

UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

TITOLO:

INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA ELETTRICO DEL TERMOVALORIZZATORE DI PARONA

Candidato: **Ferriello Matteo**

Relatore: Ing. **Pedrazzini Sergio Gabriele**

Correlatore: …….

Anno Accademico 2025/2026

Sommario

Introduzione 4

1. La termovalorizzazione in Italia 7

2. Il termovalorizzatore di Parona 9

2.1. Ricevimento e stoccaggio rifiuti 12

2.2. Sezioni di termovalorizzazione 12

2.2.1. Caldaia a letto fluido circolante 13

2.2.2. Caldaia A Griglia Mobile Inclinata 14

2.3. Sezioni di trattamento fumi 14

2.4. Monitoraggio emissioni 15

2.5. Rifiuti derivanti da termovalorizzazione 16

2.6. Ciclo termico 17

3. Distribuzione elettrica nell'impianto 18

3.1. Autoconsumo 21

3.2. Scenari d'emergenza di partenza 22

3.3. Impianto in isola 29

4. Interventi di miglioramenti del sistema elettrico 31

4.1. Nuovi scenari di emergenza 31

4.2. Luoghi oggetto della realizzazione 33

4.2.1. Sottostazione SS2 34

4.2.2. Sottostazione SS3 35

4.2.3. Sottostazione SS7 35

4.2.4. Sottostazione MT/BT Linea 3 35

4.3. Nuove forniture 36

4.3.1. Quadro MT 02-MVS-902 36

4.3.2. Quadro MT 03-MVB-903 37

4.3.3. Trasformatori TU-901 e TR-001 40

4.4. Tempistiche 41

4.5. Criticità 41

5. Coordinamento della attività 43

5.1. Attività di coordinamento 45

5.2. Attività in campo 46

6. Tarature delle protezioni 49

6.1. Quadro 03-MVB-901 49

6.2. Tarature celle alimentazione a 15kV 52
6.2.1. Protezione 51 52
6.2.2. Protezione 50 53
6.2.3. Protezione 51N 54
6.2.4. Coordinamento delle protezioni 55
6.2.5. Possibili modifiche 57
7. Dimensionamento cavi 60
7.1. Protezione da sovraccarico 61
7.2. Temperature di esercizio 62
7.3. Caduta di tensione 62
8. Automazione 65
8.1. Relè di protezione e comunicazione 66
9. Implementazioni future 68
10. Conclusioni 70

Introduzione

La crescente domanda di energia, unita all'obiettivo globale di una transizione verso fonti sostenibili e sicure, pone nuove sfide per la gestione delle infrastrutture energetiche. In questo contesto, i termovalorizzatori ricoprono un ruolo cruciale, consentendo la trasformazione dei rifiuti solidi urbani (RSU) in energia utile, riducendo al contempo l'impatto ambientale e lo smaltimento in discarica.

I termovalorizzatori svolgono un duplice ruolo strategico: da un lato consentono la gestione sostenibile dei rifiuti e dall'altro permettono la generazione di energia elettrica e termica. In Italia, gli impianti di termovalorizzazione contribuiscono alla produzione di oltre 6 TWh di energia elettrica all'anno, pari al fabbisogno di circa 2 milioni di famiglie. L'integrazione di tali impianti nel mix energetico nazionale risponde alla necessità di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e di raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione previsti dall'Agenda 2030 delle Nazioni Unite.

L'efficienza e l'affidabilità della distribuzione elettrica interna di tali impianti rappresentano elementi fondamentali per garantirne il funzionamento continuo, soprattutto in condizioni di emergenza.

Questa tesi si concentra su gli interventi atti al miglioramento della distribuzione elettrica della linea di soccorso presso il termovalorizzatore di Parona (PV), una rete di fondamentale importanza per assicurare la continuità operativa in caso di anomalie o guasti derivati dal montante ad alta tensione connesso alla rete elettrica nazionale.

L'impianto oggetto di studio rappresenta un caso emblematico per analizzare come l'ottimizzazione tecnologica e la progettazione avanzata possano incrementare la garanzia di continuità d’esercizio di un sistema elettrico.

Il termovalorizzatore di Parona è progettato per trattare quasi 400.000 tonnellate di rifiuti annui, generando energia sufficiente per alimentare tutta la zona limitrofa. La gestione efficiente dell'alimentazione elettrica di soccorso è essenziale per mantenere il ciclo operativo dell'impianto, evitando interruzioni che potrebbero compromettere sia la continuità dello smaltimento rifiuti, l'integrità delle macchine e le strutture di processo, nonché il rispetto delle normative ambientali in materia di emissioni.

La linea di soccorso, entra in funzione in caso di anomalie o guasti alla rete principale, assicurando l'alimentazione di sistemi fondamentali come le caldaie, le pompe di alimentazione del ciclo termico ed i sistemi di automazione e controllo. Tuttavia, l'operatività di tali linee può essere compromessa da diversi fattori, tra cui l'obsolescenza delle apparecchiature e la scarsa integrazione con i sistemi di automazione e supervisione.

In particolare, l'impianto oggetto di studio presenta una configurazione elettrica che necessita di interventi mirati per soddisfare la richiesta di energia dell'impianto per consentirne la continuità o per permettere lo spegnimento delle caldaie in massima sicurezza. La riprogettazione delle attuali soluzioni di distribuzione elettrica, basate su quadri di media tensione (QMT), richiedono un controllo sicuro e una maggiore flessibilità operativa.

Il lavoro presentato in questa tesi si propone di analizzare le criticità della distribuzione elettrica di soccorso presso il Termoutilizzatore di Parona e di illustrare la soluzione progettuale sviluppata in grado di migliorarne l'affidabilità e l'efficienza, di mostrare che l'implementazione di tecnologie avanzate, come sistemi di automazione PLC/SCADA, e mediante una revisione delle logiche di commutazione, è possibile ridurre i rischi di interruzione e ottimizzare la gestione energetica in condizioni di emergenza. Inoltre, si analizzerà in dettaglio come l'affidabilità dell'impianto sia dipendente da una corretta progettazione e

dimensionamento dei dispositivi installati, facendo riferimento a casi reali di tarature di protezioni e dimensionamento cavi, per far fronte agli obiettivi posti dal progetto "*Interventi di miglioramento del sistema elettrico del Termovalorizzatore di Parona"*.

Il presente elaborato è relativo al periodo compreso tra novembre 2023 e maggio 2024 durante il quale ho svolto un tirocinio nel Termovalorizzatore di Parona della società A2A Ambiente del gruppo A2A S.p.A.; attualmente svolgo il ruolo di coordinatore di manutenzione Elettrostrumentale nel medesimo impianto.

1. La termovalorizzazione in Italia

In Italia, il sistema di gestione dei rifiuti si avvale di 37 termovalorizzatori attivi, distribuiti in diverse regioni, con una capacità complessiva di trattamento superiore a 6,1 milioni di tonnellate di rifiuti annui. Tali impianti rivestono un ruolo fondamentale nella chiusura del ciclo dei rifiuti, riducendo il volume dei materiali conferiti in discarica e contribuendo alla produzione di energia elettrica e termica.

La Lombardia, con i suoi 13 termovalorizzatori, è la regione che vanta il maggior numero di impianti attivi. Questi rappresentano circa il 35% della capacità totale nazionale, confermando il ruolo di questa regione come punto di riferimento per la gestione sostenibile dei rifiuti. I principali termovalorizzatori lombardi si trovano a Milano, Brescia, Cremona e Parona, ciascuno caratterizzato da tecnologie avanzate e da un'elevata efficienza energetica e ambientale.

In Lombardia solo i termovalorizzatori di Brescia e di Milano Silla 2 hanno una capacità di trattamento superiore al termovalorizzatore di Parona, in gradi di trattare circa 400.000 tonnellate di rifiuti annue.

In particolare, esso ha una produzione energetica di circa 250 GWh/anno di energia elettrica, sufficiente per alimentare 80.000 famiglie, ed è quindi un elemento chiave nel sistema regionale di gestione dei rifiuti, consentendo di ridurre il ricorso alle discariche e contribuendo al raggiungimento degli obiettivi europei di economia circolare.

Negli ultimi anni la quantità di rifiuti destinati alla termovalorizzazione in Italia è aumentato, nonostante il numero di impianti totali presenti sul territorio sia in calo; questa tecnologia oltre ai vantaggi già citati si scontra sempre con l'opinione pubblica che osteggia la costruzione di nuovi impianti. Infatti, la combustione da rifiuti determina l'emissione in atmosfera di inquinanti come ossido d'azoto, CO_2 e in piccolissima parte

da diossine, anche se gli impianti moderni sono molto più sicuri rispetto al passato.

I termovalorizzatori immettono in atmosfera inquinanti in valori molto al di sotto rispetto ai limiti di legge (Direttiva 2010/75/UE) grazie a filtri, scrubber, catalizzatori e monitoraggio continuo con dati trasmessi agli enti nazionali di settori in tempo reale.

2. Il termovalorizzatore di Parona

Il termovalorizzatore di Parona, impianto della società A2A Ambiente del gruppo A2A S.p.A., è un'azienda che si occupa dello smaltimento di rifiuti e la produzione di energia elettrica tramite termovalorizzazione.

L'impianto, situato a Parona (PV), nella Lomellina settentrionale, opera su un'area di circa 110.000 m² ed è responsabile della termovalorizzazione di Rifiuti Solidi Urbani (RSU) e Rifiuti Solidi Non Pericolosi (RSNP) provenienti da varie fonti provinciali, regionali ed extra regionali.

La capacità autorizzata è di 492.000 tonnellate di rifiuti all'anno, di cui 380.000 tonnellate destinate alla termovalorizzazione.

Le prime due linee di termovalorizzazione, attrezzate con forni a letto fluido circolante, sono entrate in funzione rispettivamente nel 2000, Linea 1, e nel 2007, Linea 2.

Nella configurazione attuale Linea 1 è dismessa ma è presente una nuova linea di produzione, Linea 3, basata su tecnologia tradizionale con forno a griglia mobile inclinata, ed attiva dal secondo semestre del 2022.

La potenza nominale del generatore di Linea 2 è 30 MVA, mentre del generatore di Linea 3 è 40 MVA.

L'energia elettrica generata dalla termovalorizzazione della frazione combustibile dei rifiuti viene immessa nella rete ad alta tensione, mentre le frazioni residue vengono inviate a recupero o smaltimento in impianti esterni.

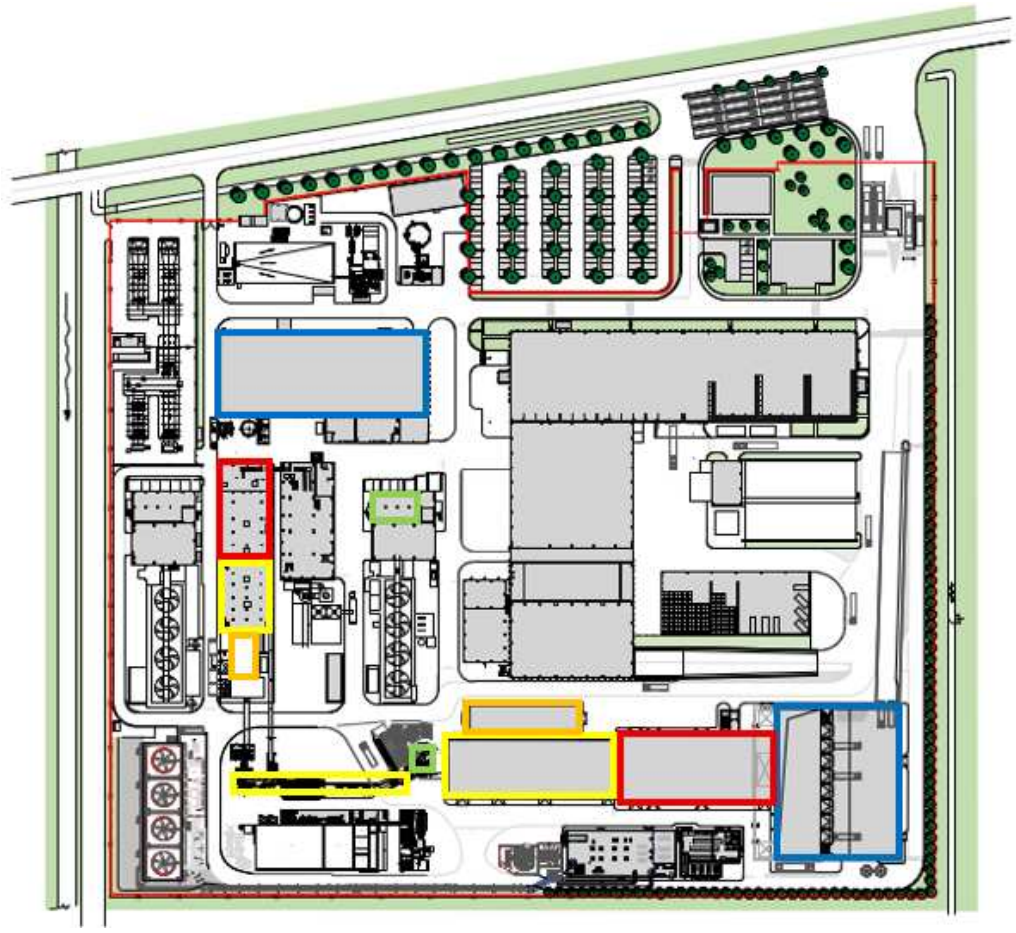
Lo stabilimento è inoltre dotato di una serie di servizi ausiliari funzionali alle attività fin qui descritte come: serbatoi e reti acqua servizi e acqua potabile, con alimentazione da pozzo e da acquedotto; rete di raccolta e convogliamento ad impianti di trattamento delle acque reflue di natura civile, industriale e meteorica; impianti di produzione e rete di distribuzione dell'aria compressa; serbatoi, rete e impianti antincendio ad

acqua, schiuma e gas estinguente; sottostazioni e reti elettriche a bassa, media ed alta tensione.

L'impianto è articolato nelle macrosezioni seguenti e descritte più dettagliatamente successivamente:

- Sezioni di ricevimento e stoccaggio rifiuti;
- Sezioni di termovalorizzazione;
- Sezioni di trattamento fumi;
- Monitoraggio emissioni;
- Sezione stoccaggio rifiuti derivanti da termovalorizzazione;
- Ciclo termico;

L’impianto è inoltre dotato di un importante sistema di monitoraggio delle emissioni, interfacciato con la rete SME di ARPA Lombardia, il quale è collegato il sistema di controllo e regolazione dell’impianto (DCS).



sezioni di ricevimento e stoccaggio rifiuti

sezioni di termovalorizzazione

sezioni di trattamento fumi

monitoraggio emissioni

sezione stoccaggio rifiuti derivanti da termovalorizzazione

Immagine 1 – pianta e sezioni termovalorizzatore di Parona

2.1. Ricevimento e stoccaggio rifiuti

Le materie prime principali in ingresso sono costituite da rifiuto solido urbano RSU e rifiuti speciali non pericolosi RSNP. Tutti i rifiuti in arrivo all'impianto passano attraverso un portale di rilevazione della radioattività, che non possono entrare all'interno del sito, e una stazione di controllo e pesatura, dopodiché vengono smistati nei depositi di Linea 2 e Linea 3.

Il metodo di stoccaggio rifiuti è differente per le due linee in quanto le due caldaie vengono alimentate con procedure differenti, oltre ad utilizzare una tecnologia ed un combustibile da rifiuti (CDR) diversi.

Per l'alimentazione di Linea 2 viene fornito un CDR pretrattato che viene stoccato in un vasto ambiente, Storage 2, dove il materiale viene movimentato e caricato in tramoggia per l'alimentazione della caldaia da trattori con pala.

La sezione di ricezione e stoccaggio dei rifiuti della Linea 3 è costituita da una fossa all'interno di un edificio chiuso e mantenuto in depressione, avente una capacità di messa in riserva di rifiuti pari a 11.840 m^3, la cui movimentazione viene effettuata tramite due polipi meccanici comandati da carriponte.

All'inizio del canale verticale della tramoggia vi sono due serrande con comando oleodinamico. Il fondo del canale di carico è chiuso da un piano sul quale scorrono gli alimentatori a cassetto, dotati di movimento alternato.

2.2. Sezioni di termovalorizzazione

La seconda linea di termovalorizzazione dell'impianto di Parona ha come cuore principale una caldaia a letto fluido circolante a differenza della terza Linea che utilizza la tecnologia della griglia mobile inclinata. I

sistemi sono progettati per trattare i rifiuti solidi, trasformandoli in energia sotto forma di vapore ad alta temperatura, che è utilizzato per produrre elettricità.

2.2.1. Caldaia a letto fluido circolante

Questa tipologia da caldaia è costituita da una colonna verticale in cui i rifiuti vengono bruciati in un letto di sabbia che viene mantenuto in sospensione da un flusso di aria caldo. Questo flusso consente un buon mescolamento dei materiali, mantenendo omogenea la temperatura all'interno della fornace, diminuendo gli incombusti aumentando l'efficienza della combustione.

I rifiuti vengono alimentati in un'apposita zona di combustione dove avviene la loro ossidazione. Il letto fluido permette di ottenere una combustione più uniforme, a temperature controllate, riducendo così le emissioni di sostanze inquinanti come ossidi di azoto (NOx) e anidride solforosa (SO2).

Il calore immagazzinato nei fumi generati dalla combustione dei rifiuti vengono trasferiti a più scambiatori di calore in cascata che cedono l'energia all'acqua, presente nel ciclo termico, che passa allo stato gassoso. Il vapore prodotto è utilizzato per alimentare la turbina a vapore per la produzione di energia elettrica.

Una delle principali caratteristiche del letto fluido circolante è la sua capacità di trattare una vasta gamma di combustibili, inclusi rifiuti solidi urbani, biomassa, e materiali di scarto industriali. Questo rende le caldaie a letto fluido circolante particolarmente adatte per impianti di termovalorizzazione.

La configurazione del letto fluido circolante consente anche un buon controllo delle emissioni attraverso l'uso di tecnologie per la rimozione di

particolato (come i cicloni) e l'adozione di sistemi di desolforazione e denitrificazione, per garantire che le normative ambientali siano rispettate.

2.2.2. Caldaia A Griglia Mobile Inclinata

La camera di combustione di Linea 3 è di tipo adiabatico con griglia mobile inclinata. Questa griglia è composta da una serie di elementi metallici mobili inclinati, che si spostano progressivamente per favorire l'avanzamento del combustibile all'interno della camera di combustione. Il movimento della griglia permette di distribuire il combustibile in modo uniforme, migliorando il processo di combustione e garantendo una maggiore efficienza termica. Inoltre, facilita l'evacuazione automatica delle ceneri residue, riducendo la necessità di interventi manuali per la pulizia e la manutenzione.

Il processo a valle della camera di combustione è simile a quello della seconda linea di produzione (scambiatori ed economizzatori) anche se, essendo una linea molto più moderna, si presenta come un edificio più compatto.

Questa tecnologia si distingue da quella utilizzata per la Linea di produzione 2 per la sua semplicità e robustezza, ma soprattutto per la sua adattabilità a combustibili grossolani e non pretrattati.

2.3. Sezioni di trattamento fumi

I fumi generati dal processo di combustione devono essere sottoposti a un articolato sistema di trattamento prima di essere immessi in atmosfera, al fine di ridurre la concentrazione degli inquinanti e rispettare i limiti imposti dalla normativa vigente.

Il processo di depurazione avviene attraverso diverse fasi; in prima battuta, i fumi attraversano sistemi di separazione meccanica, come i cicloni, che

permettono la rimozione delle particelle solide più grossolane sfruttando la forza centrifuga. Successivamente, attraversano sistemi di abbattimento del particolato fine, come i filtri a maniche, che consentono di trattenere le polveri residue.

A questo punto si procede con il trattamento chimico dei fumi. Vengono iniettati specifici reagenti, tra cui calce e bicarbonato di sodio che reagiscono con i gas acidi, come acido cloridrico (HCl) e anidride solforosa (SO_2), neutralizzandoli e trasformandoli in composti solidi facilmente separabili.

Prima dell'espulsione in ambiente dei fumi, viene invece utilizzata ammoniaca per la riduzione degli ossidi di azoto (NOx) che reagisce con tali composti trasformandoli principalmente in azoto molecolare (N_2) e vapore acqueo.

Al termine di questo processo i fumi risultano depurati e possono essere immessi in atmosfera.

2.4. Monitoraggio emissioni

Il controllo delle emissioni rappresenta un aspetto fondamentale nella gestione di un impianto di termovalorizzazione, al fine di garantire il rispetto dei limiti imposti dalla normativa ambientale.

Il Sistema di Monitoraggio delle Emissioni (SME) è costituito da più apparecchiature installate allo scopo di verificare quantitativamente il contenuto di inquinanti nei fumi emessi a valle del processo di combustione e trattamento dei fumi; a queste si affiancano ulteriori strumenti dedicati al controllo dei parametri di processo.

Gli obiettivi principali del sistema sono la riduzione dell'inquinamento atmosferico, il controllo della gestione ambientale rispettando le normative di riferimento e la prevenzione di incidenti causati da emissioni fuori controllo.

Sensori ed analizzatori sono responsabili della misurazione in tempo reale delle concentrazioni di CO_2, NOx, SO_2, CO e particolato presenti nei fluidi in camino. I dati vengono elaborati e trasmessi all'ente ambientale *ARPA Lombardia* (Agenzia Regionale per la protezione dell'Ambiente), che ne verificano la conformità ai limiti normativi.

Presso l'impianto descritto è presente un team dedicato, dotato di quattro cabine e due laboratori, che garantisce il monitoraggio continuo, 24 ore su 24 per 365 giorni all'anno, della concentrazione delle sostanze sopraelencate presenti nei fumi che vengono immessi nell'atmosfera.

2.5. Rifiuti derivanti da termovalorizzazione

I rifiuti derivanti dal processo di termovalorizzazione si dividono in due macrogruppi: ceneri pesanti e ceneri leggere.

Le prime sono il rifiuto prodotto dal normale esercizio dell'impianto ed è costituito dalle scorie di fondo periodicamente scaricate dai forni che vengono smaltite o utilizzate da impianti terzi. La seconda linea di termovalorizzazione li scarica dal letto forno con una produzione media annua di 9.000 t. La terza invece scarica le scorie e le ceneri pesanti dalla griglia, successivamente vengono raffreddati e stoccati in apposita fossa ed infine utilizzati, da aziende terze, come materia prima per altri utilizzi.

Per ceneri leggere invece si intende le ceneri raccolte nelle diverse sezioni di caldaia e separate dai fumi sia per gravità sia grazie a sistemi di pulizia automatizzata delle superfici di scambio termico. Si dividono in ceneri leggere intermedie e finali in base a quando, all'interno del processo, si depositano e quindi se vengono espulse prima o dopo l'aggiunta di reagenti, quali la calce idrata ed il bicarbonato. Queste ceneri vengono asportate mediante sistemi di trasporto a catena e successivamente inviate a silo di stoccaggio, prima di essere smaltite in impianti terzi.

2.6. Ciclo termico

L'impianto di termovalorizzazione consente non solo lo smaltimento dei rifiuti, ma anche il recupero energetico attraverso la produzione di energia elettrica.

Il ciclo termico rappresenta il sistema attraverso il quale l'energia termica prodotta dalla combustione dei rifiuti viene convertita in energia meccanica ed elettrica.

All'interno della caldaia, l'acqua del circuito acqua-vapore fluisce in senso opposto rispetto ai fumi caldi prodotti dalla combustione, realizzando uno scambio termico in controcorrente. In questo modo i fumi si raffreddano progressivamente prima dell'emissione in atmosfera, mentre l'acqua assorbe energia termica fino a trasformarsi in vapore. Lo scambio termico avviene attraverso le superfici della caldaia e componenti come l'economizzatore, che consente di preriscaldare l'acqua di alimento sfruttando il calore residuo dei fumi.

Il vapore prodotto viene convogliato verso una turbina a vapore, dove l'energia termica e di pressione viene convertita in energia meccanica. L'espansione del vapore provoca la rotazione dell'albero della turbina, collegato a un alternatore. Quest'ultimo trasforma l'energia meccanica in energia elettrica, che viene poi utilizzata nella rete di distribuzione interna ed immessa nella rete elettrica nazionale.

Dopo aver attraversato la turbina, il vapore viene inviato a un condensatore, dove viene raffreddato e riportato allo stato liquido. L'acqua così ottenuta viene reimmessa nel ciclo, realizzando un circuito chiuso. La perdita fisiologica di acqua del sistema viene compensata tramite pompe di alimento, che prelevano acqua da un serbatoio di reintegro alimentato con acqua di pozzo. Prima dell'immissione nel ciclo, l'acqua viene sottoposta a trattamenti chimico-fisici per evitare la formazione di incrostazioni e depositi all'interno dell'impianto.

3. Distribuzione elettrica nell'impianto

La distribuzione elettrica del termovalorizzatore di Parona è gestita da quadri di media tensione installati nelle sottostazioni elettriche dell'impianto.

In sito sono presenti 18 cabine e sottostazioni elettriche per la gestione di corrente a bassa, media ed alta tensione e segnali per il controllo di tutti i processi di produzione e monitoraggio dello stabilimento.

La connessione principale con la rete elettrica nazionale avviene nella sottostazione SS1 ad alta tensione. Qui avviene l'interfaccia con la rete di Terna S.p.A. a 132 kV; chiudendo il sezionatore meccanico ad alta tensione si vanno ad alimentare le sbarre che diramano la corrente sulle due linee di produzione, Linea 2 e Linea 3.

Nello stallo AT sono presenti trasformatori di tensione, trasformatori di corrente, interruttori e sezionatori per proteggere l'impianto da eventuali guasti sulla rete di distribuzione Terna e per mettere in sicurezza le varie apparecchiature in caso di manutenzione ordinaria, straordinaria o su guasto.

Per ogni Linea di produzione è presente un trasformatore elevatore, TE-2901 per Linea 2 e P30ATA10GH001 per Linea 3, che trasformano la tensione da quella in uscita dai generatori, 11 kV, a quella di scambio con la rete, 132 kV.

Sono presenti anche due trasformatori per portare la tensione da quella prodotta dai generatori a quella di distribuzione interna all'impianto, pari a 6300 V. Per la seconda linea di termovalorizzazione questa trasformazione di tensione è svolta dal trasformatore TU-2901 che ha una potenza nominale di 5 MVA, che può arrivare a 6 MVA con ventilazione dell'aria forzata. Lo stesso compito per Linea 3 è svolto dal trasformatore TR-E che ha una potenza nominale pari a 8 MVA in esercizio ONAN e 10 MVA in esercizio ONAF.

Nella configurazione in essere prima degli interventi di miglioramento elettrico descritti nel presente lavoro di tesi, le aree comuni di stabilimento ed i servizi come uffici, guardiania e pesa prelevavano energia dalla catena di distribuzione derivata dal generatore/montante di Linea 2. A valle degli interventi descritti successivamente queste utenze preleveranno energia dalla terza linea di produzione.



Immagine 2 - trasformatore TE-2901



Immagine 3 - trasformatore P30ATA10GH001

Trasformatore	TE-2901	P30ATA10GH001	u.m.
Potenza nominale	30	43	MVA
Tensione nominale AT	138±5x1,25%	136±8x1,25%	kV
Tensione nominale MT	11	11	kV
Corrente nominale AT	125,5	182,5	A
Corrente nominale MT	1574,6	2256,9	A
Frequenza	50	50	Hz
Collegamento	YNd11	YNd11	-
Raffreddamento	ONAN	ONAN	-

Tabella 1: dati di targa dei trasformatori elevatori

Trasformatore	TU-2901	P30ATA10GH001	u.m.
Potenza nominale	5,5/7,25	10/13	MVA
Tensione nominale AT	11±2x2,5%	11±5x1,25%	kV
Tensione nominale MT	6,3	6,3	kV
Corrente nominale AT	288,7	524,9	A
Corrente nominale MT	504	96,4	A
Frequenza	50	50	Hz
Collegamento	Dyn11	Dyn11	-
Raffreddamento	ONAN/ONAF	ONAN/ONAF	-

Tabella 2: dati di targa dei trasformatori di unità

3.1. Autoconsumo

La seconda linea di produzione è gestita dalla cabina elettrica SS7.

Il quadro di media tensione 07-MVB-2901 è alimentato direttamente dal generatore elettrico ed ha due partenze: una per il TE-2901 (Immagine 2), per la cessione ed il prelievo di energia elettrica dalla rete Terna a 132 kV, una per il TU-2901, trasformatore 11/6,3 kV per l'alimentazione di tutti i servizi legati alla produzione della Linea, oltre che ad i servizi delle aree comuni di stabilimento.

L'autoconsumo degli ausiliari della Linea è di 3,5÷4 MVA a normale regime.

La terza linea di produzione viene gestita nella cabina elettrica BT/MT Linea 3. Anche qui è presente un quadro con sbarre in media tensione a 11 kV, 30BFB10GH001, alimentato direttamente dal generatore di Linea 3,

da cui alimenta il trasformatore 30ATA10GH001 11/136 kV per lo scambio con la rete, ed il trasformatore TR-E 11/6,3 kV per l'autoconsumo, che a regime ha una potenza richiesta di 4÷4,5 MVA

3.2. Scenari d'emergenza di partenza

Prima del progetto *Interventi di miglioramento della rete di distribuzione elettrica del Termovalorizzatore di Parona* la logica permetteva, in caso di guasto sul montante ad alta tensione, che le linee andassero in isola.

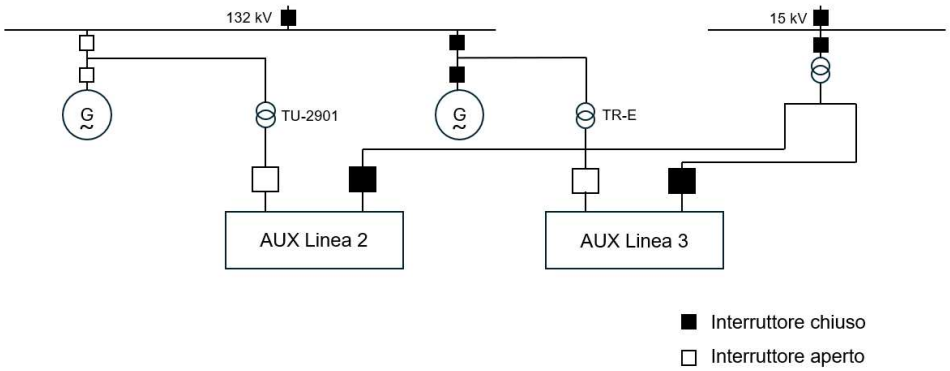
In caso di fallimento dell'isola, la connessione alla rete E-distribuzione a 15 kV come ultimo scenario di emergenza.

Un impianto è in isola quando opera indipendentemente dalla rete elettrica principale e continua ad alimentare il carico locale anche in caso di interruzione della rete pubblica. Questa può fallire quando la caldaia è a massimo carico perché deve repentinamente diminuire la potenza erogata, che nel caso della seconda linea di produzione del Termovalorizzatore di Parona passa da circa 23 MVA a circa 4 MVA per autoconsumo. Questo è possibile grazie alle valvole di immissione di vapore alla turbina accoppiata col generatore che strozzano il passaggio del fluido riducendo i giri della turbina stessa.

Di seguito elencanti gli scenari di configurazione della distribuzione elettrica nello stabilimento industriale di Parona:

- SCENARIO A

  connessione al montante 132 kV



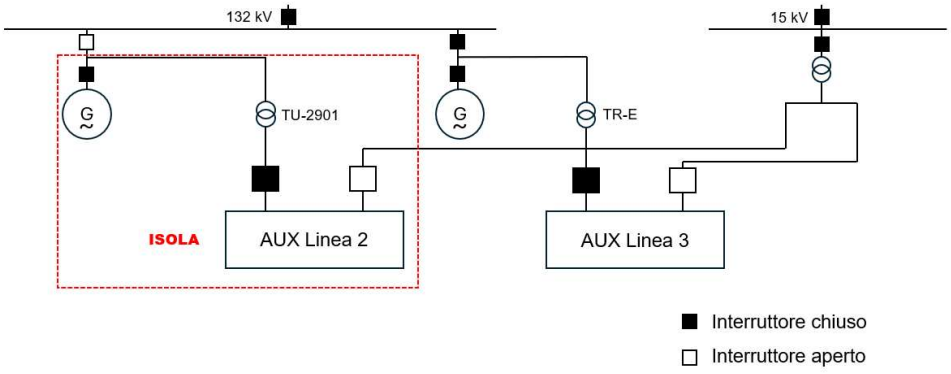
Schema a blocchi 1

Questo è l'assetto in normale esercizio, con entrambi i generatori che alimentano l'impianto e la potenza elettrica eccedente generata viene ceduta alla rete elettrica nazionale.

- SCENARIO B

  guasto al montante 132 kV di Linea 2

  (Linea 2 in isola / Linea 3 connessa al montante 132 kV)



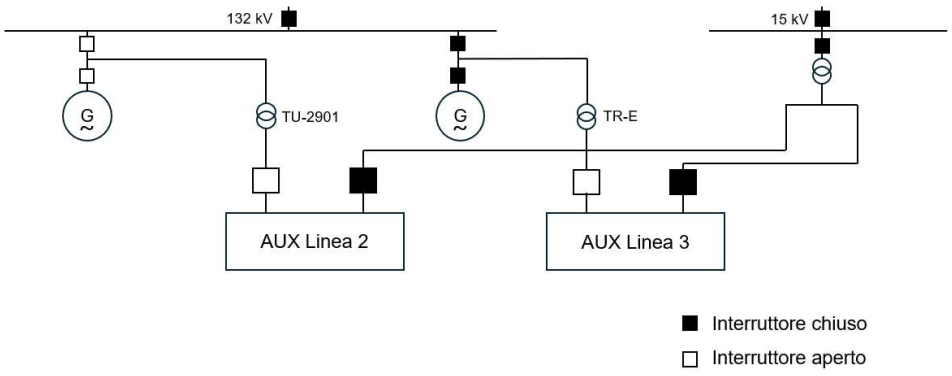
Schema a blocchi 2

Lo schema a blocchi illustra come l'impianto elettrico si assetta in caso di guasto sullo stallo ad alta tensione di Linea 2: il generatore della seconda

Linea di produzione continua ad alimentare i suoi servizi andando in isola, mentre la Linea 3 rimane nell'assetto mostrato nel scenario A.

- SCENARIO B1

  guasto al montante 132 kV di Linea 2 e fallimento isola
  (Linea 2 connessa al montante 15 kV / Linea 3 connessa al montante 132 kV)



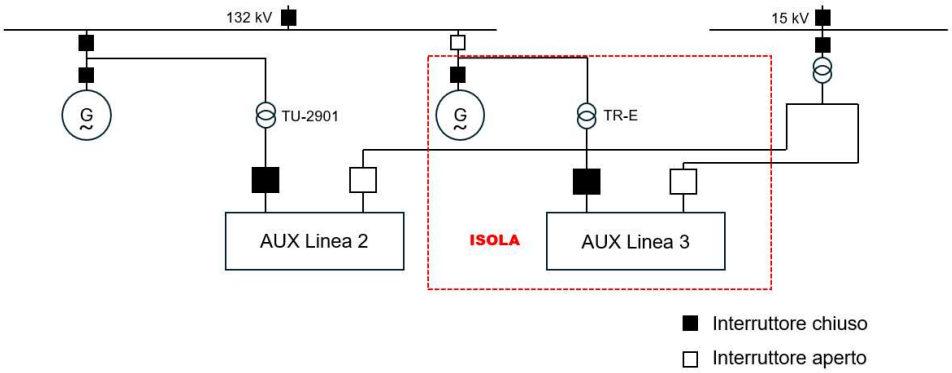
Schema a blocchi 3

Con il fallimento dell'isola, richiesta in assenza di connessione in alta tensione, la potenza elettrica necessaria agli ausiliari dalla seconda Linea di termovalorrizzazione viene fornita dalla dorsale di emergenza con montante a 15 kV.

- SCENARIO C

  guasto al montante 132 kV di Linea 3

  (Linea 3 in isola / Linea 2 connessa al montante 132 kV)



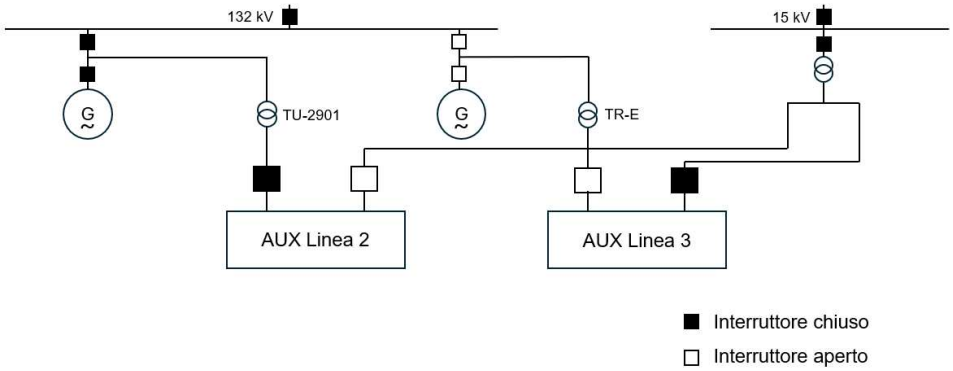
Schema a blocchi 4

Stesso scenario mostrato nel caso B, ma con isola da parte della Linea 3. Il generatore non immette più energia in rete ma riesce ad autoalimentare i propri servizi.

- SCENARIO C1

  guasto al montante 132 kV di Linea 3 e fallimento isola

  (Linea 3 connessa al montante 15 kV/ Linea 2 connessa al montante 132 kV)



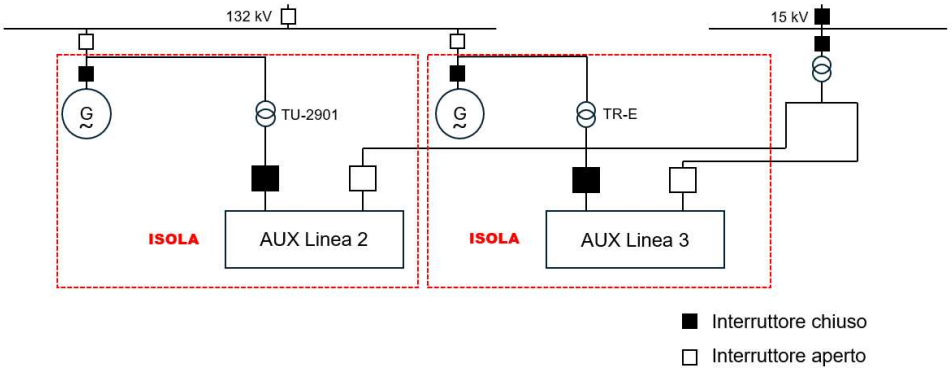
Schema a blocchi 5

Nel caso in cui non fosse possibile l'isola dell'impianto 3, richiesto dal guasto sul montante ad alta tensione, la rete di emergenza alimenta gli ausiliari della porzione di sito alimentato dallo stesso.

- SCENARIO D

  guasto al montante comune 132 kV

  (Linea 2 in isola / Linea 3 in isola



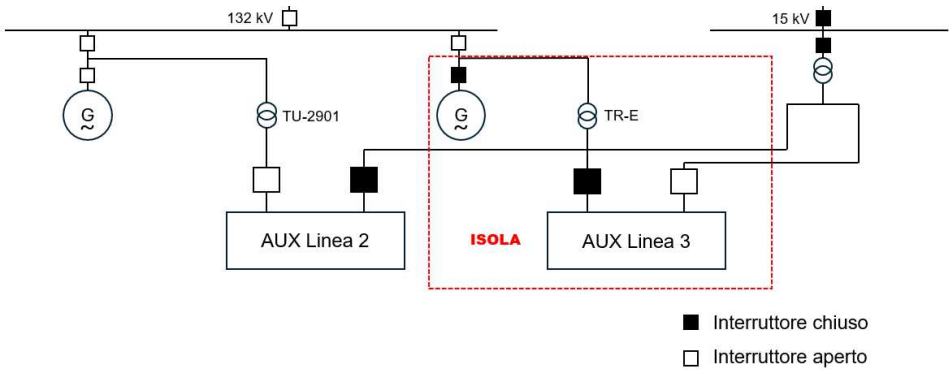
Schema a blocchi 6

In caso di guasto sul montante comune di alta tensione oppure sulla rete Terna le protezioni dello stallo di connessione sganciano evitando la propagazione del guasto in tutto l'impianto di Parona. Il primo livello di emergenza che adotta il termovalorizzatore è quello di passare entrambe le Linee in isola.

- SCENARIO D1

  guasto al montante comune 132 kV e fallimento isola Linea 2

  (Linea 2 connessa al montante 15 kV / Linea 3 in isola)

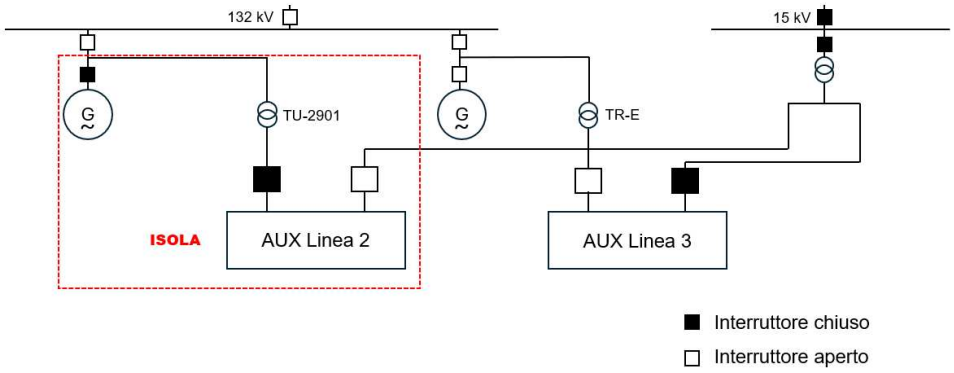


Schema a blocchi 7

- SCENARIO D2

  guasto al montante comune 132 kV e fallimento isola Linea 3

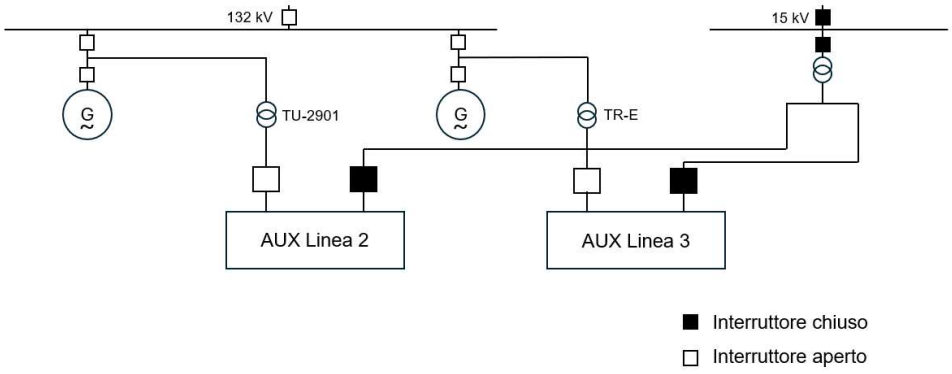
  (Linea 2 in isola / Linea 3 connessa al montante 15 kV)



Schema a blocchi 8

- SCENARIO D3

  guasto al montante comune 132 kV e fallimento isola Linea 2 e Linea 3 (Linea 2 e Linea 3 connessa al montante 15 kV, con priorità Linea 3)



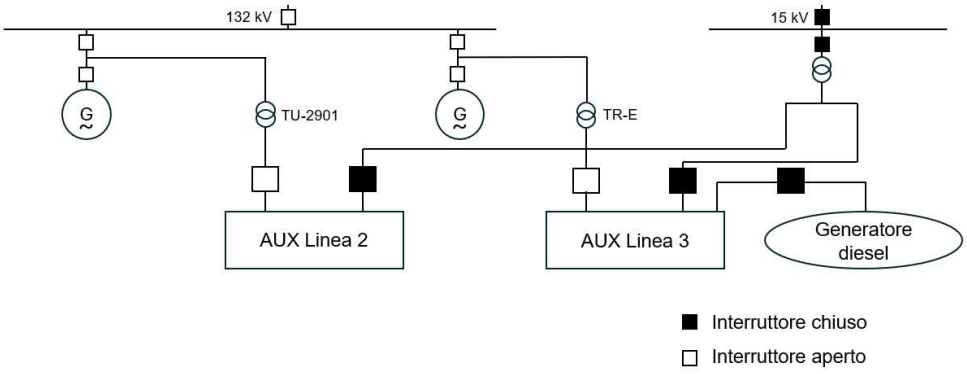
Schema a blocchi 9

Gli schemi a blocchi 7 e 8 mostrano come si riassetta l'impianto in caso una delle due Linee non reagisce positivamente alla richiesta di passaggio in isola; la Linea che non supporta l'assetto apre l'interruttore per essere energizzata dalla rete a 15 kV.

Nel caso entrambe le Linee abbiano bisogno della rete di soccorso lo stallo MT approvvigiona potenza per l'intero impianto, sapendo però che la connessione d'emergenza permette il consumo fino ad un massimo di 6,8 MW non abbastanza per il normale esercizio, ma sufficiente per lo spegnimento di una caldaia in sicurezza (secondo la logica di distaccamenti carichi, la Linea 3 ha priorità nel continuare la marcia).

- SCENARIO Z

  guasto al montante comune 132 kV, fallimento isola Linea 2 e Linea 3, guasto al montante comune 15 kV
  (blocco Linea 2 ed intervento turbogeneratore di Linea 3 per spegnere la caldaia ed i suoi servizi in sicurezza)



Schema a blocchi 10

La Linea 3 è provvista di generatore diesel di emergenza ed è l'extrema ratio da utilizzare in caso tutti gli scenari descritti precedentemente non siano attuabili. Tale generatore ha il solo scopo di "accompagnare" l'impianto numero 3 allo spegnimento, senza recare nessun danno alle strutture meccaniche ed ai dispositivi elettrici dello stesso.

3.3. Impianto in isola

Negli scenari descritti è stata spesso citata la configurazione "in isola": un impianto, qualunque sia il combustibile che lo alimenta, può andare in isola quando ha la capacità di distaccarsi dalla rete nazionale e generare energia per l'autosostentamento.

A seguito di un guasto o di manutenzione programmata sul montante di connessione alla rete pubblica la turbina a vapore passa in assetto in isola aprendo l'interruttore di parallelo con la rete e la potenza erogata dal

generatore si deve adattare tempestivamente alla richiesta di potenza dell'impianto, sicuramente minore rispetto a quando si è connessi alla rete. Il Termovalorizzatore è configurato in maniera tale che sia permesso l'assetto in isola per entrambe e Linee di produzione.

Diminuendo il carico del generatore, la turbina tende ad accelerare aumentando anche la frequenza interna di rete. Quindi le valvole di regolazione che regolano il flusso di vapore in turbina devono rapidamente diminuire la portata in ingresso per far sì che la frequenza rimanga intorno ai 50 Hz, aiutandosi con anche la valvola di by-pass, che permette la fuori uscita del vapore in eccesso. Durante l'esercizio dell'impianto cambiano i carichi totali ed il sistema di automazione regola le valvole facendo una regolazione in frequenza con l'obiettivo di mantenerla stabile; durante la connessione in rete, invece la regolazione viene fatta sulla potenza attiva od sul cosφ.

4. Interventi di miglioramenti del sistema elettrico

Lo scopo del progetto *Interventi di miglioramento del sistema elettrico del Termovalorizzatore di Parona* è quello di migliorare l'affidabilità, la sicurezza e l'efficienza della rete elettrica aziendale, con un'integrazione avanzata di sistemi di automazione e supervisione. Questo avverrà tramite aggiornamenti, installazioni e sostituzioni mirate.

Gli interventi principali sono:

- Raddoppio del montante a 15 kV di connessione alla rete E-distribuzione con la posa di un trasformatore 15/6,3 kV di nuova fornitura, per garantire l'alimentazione in caso di guasto su interruttori, sezionatori o sul trasformatore TU-902;
- Creare due nuovi scenari di emergenza che permettano, in caso di guasto su entrambi i montanti di connessione alla rete pubblica, l'alimentazione degli ausiliari di Linea 2 da Linea 3 e viceversa.

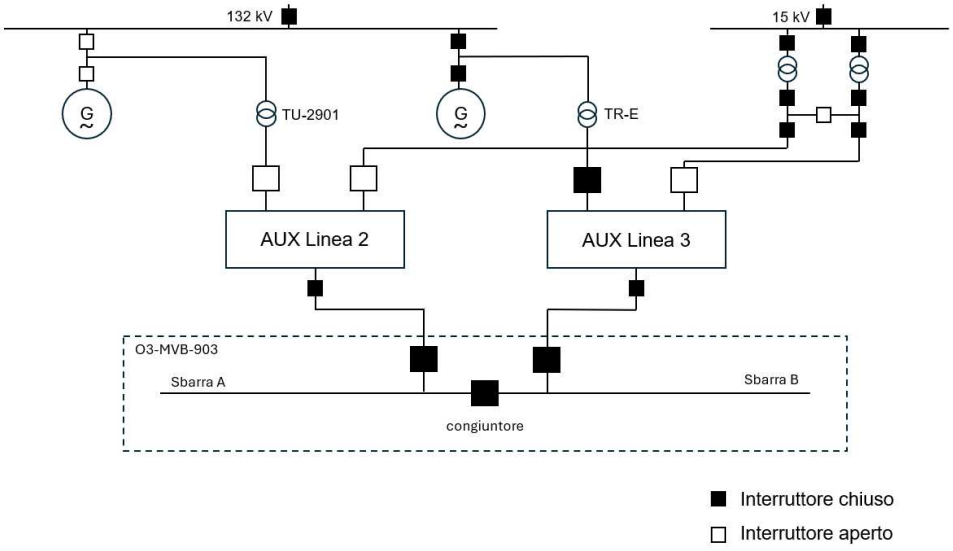
4.1. Nuovi scenari di emergenza

Il quadro di nuova fornitura 03-MVB-903 con la chiusura del congiuntore permette l'alimentazione di una linea di produzione grazie all'energia elettrica generata dall'altra, un ulteriore assetto di emergenza che aumenta la capacità di di sopportare così si sono aggiunti due nuovi scenari di emergenza a quelli descritti nel capitolo 3.2.

- SCENARIO E1

  guasto al montante132 kV di Linea 2, fallimento isola e guasto al montante 15 kV

  (Linea 3 connessa al montante 132 kV / Linea 2 alimentata da Linea 3 con la chiusura del congiuntore del quadro 03-MVB-903)



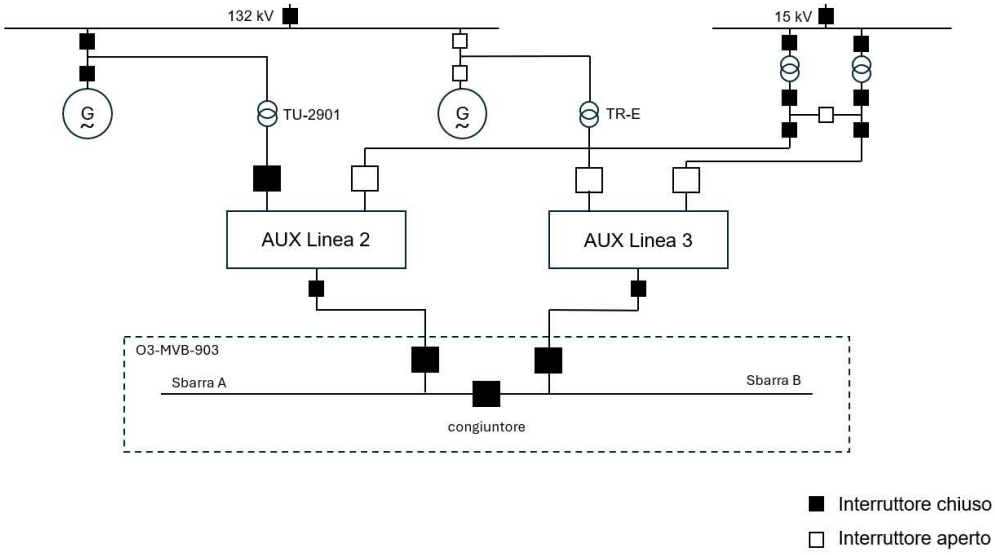
Schema a blocchi 11

Nel caso in cui nessuna delle possibilità di alimentazione è possibile per la seconda Linea, connessione in alta tensione, in media tensione ed autoalimentazione, la terza Linea è in grado di fornire energia ai servizi della Linea 2.

- SCENARIO E2

  guasto al montante132 kV di Linea 3 e guasto al montante 15 kV

  (Linea 2 connessa al montante 132 kV / Linea 3 alimentata da Linea 2 con la chiusura del congiuntore del quadro 03-MVB-903)



Schema a blocchi 12

In questo caso è il generatore di Linea 2 che alimenta la terza Linea di produzione.

4.2. Luoghi oggetto della realizzazione

Per la realizzazione del nuovo sistema, si andranno ad effettuare delle modifiche nelle sottostazioni elettriche che sono necessarie per la produzione, trasformazione e distribuzione di energia elettrica all'interno del Termovalorizzatore di Parona.

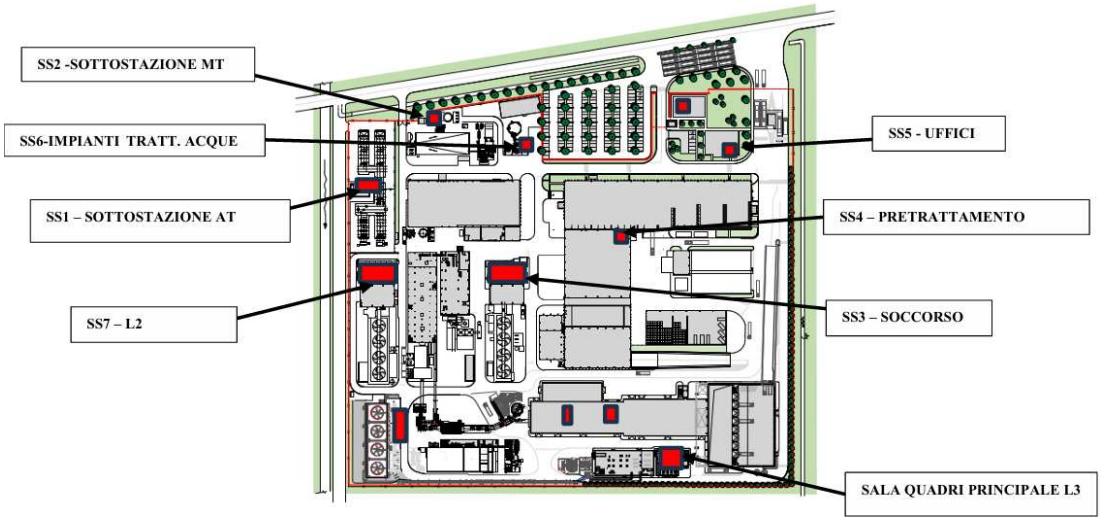


Immagine 7 – Cabine elettriche Termovalorizzatore di Parona

4.2.1. Sottostazione SS2

La sottostazione SS2 è la cabina elettrica dedicata al prelievo di potenza dalla rete a 15 kV.

Qui sarà dismesso l'esistente quadro, ormai obsoleto, e sostituito dal nuovo QMT 02-MVS-902 (*Immagine 8*) comprensivo di sistema di protezione generale SPG d'utenza conforme a CEI 0-16 e di tre nuove celle interruttore, di cui due dedicate all'alimentazione dei trasformatori 15/6,3 kV, TU-902 (esistente) e TU-901 (di nuova fornitura), ed il terzo dedicato all'alimentazione del nuovo trasformatore TR-001 15/0,4 kV per l'alimentazione dell'elettropompa antincendio, oltre che delle pompe ed i servizi ausiliari delle vasche e le utenze dedicate al trattamento delle acque.

4.2.2. Sottostazione SS3

La sottostazione SS3 è la cabina elettrica una volta interessata della produzione di Linea 1, oggi dismessa, e che con il nuovo assetto sarà lo snodo principale per l'alimentazione in emergenza sia di Linea 2 che di Linea 3.

Qui saranno dismessi tutti i quadri ed i cassetti BT dedicati all'esercizio di Linea 1, sarà soggetto di revamping il quadro MT 03-MVB-901 (*Immagine 9*), quadro per la gestione della rete di soccorso derivata dal montante a 15 kV, che avrà le quattro celle interruttori dedicate all'arrivo della tensione secondaria dei trasformatori TU-901 e TU-902 e le partenze delle linee di emergenza delle due linee di produzione.

Sarà posato e messo in esercizio il nuovo quadro MT 03-MVB-903 dove saranno presenti le nuove partenze in media tensione per di alcuni servizi di stabilimento, i nuovi interruttori di protezione degli inverter delle pompe alimento e permetterà l'ulteriore configurazione di emergenza per l'alimentazione dei servizi ausiliari di Linea 2 da Linea 3 e viceversa.

Sarà infine installato un quadro di bassa tensione per gli sviluppi futuri.

4.2.3. Sottostazione SS7

La sottostazione SS7 è la cabina elettrica interessata della produzione di Linea 2.

Qui sarà aggiunta una nuova colonna al quadro già esistente 07-MVB-2901 dove sarà installato il nuovo interruttore per l'alimentazione della sbarra A del quadro 03-MVB-903 in sottostazione SS3.

4.2.4. Sottostazione MT/BT Linea 3

La sottostazione MT/BT Linea 3 è la cabina elettrica interessata della produzione di Linea 3.

Qui si utilizzerà un interruttore spare del quadro già esistente 30BFB10GS001 da cui partirà l'alimentazione della sbarra B del quadro 03-MVB-903 in sottostazione SS3.

4.3. Nuove forniture

Per la realizzazione del nuovo lay-out sono stati forniti nuovi quadri e trasformatori le cui caratteristiche tecniche sono descritte nei prossimi sottocapitoli.

4.3.1. Quadro MT 02-MVS-902

Il quadro elettrico QMT 6kV 02-MVS-902 è un quadro di media tensione di tipo Blindato (Metal Clad) progettato per essere installato nella cabina SS2.
Questo è il quadro di interfaccia con la rete a 15 kV E-distribuzione, utilizzata nell'impianto di Parona come rete di soccorso.
Il quadro è dimensionato per una tensione nominale di 24 kV a 50 Hz ed una tensione di esercizio pari a 15 kV.
È costituito da 4 scomparti:

- Colonna 1 – protezione generale arrivo 15kV e misure di sbarra;
- Colonna 2 – alimentazione e protezione TU-901;
- Colonna 3 – alimentazione e protezione TU-902;
- Colonna 4 – alimentazione e protezione TR-001.



Immagine 8 – Fronte quadro 02-MVS-902

Questo armadio va a sostituire un quadro esistente che permetteva l'alimentazione del TU-902.
È stato necessario sostituirlo per raggiungere un obiettivo dell'intero progetto, cioè raddoppiare il montante della rete di soccorso.
Inoltre è stato aggiunto il TR-001 15/0,4 kV, descritto successivamente, per l'alimentazione dell'elettropompa antincendio ed i servizi della cabina antincendio.

4.3.2. Quadro MT 03-MVB-903

Il quadro elettrico QMT 6kV 03-MVB-903 è un quadro di media tensione di tipo Blindato progettato per essere installato nella cabina SS3.
Il quadro è dimensionato per una tensione nominale di 12 kV a 50 Hz ed una tensione di esercizio pari a 6300 V.

È formato da due sbarre che sono alimentate indipendentemente dalla sottostazione SS7 (cabina dedicata a Linea 2) e dalla sottostazione BT/MT Linea 3 (cabina dedicata a Linea 3), che in normale esercizio sono divise da un congiuntore in posizione aperta.

È costituito da 13 scomparti:

- Scomparto A01 – protezione TR-901;
- Scomparto A02 – riserva;
- Scomparto A03 – arrivo linea (Linea 2);
- Scomparto A04 – protezione TR-902C;
- Scomparto A05 – VFD inverter pompa alimento A;
- Scomparto A06 – misure di sbarra A;
- Scomparto A07 – congiuntore;
- Scomparto A08 – VFD inverter pompa alimento B;
- Scomparto A09 – misure di sbarra B;
- Scomparto A10 – protezione TR-902A;
- Scomparto A11 – arrivo linea (Linea 3);
- Scomparto A12 – riserva;
- Scomparto A13 – protezione TR-902B.



Immagine 9 – Fronte quadro 03-MVB-903

Questo quadro è fondamentale per raggiungere uno degli scopi principali del progetto: alimentare in caso di necessita Linea 2 da Linea 3 e viceversa.

Per esempio, in caso mancasse alimentazione all'impianto dedicato alla seconda linea di termovalorizzazione, da entrambi i montanti a cui è connesso, grazie alla chiusura del congiuntore tra le due sbarre è possibile alimentare l'intero quadro. Lo scomparto A03 con interruttore dedicato nel normale esercizio all'arrivo di tensione e corrente derivata da Linea 2, grazie alla sua configurazione bidirezionale, ha la capacità di trasferire potenza anche nel verso opposto; a questo punto i servizi di Linea 2 sono alimentati da Linea 3 tramite il quadro (*schema a blocchi 11 Scenario E1*).

4.3.3. Trasformatori TU-901 e TR-001

I trasformatori TU-901 e TR-001 sono dei trasformatori trifase isolati in olio minerale, progettati per l'installazione all'esterno.
Le loro configurazioni prevedono due avvolgimenti con un variatore della tensione a vuoto, garantendo affidabilità ed efficienza nel sistema elettrico in cui sono inserito.
Hanno una frequenza nominale di 50 Hz e sono progettati per essere alimentati all'avvolgimento primario con una tensione pari a 15 kV, con collegamento a triangolo senza neutro. La tensione nominale al secondario è 6,3 kV per il TU-901 e 400 V per il TR-901, con collegamento a stella.
I trasformatori permettono la ventilazione forzata. Nella tabella seguente è indicata la potenza nominale delle due apparecchiature in base alla ventilazione dell'aria:

Trasformatore	Ventilazione	Potenza nominale	
TU-901	ONAN	5000	kVA
	ONAF	6000	kVA
TR-901	ONAN	630	kVA
	ONAF	800	kVA

Tabella 3: potenza nominale trasformatori di nuova fornitura

Inoltre, i trasformatori sono completi di accessori per il controllo e la sicurezza dell'apparecchiatura:

- Relè di Buchholz;
- Termometri con contatti di allarme e sgancio;
- Conservatore olio con valvola di scarico e indicatore di livello;
- Ventilazione forzata con quadro di comando;
- Valvola di sovrapressione con contatto di allarme.

4.4. Tempistiche

Il progetto è stato approvato ed assegnato ad una società appaltatrice nel febbraio 2022. Dopo sopralluoghi e revisioni operative della realizzazione i lavori sono iniziati nell'ottobre 2023 e termineranno nel 2026, con l'installazione di due nuovi inverter per l'azionamento elettrico delle pompe alimento del ciclo termico della caldaia. Quest'ultima attività è stata aggiunta a lavori in corso ma è stata inserita nello stesso progetto di lavoro.

I lunghi tempi di realizzazione sono dati da diversi fattori. È importante evidenziare che le attività descritte avvengono all'interno di uno stabilimento a ciclo continuo che opera 24h/giorno e 365 giorni/anno; molte attività, in particolare la sostituzione ed il revamping dei quadri di distribuzione, devono essere svolte durante i fermi impianto, circa 60 giorni/anno, per garantire l'operatività della caldaia quando è in produzione. Altre attività sono soggette ad eventi atmosferici, come la posa dei cavi di potenza e segnale nei cavidotti sotterranei. Inoltre, va considerato che le attività si sommano a quelle di manutenzione ordinaria, straordinaria e su guasto che si svolgono nel perimetro e che, per garantire la massima sicurezza, non devono creare interferenze di lavoro.

4.5. Criticità

Lo scenario E2 (*capitolo 4.1*) non è attualmente realizzabile in quanto il trasformatore TU-2901 ha una potenza nominale di 6 MVA, con ventilazione forzata, e la sommatoria delle potenze richieste dal normale esercizio delle due linee di produzione è di 7÷8 MVA.

È previsto, come futuro investimento, la sostituzione del trasformatore di unità con uno con potenza maggiore, posando un trasformatore uguale al

TR-E di Linea 3 di 8/10 MVA e che quindi possa fornire la potenza richiesta.

Inoltre, all'interno dello stesso progetto è stato inserita anche l'attività di fornitura, posa e messa in servizio di n° 2 nuovi inverter per l'azionamento elettrico dei motori delle pompe alimento, "cuore" del ciclo termico di Linea 2. Attualmente i motori hanno un funzionamento in DOL (Direct-On-Line): il motore viene collegato direttamente alla rete elettrica senza dispositivi di limitazione della corrente di spunto.

Con avviamento diretto il motore assorbe fino a 7 volte la corrente nominale causando stress alle tubature meccaniche a valle della pompa, oltre che allo stesso motore ed ai suoi componenti meccanici.

5. Coordinamento della attività

Il team di Coordinamento di Manutenzione Elettrostrumentale.è responsabile della gestione, la pianificazione e la supervisione delle attività di manutenzione preventive, straordinarie e su guasto riguardanti gli impianti elettrici, strumentali e di automazione. Inoltre, redige elaborati tecnici, gestisce le risorse interne, i rapporti con le risorse esterne ed è responsabile della sicurezza di tutte le attività manutentive elettrostrumentali che si svolgono all'interno del perimetro.

Durante il mio tirocinio presso l'impianto ho fatto parte del reparto appena descritto ed uno dei compiti da me svolti è stato quello di seguire in prima persona le attività all'interno del progetto "*Interventi di miglioramento del sistema elettrico del Termovalorizzatore di Parona"* assicurandomi che fossero svolte in sicurezza, in conformità con le principali normative di riferimento, quali:

- D.Lgs. 81/2008 – Testo Unico sulla Sicurezza sul Lavoro

  È la normativa principale in materia di tutela della salute e la sicurezza sui luoghi di lavoro che favorisce la prevenzione e la responsabilizzazione di tutti i soggetti coinvolti nel sistema aziendale di sicurezza; definisce ruoli e responsabilità di tutte le figure coinvolte: datore di lavoro, dirigenti, preposti, lavoratori e medico competente. Regola strumenti fondamentali come il documento di valutazione dei rischi (DVR), la formazione obbligatoria del personale (PAV, PES, PEI) e l'adozione di misure di prevenzione e protezione adeguate.
  All'interno della normativa viene dato rilievo all'utilizzo di dispositivi di protezione individuale (DPI), alla sorveglianza sanitaria, alla gestione delle emergenze ed alla segnaletica di sicurezza.

- CEI 11-27 – Lavori su impianti elettrici

È il principale riferimento tecnico-normativo per la sicurezza dei lavori sugli impianti elettrici, elaborato dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). Stabilisce le regole di sicurezza da seguire durante i lavori elettrici, sia sotto che fuori tensione.

La normativa è applicata a tutti i lavori elettrici, sia nuove installazioni che revamping, definendo tutte le fasi operative che ogni attività deve rispettare: pianificazione del lavoro, verifica dell'impianto, messa in sicurezza, controllo e conferma di assenza tensione ed esecuzione dell'intervento.

Regola in modo preciso le figure professionali che possono svolgere lavori elettrici: PAV (persona che ha ricevuto una formazione adeguata sui rischi elettrici e può operare sotto la supervisione di una PES), PES (tecnico con conoscenze e competenze approfondite nel settore elettrico, in grado di valutare i rischi e lavorare in autonomia) e PEI (lavoratore qualificato che ha seguito corsi specifici e dimostrato la capacità di intervenire in sicurezza su parti in tensione, oltre ad avere le competenze per effettuare manovre su infrastrutture in alta tensione).

Inoltre, per ogni attività svolta indica i DPI necessari quali guanti isolanti, visiere, tappeti isolati ed altri.

Altre normative fondamentali per i lavori elettrici fanno riferimento alla progettazione, ai materiali e dispositivi da utilizzare ed alla documentazione necessaria:

- Norma CEI 64-8 – Impianti elettrici utilizzatori a bassa tensione

Questa norma è fondamentale per garantire che gli impianti elettrici siano sicuri, affidabili e conformi alle leggi vigenti, quindi il principale riferimento tecnico per la progettazione ed installazione degli impianti elettrici utilizzatori a bassa tensione, cioè fino a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua.

Stabilisce in maniera completa le regole da seguire durante la realizzazione di un impianto, definendo criteri di protezione contro i contatti diretti e indiretti, la messa a terra, la scelta dei conduttori, la protezione dai sovraccarichi e dai cortocircuiti e la verifica finale dell'impianto.

All'interno della norma vengono anche indicate le caratteristiche dei componenti elettrici e i metodi di posa dei cavi, affinché l'impianto risulti sicuro per le persone e per i carichi.

la Norma CEI 64-8 assicura che un impianto elettrico sia costruito "a regola d'arte", come richiesto dal D.M. 37/2008, sotto descritto, e rappresenta una garanzia di sicurezza del''impianto.

- D.M. 37/2008 – Norme per la sicurezza degli impianti

Il decreto è la principale normativa italiana circa la progettazione, realizzazione e manutenzione degli impianti non solo elettrici.

L'obiettivo dell'ordinanza è fare in modo che tutti gli impianti siano costruiti "a regola d'arte", cioè confermi a tutte le leggi vigenti e sicuri per le persone.

Il D.M. introduce l'obbligo alla dichiarazione di conformità che deve essere rilasciata dall'impresa installatrice al termine dei lavori, certificando che l'impianto è stato eseguito secondo le normative tecniche, garantendo la sicurezza e la funzionalità dell'impianto stesso.

Tale certificato, e quindi il lavoro stesso, può essere rilasciato solo da imprese abilitate. Infine, in caso di malfunzionamenti o incidenti definisce le responsabilità dell'Appaltatore e della Committente.

5.1. Attività di coordinamento

Essendo il progetto sviluppato e descritto in questa tesi molto complesso, sono state tante e di tipologia molto differente tra loro le attività svolte per il buon completamento del revamping dell'impianto.

Il compito a me assegnato durante la mia intership è stato quello di coordinare le attività operative con i diversi reparti del Termovalorizzatore, in particolare con il reparto di Esercizio con il fine di garantire che le lavorazioni in corso non generassero disservizi o interferenze con il normale funzionamento della linea di produzione.
Mi sono inoltre occupato di gestire i rapporti con la società Appaltatrice, assicurandomi che venissero rispettati i tempi e i costi previsti dal progetto, senza mai compromettere gli standard di sicurezza, che rappresentano sempre l'aspetto prioritario.
Infine, attraverso la redazione di report tecnici e documenti di avanzamento lavori, ho mantenuto un costante rapporto di confronto e collaborazione con il team di ingegneria progettista del sistema, al fine di garantire che le attività svolte rispettassero gli standard qualitativi richiesti e fossero pienamente conformi alle specifiche tecniche di progetto.

5.2. Attività in campo

Nel corso dell'attività di revamping del sistema elettrico dell'impianto, uno degli interventi principali ha riguardato la sostituzione del quadro MT nella sottostazione SS2 (capitolo 4.2.1.) direttamente alimentato da E-distribuzione. Questa fase ha rappresentato un'operazione particolarmente delicata poiché coinvolgeva uno dei punti di consegna dell'energia elettrica all'impianto. Tutte le operazioni di smontaggio e installazione sono state pianificate in stretta collaborazione con E- distribuzione e con il reparto di Esercizio, prevedendo finestre temporali precise per l'interruzione della fornitura e assicurando un costante coordinamento con la sala controllo. Prima della rimessa in tensione sono state effettuate le prove di isolamento, le verifiche di continuità del circuito di terra e il collaudo funzionale delle apparecchiature, al fine di garantire il corretto funzionamento e la conformità alle specifiche tecniche.

L’intervento ha previsto la posa di nuovi cavi di media e bassa tensione, necessari per collegare i nuovi quadri elettrici alle utenze, al nuovo trasformatore e alle sottostazioni interne. In alcuni tratti i cavi hanno raggiunto lunghezze fino a quattrocento metri, attraversando pozzetti, cavedi e canalizzazioni interrate, circostanza che ha reso le operazioni particolarmente impegnative dal punto di vista tecnico e logistico oltre che dover svolgere attività in spazi confinati. Durante queste fasi sono stati adottati rigorosi criteri di sicurezza e sono stati impiegati dispositivi di protezione individuale adeguati, tra cui elmetti isolanti, tappeti dielettrici, scarpe antinfortunistiche con suola isolante, maschere antipolvere, giubbotti ad alta visibilità; durante gli interventi all’interno di spazi confinati sono state monitorate costantemente le condizioni operative come la presenza di gas combustibili, gas tossici e la percentuale di ossigeno all’interno di tali spazi, con l’aggiunta di DPI appositi quali le imbracature e DPI per recupero di persone.

Le attività di movimentazione e di posa dei cavi sono state eseguite ponendo attenzione alla protezione meccanica dei conduttori, all’utilizzo di rulli di guida e al rispetto dei raggi minimi di curvatura indicati dai produttori. Terminata la posa, si è proceduto alla sigillatura dei pozzetti, all’etichettatura dei cavi e all’esecuzione delle misure di isolamento e continuità mediante megger, per verificare la corretta posa e l’integrità dei collegamenti.

Un’altra area di intervento significativa ha riguardato la sottostazione SS3, dove sono stati sostituiti due quadri elettrici e sottoposto a revamping un terzo (capitolo 4.2.2.). Oltre all’implementazione di un quadro di media e uno di bassa tensione ex novo, le operazioni di revamping sul quadro esistente hanno comportato la rimozione dei componenti obsoleti, quali interruttori, relè e strumenti di misura, e l’installazione di apparecchiature di nuova generazione compatibili con i sistemi di supervisione e telecontrollo dell’impianto

Ogni fase è stata preceduta da riunioni di coordinamento e da valutazioni dei rischi specifici, in modo da pianificare correttamente le manovre e ridurre al minimo le interferenze con le normali attività operative. Particolare attenzione è stata posta alla messa fuori tensione e al blocco delle linee interessate dai lavori, alla delimitazione delle aree di intervento con barriere, nastro e segnaletica di sicurezza, nonché all'utilizzo di strumenti e dispositivi certificati.

Tutte le manovre elettriche per la messa in sicurezza sono state eseguite da personale A2A Ambiente qualificato PES, io compreso, in costante comunicazione con la sala controllo, che autorizzava ogni manovra.

6. Tarature delle protezioni

Nell'ambito della progettazione della nuova architettura della rete di distribuzione dell'impianto, le tarature rappresentano un passaggio cruciale per garantire l'affidabilità e la precisione delle misurazioni, ricordando che si trattano di quadri per garantire l'esercizio in situazioni di emergenza.

Per valutare come definire e tarare le protezioni degli interruttori di media tensione nei quadri di nuova fornitura si devono considerare diverse variabili: la portata dei cavi, le correnti di spunto delle macchine, l'eventualità di guasti a terra e la necessità di tutelare i componenti stessi del sistema. L'obiettivo generale consiste nel garantire selettività e affidabilità, pur evitando interventi che possano sottrarre energia a sezioni non coinvolte da eventuali guasti. È importante porre l'attenzione sulle soglie di protezione e sui tempi di intervento, dal momento che un solo errore di impostazione può sfociare in un fermo impianto o in un danneggiamento di trasformatori e motori che richiederebbero costosi interventi di manutenzione o sostituzione.

Per redigere le tarature da impostare sono stati analizzati i percorsi dei cavi, la loro lunghezza, le temperature di esercizio, i coefficienti di simultaneità e i possibili punti di cortocircuito, confrontandoli con la letteratura tecnica e con le normative applicabili.

6.1. Quadro 03-MVB-901

Ogni sistema di protezione progettato per la media tensione richiede un esame molto attento delle condizioni operative, così come delle condizioni di guasto. A maggior ragione se ci si riferisce ad un'infrastruttura adibita alle emergenze, nella quale l'energia deve essere fornita quando la rete principale non è in grado di sostenere i carichi previsti.

L’esistenza del quadro 03-MVB-901, soggetto a revamping nell’ambito del progetto *Interventi di miglioramento del sistema elettrico del Termovalorizzatore di Parona* che riceve il proprio ingresso dal montante in media tensione a 15 kV, nasce proprio per garantire un piano di riserva all’impianto. Al suo interno, sono presenti quattro celle con relativi interruttori: due riguardano le connessioni ai trasformatori TU-901 e TU-902, mentre le altre due sono le partenze per l’alimentazione in emergenza di Linea 2 e Linea 3.

Quando una linea di emergenza entra in servizio, si ritrova a gestire carichi significativi ed a subire eventuali sbalzi di corrente. Inoltre, in caso l’impianto incorresse in cortocircuiti o guasti a terra, se questi non sono correttamente identificati e isolati, potrebbero danneggiare parte o l’intero sistema.

L’ingegneria di A2A Ambiente, in coordinamento con l’organo di manutenzione elettrostrumentale del Termovalorizzatore di Parona, ha definito le tarature da impostare in base alle condizioni di funzionamento reali.

Sono diversi i riferimenti normativi che governano il dimensionamento delle protezioni come la CEI EN 60909-0, che si applica per calcolare le correnti di cortocircuito e la CEI 11-17, la linea guida per i criteri di posa e portata dei cavi. Oltre a tali normative, si tiene conto delle informazioni specifiche sui dispositivi di protezione, fornite dalle case costruttrici, che consentono di tarare con precisione le funzioni.

Nel caso degli scomparti relativi alle alimentazioni a 15 kV, l’esame dei dati dell’impianto dimostra come la corrente nominale che ci si aspetta sulle linee di emergenza si differenzia tra i due rami, influenzando così la soglia di intervento termico. Chi esegue la taratura non si limita alla corrente nominale, ma verifica anche il possibile contributo di cortocircuito, confrontando il potere di interruzione dell’interruttore installato. In altre parole, se si stima che un guasto possa generare correnti

di parecchi kA, l'interruttore deve essere in grado di interromperle senza subire danni, quindi le tarature 50 (istantaneo) e 51 (tempo inverso) vanno impostate in maniera coerente.

Si deve considerare che i valori di corrente di avviamento di eventuali motori industriali, sapendo che un avviamento a pieno carico può produrre correnti di spunto elevate, non devono innescare uno sgancio dell'interruttore; è necessario dimensionare i componenti sapendo che un valore troppo basso di soglia di intervento istantaneo può portare a scatti non desiderati, ma un valore troppo alto potrebbe consentire un passaggio di corrente di guasto ingiustificatamente lungo.

Anche la protezione di terra presenta aspetti fondamentali; in determinati scenari, una fase a terra potrebbe generare correnti limitate, ragione per cui è essenziale una sensibilità adeguata nella protezione omopolare (51N o 67N).

Un altro aspetto centrale, specialmente in un quadro di emergenza come il 03-MVB-901, consiste nel coordinamento con i trasformatori TU-901 e TU-902. Queste unità trasformano la tensione primaria, immettendo nella rete di stabilimento la potenza necessaria. Se le protezioni delle celle di partenza per le Linee di produzione non è selettiva rispetto alla protezione posta a monte sui trasformatori, si rischia di perdere l'intera alimentazione. Il principio di selettività suggerisce di impostare le soglie e i tempi del relé di linea in modo che sia questo a intervenire per primo in caso di guasto localizzato nella tratta a valle, lasciando ai dispositivi sul trasformatore il ruolo di protezione di secondo livello. Questo approccio, in un impianto dove la continuità di esercizio rappresenta una priorità, riduce la probabilità di blackout di estese porzioni dell'impianto.

6.2. Tarature celle alimentazione a 15kV

Come già indicato precedentemente il quadro 03-MVB-901, con sbarre alimentate dal trasformatore TU-901 o TU-902, custodiscono gli interruttori delle partenze delle due linee di produzione all'interno.

Di seguito, si evidenziano in maniera estesa i criteri utilizzati per la selezione delle soglie, riflettendo sulla configurazione scelta e sulle ragioni tecniche che ne stanno alla base.

Per l'identificazione delle protezioni è stato utilizzato lo standard ANSI C37.2 sviluppato dall'*American National Standards Institute* in collaborazione con l'*Institute of Electrical and Electronics Engineers* che stabilisce un sistema unificato per identificare i dispositivi elettrici di potenza in base alle loro funzioni, in particolare nei circuiti di protezione.

6.2.1. Protezione 51

Ogni linea può incontrare situazioni di sovraccarico, ovvero quando la linea di produzione gestisce un carico superiore a quello usuale. L'obiettivo della protezione 51 è di salvaguardare i cavi e le apparecchiature da correnti che eccedano la capacità termica per un tempo eccessivo.

Nel caso dello scomparto a servizio di Linea 2 la corrente di taratura è impostata su 504 A, mentre sullo scomparto per Linea 3 il valore scelto è pari a 300 A. Questa differenza riflette il fatto che le due linee gestiscono quantità di potenza non equivalenti e che, di conseguenza, i cavi sono dimensionati in modo diverso.

Per impostare questa taratura è stata valutata la portata termica dei conduttori (Iz) e imposta la soglia leggermente al di sotto del valore di capacità di corrente, cosicché non si verifichino surriscaldamenti a lungo termine. Il margine di sicurezza serve a compensare le fluttuazioni di

temperatura ambiente, gli eventuali fattori di declassamento o l'accumulo di cavi in canaline sovraffollate.

Tale protezione non interviene immediatamente appena la corrente supera la soglia selezionata: il relé calcola un tempo d'integrazione che consente di ignorare picchi momentanei. La curva scelta può essere più o meno inclinata, adattandosi alle esigenze dell'impianto. In altri termini, una corrente di sovraccarico elevata provocherà l'intervento dopo un tempo più breve rispetto a una corrente di poco superiore alla soglia, in modo proporzionale a quanto stabilito dalla curva. Il pregio di questa logica a tempo dipendente è che si ottiene una protezione progressiva: lo scatto è più rapido quando la corrente è considerevolmente fuori range, mentre appare tollerante per superamenti modesti.

6.2.2. Protezione 50

Oltre al sovraccarico, va considerato lo scenario in cui compaia un cortocircuito franco, con correnti potenzialmente centinaia di volte la nominale.

Qui entra in gioco la protezione 50, a sgancio istantaneo, che comanda l'apertura immediata dell'interruttore di linea. L'ingegneria di A2A Ambiente ha analizzato il livello di cortocircuito massimo atteso, derivante dalla potenza di trasformatori e generatori, nonché dalla resistenza e reattanza dei cavi.

Per progettare le impostazioni dei relé sono stati presi in esame scenari di cortocircuito trifase e di fase-terra in vari punti della rete, considerando la reattanza e resistenza dei cavi, dei trasformatori e di ogni motore di potenza elevata presente in impianto. È stata quindi determinata la massima corrente di guasto (Ik max) a monte ed a valle di ogni quadro di nuova fornitura; nel caso del quadro 03-MVB-901 è stata stimata una Ik

max pari a 4,92 kA e sono stati di conseguenza scelti degli interruttori con potere di interruzione idoneo, cioè 16 kA.

Nel contesto dello scomparto dell'interruttore di alimentazione in emergenza di Linea 3, la soglia della protezione 50 è situata a 660 A, una corrente che oltrepassi tale valore viene interpretata come un segnale di guasto, ed il relé istruisce l'interruttore a sganciarsi quasi all'istante. Tuttavia il valore scelto risulta notevolmente al di sotto di possibili correnti di guasto massime, così da garantire l'intervento in caso di guasto reale.

Per la partenza di Linea 2, invece, la regolazione prescelta è di circa 480 A.

La protezione 50 è indispensabile per limitare i danni. Se un cortocircuito trifase si protraesse anche solo per alcune decine di millisecondi in più del dovuto, le forze elettrodinamiche e l'energia termica sviluppate sarebbero tali da compromettere isolamenti, giunzioni ed apparati.

6.2.3. Protezione 51N

Nelle reti in media tensione può essere complesso individuare un guasto a terra. Se il è isolato o compensato, la corrente di guasto a terra potrebbe essere notevolmente ridotta, un aspetto che rischia di ingannare una protezione tarata soltanto per guasti di fase-fase o trifase. Qui diventa importante la rilevazione della corrente omopolare tramite protezione 51N (sovracorrente di terra a tempo dipendente), la corrente che scorre attraverso il neutro soltanto in caso di guasto in un sistema trifase

Nel caso di Linea 2, è stata impostata una taratura pari a 2,5 A. Quindi se il relé rileva una componente omopolare di intensità superiore, interpretando l'evento come un potenziale guasto a terra, attiva l'apertura dell'interruttore in un tempo contenuto.

Per la Linea di produzione 3, la soglia riportata è di circa 18 A, un valore molto più elevato, perché la linea presenta correnti capacitive e perdite fisiologiche più alte.

6.2.4. Coordinamento delle protezioni

La logica prevede che, se si verifica un guasto su una linea dedicata ad una specifica utenza, sia la protezione di linea ad intervenire, e non quella del trasformatore a monte. La protezione del trasformatore deve sganciare in un secondo momento, nel caso fallisse la protezione di linea.

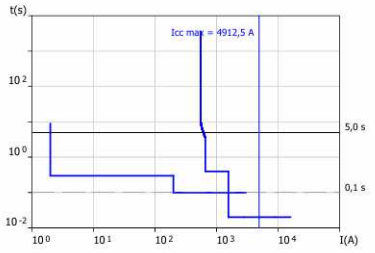
Quando la linea di emergenza deve operare, in caso di guasto sul montante a 132 kV dell'impianto ed a seguito del fallimento dello stato di isola di una o entrambe le linee di produzione, i trasformatori TU-901 e TU-902 passano da riserva calda ad apparecchiature sotto carico. In questa eventualità, i flussi di corrente possono variare in modo considerevole e la protezione deve tollerare i picchi di avviamento senza sganciare accidentalmente. È particolarmente importante il dimensionamento della protezione 50 in modo che non sganci quando gli interruttori nelle celle di partenza alimentazione passano sotto carico.

Per definire la soglia corretta, sono stati eseguiti test e misure di corrente di spunto, verificando con i sistemi di misura i valori di partenza effettivi. Non sono emersi spunti tali da superare i 660 A per la Linea 3 e 480 A, per la Linea 2, motivo per la quale sono stati impostati tali valori.

Se il carico di esercizio genera correnti superiori alle nominali, l'intervento istantaneo non scatta, lasciando spazio, in caso di sovraccarico prolungato, alla protezione temporizzata. Questa "gerarchia" di funzionamento (prima la 50, se la corrente è elevatissima, poi la 51, se la corrente è superiore alla nominale ma non abbastanza da richiedere uno sgancio immediato) assicura una protezione dinamica e selettiva.

Nell'impianto di Parona sono stati installati relé digitali (descritti nel *capitolo 7.1*) che salvano in memoria l'andamento istantaneo della corrente nel caso di guasto, consentendo al reparto di manutenzione elettrostrumentale di analizzare lo storico e capire quale sia stata la problematica. Tali funzioni di registrazione rappresentano un vantaggio enorme in termini di diagnostica, perché permettono di identificare guasti intermittenti, problemi di installazione o deterioramento.

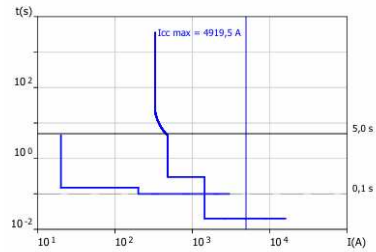
Utenza:	**SC.2**	
Zona - Quadro:	CABINA SS3	03-MVB-901/902
Denominazione 1:	PARTENZA QMT1	
Denominazione 2:	EMERGENZA LINEA 3	
Costruttore - Sigla:	ABB	H 12-16kA
Poli - Corrente nominale IN:	3	1250
Costruttore - Sigla sganciatore:	THYTRONIC	NA30
Ith [A]:	504	
Im [A]:	660	
Ist [A]:	1560	



Regolazione correnti		Minima	Massima	Regolazione tempi		Minima	Massima
Corrente Is [A]:	**600**	1	10000				
LR (Ir = x Is):	**0,84**	0,1	20	LR (tr) [s]:	**0,14**	0,02	60
CR (Im = x Is):	**1,1**	0,1	40	CR [s]:	**0,4**	0,03	10
IST (Ist = x Is):	**2,6**	0,1	40	IST [s]:	**0,02**	0,02	10
T (T = x In0):	**0,02**	0,002	2	T [s]:	**0,3**	0,04	200
T2 (T = x In0):	**2**			T2 [s]:	**0,1**		
Corrente In0 [A]:	**100**						

Immagine 10 – Tabella tarature protezione cella di partenza di emergenza Linea 3

Utenza:	**SC.11**	
Zona - Quadro:	CABINA SS3	03-MVB-901/902
Denominazione 1:	PARTENZA 07-MVB-2901	
Denominazione 2:	EMERGENZA LINEA 2	
Costruttore - Sigla:	ABB	H 12-16kA
Poli - Corrente nominale IN:	3	1250
Costruttore - Sigla sganciatore:	THYTRONIC	NA30
Ith [A]:	300	
Im [A]:	480	
Ist [A]:	1440	



Regolazione correnti		Minima	Massima	Regolazione tempi		Minima	Massima
Corrente Is [A]:	**600**	1	10000				
LR (Ir = x Is):	**0,5**	0,1	20	LR (tr) [s]:	**0,3**	0,02	60
CR (Im = x Is):	**0,8**	0,1	40	CR [s]:	**0,3**	0,03	10
IST (Ist = x Is):	**2,4**	0,1	40	IST [s]:	**0,02**	0,02	10
T (T = x In0):	**0,2**	0,002	2	T [s]:	**0,15**	0,04	200
T2 (T = x In0):	**2**			T2 [s]:	**0,1**		
Corrente In0 [A]:	**100**						

Immagine 11 – Tabella tarature protezione cella di partenza di emergenza Linea 2

	Monte:	Valle:
Utenza:	SC.4	SC.2
Zona:	CABINA SS3	CABINA SS3
Quadro:	03-MVB-901/902	03-MVB-901/902
Tensione nominale utenza:	6300 V	6300 V
Sigla protezione:	NA30	NA30
Tipo protezione:	50-51-51N	50-51-51N
Corrente nominale:	600 A	600 A
Sgancio magnetico:	690 A	660 A
Sgancio a: 5 s / 0,1 s:	690 A / 1800 A	612,4 A / 1560 A
Icc minima:	3112 A	
Tempo di intervento:	0,02 s	0,02 s
Rapporto tra magnetiche:	1,05	
Selettività:	Parziale a corto circuito	
Selettività amperometrica:	1800 A	
Selettività cronometrica:	n.d.	

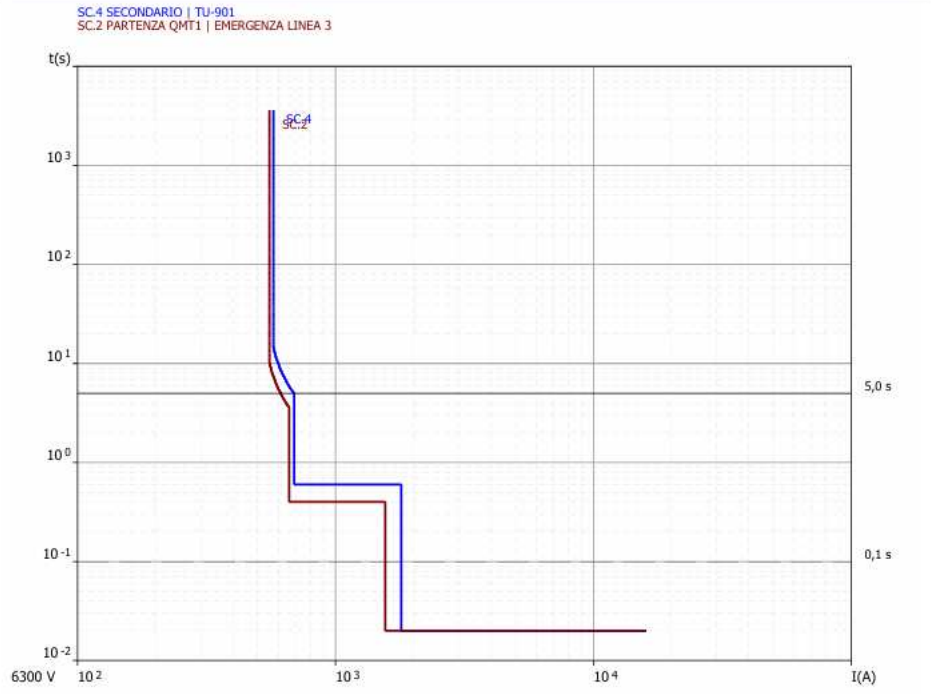


Immagine 12 – Tabella verifica selettività tra protezioni cella di partenza di emergenza Linea 3 e cella di protezione trasformatore TU-901 a monte

6.2.5. Possibili modifiche

L'impianto di termovalorizzazione di Parona è sempre alla ricerca di migliorie da effettuare all'interno dello stabilimento con l'obiettivo di alzare il livello di affidabilità, sicurezza ed efficienza, come dimostra il progetto oggetto del presente lavoro.

In futuro potrebbero esserci modifiche strutturali sulla linea di emergenza come, per esempio, la sostituzione dei trasformatori TU-902 (attivo dal

2006) oppure per l'implementazione di un nuovo generatore diesel per Linea 2 (Linea 3 è già munita di questa ulteriore sicurezza).

Nel caso si procedesse con le suddette verifiche, si dovrà intervenire per dimensionare e ritarare tutti i relè di protezione della linea di alimentazione in soccorso.

Se, per esempio, la potenza disponibile a monte crescesse, di conseguenza aumenterebbero le correnti di cortocircuito; in questo caso si valuterà se l'interruttore di linea e le tarature correnti siano ancora adatte. Qualora il potere di interruzione risulti insufficiente, bisognerà procedere ad un upgrade del dispositivo, altrimenti esiste il rischio che, in caso di guasto, la scarica non possa essere arrestata efficacemente.

Quanto discusso in questo capitolo sottolinea l'importanza del coordinamento tra i livelli di protezione. Se le protezioni degli interruttori presenti nel quadro 03-MVB-901 scattano prima delle protezioni dei trasformatori TU-901 e TU-902, si salvaguarda la rete di emergenza per tutto il resto dell'impianto, riducendo l'entità dell'eventuale danno. Se le protezioni 50 descritte sono regolate a 660 A e 480 A rispettivamente, vuol dire che i picchi di avvio normali ne restano al di sotto, mentre un cortocircuito franco li supererebbe ampiamente, facendo intervenire la protezione in modo pressoché immediato. Le soglie di 51 (504 A e 300 A) forniscono una protezione contro sovraccarichi prolungati, mentre le soglie per correnti omopolari (2,5 A e 18 A) assicurano la reazione alle dispersioni a terra.

La valutazione di queste impostazioni di protezione ha rappresentato una sfida per tutto il team di manutenzione elettrostrumentale, che ha ricercato ed ottenuto un equilibrio tra interventi rapidi e tolleranza ai transitori.

Ogni volta che avviene una modifica a livello di potenza o di schema di esercizio, queste soglie potrebbero essere riviste, è quindi essenziale disporre di un archivio e di relazioni tecniche che descrivano la logica delle impostazioni così da poter comprendere in futuro le scelte effettuate,

valutare gli eventuali cambiamenti di scenario, e intervenire in maniera mirata.

Le scelte di taratura sono state individuate sapendo che l'obiettivo è quello di proteggere l'infrastruttura e garantire continuità di esercizio, sapendo che si tratta di architetture dedicate a linee che devono mantenere attive le produzioni o i servizi di sicurezza in caso di emergenza.

7. Dimensionamento cavi

All'interno del progetto descritto in questo elaborato di tesi, il dimensionamento dei cavi di media tensione riveste un ruolo fondamentale nell'intera realizzazione.

La mia intership, quindi il coinvolgimento nel progetto descritto, è iniziata dopo l'effettivo inizio delle opere per l'installazione della nuova architettura. Questo non mi ha permesso di essere parte coinvolta per il dimensionamento dei cavi di potenza, però mi ha reso partecipe per la stesura dei progetti futuri collegati a questa prima fase di progetto; il presente capitolo analizza in dettaglio il dimensionamento dei cavi di potenza che sono stati posati per l'alimentazione degli inverter per l'azionamento elettrico delle pompe alimento della Linea 2, che rientra nelle implementazioni future ancora in fase di progettazione, descritte meglio nel *capitolo 9*.

Gli inverter saranno alimentati dal quadro 03-MVB-903 in sottostazione SS3 dagli scomparti A05 e A08, come indicato nel *capitolo 4.3.2;* la scelta non è casuale in quanto il quadro è stato progettato anche per l'alimentazione di Linea 2 da Linea 3 e quindi in caso di blackout della seconda Linea sarà possibile fermare le macchine in sicurezza.

Sono state indicate per l'alimentazione di potenza la posa di tre cavi unipolari con sezione pari a 95mm² (3x(1x95)), anima in alluminio, con disposizione a trifoglio in tubo interrato del tipo ARG7H1R 12/20 kV, per ogni cella per alimentazione inverter. La tipologia di cavo scelta permette l'esercizio ad una temperatura massima di 85°C e la resistenza fino alla temperatura di 250°C in caso ci cortocircuito.

Inoltre, il conduttore è rivestito di isolante EPR, nastro isolante autoagglomerante a base di gomma etilen-propilenica, contraddistinto da un'ottima resistenza alle abrasioni ed all'umidità.

Per valutare che il dimensionamento sia corretto, deve essere verificato che le condizioni dei seguenti aspetti, rientrino entro i valori concessi dalle norme in ambito di progettazione, installazione e manutenzione di impianti elettrici di media tensione:

1) Protezione da sovraccarico
2) Temperature di esercizio
3) Caduta di tensione

7.1. Protezione da sovraccarico

La norma CEI 64-8/3 indica che i circuiti di un impianto devono prevedere dispositivi di protezione che interrompano correnti di sovraccarico prima che queste possano provocare un riscaldamento eccessivo con il conseguente danneggiamento dell'isolante del cavo del circuito.
Per far sì che questo non accada deve essere rispettata la disequazione:

$$Ib \leq In \leq Iz$$

Dove Ib rappresenta la corrente di impiego, nel caso descritto pari a 64,8 A.
In è pari a 100 A ed è la corrente nominale del dispositivo di protezione, ovvero la corrente massima per la quale il relè di protezione non interviene.
Iz è la corrente a regime permanente ammissibile del cavo prima del declassamento dei materiali che lo compongono, pari a 202,5 A.
Andando ad inserire i valori reali di impianto nella disequazione, si evince che la condizione è verificata:

$$64{,}8\ A \leq 100\ A \leq 202{,}5\ A$$

7.2. Temperature di esercizio

La temperatura raggiunta dal cavo durante il suo esercizio non deve raggiungere la temperatura massima ammissibile dal cavo stesso:

$$T(Ib) < Tk\ max$$
$$T(In) < Tk\ max$$
$$Tk\ \text{max} = 85°$$

Nel caso del cavo di potenza per l'alimentazione dell'inverter, descritto in questo capitolo, la temperatura raggiunta dal cavo quando attraversato dalla corrente di impiego $Ib = 64{,}8\ A$ è $T(Ib) = 27{,}2°C$, mentre se attraversato dalla corrente nominale del relè di protezione $In = 100\ A$, la temperatura del cavo sarà pari a $T(In) = 37{,}1°C$ (nel caso la temperatura ambiente sia $Tamb = 20°C$.

7.3. Caduta di tensione

La caduta di tensione sui cavi di media tensione è regolata da diverse normative e standard, a seconda del paese e del contesto specifico. In Europa, una delle normative più rilevanti è la Normativa CEI 11-17 (in Italia), che stabilisce i criteri per la progettazione, l'installazione e la manutenzione degli impianti elettrici in media tensione.
Per calcolare la caduta di tensione su una linea si utilizzata la seguente formula:

$$cdt(Ib) = max\left[\sum_{i=1}^{k}(Zfi \times Ifi) - (Zni \times Ini)\right]_{f=R,S,T}$$

dove i rappresenta le k utenze coinvolte, n il conduttore di neutro e f le tre fasi R, S e T.

Di seguito viene riportato il calcolo della caduta di tensione con l'utilizzo della formula semplificata:

$$cdt(Ib) = k_{cdt} \times I_b \times L \times Z(cos\theta) \times \frac{100}{V_n}$$

si può procedere con il calcolo sapendo che per le correnti trifase alternate il coefficiente $k_{cdt} = \sqrt{3}$ e che per il caso analizzato l'impedenza, sapendo che il fattore di potenza è $cos\theta = 0{,}88$ e che la sezione del cavo è pari a $S = 95mm^2$, è uguale a $Z(cos\theta) = 0{,}0039\,{}^{\Omega}/_{m}$.

Inserendo i valori nella formula semplificata:

$$\sqrt{3} \times 64{,}8 \times 190 \times 0{,}0039 \times \frac{100}{6300} = 1{,}32\%$$

Il valore ottenuto attesta che la caduta di tensione del cavo è minore del 5%, valore massimo consentito dalle normative vigenti.

Identificazione

Sigla utenza:	**+CABINA SS3.03-MVB-903-52-3A**
Denominazione 1:	PARTENZA INVERTER POMPA
Denominazione 2:	ALIMENTO LINEA 2 MP-2301A
Informazioni aggiuntive/Note 1:	
Informazioni aggiuntive/Note 2:	

Utenza

Tipologia utenza:	**Distribuzione generica**		
Potenza nominale:	**622,2 kW**	Sistema distribuzione:	**Media**
Coefficiente:	**1**	Collegamento fasi:	**3F**
Potenza dimensionamento:	**622,2 kW**	Frequenza ingresso:	**50 Hz**
Potenza reattiva:	**335,8 kVAR**	Pot. trasferita a monte:	**707,1 kVA**
Corrente di impiego Ib:	**64,8 A**	Potenza totale:	**1091 kVA**
Fattore di potenza:	**0,88**	Potenza disponibile:	**384,1 kVA**
Tensione nominale:	**6300 V**		

Cavi

Formazione:	**3x(1x95)**		
Tipo posa:	N - Cavi unipolari in tubo interrato (trifoglio)		
Disposizione posa:			
Designazione cavo	ARG7H1R 12/20 kV		
Isolante (fase+neutro+PE):	**EPR**	Coefficiente di declassamento totale:	**0,82**
Tabella posa:	**CEI 11-17 (Media)**	K^2S^2 conduttore fase:	**7,639E+07 A^2s**
Materiale conduttore:	**ALLUMINIO**	Caduta di tensione parziale a Ib:	**0,118 %**
Lunghezza linea:	**190 m**	Caduta di tensione totale a Ib:	**1,32 %**
Corrente ammissibile Iz:	**202,5 A (Archivio)**	Temperatura ambiente:	**20 °C**
Corrente ammissibile neutro:	**n.d.**	Temperatura cavo a Ib:	**27,2 °C**
Coefficiente di prossimità:	**0,82 (Numero circuiti: 1)**	Temperatura cavo a In:	**37,1 °C**
Coefficiente di temperatura:	**1**	Coordinamento Ib<=In<=Iz:	**64,8<=100<=202,5 A**

Condizioni di guasto (CEI EN 60909-0)

Ikm max a monte:	**9,56 kA**	Ip2:	**18,5 kA**
Ikv max a valle:	**9,15 kA**	Ik2min:	**5,89 kA**
Imagmax (magnetica massima):	**5504 A**	Ik1ftmax:	**6,47 kA**
Ik max:	**7,75 kA**	Ip1ft:	**17,4 kA**
Ip:	**21,3 kA**	Ik1ftmin:	**5,5 kA**
Ik min:	**6,81 kA**	Zk min:	**516,2 mohm**
Ik2ftmax:	**8,63 kA**	Zk max:	**534 mohm**
Ip2ft:	**23,7 kA**	Zk1ftmin:	**618 mohm**
Ik2ftmin:	**7,44 kA**	Zk1ftmax:	**660,9 mohm**
Ik2max:	**6,7 kA**		

Protezione

Costruttore protezione:	**ABB**		
Sigla protezione:	**VD4/P 12-25kA + REF 620 DT**		
Tipo protezione:	**50-51-51N (S: OFF)**		
Corrente nominale protez.:	**630 A**	Taratura differenziale:	**5 A**
Numero poli:	**3**	Potere di interruzione PdI:	**25 kA**
Taratura termica:	**100 A**	PdI >= I max in ctocto a monte:	**25 >= 9,56 kA**
Taratura magnetica:	**500 A**	Norma:	**CEI 17-1**
Sg. magnetico < I mag. massima:	**500 < 5504 A**		

Immagine 13 – Dimensionamento cavi di alimentazione pompe alimento

8. Automazione

La gestione della rete di distribuzione elettrica nel termovalorizzatore di Parona avviene tramite il DCS (Distributed Control System), sistema fondamentale per garantire l'efficienza operativa, la sicurezza e la stabilità dell'impianto.

Il DCS è un sistema automatizzato che consente di monitorare e controllare i vari processi industriali in tempo reale, inclusi quelli relativi alla distribuzione e gestione dell'energia elettrica, grazie ai continui dati e segnali che riceve dai dispositivi installati sulle apparecchiature in campo.

Nell'ambito dell'impianto di Parona, dove l'energia prodotta dalla combustione dei rifiuti viene trasformata in energia elettrica, la rete di distribuzione è responsabile di fornire e regolare l'energia verso le utenze interne dell'impianto e verso la rete elettrica nazionale.

Il sistema DCS raccoglie dati in tempo reale da una rete di sensori distribuiti lungo tutta la rete elettrica dell'impianto, come misuratori di tensione, corrente, potenza, frequenza e temperatura. Questi parametri vengono costantemente monitorati e inviati al centro di controllo, dove gli operatori possono visualizzare attraverso un'interfaccia grafica centralizzata lo stato di tutte le apparecchiature e le linee elettriche.

L'automazione del sistema DCS consente di rilevare immediatamente eventuali anomalie o guasti, come cortocircuiti, sovraccarichi o fluttuazioni di tensione, e di attuare interventi correttivi in tempo reale, minimizzando il rischio di danni alle apparecchiature e interruzioni di servizio.

La gestione automatizzata delle commutazioni tra i vari scenari di emergenza elencati nella tesi e l'attivazione di protezioni e allarmi sono operazioni fondamentali per mantenere alta l'affidabilità del sistema. In caso di guasti o sovraccarichi, il DCS può isolare automaticamente la

sezione interessata, evitando danni più estesi e ripristinando rapidamente la normale operatività.
Inoltre, il sistema fornisce agli addetti alla manutenzione una visione a lungo termine attraverso l'archiviazione storica dei dati, utile per le analisi predittive e le manutenzioni programmate. I dati raccolti vengono utilizzati per analizzare il comportamento della rete elettrica nel tempo, individuare tendenze e ottimizzare la gestione dell'impianto, riducendo i costi operativi e aumentando l'efficienza energetica.
Grazie a questo sistema automatico l'impianto può operare in modo sicuro, affidabile e altamente performante, ottimizzando la produzione energetica e riducendo al minimo i rischi di disservizi o danni.

8.1. Relè di protezione e comunicazione

Nelle celle di media tensione di nuova fornitura per la realizzazione delle migliorie oggetto di tesi, sono installati i relè di protezione REF615 e REF620 di marca ABB. Essi appartengono alla famiglia dei dispositivi di protezione avanzata per sistemi elettrici in media tensione e sono progettati per garantire la sicurezza e l'affidabilità della rete elettrica, fornendo, oltre alle funzionalità di protezione, la possibilità di monitoraggio e comunicazione.
Il REF615 è un relè di protezione compatto, progettato per la protezione di linee e sbarre di media tensione. Fornisce una protezione completa come la massima corrente (protezione 50 e 51 nello standard IEEE C37.2), guasto a terra (50N e 51N), sovratensione (59) e sottotensione (27).
Il relè REF620 è un relè di protezione più avanzato rispetto al REF615, progettato specificamente per la protezione di trasformatori e linee con maggiore complessità operativa. Oltre alle protezioni garantite dal REF615 include funzione di massima corrente differenziale (87T), sovratemperatura (49) e squilibrio di corrente.

Entrambi i dispositivi monitorano in tempo reale tensioni correnti e potenza e supportano protocolli standard di comunicazione quali Modbus, DNP3 ed IEC 61850; quest'ultimo utilizzato per le comunicazioni tra relè nell'impianto di termovalorizzazione di Parona.
I relè descritti sono strumenti che garantistico elevati standard di sicurezza ed indispensabili per garantire l'efficienza e l'affidabilità dell'intera rete elettrica di stabilimento

9. Implementazioni future

La realizzazione dei nuovi quadri di media e bassa tensione non è stata concepita esclusivamente per migliorare il comportamento della rete in condizioni di emergenza, ma rappresenta un progetto strategico volto allo sviluppo futuro dell'infrastruttura elettrica. L'impianto è in continua evoluzione e la pianificazione delle espansioni future ha un ruolo fondamentale per garantire adattabilità alle esigenze che si presenteranno nell'avvenire.

Come già descritto precedentemente, nei quadri di nuova fornitura sono presenti celle spare, previsti da subito in fase di progettazione. Queste sonostate dimensionate sia dal punto di vista termico sia dal punto di vista elettrodinamico per integrare nuovi carichi senza modifiche che potrebbero essere impattanti.

La principale implementazione futura prevista riguarda la posa e messa in servizio di n° 2 nuovi inverter per l'azionamento elettrico dei motori delle pompe alimento, "cuore" del ciclo termico di Linea 2. Attualmente i motori hanno un funzionamento in DOL (Direct-On-Line): il motore viene collegato direttamente alla rete elettrica senza dispositivi di limitazione della corrente di spunto.

Con avviamento diretto il motore assorbe fino a 7 volte la corrente nominale causando stress alle tubature meccaniche a valle della pompa, oltre che allo stesso motore ed ai suoi componenti meccanici. Queste saranno alimentate dall'armadio 03-MVB-903 (capitolo 4.3.2).

Dallo stesso quadro di distribuzione partirà l'alimentazione di un nuovo trasformatore MT/BT (TR902C) destinato all'alimentazione di una linea di processo aggiuntiva con assorbimento stimato fino a 2 MW. Un incremento di potenza di queste dimensioni richiede un'attenta gestione dei flussi energetici e della selettività delle protezioni, per evitare che eventuali guasti locali si propaghino all'intera rete. La predisposizione

delle celle di media tensione consente il collegamento del nuovo trasformatore mantenendo invariata la filosofia a doppia alimentazione, preservando i criteri di ridondanza e garantendo la continuità del servizio anche in condizioni di non normale esercizio.

Parallelamente all'espansione produttiva, il progetto consente la possibilità di integrare impianti fotovoltaici attualmente in fase di studio. L'integrazione di una nuova generazione di energia elettrica introdurrà nuove dinamiche di esercizio; questo si tradurrà in un nuovo calcolo delle correnti di guasto e una modifica nel coordinamento delle protezioni. La struttura della rete è stata quindi concepita per accogliere tali evoluzioni senza compromettere la sicurezza e l'affidabilità complessiva dell'impianto.

L'eventuale realizzazione dell'impianto fotovoltaico consentirebbe di ridurre l'autoconsumo interno e di migliorare l'efficienza energetica del sito.

La possibilità di integrare nuovi carichi ed eventuali nuove generazioni distribuite aiuterà in futuro a non dover compiere modifiche sostanziali alle infrastrutture garantendo una maggiore adattabilità alle evoluzioni tecnologiche e normative.

Il progetto *Interventi di miglioramento della rete di distribuzione elettrica del Termovalorizzatore di Parona* non è quindi una soluzione statica per la rete di emergenza, ma parallelamente all'affidabilità del sistema permette lo sviluppo della rete di distribuzione stessa.

10. Conclusioni

L'analisi delle attività svolte nell'ambito del progetto *Interventi di miglioramento del sistema elettrico del Termovalorizzatore di Parona* ha evidenziato l'importanza di un sistema di distribuzione elettrica affidabile e sicuro, soprattutto in condizioni di emergenza. La necessità di garantire la continuità operativa di un impianto a ciclo continuo, riducendo al minimo il rischio di interruzioni, ha portato all'implementazione di diverse migliorie tecniche e strutturali nella rete di distribuzione elettrica.

Le modifiche apportate, tra cui l'installazione di nuovi quadri di media tensione, l'aggiornamento dei trasformatori e l'integrazione di nuovi dispositivi nel sistema DCS di supervisione, hanno permesso di incrementare l'efficienza e la sicurezza dell'infrastruttura elettrica. L'adozione di relè di protezione avanzati, quali REF615 e REF620, ha migliorato la selettività e la rapidità di intervento in caso di guasti, riducendo i tempi di ripristino e minimizzando l'impatto sulle operazioni dell'impianto.

È stato messo in luce come le normative vigenti delimitano il perimetro di azione per la progettazione, il dimensionamento, la messa in opera e la manutenzione degli impianti elettrici, per garantirne la sicurezza e non recare danni ad apparecchiature e soprattutto persone.

In conclusione, Gli organi di esercizio e di manutenzione in coordinamento all'interno del Termovalorizzatore di Parona sono sempre alla ricerca di nuove soluzioni e migliorie per rendere efficiente, sicuro ed affidabile ogni ciclo operativo di stabilimento e le soluzioni implementate rappresentano un passo significativo verso un impianto di termovalorizzazione più sicuro, efficiente e tecnologicamente avanzato. A dimostrazione di questo sono già state individuate le future implementazioni per fare un upgrade della rete di soccorso del Termovalorizzatore di Parona.