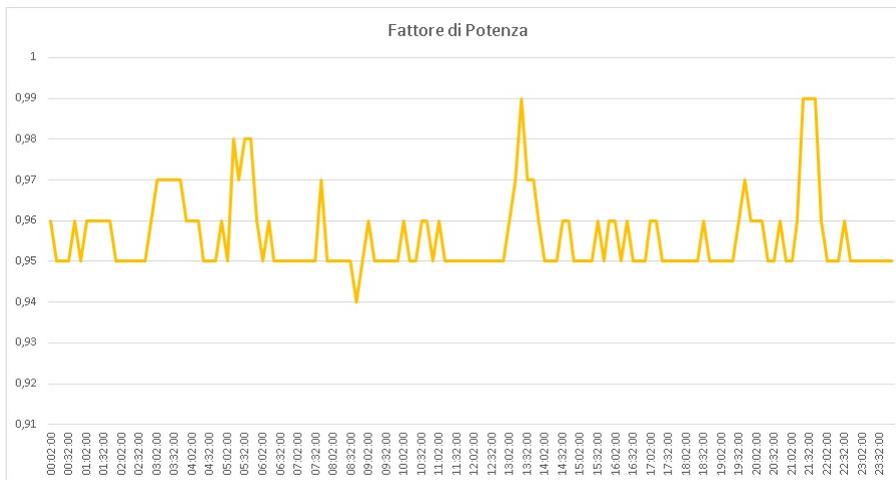


Figura 4.4: Fattore di Potenza

Da questi pochi grafici è possibile comprendere molto del sistema:

1. Le variazioni delle tensioni sono veramente esigue: il punto di massimo è pari a 234 V, mentre il minimo 226 V, con uno scarto di appena 8 V; ciò significa che il sistema è ben equilibrato e stabile.
2. Discorso diverso, invece, per le correnti: ci sono vari picchi e lo scarto maggiore tra il valore massimo e quello minimo è di circa 500 A; si possono notare tre grandi picchi inferiori, dovuti ai cambi turno, e sei picchi minori, molto probabilmente dovuti a cambi di produzione nei quali l'impianto diminuiva il suo carico di lavoro.
3. Ovviamente discorso analogo a quello fatto per le correnti vale per le potenze, che precipitano proprio negli stessi punti dei picchi inferiori della corrente; si può notare che il periodo più produttivo è alla mattina e nel primo pomeriggio, mentre alla sera e nella notte c'è un trend che cala, magari dovuto al fatto che non tutte le lavorazioni vengono effettuate su tre turni e c'è qualche reparto che lavora giornalmente; è importante specificare che la potenza reattiva va a zero nei momenti di cambio turno, proprio per accentuare il fatto che i pochi carichi collegati sono carichi puramente attivi, principalmente le luci; in più è da notare che la potenza reattiva è ben inferiore alla potenza attiva, per mettere in evidenza il fatto che il sistema sia ben rifasato.
4. Completamente opposto il trend del fattore di potenza, che aumenta nei momenti di picco inferiore; questa tendenza non è ovvia ed è data dalla tipologia di rifasamento: considerato che è centralizzato automatico, il valore della potenza reattiva viene compensata a piccoli step, ma il tempo di risposta non è immediato, per questo nei momenti di picchi, siano essi superiori o inferiori, la risposta del rifasamento non è immediato e quindi potrebbe dar valori fuori scala, come in questo caso.

Per quanto riguarda i valori medi nei tre giorni, i dati sono i seguenti (sono stati suddivisi in due tabelle, come la serie di grafici):

	V_1 [V]	V_2 [V]	V_3 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]
27 - apr	231,03	230,84	230,43	633,438	621,083	662,583
28 - apr	230,83	230,89	230,42	655,042	652,214	690,674
29 - apr	231,60	231,53	231,13	662,292	649,444	694,986
<i>TOT</i>	231	231	231	650	641	683

Mentre per le potenze:

	$P [kW]$	$Q [kVAR]$	$\cos(\varphi)$
<i>27 - apr</i>	425,39	118,45	0,956
<i>28 - apr</i>	442,45	127,31	0,954
<i>29 - apr</i>	445,89	128,08	0,954
<i>TOT</i>	437,90	124,62	0,95

Da come si evince dalla tabella, nei tre giorni in esame:

- Le tensioni non cambiano molto, anzi rimangono pressoché costanti;
- Le correnti sono elevate e si può notare che i valori sul terzo conduttore sono maggiori, probabilmente perché dovuto al fatto che sono collegati più carichi monofasi;
- Le potenze sono elevate, si sta parlando di una potenza media di $400 kW$, ciò significa che è un'azienda che ha un'elevata produzione, in più la potenza reattiva è circa il 30% del valore della potenza attiva, come imposto dalla legge;
- Il rifasamento è dentro le normative imposte di mantenere un valore di $0,95$, ma considerato i picchi che ha, si nota la limitazione dovuta alla risposta non immediata, per questo ipotizzare un rifasamento distribuito in un settore e mantenere il rifasamento centralizzato, potrebbe migliorare le caratteristiche di risposta del sistema;
- Un'ultima analisi sul rifasamento e la potenza: il sistema di compensazione è stato progettato nel caso peggiore, quindi ipotizzando che tutta l'azienda stia andando al suo 100 %, ma questo non avviene se non in alcuni momenti, invece il fattore di contemporaneità dei carichi è variabile, cioè in alcuni momenti della giornata potrebbero funzionare due reparti su tre oppure solo uno mentre gli altri sono fermi; questa condizione ha influenza negativa sul sistema di rifasamento, non tanto in termini di valore da rifasare, ma di velocità di risposta.

Nella seconda campagna di misure si analizzeranno due situazioni completamente diverse:

1. La prima riguarda tutto l'impianto senza rifasamento, nel quale si vedranno solo grafici e valori medi della potenza, poiché le tensioni e le correnti sono pressoché costanti;
2. La seconda riguarda solo l'impianto non rifasato del magazzino automatico e in questo caso si vedranno nel dettaglio tutte le grandezze elettriche interessate.

Come accaduto precedentemente, si analizzerà il trend di singolo giorno per poi spostarsi ai valori medi nei due giorni di analisi.

4.1.1 Impianto non Rifasato

Nel primo caso si vedrà il giorno 18/07, che ha dato i seguenti risultati:

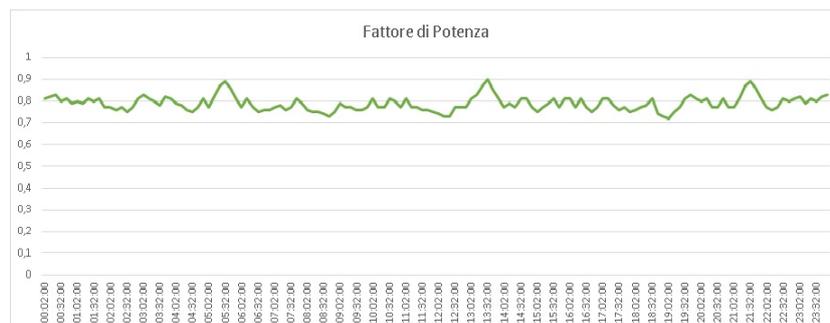


Figura 4.5: Fattore di Potenza

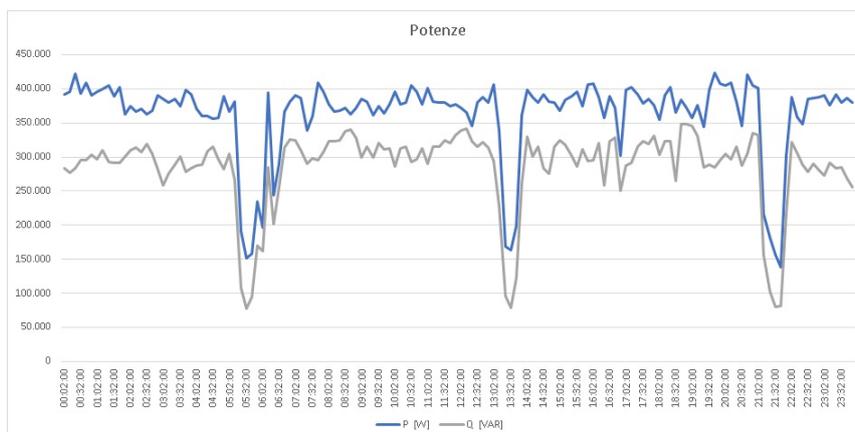


Figura 4.6: Potenza Attiva e Reattiva

Come si vede ci sono notevoli differenze rispetto ad un giorno in cui l'impianto è rifasato, infatti si possono vedere meglio nei risultati delle potenze medie:

	P [kW]	Q [kVAR]	$\cos(\varphi)$
18 - apr	357,66	289,50	0,7799
19 - apr	357,54	289,53	0,7715
<i>TOT</i>	357,60	289,52	0,776

I valori presentano dei cambiamenti rispetto all'altra compagnia di misurazioni, infatti la potenza reattiva è più della metà, circa l'80% della potenza attiva. Questo è dovuto dall'entità dei carichi induttivi spalmati su tutte le linee di produzione.

Questa analisi è utile perché fa comprendere che le linee elettriche interne e i quadri dell'azienda sono progettate secondo questi valori e pertanto un'ottimizzazione energetica anche di una sola parte dell'impianto, avrebbe delle conseguenze positive su tutto l'impianto. Infatti, andando a vedere i valori medi della corrente nell'impianto non rifasato, si nota una maggiorazione della corrente che circola pari al 14%, che andrebbe tutta dispersa nelle condutture e nella infrastruttura elettrica:

	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]
Impianto non rifasato	756	737	794
Impianto rifasato	650	641	683
<i>Percentuale</i>	14%	13%	14%

In più, facendo la differenza tra i valori delle potenze si ottiene:

ΔP [kW]	80
ΔQ [kVAR]	-165

Ottenendo circa 80 kW di potenza media dispersa; questa differenza tiene conto di un'integrazione nel periodo d'analisi, in modo da ottenere dei valori costanti, poiché, come si è visto, il trend dei consumi è di difficile analisi. Questa potenza, trasformata in energia e conteggiando un costo medio di circa 0,277 €/kWh per tre turni da 8 h giornaliere, porterebbe all'azienda

di pagare 500 €/giorno e circa 150'000 €/anno, nel caso in cui l'impianto non fosse rifasato.

Questa differenza è attribuibile al solo rifasamento, poiché durante le misurazioni non sono stati riscontrati cambiamenti né nella rete elettrica (variazioni significative nell'infrastruttura elettrica, quali introduzione di nuovi macchinari o messa in opera di nuovi reparti) né nella produzione; in ottemperanza a ciò, mi sono confrontato con l'azienda *DFV* che mi ha confermato che nel periodo che va da Marzo ad Agosto, la produttività dell'impianto è oscillata tra l'85% e il 90%, dovuta all'evasione degli ordini accumulati nel 2021 e dagli ordini dovuti al *Decreto Legge n.34 del 2020*.

4.1.2 Magazzino automatico non Rifasato

Per quanto concerne il secondo caso, cioè l'analisi del solo reparto del magazzino, verrà effettuata una descrizione del solo giorno 20/07, tenendo presente che i valori delle tensioni sono quasi identici agli altri casi, verranno mostrati solo i grafici delle correnti, potenze e fattore di potenza:

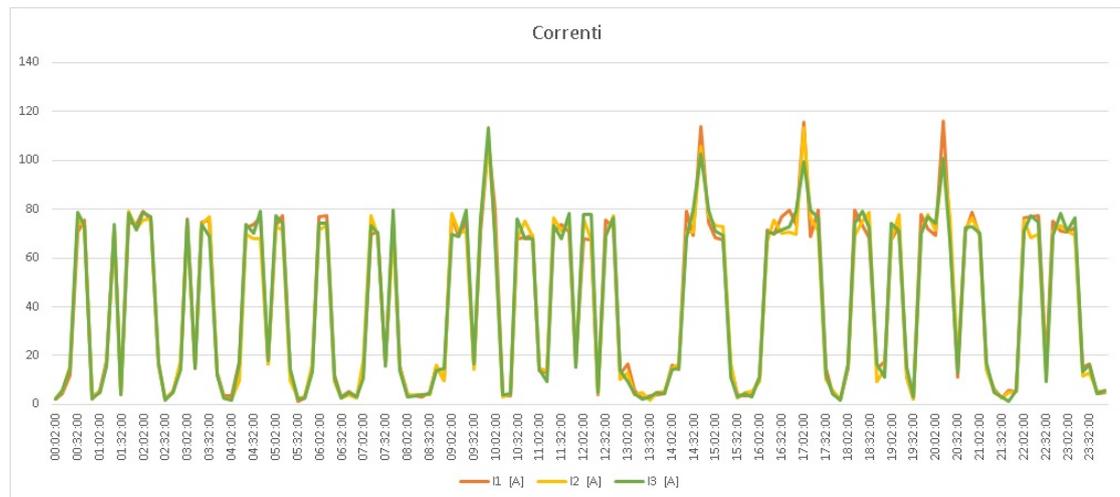


Figura 4.7: Correnti

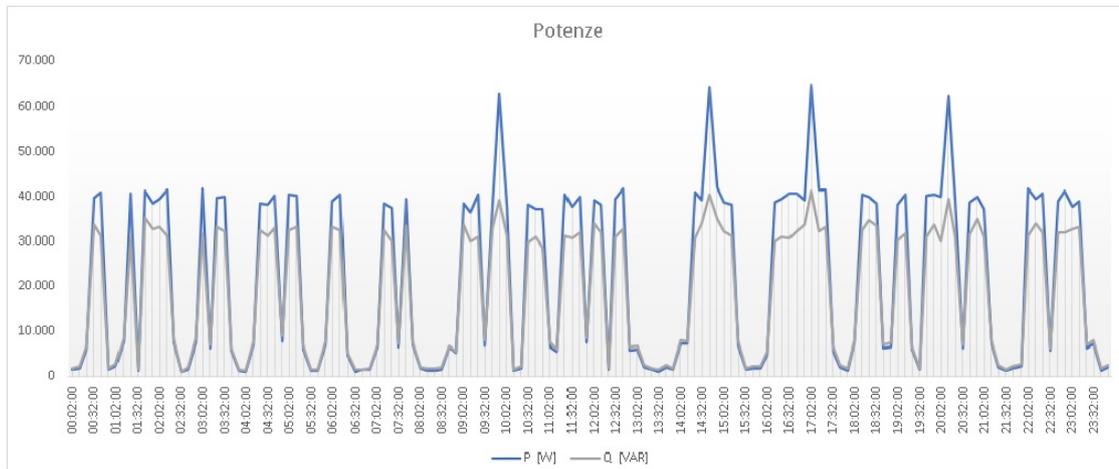


Figura 4.8: Potenze

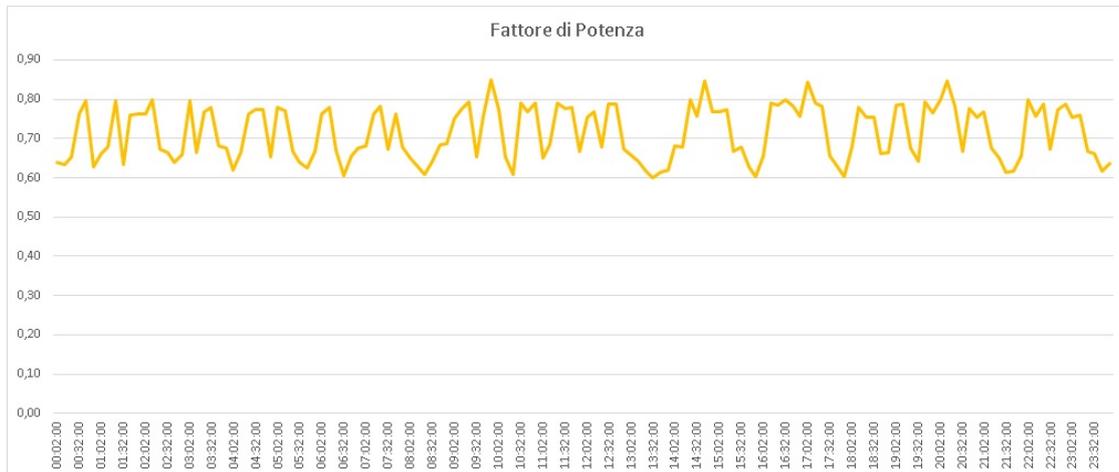


Figura 4.9: Fattore di Potenza

In questo caso, non si riesce a vedere un trend specifico, proprio dato dalla natura quasi continuativa del settore, si possono, però, notare quattro picchi elevati, dati probabilmente dall'utilizzo di entrambi i macchinari contemporaneamente: questi picchi sono molto pochi, per questo giorno sono solo quattro, mentre per il 21/07 sono cinque, significa che il magazzino viene utilizzato alla sua potenza massima poche volte al giorno; da qui si può notare l'utilità di avere un sistema automatico che "insegua" la potenza reattiva.

L'analisi media viene effettuata tenendo conto di tutti i valori, ma da come evince il grafico, il magazzino utilizza una corrente tra i 70-80 A, nei momenti in cui è in funzione, con l'utilizzo di una potenza attiva di circa 40 kW e potenza reattiva di 30 kVAR.

Per il fattore di potenza, non si riesce a trovare un trend o un andamento, è molto oscillante e "caotico", data dalla natura dell'impianto; per questo analisi approfondite su questo dato è molto complesso.

La tabella dei valori medi è la seguente (come prima si è preferito suddividere in due tabelle):

	$V_1 [V]$	$V_2 [V]$	$V_3 [V]$	$I_1 [A]$	$I_2 [A]$	$I_3 [A]$
20 - lug	232,4	232,1	231,6	41,41	40,81	41,15
21 - lug	234,6	234,0	233,3	38,92	39,10	38,79
<i>TOT</i>	233,5	233,0	232,5	40,17	39,95	39,97

Mentre per le potenze:

	$P [kW]$	$Q [kVAR]$	$\cos(\varphi)$
21 - lug	21,92	18,14	0,714
21 - lug	20,98	17,41	0,713
<i>TOT</i>	21,45	17,78	0,71

Dai valori medi, si nota che il fattore di potenza è inferiore al valore medio dell'intero impianto, a valorizzare ancora di più l'ipotesi di installare un sistema di rifasamento dedicato, inoltre è stata eseguita una stima nel caso in cui, dati i valori della corrente e tensione del magazzino automatico, si è stimato il valore della potenza attiva, tenendo un fattore di potenza entro le normative, cioè di $0,95$:

$P [kW]$	28
$\Delta P [kW]$	-6

Questa semplice stima fa comprendere che le perdite in valore di potenza sono pari a $6 kW$, che sono spalmate attraverso le perdite nei conduttori e nei componenti. Ipotizzando sempre $24 h$ di lavoro giornaliero, con circa 300 giorni di lavoro e con il costo attuale dell'energia elettrica pari a $0,277 \text{ €/kWh}$, si ottiene una perdita di circa **12'000 €/anno**, un costo che potrebbe essere tranquillamente investito in un impianto di rifasamento localizzato.

Capitolo 5

Analisi finali

Dopo aver analizzato i dati rilevati, si può concludere che l'impianto non presenta problematiche o difetti di natura elettrica; oltretutto l'analisi eseguita in automatico dallo strumento non ha rilevato né delle anomalie nelle tensioni (buchi, distorsioni di armoniche rilevanti, dissimmetrie) né falle nella sicurezza (correnti anomale nel neutro, sovracorrenti dovute a sovraccarichi, dispersioni delle correnti sui dispositivi di sicurezza). L'azienda pertanto è ben progettata e ben strutturata a livello elettrico. Anche il sistema di compensazione agisce in ottimo modo, tenendo il fattore di potenza entro i limiti legislativi, l'unica pecca è data dalla velocità di risposta.

Proprio per questo motivo, la possibilità di modificare l'attuale struttura, senza sostituirla, potrebbe migliorare la velocità di risposta e comportare delle migliorie: aggiungendo un'interfaccia elettronica formata da un sistema Proporzionale-Integrativo (un controllore PI) è possibile migliorare le prestazioni nella velocità, in modo da mantenere il fattore di potenza più costante possibile, riuscendo ad ottenere un valore medio anche maggiore e di conseguenza una potenza attiva disponibile maggiore a parità di costo.

Per quanto concerne il magazzino automatico, invece, si potrebbe prevedere varie soluzioni, proposte in ordine crescente di qualità:

1. Si sostituisce l'interfaccia elettronica del sistema del sistema, come proposto sopra;
2. Installare nel magazzino un adeguato compensatore elettromeccanico;
3. Installare un compensatore elettronico all'interno del reparto in questione;
4. Ampliare la soluzione precedente, andando ad inserire altri compensatori elettronici all'interno di altri reparti e sostituendo la compensazione sul quadro generale, per una gestione ottimizzata.

Queste proposte sono tutte valide, ma presentano alcune criticità:

1. L'inserimento di un controllore elettronico PI potrebbe non portare ad effettivi benefici, quindi potrebbe essere un costo inutile, per un vantaggio quasi inesistente; inoltre difficilmente si va a modificare un elemento già esistente, perché comporta delle difficoltà tecniche, oltre ad andare a inficiare la marcatura CE e quindi diventerebbe un rischio per la sicurezza.
2. L'inserimento di un rifasamento elettromeccanico localizzato all'interno del magazzino porterebbe a dei vantaggi, ma la lentezza della velocità di risposta potrebbe invece portare degli svantaggi come si è notato nell'analisi: se un sistema elettrico non è costante, ma molto fluttuante nel tempo, la compensazione non riesce a reagire prontamente e possono verificarsi due casi opposti: si può avere la condizione che il fattore di potenza aumenta (come in questo caso) all'aumentare del carico (per inserimento di batterie di condensatori troppo esagerate), come si può avere il caso che il fattore di potenza diminuisca perché il sistema è poco sensibile ai bassi carichi: in entrambi i casi non si ha una perfetta compensazione.
3. Posizionare un rifasamento elettronico porterebbe una positiva innovazione al magazzino automatico, riducendo le perdite analizzate nel capitolo precedente e di conseguenza ai consumi, poiché la potenza disponibile, sarebbe maggiore.
4. La capillarizzazione dei vari sistemi di compensazione (uno per reparto) è una soluzione molto virtuosa, ma potrebbe essere un investimento non indifferente e che potrebbe non riuscire ad essere armonizzato, ma soprattutto non è considerato una soluzione efficace di efficientamento energetico.

Pertanto, la soluzione ottimale, risulta essere la terza opzione: inserire un sistema di compensazione dedicato nel magazzino automatico. Nella fattispecie si è pensato al prodotto *PowerLogic™ AccuSine PFV+* della **Schneider Electric**. È un sistema all-in-one, dove tutta la strumentazione e i collegamenti sono posizionati all'interno di un armadio (tipo un armadio rack di dati), nel quale l'unica cosa da inserire sono i banchi dei condensatori. A differenza del sistema elettromeccanico, la sua velocità di risposta è pari a $25 \mu s$, in altre parole quasi immediata, inoltre la sua risoluzione, tramite l'apparato elettronico, è pressoché infinita in modo da riuscire a coprire tutte le possibili situazioni e variazioni di carico, cosa ideale in questo caso. Questo sistema ha un costo di circa 25'000 €, che con i calcoli effettuati nel capitolo precedente, potrebbe essere ammortizzato in circa due anni.

5.1 Considerazioni Finali

I calcoli eseguiti tengono conto della seguenti semplificazioni:

1. Sono state mantenute costanti le correnti e analizzate solo le potenze misurate, per la difficoltà di misurare tutte le correnti sui singoli conduttori, sui dispositivi e sui componenti della rete;
2. Data l'impossibilità di fare queste misurazioni, sono stati presi i valori delle potenze e si è eseguita una semplice differenza.

Così facendo, i dati analizzati devono essere corretti di un coefficiente preso prudenzialmente pari al 50 %, ottenendo un risparmio di circa 6'000 € e portando il periodo di ammortamento a 4 anni.

Le considerazioni eseguite puntano ad un risparmio economico, che è esiguo. Come spiegato nel primo capitolo, un sistema di rifasamento localizzato porta ad un efficientamento energetico, non a un ritorno economico. Tale miglioria è dovuta ad una riduzione delle perdite per effetto Joule nei conduttori (che sono state calcolate approssimativamente nel capitolo scorso), ad una diminuzione delle sezioni conduttori e ad un utilizzo più opportuno dei componenti. Questi vantaggi sono molto difficili da quantificare e fare un'analisi con i dati proposti, a maggior ragione il coefficiente cautelativo preso è sufficiente.

Con queste nuove informazioni, grazie all'aiuto del responsabile tecnico Schneider abbiamo individuato una nuova soluzione: il sistema *AccuSine PCSn*. Rispetto all'altro componente non è un rifasamento elettronico, o meglio, non è solo un sistema di rifasamento elettronico, bensì un componente elettronico che ha due funzionalità: rifasatore elettronico e compensatore armonico.

In questa analisi non si sono analizzate le armoniche di tensione e corrente dell'impianto, perché esulava dall'idea originale, comunque, data la natura prettamente induttiva dell'impianto, si può intuire come la corrente sia molto distorta e questo provoca delle distorsioni anche nella potenza. A maggior ragione un componente che riesce a ottimizzare sia il fattore di potenza che il fattore di distorsione armonica, sarebbe una soluzione ideale per ottenere non tanto un risparmio economico, ma un efficientamento energetico.

Con questa nuova soluzione e mantenendo la stima di risparmio calcolata pari a 6'000 €/anno (si è scelto di mantenere il valore costante, senza contare il miglioramento delle armoniche, per mancanza di conoscenza in materia), il costo del componente sarebbe di circa 10'500 €, che verrebbero ammortizzati in circa due anni, un tempo dinamico per un piano pluriennale di efficientamento energetico.

Infine ci sono ulteriori considerazioni da fare:

- Il componente prevede che in ogni carico del settore (sia esso motore o quadro sensori) ci sia installata una reattanza di linea pari al 3%, per evitare che la compensazione armonica vada ad intaccare i componenti, poiché immette nella linea armoniche di corrente molto elevate e queste andrebbero ad intaccare il regolare funzionamento dei componenti, poiché sprovvisti di un filtro apposito; per questo motivo è necessario installare la reattanza sopra citata, che fungerebbe da filtro.
- I calcoli di massima del ritorno economico hanno tenuto conto di un costo dell'energia pari allo 0,27 €/kWh, quando, al tempo della stesura finale della tesi (settembre 2022), il costo è ben più superiore (in base al contratto fornitore varia da uno 0,50 allo 0,60) e pertanto il periodo di ammortamento è minore.

Concludendo e partendo dal presupposto che comunque l'impianto elettrico dell'azienda non presenta criticità perché è realizzato secondo le normative vigenti, l'installazione del sistema proposto porterebbe un efficientamento dal punto di vista energetico nel reparto analizzato. Nulla osta ad un ulteriore studio per l'ampliamento di tale sistema nei vari reparti.

Ringraziamenti

Infine, mi sembra opportuno ringraziare coloro che hanno permesso e che mi hanno accompagnato in questo percorso, senza le quali non sarei riuscito a completare questo mio traguardo.

In primis ringrazio il mio relatore, il prof.re Chitarin Giuseppe, che ha saputo indirizzare la mia ricerca e la mia analisi, che mi ha fornito delle sfide pratiche e reali per aiutarmi nella realizzazione e che ha portato tanta pazienza con me.

Mi sembra doveroso ringraziare di cuore la mia famiglia, che ha consentito tutto questo, sostenendomi dal primo giorno fino all'ultimo, spronandomi a dare il massimo ogni giorno e sorretto ad ogni mio esame fallito; ringrazio i miei nonni, quelli che ci sono e quelli che non ci sono più, per avermi insegnato tanto e spero che mi insegnino ancora; mia sorella, per avermi corretto (a modo suo) la tesi, per aver condiviso dolori e difficoltà insieme; ringrazio mia madre per essere sempre stata al mio fianco, anche quando non era facile starmi accanto; ringrazio mio padre per avermi sempre fatto vedere le cose da un diverso punto di vista e farmi sempre ragionare con la mia testa.

Ringrazio i miei colleghi, nonché amici, ormai fratelli, per essere stati al mio fianco durante le lezioni, durante le pause pranzo in mensa e soprattutto negli esami, nei preesami, ma in particolare nei post-esami, quando l'esito era già segnato.

Ringrazio Sara, Gianmarco e Giorgia, che mi hanno fatto scoprire la vita fuori di casa, che hanno sopportato le mie manie e che mi hanno aiutato a sbattere le ali da solo.

Ringrazio i miei coinquilini del convitto, compagni di partite a carte indimenticabili, di pasti al limite del legale, di pause studio trasformate in tornei di calciobalilla, di vittorie e sconfitte condivise.

Ringrazio *DFV* e i tecnici *Schneider*, in particolare Sadocco Matteo e Netti Tiozzo Luca, per avermi dato la possibilità di espandere le mie conoscenze e

per avermi aiutato nella raccolta dei dati e delle informazioni necessarie per esplorare nuove soluzioni.

Dulcis in fundo, ringrazio la mia ragazza che nell'ultimo periodo è rimasta al mio fianco, a prescindere da tutto, mi ha sostenuto, mi ha aiutato ad abbattere i miei limiti e a trasformare questo mio sogno in realtà, a rendermi una persona migliore e a non cedere di fronte a nulla.

Infine, come mi è stato fatto notare, ringrazio me stesso, ringrazio quel ragazzo di ormai sette anni fa che ha preso questa meravigliosa decisione di trasformare la sua vita e di giocare al meraviglioso gioco della vita.

Bibliografia

- [1] G. Chitarin, F. Gnesotto, M. Guarnieri, A. Maschio, A. Stella *Elettrotecnica 1 - Principi* Esculapio, 2017
- [2] R. Benato, L. Fellin *Impianti Elettrici* Wolters Kluwer, 2018
- [3] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins *Power Electronics* John Wiley & Sons, 1995
- [4] HT Instruments *Scheda Tecnica GSC60*

