

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E
DELL'INFORMAZIONE «GUGLIELMO MARCONI» — DEI*

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA

in

Misure e Collaudo di Macchine e Impianti Elettrici

**SISTEMA AUTOMATICO PER LA LOCALIZZAZIONE DEI
GUASTI DELLA TRAZIONE ELETTRICA LUNGO LE
LINEE FERROVIARIE IN CORRENTE CONTINUA**

CANDIDATO
Lorenzo ZOCCHI

RELATORE:
Ing. Roberto TINARELLI

CORRELATORI
Paride DELUCCA
Claudio BALDO

Anno Accademico 2013/2014

Sessione III

INDICE

Prefazione	1
1. Impianti di Trazione Elettrica	3
1.1. Introduzione	3
1.2. Linee Primarie	5
1.3. Sottostazioni elettriche	6
2. Linea ferroviaria Ferrara-Ravenna	11
2.1. Introduzione	11
2.2. Impianti di Trazione Elettrica	11
2.3. Impianto della Sottostazione elettrica di Portomaggiore	15
3. Circuito a tensione 3kV in corrente continua	21
3.1. Linea di contatto	21
3.2. Circuito di ritorno – rotaia	24
3.3. Circuito di protezione	25
4. Localizzazione dei guasti sulla linea di contatto	27
4.1. Tipologie di guasto ricorrenti	27
4.2. Attuali procedure operative di localizzazione guasto	28
4.3. Guasti – Esempi di avvisi di avaria in RFI	31
5. Metodo proposto per individuare il guasto franco a terra lungo le linee ferroviarie	35
5.1. Aspetti teorici	35
5.2. Simulazioni	36
5.3. Analisi degli impianti esistenti	40
5.4. Circuito di prova a terra	41
5.5. Analisi dei circuiti di misura distanziometrica	44
5.5.1. Strumenti di misura in corrente continua	44
5.5.2. Prove in laboratorio e sul campo	47
5.5.3. Variazione del circuito di misura di prova	50
6. Prove sul campo	53
6.1. Parziali modifiche degli impianti in sottostazione	53
6.2. Svolgimento delle prove	55
6.2.1. Descrizione della procedura operativa	55
6.3. Condizioni di prova	58
6.4. Elaborazioni dati e misure	61
6.5. Risultati ottenuti	64
7. Conclusioni	71
Bibliografia	73
Ringraziamenti	75

Acronimi

AM	Agente della Manutenzione
AT	Alta Tensione
AV-AC	Alta Velocità - Alta Capacità
CA	Corrente Alternata
CC	Corrente Continua
Cdb	Circuiti di binario
DOTE	Dirigente Operazione Trazione Elettrica
Ldc	Linea di contatto
MT	Media Tensione
PCS	Posto Centrale Satellite
Pdc	Personale di condotta
RFI	Rete Ferroviaria Italiana
SAP	Sistema di gestione aziendale
SSE	Sotto Stazione Elettrica
TE	Trazione Elettrica
TLC-TD	Telecomunicazione trasporto dati

Prefazione

Migliorare le condizioni del trasporto ferroviario è uno degli obiettivi principali dell'azienda gestore della infrastruttura ferroviaria italiana, Rete ferroviaria Italiana (RFI S.p.A), azienda presso la quale il sottoscritto è impiegato.

L'Azienda si occupa della costruzione e manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria utilizzando tecnologie volte alla realizzazione di impianti con sempre maggiori standard di sicurezza ed affidabilità per la circolazione dei treni. È prioritario l'obiettivo di ridurre le problematiche d'impianto, causate da guasti alla infrastruttura ferroviaria che possono portare a una interruzione di pubblico servizio, tramite lo sviluppo di progetti e sistemi all'avanguardia di tipo predittivo e di tipo localizzativo finalizzati alla riduzione delle tempistiche di intervento in risoluzione del malfunzionamento dei sistemi.

Il presente elaborato di tesi è finalizzato a studiare una metodologia di localizzazione del guasto negli impianti della trazione elettrica, nello specifico, lungo la linea di contatto a 3 kV in corrente continua delle reti ferroviarie. Sono state sviluppate sia analisi teoriche che prove sperimentali in laboratorio e sul campo con l'obiettivo di una futura applicazione pratica di una metodologia di localizzazione del guasto. Sono stati utilizzati gli impianti esistenti, apportando solo limitate modifiche nelle sottostazioni elettriche che erogano energia alla linea di contatto della rete ferroviaria per la movimentazione dei treni.

Nel primo capitolo sono descritti, in maniera generale, gli impianti di Trazione Elettrica, con particolare riferimento alle linee primarie e alle sottostazioni elettriche.

Nel secondo capitolo si descrive la linea ferroviaria Ferrara-Ravenna e i suoi impianti di trazione elettrica e, con maggior dettaglio, la sottostazione elettrica di Portomaggiore, sede delle prove sul campo dell'elaborato di tesi.

Il terzo capitolo descrive: il circuito a tensione 3 kV in corrente continua che alimenta la linea di contatto come polo positivo, il circuito di ritorno, per mezzo della rotaia, come polo negativo, ed, in ultimo, il circuito di terra.

Il quarto capitolo descrive le tipologie di guasto più ricorrenti e le attuali procedure operative utilizzate per localizzare i guasti lungo la linea di contatto.

Il metodo proposto per individuare il guasto franco a terra in linee ferroviarie a singolo binario è descritto nel quinto capitolo. Sono analizzati gli aspetti teorici, gli impianti esistenti, gli strumenti di misura, il circuito di prova a terra e sono illustrate le simulazioni condotte sui valori teorici.

Le prove sul campo sono descritte nel sesto capitolo. Dopo una illustrazione delle parziali modifiche degli impianti della sottostazione necessarie per effettuare la sperimentazione e la preparazione degli impianti, è riportato lo svolgimento delle prove stesse, esplicitandone le condizioni di prova, l'elaborazione dei dati e i risultati delle misure ottenute.

Le conclusioni e le future proposte di sviluppo e applicazione del sistema in esame sono esposte nel settimo ed ultimo capitolo dell'elaborato di tesi.

1. Impianti di Trazione Elettrica

1.1. Introduzione

Le ferrovie possono utilizzare diversi metodi di trazione, tra cui quella elettrica, per la movimentazione dei treni. Lo sviluppo di questo tipo di trazione, in Italia in corrente continua a 3600 V (detta 3kV CC), avvenne nel decennio successivo alla fine della prima guerra mondiale, con sperimentazioni di notevole successo nella linea Benevento-Foggia. In seguito a queste prove la trazione in corrente continua (c.c.) si è imposta sul sistema elettrico trifase in corrente alternata (CA) che era stato parzialmente applicato a partire dall'inizio del secolo, dando quindi luogo alla rapida diffusione della Trazione Elettrica sulla rete della ferrovia Italiana e consentendo così un servizio con maggior circolazione treni a velocità maggiori e più economico, fino ai giorni nostri con l'avvento dell'alimentazione in corrente alternata per le linee di Alta Velocità, con tecnologia innovativa. [1,2]

Brevemente, si descrive come si origina e si sfrutta l'energia elettrica per la trazione ferroviaria. L'erogazione di energia elettrica dalle centrali elettriche dette "di produzione" (termiche, idrauliche, o altro) avviene in bassa tensione, la tensione viene poi elevata nelle adiacenti sotto stazioni elevatrici, processo necessario per rendere conveniente il trasporto dell'energia a grande distanza tramite la rete di linee primarie, in alta tensione, di solito a 132 kV CA. Queste linee primarie alimentano le Sotto Stazioni Elettriche (SSE) che sono posizionate vicino alla linea ferroviaria, a distanza opportuna lungo i tronchi ferroviari da servire.

Le SSE hanno la funzione di abbassare la tensione in arrivo e convertire la stessa da alternata a continua, alla tensione di 3 kV. Quindi le SSE alimentano la linea di contatto (Ldc) del binario, dalla quale, mediante il pantografo del treno che striscia sui conduttori, sono alimentati i locomotori con il polo positivo mentre il polo negativo è connesso alla rotaia che chiude il circuito, come illustra la Figura 1.1.

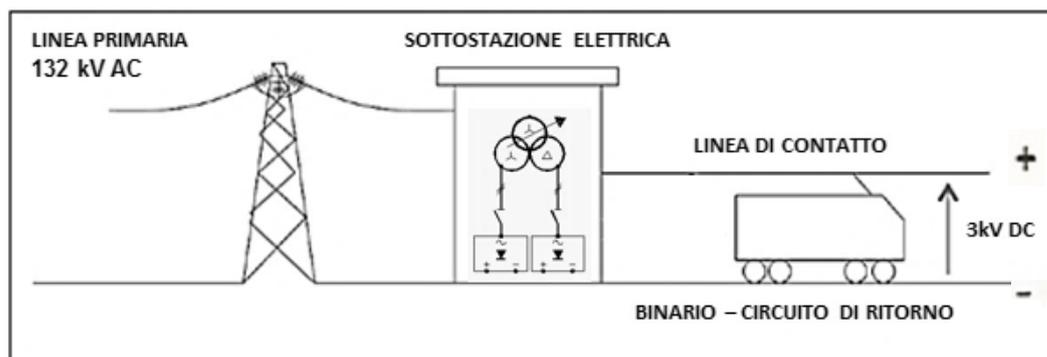


Fig. 1.1 - Struttura schematica del sistema elettrico ferroviario [3].

Questo sistema in corrente continua rappresenta, ancora oggi, una soluzione valida anche in presenza di elevate intensità di traffico con treni che arrivano a velocità di 250 km/h con potenze specifiche assorbite intorno a 1 MW/Km. Tuttavia, tale tipo di traffico necessita di minori distanze tra le SSE, fino ai 12-15 km, e di una maggiore sezione della linea di contatto, fino a 610 mm², rispetto a un traffico meno intenso.

Per velocità superiori ai 250 km/h e potenze unitarie assorbite dai singoli convogli oltre i 10 MW occorrono tensioni di alimentazioni maggiori dei 3 kV in c.c. attuali. Da cui l'applicazione della trazione elettrica in corrente alternata, per le linee Alta Velocità - Alta Capacità (AV-AC) con treni che raggiungono velocità di 300 km/h con alimentazioni a 25 kV 50 Hz CA con un impiego di potenza di 1.5-2 MW assorbiti al km [2].

La trazione elettrica utilizzata per l'alta velocità, è impiegata in linee con mezzi di trazione con caratteristiche elettromeccaniche specifiche, che captano l'alimentazione a 25 kV CA, fino ad arrivare a velocità di 300 km/h con treni di innovazione tecnologica, come l'ETR 600 e l'ETR 1000. Le linee ad alta velocità attualmente in servizio sul territorio Italiano sono quelle da Torino fino a Salerno, come si può vedere in Figura 1.2. Di futura realizzazione, invece, le linee ad alta velocità che collegheranno l'Italia con l'Europa formando i "corridoi europei", che permetteranno il collegamento tra le nazioni Europee.

Il presente lavoro di tesi si concentra esclusivamente sulle linee "storiche" in cc.



Fig. 1.2 - Sistema Alta Velocità/Alta Capacità Italiano.

1.2. Linee primarie

Le linee primarie hanno il compito di trasportare l'energia elettrica dalla centrale di produzione al punto di utilizzo dell'energia e, se necessario, di mettere in collegamento più impianti e reti. Questo lavoro è globalmente chiamato "rete di trasporto d'energia" o "rete di distribuzione Alta Tensione (AT)".

I valori di tensioni presenti nelle linee primarie sono 380-220-150-132-66kV CA, con l'obiettivo finale di arrivare ad alimentare la linea di contatto a tensione secondaria a 3 kV CC. La tensione commercialmente usata per il trasporto dell'energia elettrica sulla rete ferroviaria è di 132 kV CA con frequenza industriale a 50 Hz (Figura 1.3).

I tratti di rete di distribuzione possono variare da pochi chilometri a distanze maggiori. Ad esempio, come citano i manuali, si può arrivare fino a una tensione di 150 kV con potenza di 50 MW con distanze di 100-500 km [1].

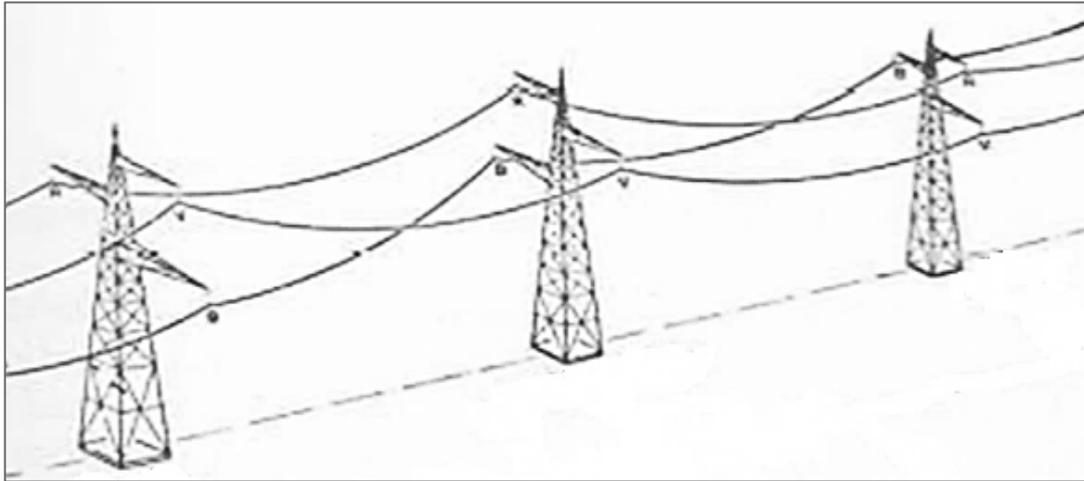


Fig. 1.3 - Linea Primaria a 132 kV a 50 Hz.

1.3. Sottostazioni elettriche

Le SSE sono aree e locali tecnologici nei quali avviene la riduzione e trasformazione della tensione in arrivo dalla linea primaria, che viene poi erogata alla linea di contatto. La distanza tra le SSE dipende principalmente dall'intensità del traffico ferroviario, ossia dagli assorbimenti dei mezzi di trazione che circolano su quella linea.

La distanza tra le sottostazioni era compresa inizialmente tra i 35 e i 45 km. L'aumento del traffico ha comportato la riduzione di tale distanza a 20-30 km e, per alcuni casi di particolare densità di traffico, a distanze di 15-20 km.

Il compito principale delle SSE è di trasformare l'alta tensione (AT) in arrivo in alternata in media tensione (MT) in continua. Sebbene siano possibili schemi più complessi, lo schema più semplice è quello di una sottostazione che derivi l'energia da un'unica linea primaria e che abbia una sola uscita in corrente continua.

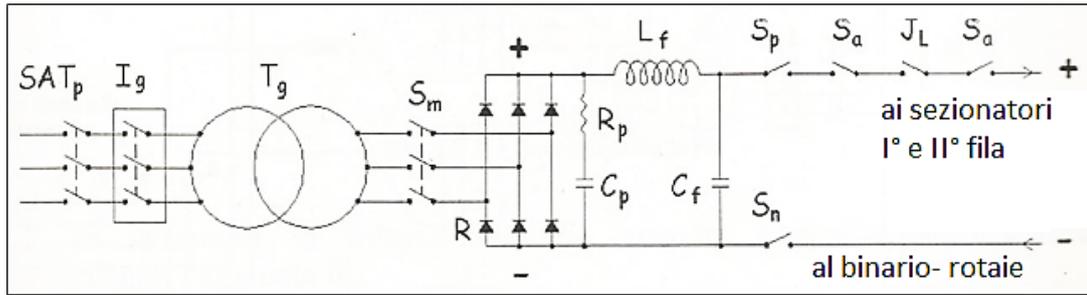


Fig. 1.4 - Schema di principio di sottostazione in CC.

In tal caso, lo schema si riduce alla Figura 1.4, con le seguenti principali apparecchiature:

- sezionatore tripolare d'ingresso della linea primaria SAT_p ;
- un interruttore tripolare di protezione del gruppo raddrizzatore I_g ;
- gruppo raddrizzatore costituito da:
 - trasformatore T_g ;
 - sezionatore multipolare S_m ;
 - raddrizzatore R , comprensivo della resistenza R_p e condensatore C_p di protezione da inserzioni e disinserzioni dei carichi;
- filtro F per assorbimento delle armoniche contenute nella corrente raddrizzata, costituito dal condensatore C_f e induttanza L_f ;
- sezionatore bipolare per i poli positivo e negativo S_p e S_n ;
- interruttore extrarapido di linea J_L con sezionatori unipolari S_a per il sezionamento a monte e a valle dello stesso;
- collegamento del polo positivo ai sezionatori di I e II fila e infine alla linea di contatto;
- collegamento del polo negativo al binario (rotaie).

Questo schema proposto è semplificato e rappresenta per lo più le sottostazioni ambulanti, sottostazioni usate in caso di emergenza [5]. Lo schema tipico di una SSE fissa è più complesso e comprende più gruppi di conversione e più linee in uscita e l'alimentazione delle sottostazioni può essere in serie o in derivazione dalla linea primaria che le interconnette dal lato AT.

A valle del sezionatore del polo positivo si hanno i sezionatori di I e II fila, apparati atti al sezionamento dell'alimentazione della linea di contatto lungo il tratto di linea ferroviario interessato. Ad esempio, nel caso rappresentato nella

Figura 1.5, l'apertura del sezionatore numero 5 e la chiusura del sezionatore numero 2 permettono di alimentare la linea a destra della SSE, e l'apertura del sezionatore numero 6 permette di disalimentare la linea di stazione e di tratta a sinistra della SSE.

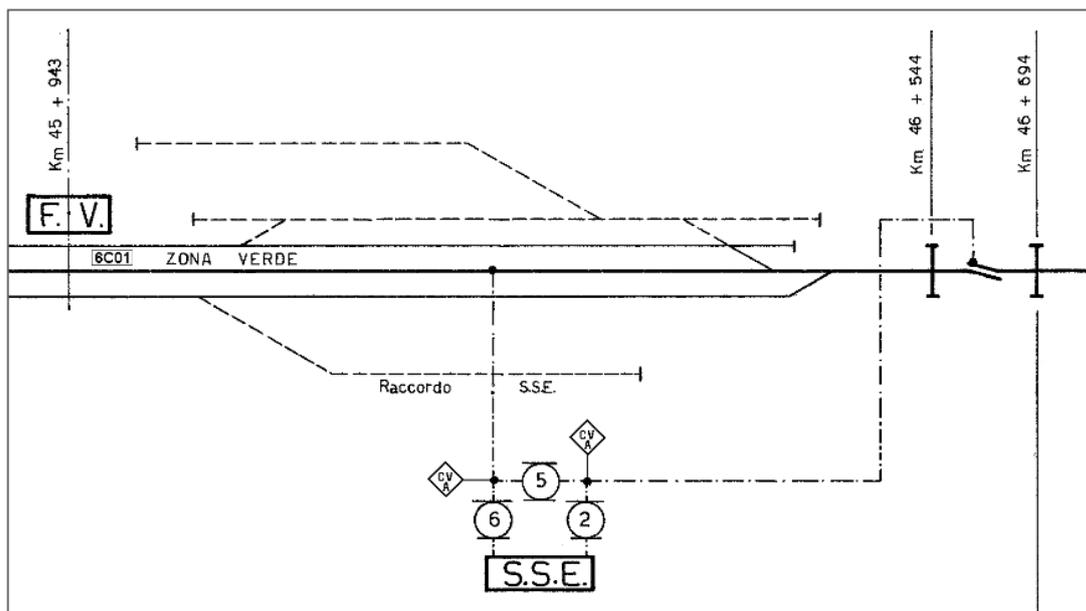


Fig. 1.5 - Stralcio di schema dei circuiti della linea di contatto.

Le SSE sono tutte impresenziate e controllate a distanza dal dirigente operatore trazione elettrica (DOTE) che, dal posto centrale satellite (PCS), comanda e controlla da remoto le alimentazioni delle linee ferroviarie degli impianti di trazione elettrica, tramite i sezionatori e gli interruttori, avendo a disposizione le misure di corrente e tensione relativi alle linee. La Figura 1.6 rappresenta una generica configurazione di architettura di sistema al PCS. L'informazione dall'esterno viene inviata al DOTE tramite modem e database server, utilizzando linee dedicate FS, di telecomunicazioni e trasporto dati (TLC-TD).

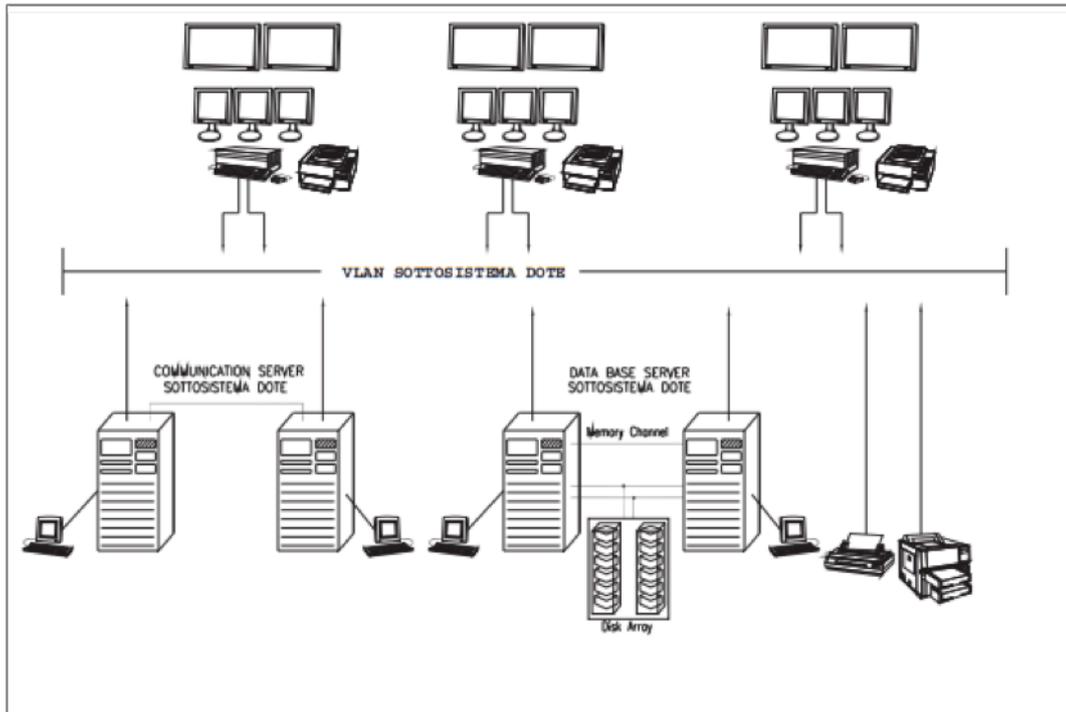


Fig. 1.6 - Architettura di sistema postazioni DOTE del PCS.

2. Linea ferroviaria Ferrara-Ravenna

2.1. Introduzione

La ferrovia Ferrara – Ravenna è una linea ferroviaria che unisce Ferrara, la cui stazione si trova sulla linea Padova – Bologna, con Rimini, sulla linea Bologna – Ancona, passando per Ravenna; la linea corre interamente nella regione dell'Emilia-Romagna.

La linea è gestita da RFI, che la qualifica come linea complementare. Essa è a binario unico ed è elettrificata ed alimentata alla tensione di 3600 V a corrente continua.

Questa linea è stata scelta per lo sviluppo delle prove inerenti all'elaborato della tesi in quanto facilmente modificabile per implementazione dei circuiti per lo svolgimento delle stesse.

2.2. Impianti di Trazione Elettrica

La linea Ferroviaria Ferrara – Ravenna (Figure 2.1a e 2.1b), si sviluppa per 73 km. Quattro SSE alimentano la linea a 3600V c.c.. Le sottostazioni sono dislocate l'una dall'altra a una distanza di circa 23 km.

La linea ferroviaria è provvista di conduttori, chiamati linea di contatto (Ldc), di sezione complessiva di 320 mm², alimentati dalle suddette sottostazioni, in cui il treno preleva l'alimentazione per la trazione.

Si focalizzerà l'attenzione sulla stazione ferroviaria di Portomaggiore e sui tratti ferroviari di linea al suo ingresso e uscita, in direzione delle sottostazioni elettriche limitrofe di Ferrara, da un lato, e di Voltana, dall'altro, in quanto utilizzate per le prove.

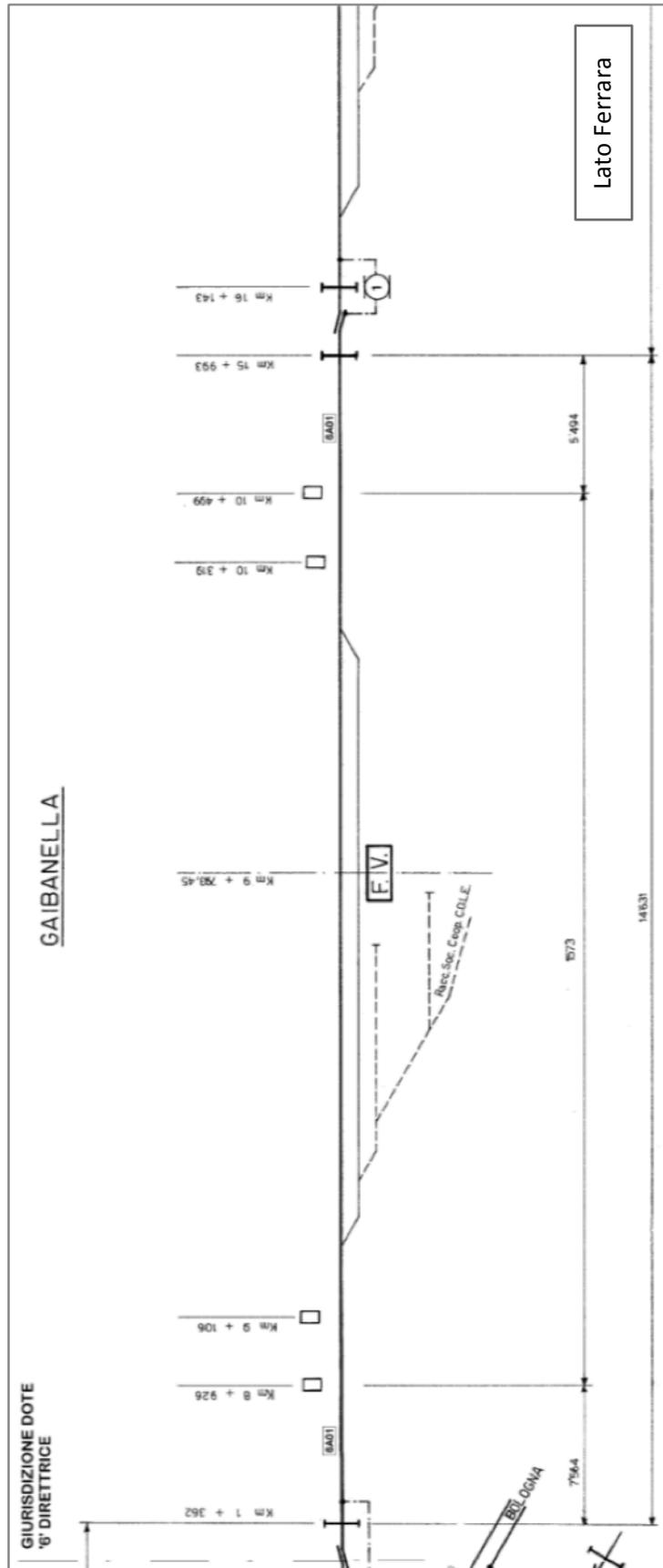


Fig. 2.1a - Stralci dello schema generale dei circuiti della linea di contatto 3kVCC Ferrara – Ravenna, lato Ferrara.

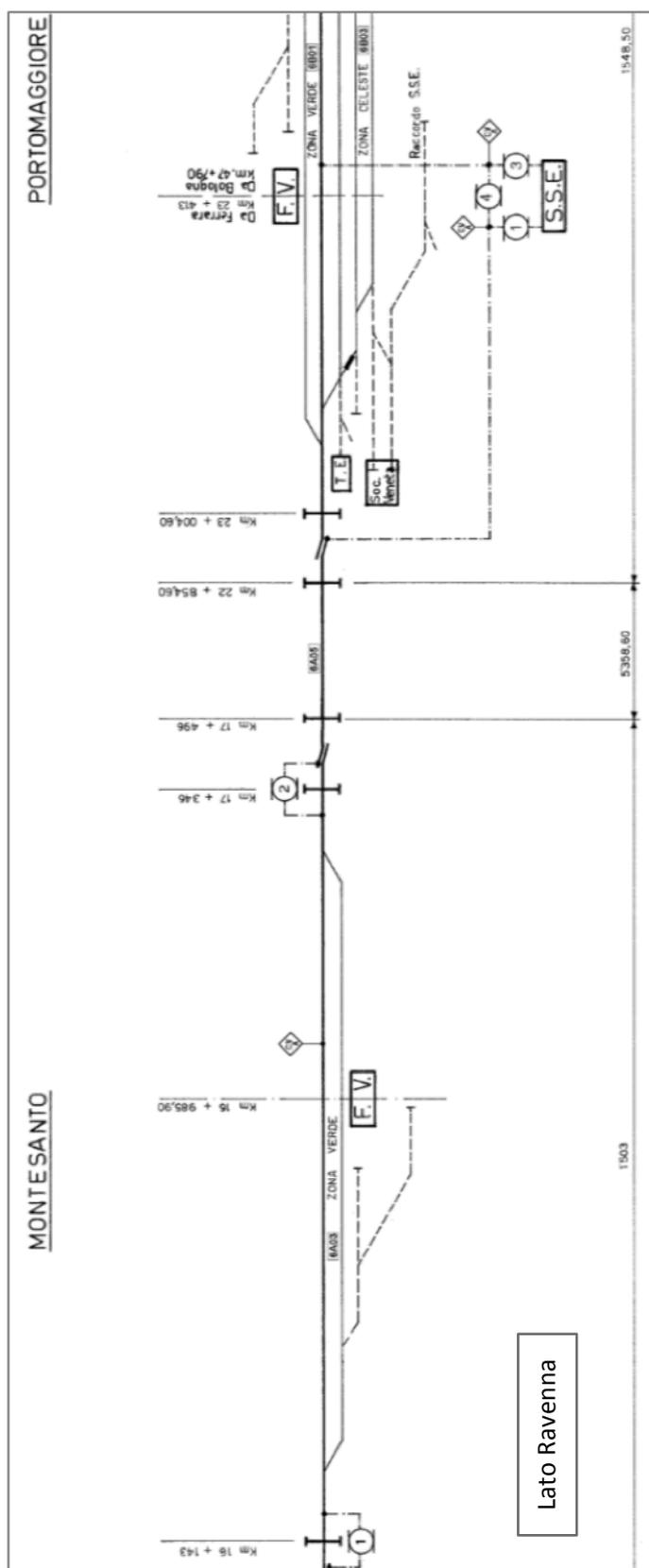


Fig. 2.1b - Stralci dello schema generale dei circuiti della linea di contatto 3kVCC Ferrara – Ravenna, lato Ravenna.

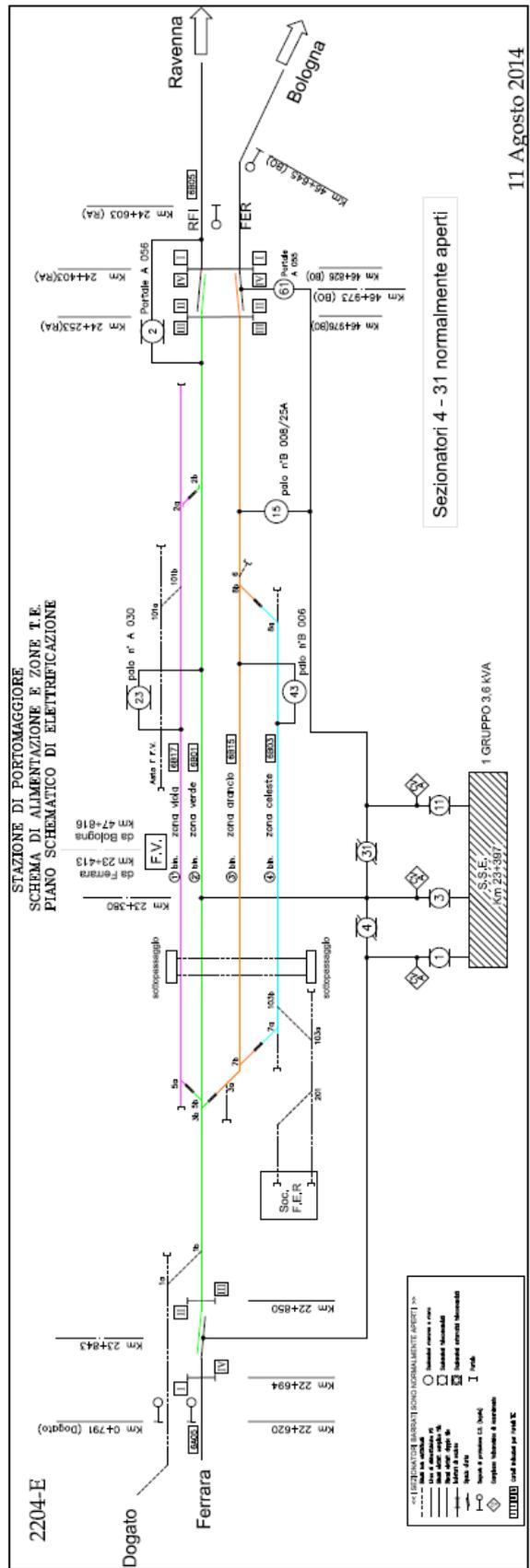


Fig. 2.2 - Schema di alimentazione e zone TE e piano schematico di elettrificazione della stazione di Portomaggiore della linea Ferrara – Ravenna.

Per ogni stazione ferroviaria esiste lo schema di alimentazione e zone trazione elettrica (TE) con piano schematico di elettrificazione.

La stazione ferroviaria di Portomaggiore è caratterizzata da 4 binari. Ogni binario è alimentato da una linea di contatto dedicata, chiamata “zona”, riconoscibile da colorazione univoca rispetto alle altre. In Figura 2.2 sono visibili le zone viola, verde, arancione e azzurra. Le zone colorate sono collegate con la sottostazione tramite sezionatori, con possibilità di molteplici alimentazioni e disalimentazioni totali e parziali della stazione stessa e della linea ferroviaria entrante e uscente, per limitare i disservizi in caso di guasto e facilitare gli interventi manutentivi.

2.3. Impianto della Sottostazione elettrica di Portomaggiore

La SSE di Portomaggiore, che alimenta una parte della linea ferroviaria da Ferrara a Ravenna, è una sottostazione in derivazione, con l’arrivo della linea primaria a 132 kV con conduttori aerei.

Nella SSE si possono distinguere:

- a) una zona all’aperto, nella quale arriva la linea primaria e avvengono sezionamenti, protezioni e misure dei parametri della linea e la trasformazione da alta tensione a media tensione;
- b) una parte al chiuso, all’interno del locale tecnologico, nella quale avviene il passaggio da corrente alternata a corrente continua, tramite dei raddrizzatori, nella quale sono disposti i circuiti di protezione e alimentazione della linea di contatto.

La derivazione dalla linea primaria è creata da una struttura composta da due portali dai quali si sviluppa la distribuzione di conduttori aerei, chiamati in gergo “chitarra”, che uniscono la parte di linea in arrivo con la parte successiva.

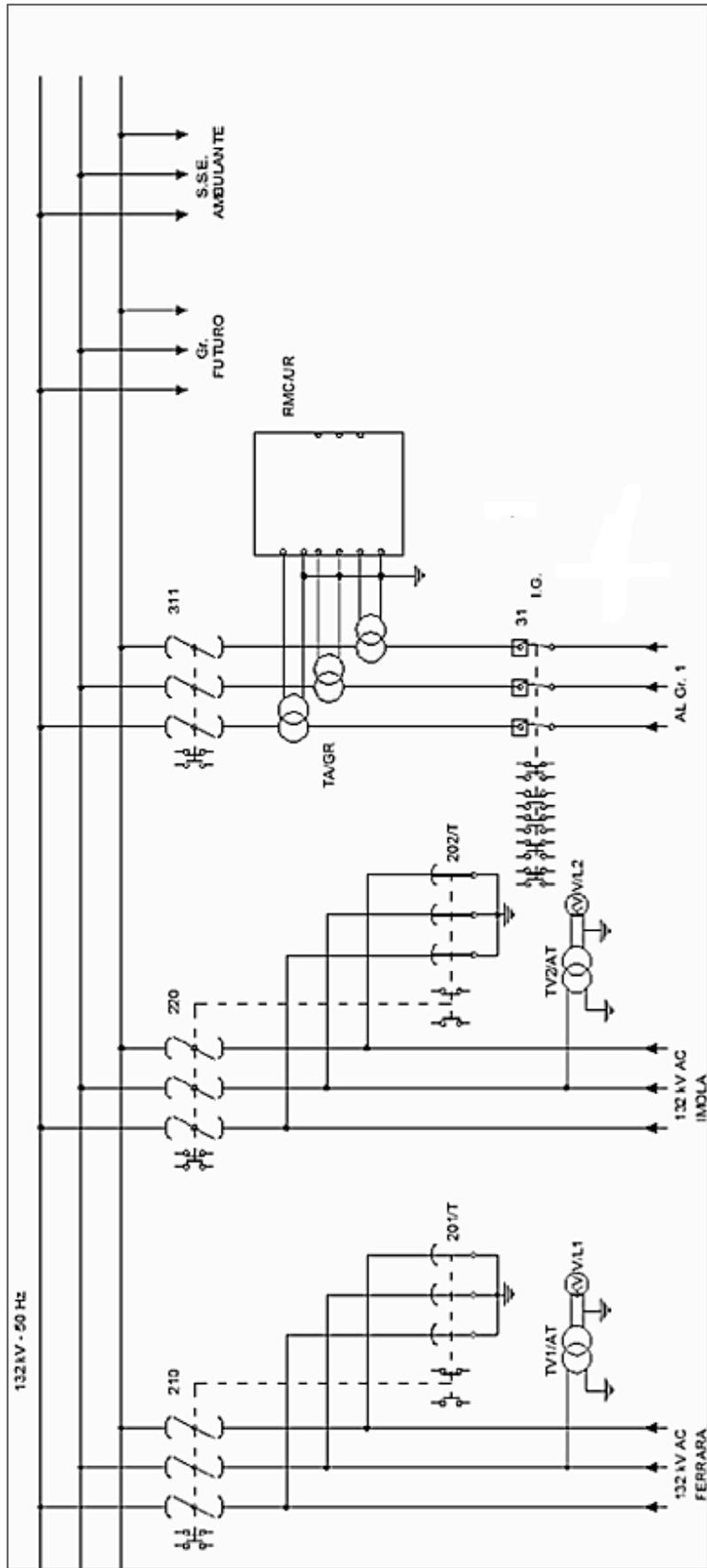


Fig. 2.3 - Circuito alta tensione e gruppo della linea Ferrara-Ravenna.



Fig. 2.4 - Quadro sinottico di Portomaggiore;

Come illustrato nelle Figure 2.3 e 2.4, i primi elementi della linea della SSE sono un sezionatore di linea e un sezionatore con lame di terra che consentono, rispettivamente, di isolarla dalla linea primaria e di realizzare un collegamento franco a terra in sicurezza. Sono presenti i Trasformatori Voltmetrici (TV) in AT, per le telemisure di controllo, e un sezionatore di gruppo che svolge l'attività di sezionare tutto ciò che mette in collegamento la sottostazione con la linea primaria in AT.

A valle del sezionatore di gruppo, si incontrano dei Trasformatori Amperometrici (TA) per le misure della corrente, usati anch'essi per le telemisure di controllo, poi si arriva all'interruttore di gruppo (I_g) atto ad intervenire per sovracorrenti e proteggere tutto ciò che si trova a valle.

Come rappresentato in Figura 2.5, a valle di I_g è posto un trasformatore con raffreddamento a olio con, in ingresso, la linea trifase. Il circuito primario è collegato a stella e, in uscita, sono presenti due avvolgimenti secondari, uno a stella e uno a triangolo, che alimentano una linea esafase (trasformatore da 132/2,750 kV con potenza 4 MVA alla frequenza di 50 Hz). Da questo punto si passa dall'impianto sviluppato esternamente al fabbricato alla parte sviluppata al suo interno. Il passaggio avviene grazie agli isolatori "passa muro" che hanno lo scopo di collegare gli avvolgimenti secondari del trasformatore con i sezionatori esapolari posti all'interno dell'edificio. Quindi, si arriva al sezionatore esafase (SE) che seziona il tratto tra il trasformatore e il gruppo raddrizzatore. Seguono due raddrizzatori, RzA e RzB, ciascuno dei quali ha in ingresso una delle due linee trifase che compone l'esafase in arrivo. Sono raddrizzatori a ponte di Graetz trifase

con un numero ridotto di diodi per ogni ramo. Seguono i filtri di cresta (da $10 \mu\text{F}$ 4000 V 10Ω) con il compito di livellare i valori di tensione in uscita dai ponti raddrizzatori. Poi si sviluppa un filtro Aperiodico ($240 \mu\text{F} - 6 \text{ mH}$ o $360 \mu\text{F} - 9 \text{ mH}$) che ha lo scopo di bloccare le armoniche generate dal gruppo raddrizzatore. Infine si hanno i sezionatori di sbarra (SB) e poi le sbarre omnibus a 3 kV in CC.

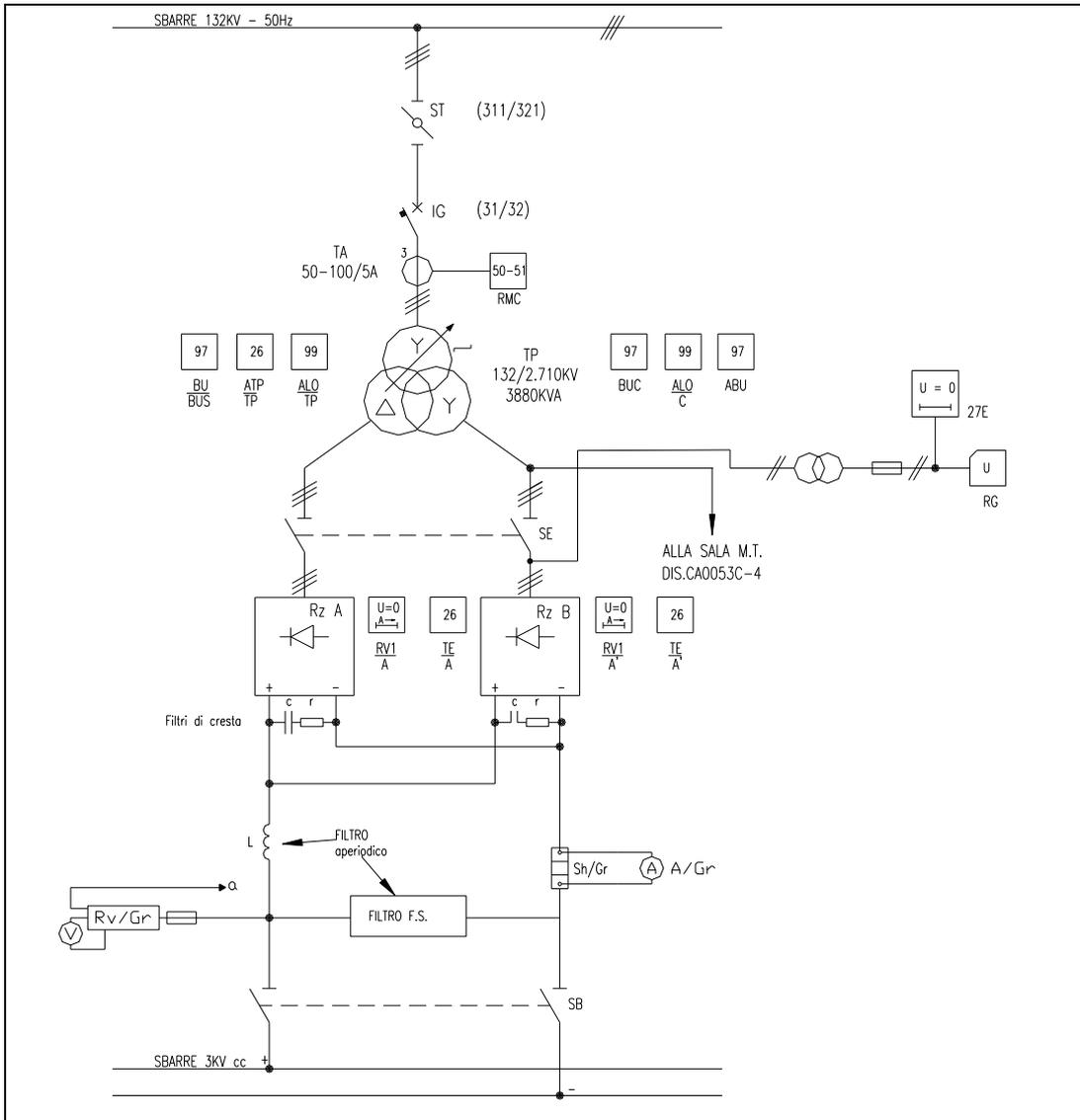


Fig. 2.5 - Schema circuitale di arrivo linea 132 kV CA dall'interruttore di gruppo alla sbarra 3 kV CC.

Dalla sbarra 3 kV in CC si sviluppa il circuito di alimentazione finale per l'erogazione di energia alla linea di contatto per la trazione dei treni.

A valle della sbarra sono derivate le linee che alimentano i vari tratti di linea della TE (Figura 2.6). Il circuito è composto da un primo ramo con l'interruttore generale di protezione di linea, detto interruttore extrarapido J. Si tratta di un

dispositivo in grado di interrompere correnti di corto circuito in pochi millisecondi, quindi è un componente molto importante per la protezione delle linee da corto circuiti e sovraccarichi. Trattandosi di corrente continua, nell'impossibilità di sfruttare i passaggi per lo zero presenti in alternata, il suo principio di funzionamento è basato sull'allungamento dell'arco elettrico. Tale allungamento è creato dalla rapida apertura dei suoi contatti e un suo successivo frazionamento che ne permette l'estinzione (Figura 2.7). Questo risultato è ottenuto anche attraverso il soffio elettromagnetico, utilizzando la stessa corrente di guasto che, percorrendo le spire con asse perpendicolare all'arco elettrico e in base alla legge di Lorenz, crea una forza sulla corrente che spinge l'arco ad allungarsi sui contatti. L'arco sui contatti aperti all'aumentare della sua lunghezza trova maggiore resistenza elettrica e si indebolisce via via nel caminetto, fino ad estinguersi.

Ritornando alla Figura 2.6, a valle dell'interruttore J si incontra uno shunt, strumento atto a misurare, tramite un Amperometro, il valore di corrente che transita sul conduttore positivo in arrivo dalla sbarra omnibus. In parallelo allo shunt e all'interruttore J, c'è il circuito di prova a terra, atto a testare la linea in fase di guasto con correnti limitate, grazie alla resistenza limitatrice (R_L). Il contattore di prova a terra (PT), a richiusura automatica con servomeccanismi di temporizzatori, verifica l'isolamento della linea di trazione. In parallelo al circuito di prova a terra c'è il circuito di misura della tensione dopo il test del PT. Tale circuito è composto da vari componenti, tra i quali il Relè voltmetrico (RV) con l'incarico di misura della tensione presente sulla linea di contatto. Se la tensione risulta maggiore di 2000 V, il RV consente di richiudere l'extrarapido J, quindi si è estinto il guasto, mentre se risulta minore, blocca in aperto definitivamente l'interruttore J.

All'uscita sulla linea elettrica TE sono presenti gli scaricatori, con il compito di proteggere la linea da sovra tensioni, per poi arrivare ai sezionatori di I fila e II fila (indicati ad esempio come SC1, SC4 e SC15 in Figura 2.6), atti ad alimentare o disalimentare la stazione o tratti di linea ferroviaria. Tali sezionatori sono motorizzati e telecomandati da remoto dal DOTE.

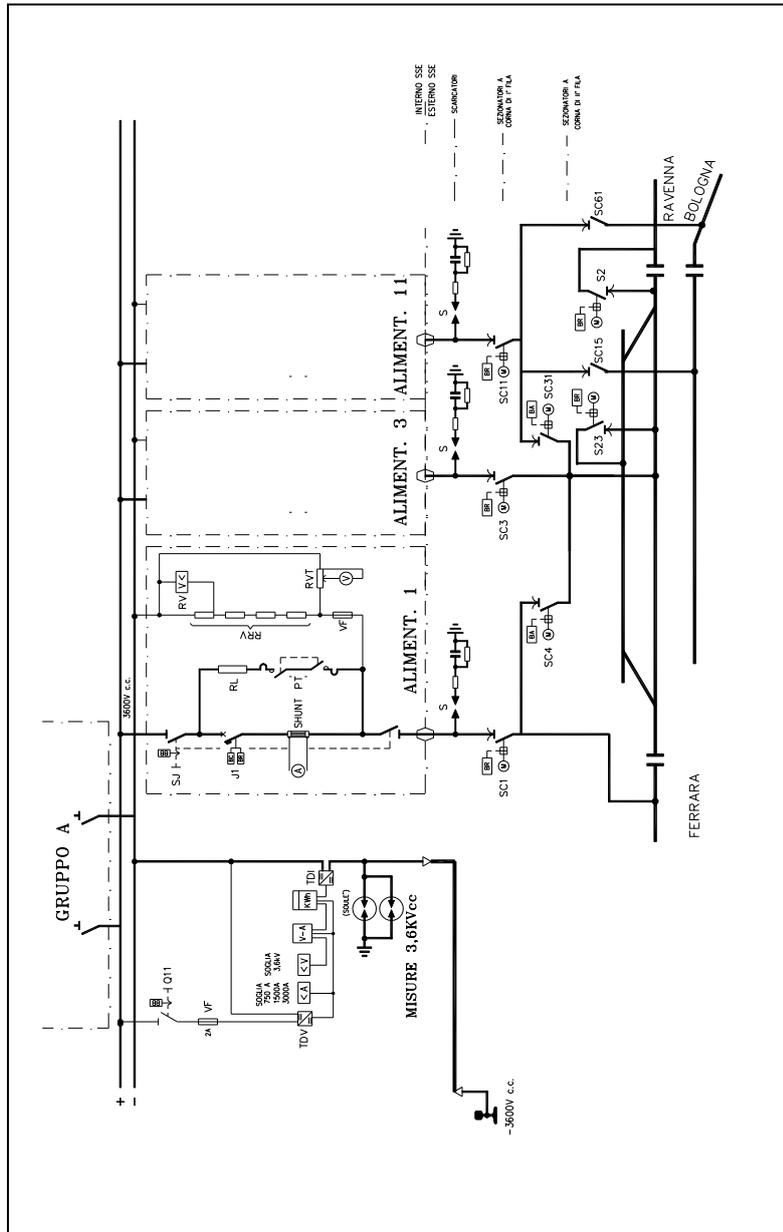


Fig. 2.6 - Schema circuitale dalla sbarra omnibus alla linea di contatto.

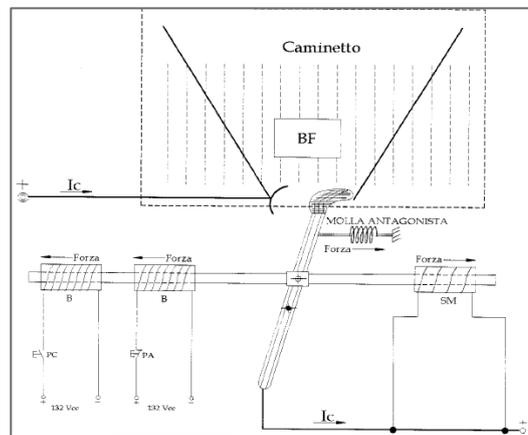


Fig. 2.7 - Parti dell'interruttore extrarapido J.

3. Circuito a tensione 3kV in corrente continua

L'alimentazione dei treni lungo la linea ferroviaria avviene attraverso la linea di contatto. Il treno, utilizzando il pantografo - organo strisciante che capta l'alimentazione, utilizza l'energia elettrica per la trazione. I treni lungo la linea ferroviaria sono identificati come carichi variabili alimentati da punti fissi, cioè le SSE dislocate lungo la linea. Il polo negativo è direttamente collegato al binario. Le rotaie hanno il compito di richiudere il circuito della corrente alla SSE più vicina.

3.1. Linea di contatto

La progettazione e quindi il dimensionamento della linea di contatto e, di conseguenza, degli impianti a monte sono conseguiti col fine di raggiungere obiettivi di:

- contenimento delle cadute di tensioni entro i limiti per garantire la normale circolazione treni lungo la linea fornendo al treno valore di tensione sufficiente;
- contenimento della densità di corrente nei conduttori per evitare il danneggiamento a causa del surriscaldamento degli stessi.

Idealmente il conduttore di contatto dovrebbe avere altezza costante, mantenere i conduttori lungo l'asse del binario e, in ultimo, non risentire del vento laterale [5].

Il conduttore è composto da una o più corde portanti e da uno o più fili di contatto di rame. La sezione totale dei conduttori è funzione della velocità massima ammissibile della linea ferroviaria che, in proporzione, richiede idonea potenza elettrica. Ad esempio, la linea Ferrara Ravenna che è composta da un unico binario con velocità massima di 150 Km/h ed è di tipo FF3 [8], come si vede in Tabella 3.1, il conduttore si compone di una corda di rame portante fissa di sezione di 120 mm² e di due fili di contatto di rame di sezione di 100 mm², con tesature di corde e filo, con ormeggi regolati rispettando la temperatura media regionale.

Tipo	Fune (n x mm ²)	Filo (n x mm ²)	Sezione tot. (mm ²)	Tiro singolo conduttore nominale (daN)		Velocità max (km/h)
				Fune	Filo	
FF0-1	0/1 x 120	1 x 100	100 – 220	819	750	150
FF3	1 x 120	2 x 100	320	1075	750	150
FF4	2 x 120	2 x 100	440	1000	750	150
FR3	1 x 120	2 x 100	320	1375	1000	200
FR4M	2 x 120	2 x 100	440	1125	1000	200
FR4A	2 x 155	2 x 150	610	1000	1125	200
FR3-DD	1 x 160	2 x 150	460	2750	1500	250
FR4-DD	2 x 155	2 x 150	610	1875	1500	250
FR4*	2 x 120	2 x 150	540	1500	1875	250

Tab. 3.1 - Composizione della linea di contatto.

I conduttori sono posti in trazione con forza costante per mantenerli complanari rispetto al binario, al fine di facilitare la captazione di corrente e di compensare le dilatazioni termiche.

Il conduttore è sostenuto tesato, come si vede in Figura 3.2, da pali distanziati tra loro fino a un massimo di 60 metri. Il collegamento meccanico dalla corda (o fune) portante con il filo di contatto è creato dai pendini. Inoltre, sono presenti connessioni con funzione di trasporto di energia elettrica, chiamati cavallotti di continuità. Le corde portanti sono a loro volta vincolate su isolatori delle sospensioni e realizzano, tra due sospensioni attigue, la curva chiamata “catenaria” come si vede nella Figura 3.3.

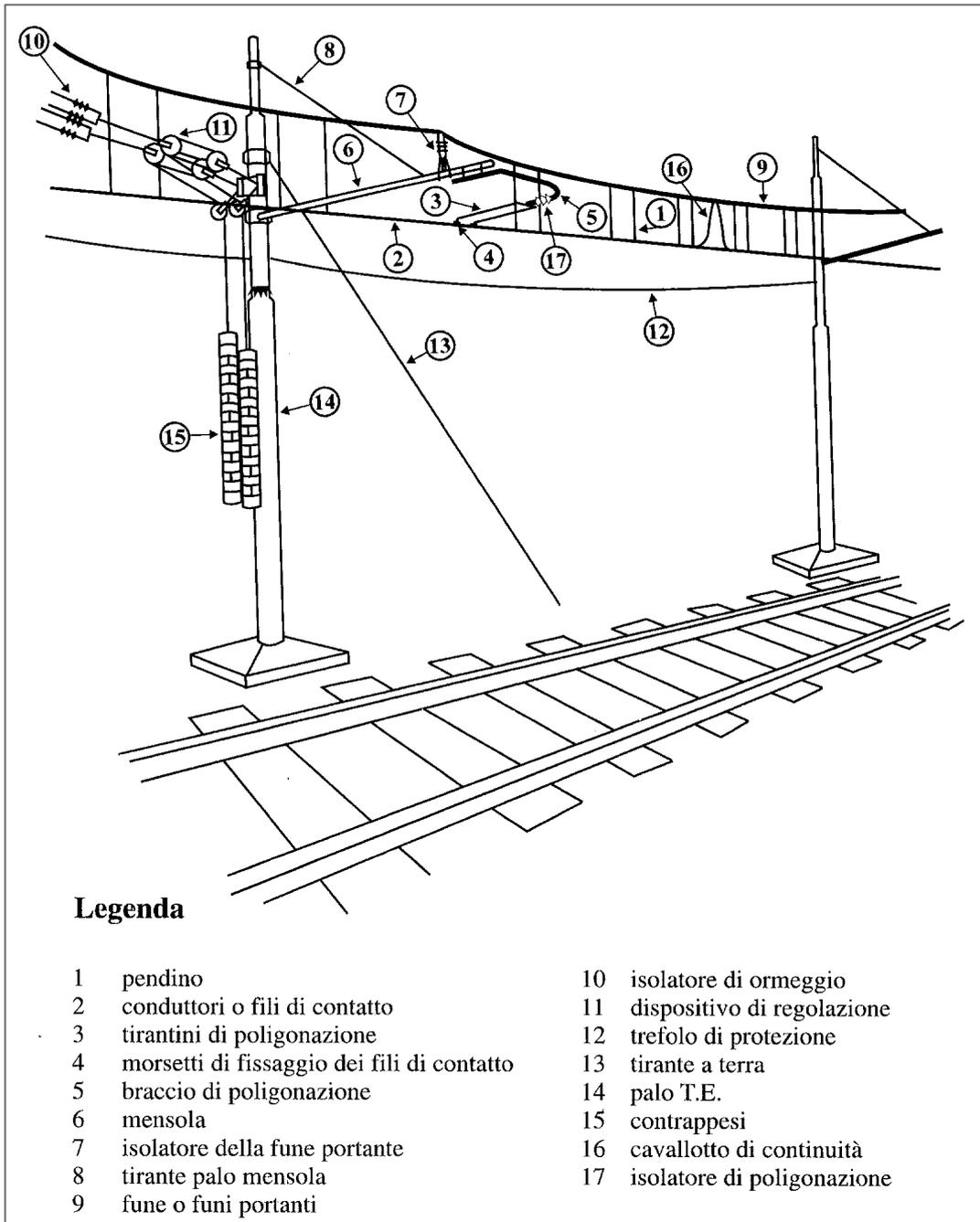


Fig. 3.2 - Linea di contatto con sospensione tradizionale [6].

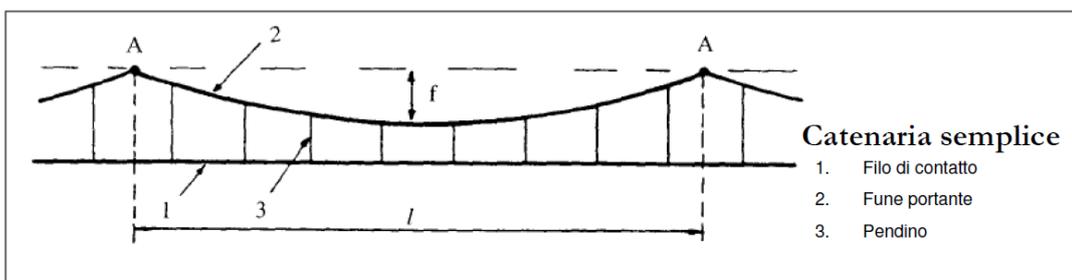


Fig. 3.3 - Linea di contatto Catenaria semplice [4]

3.2. Circuito di ritorno – rotaia

Per “circuito di ritorno” si intende il circuito costituito dalle rotaie avente lo scopo di convogliare al negativo delle SSE le correnti di ritorno della TE. Deve avere la minor resistenza possibile sia per ridurre le cadute di potenziale sia per ridurre le correnti che abbandonano il binario per immettersi nel terreno. Con l’impiego delle rotaie lunghe saldate, rispetto alle rotaie unite con giunzioni metalliche del passato, si hanno valori di resistenze minori a vantaggio del passaggio di corrente di ritorno alle SSE.

Le rotaie, oltre a far circolare il treno ed essere anche il circuito di ritorno della TE, concorrono all’identificazione della presenza del treno lungo la linea. Ciò avviene tramite gli impianti di segnalamento, che usando la tecnologia dei circuiti di binario (cdb), circuiti elettrici dedicati, che possono richiedere l’isolamento a livello longitudinale di tratte di una o ambedue le rotaie del binario. A tal proposito, come illustrato nelle Figure 3.4a, 3.4b e 3.4c, si distinguono tre tipi di circuiti di ritorno [7,9]:

→ Tipo 1. Ambedue le rotaie sono isolate. La continuità elettrica avviene tramite le connessioni induttive. Questa scelta di impianto serve per separare il circuito di segnalamento della presenza del treno dal circuito di ritorno TE;

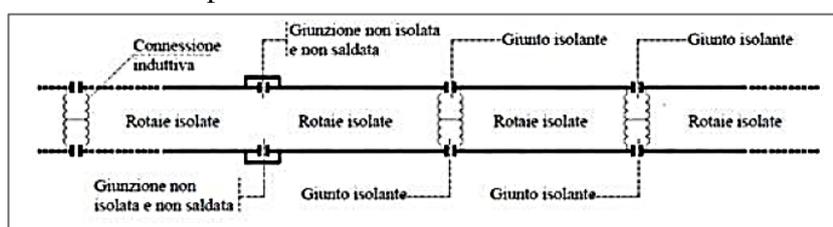


Fig. 3.4a - Circuito di ritorno di tipo 1.

→ Tipo 2. Una sola rotaia è non isolata in presenza di circuiti di binario e l’altra è isolata, quindi la corrente di trazione circolerà nella rotaia detta in gergo “a terra”. Nel caso di linee a singolo binario non vi è alcuna connessione tra le due rotaie; nel caso di linea a doppio binario, invece, si ha la connessione trasversale ogni 180 metri;



Fig. 3.4b - Circuito di ritorno di tipo 2.

→ Tipo 3. Ambedue le rotaie sono non isolate in assenza di circuiti di binario, quindi la corrente di trazione circola su entrambe le rotaie. Questo tipo di circuito si usa quando il regime di circolazione non prevede l'utilizzo delle rotaie per funzioni legate al distanziamento dei treni. In questo caso si ha la connessione trasversale fra le due rotaie dello stesso binario ogni 180 metri.

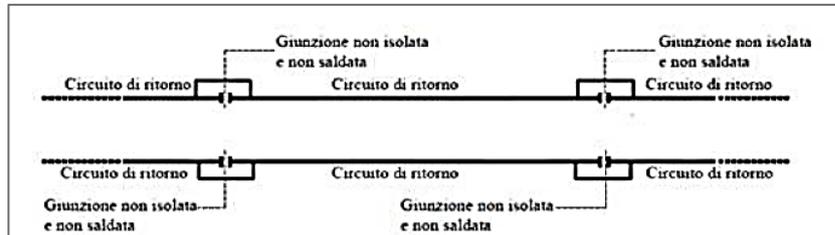


Fig. 3.4c - Circuito di ritorno di tipo 3.

3.3. Circuito di protezione

Per proteggere la sicurezza degli impianti e delle persone dai contatti indiretti, ad esempio in caso di rottura di isolatori che mettono in contatto le parti in tensione con le parti metalliche delle sospensioni e quindi con i pali della trazione elettrica, si è creato un circuito di protezione. Esso collega tutte le parti metalliche che si trovano in condizione di tensionabilità, le mette a terra attraverso opportuni dispersori e le collega alle rotaie. Le protezioni elettriche, in caso di guasto verso terra, intervengono in modo automatico, interrompendo l'alimentazione dalla sottostazione elettrica grazie all'apertura dell'interruttore extrarapido nei tempi prescritti dalla norma CEI EN 50122-1 [10].

In condizioni normali, il circuito di ritorno della trazione è indipendente dal circuito di terra. Il collegamento fra i due è realizzato tramite delle valvole di tensione o diodi che, in caso di guasto, mettono in collegamento i due circuiti, ad esempio nel caso di un accidentale contatto della parte metallica protetta con un conduttore in tensione o la folgorazione di un isolatore. La separazione dei due circuiti tramite il diodo è necessaria per evitare di far percorrere alla corrente di ritorno TE gli impianti di messa a terra delle masse metalliche dell'impianto TE. In questo caso, infatti, la corrente, uscendo dai dispersori o dalle masse metalliche (i poli) verso il terreno, crea effetti di corrosione elettrolitica con il conseguente danneggiamento delle strutture.

La conformazione del circuito di terra prevede il collegamento dei sostegni fra loro con una o più corde di alluminio in tratte di 3000 metri. Tutti i pali, di ogni tratta, vanno collegati ad un dispersore di terra, per ottenere, per ognuno, valori di resistenza inferiori ai 2Ω . Ogni estremità della tratta va collegata tramite la valvola di tensione o diodo alle due rotaie del binario più vicino. La Figura 3.5 esplicita il circuito di terra per linee a doppio binario senza blocco automatico che si può prendere in parziale riferimento impiantistico anche per la linea Ferrara Ravenna, sapendo però che si tratta di una linea a binario singolo ma anch'essa senza blocco automatico.

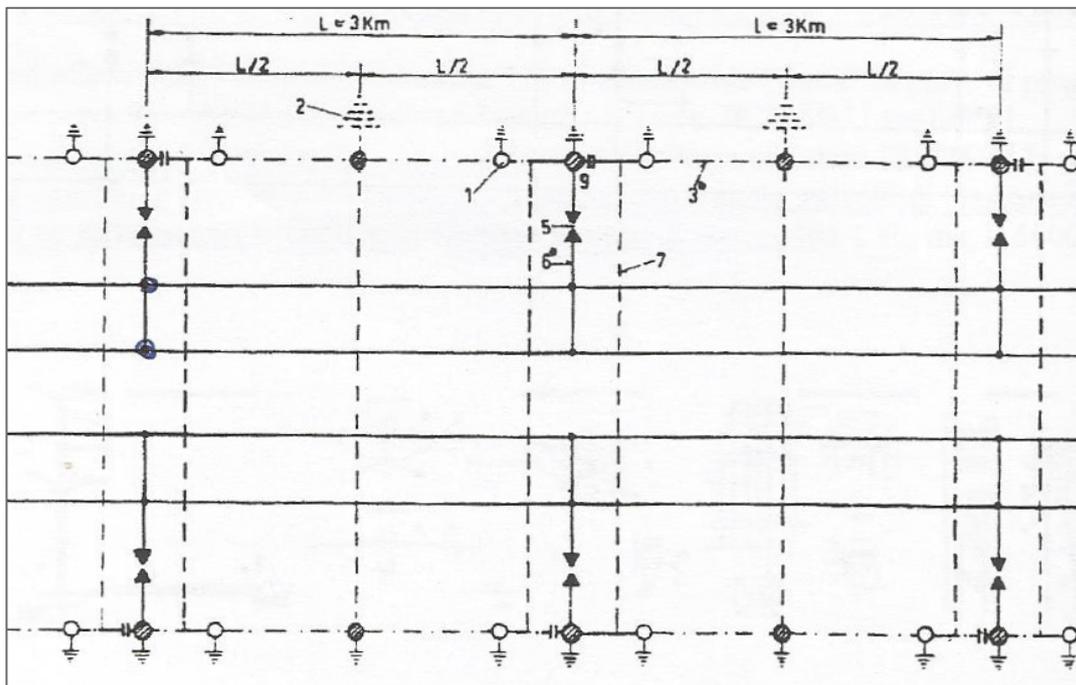


Fig. 3.5 - Circuito di terra per linee a doppio binario senza blocco automatico [7].

4. Localizzazione dei guasti sulla linea di contatto

In qualsiasi impianto e dispositivo, pur applicando metodi di manutenzione efficaci e puntuali, non è possibile annullare la probabilità che si presenti un guasto. Per guasto si intende quanto indicato nelle Norme UNI 9910 edizione 1998:

“La cessazione dell’attitudine di un’entità ad eseguire la funzione richiesta”.

Nel presente capitolo sono stati classificati i guasti ricorrenti nel caso specifico della linea di contatto dell’alimentazione della trazione elettrica e sono state identificate le metodologie in vigore per l’individuazione dei guasti tramite l’utilizzo di apparecchiature e l’intervento degli operatori sul campo.

I lavori di riparazione del guasto esigono particolare rapidità di intervento, sempre rispettando i criteri di sicurezza dell’operatore, poiché l’interruzione della linea ferroviaria porta a disservizi importati dovuti al blocco della circolazione dei treni e mezzi d’opera, quindi ritardi. Perché la riparazione sia tempestiva, è importante che il guasto sia localizzato con precisione, in modo da ridurre i tempi di intervento ai soli tempi tecnici di riparazione del guasto. La procedura attualmente in uso per localizzare il guasto consente di individuare la zona di guasto, mentre la metodologia proposta (descritta nel Capitolo 5) si propone di individuare il punto di guasto, consentendo quindi un intervento più tempestivo.

4.1. Tipologie di guasto ricorrenti

Grazie ai dati forniti dal sistema di gestione aziendale (SAP) nella sezione dei guasti e avvisi di avarie e attraverso la consultazione di manuali [1], si possono individuare, le casistiche e tipologie di guasto ricorrenti nella trazione elettrica.

Varie possono essere le cause dell’avaria della linea di contatto:

- Avarie per cause ambientali (es., scariche atmosferiche, frane, oggetti sulla linea di contatto, candelotti di ghiaccio intorno al filo sagomato, ecc.);
- Avarie per usura non prevedibile e difetti nascosti dei materiali (es., perforazione dell’isolatore, ecc.);
- Avarie dovute a mezzi di trazione (es., pantografo viene in collisione con linea di contatto o pendino, ecc.);

- Avarie causate dalla circolazione veicoli (es., carichi fuori sagoma ecc.);
- Avarie dovute a terzi (es., automezzi che provocano danneggiamenti nei passaggi a livello, ecc.);
- Avarie dovute a lavori all'armamento (es., slineamenti, spostamenti del binario, ecc.).

4.2. Attuali procedure operative di localizzazione guasto

In caso di avaria della linea di contatto è importante che l'intervento dei tecnici sia tempestivo, in modo da ridurre il disagio alla circolazione ferroviaria. Nelle linee a doppio binario, quando l'avaria interessa le condutture aeree di un solo binario, solitamente la circolazione viene effettuata solo sul binario ancora efficiente, con circolazione alternata nei due sensi di marcia. Ciò richiede opportune modalità di movimento del materiale rotabile da parte del dirigente movimento che controlla la circolazione treni, ma crea un disservizio sulla circolazione treni minore rispetto alla condizione di binario unico. In questo caso, infatti, la tratta di linea interessata viene chiusa fino alla riparazione del guasto, ed è quindi ancora più importante una localizzazione precisa del guasto per ridurre i tempi di intervento.

La anomalia degli impianti di TE, cioè il guasto, può avvenire in due casi:

1. in presenza di corto circuito in linea, caso nel quale scatta l'interruttore di protezione di una o entrambe le SSE che alimentano il tratto di linea interessato;
2. in assenza di corto circuito per linea guasta ma rimasta elettricamente isolata e quindi con mancato scatto degli interruttori.

Nel primo caso si opera in primis con l'azionamento della prova a terra da remoto dal PCS da parte dell'operatore DOTE (vedi ultima parte par. 1.3). Se non va a buon fine la richiusura, e il guasto è ancora presente, si opera con i sezionamenti di linea in modo da localizzare la zona di guasto (un tratto tra due sezionatori) e si mandando i tecnici specializzati per l'intervento.

Per la localizzazione del guasto si deve considerare che, basandosi sulla Figura 4.1, se il guasto è nelle vicinanze della SSE B, la SSE A continua ad alimentare il guasto per via della lontananza dello stesso che lo percepisce come un carico.

Questa problematica è stata risolta con il dispositivo di asservimento. Esso è composto da un collegamento elettrico a bassa tensione, il quale fa colloquiare i due interruttori extrarapidi delle due SSE ai due lati della tratta ferroviaria (esempio SSE A e SSE B). L'asservimento manda un comando a distanza, simultaneo dei due interruttori in apertura. In caso di guasto, ed immediatamente interviene l'interruttore extrarapido più vicino (es. SSE A) e poi per "trascinamento" subito dopo, grazie al dispositivo di asservimento, apre anche l'extrarapido più lontano (es. SSE B), così l'impianto è disalimentato.

La localizzazione si effettua frazionando in tratti la linea, aprendo il sezionatore a metà tratta tra A e B. Rialimentando una delle due tratte si verificherà la presenza del guasto. Quindi via via sezionando tratti sempre più brevi, si arriva ad individuare il tratto con l'avaria. Le distanze delle tratte più brevi in genere si aggirano intorno ai 20 km.

Nel secondo caso, cioè in assenza di corto circuito, il guasto può essere individuato dal personale di bordo di un treno in transito che segnala l'avaria agli agenti della manutenzione per l'intervento in loco. Oppure l'inconveniente si rivelerà al passaggio del treno nella zona del guasto con ad esempio archi elettrici all'urto dei pantografi contro parti dissestate dell'impianto TE.

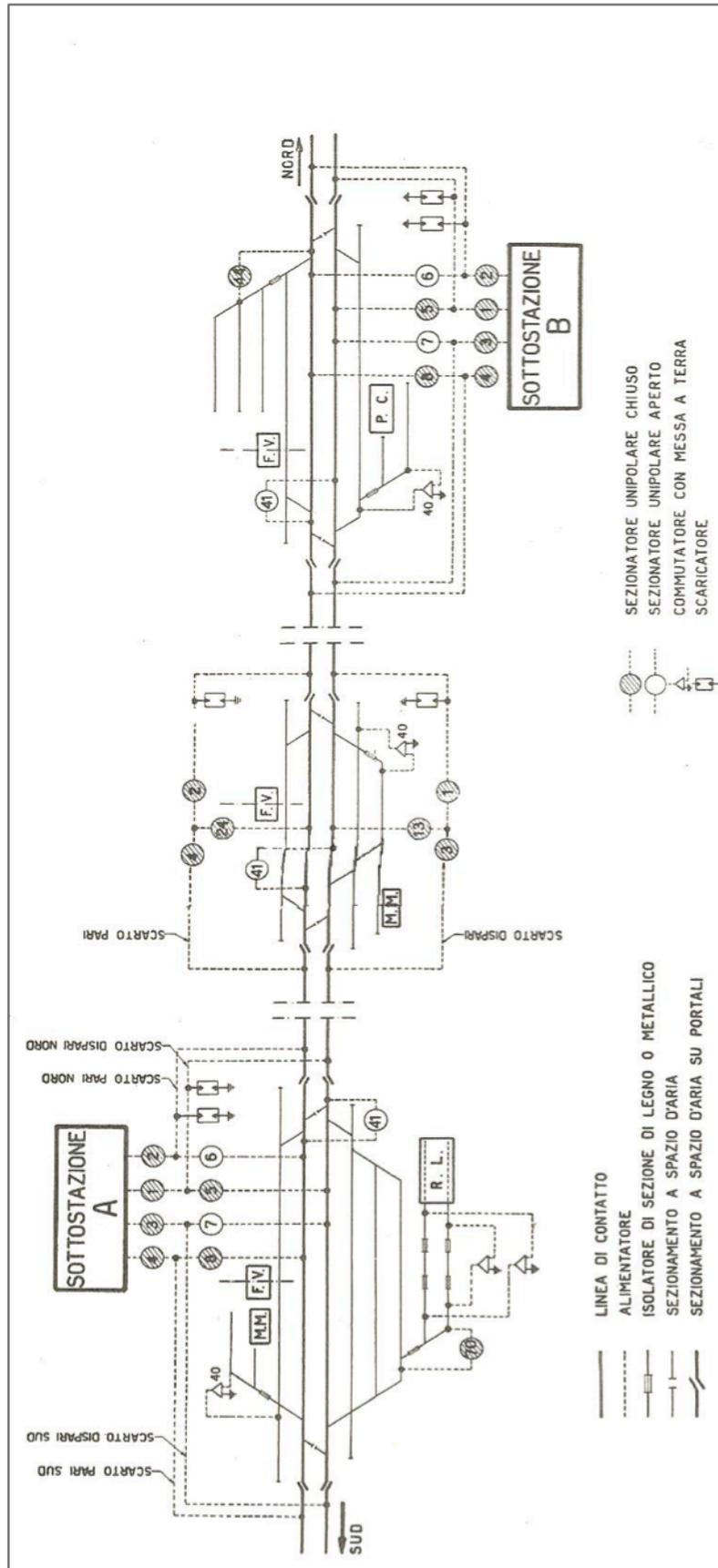


Fig. 4.1 - Schema generale dei circuiti elettrici in una tratta di linea a doppio binario [1].

4.3. Guasti – Esempi di avvisi di avaria in RFI

Si espongono alcuni guasti reali per capire, nel contesto teorico, come si evolve la realtà dell'avaria, con l'intervento da parte del personale ferroviario della manutenzione.

Il primo esempio di avviso di avaria si sviluppa sul guasto di un isolatore in corrispondenza di un palo TE lungo la linea:

Alle ore xx.xx intervento delle protezioni TE in SSE Cesenatico e Cabina TE di Rimini, risultava disalimentato il tratto di linea fra Cesenatico e Rimini. a seguito di selezione/ricerca guasto, l'operatore DOTE delimitava il tratto guasto fra le stazioni di Igea M. e Rimini.

Veniva chiesto al Personale di condotta (PdC) dei treni 30xx e 115xx di abbassare i pantografi in presa e ritentata la rialimentazione della linea di contatto con esito negativo.

Nel frattempo il PdC del treno 30xx fermo a Viserba si annuncia al dirigente movimento comunicandogli di aver notato delle sfiammate (linea lato Ravenna)

Organizzazione pronto intervento:

- Squadra TE con mezzo stradale da Rimini direttamente a Viserba*
- Squadre TE da Ravenna a Cesenatico per uscita in linea con autoscala.*

La causa del guasto veniva accertata in: folgorazione isolatore I621 porta fune nella sospensione TE al palo n°3 in uscita dalla stazione di Viserba lato Ravenna.

Il secondo avviso di avaria riguarda una problematica di allentamento di una parte di fissaggio dell'isolatore in ambito stazione:

Alle ore xx:xx intervento protezioni relative al binario pari fra SSE Parma ed SSE Fidenza, a seguito dei sezionamenti del DOTE risultava sezionata la stazione di Castelguelfo.

Allertati agenti della manutenzione (AM) TE sia per l'apertura del sezionatore 24 che per l'approntamento delle autoscale.

Dopo sezionamento zona rossa e doppia rossa il DOTE riusciva a rialimentare la zona Rossa ambito stazione di Castel Guelfo pertanto rimaneva disalimentata la sola zona Doppia Rossa (ingresso lato Parma). Considerato che in tratta erano fermi due convogli (21xx e 55xxx), veniva inviata l'autoscala da Fidenza.

A seguito visita veniva rilevata la rottura della fune portante relativa alla deviata 12B, alle ore xx:xx con autoscala giunta da Fidenza avevano inizio le operazioni di primo ripristino. Poi veniva rialimentata la zona Doppia Rossa senza limitazioni all'utilizzo dei binari. A seguito il treno 21xx entrava in stazione di Castel Guelfo.

Causa: allentamento del perno di fissaggio dell'isolatore I621 del punto fisso con caduta e contatto meccanico sulla fune della deviata e conseguente arco elettrico che provocava la rottura della fune medesima.

Il terzo avviso di avaria è avvenuto a causa dello spostamento di un tirante di poligonazione con il successivo contatto su parti a terra della struttura di sostegno in ambito stazione:

Alle ore xx.xx scatto protezioni pari in SSE Parma e Fidenza.

Allertati AM TE sia per l'apertura dei sezionatori (il telecomando DOTE in quel momento era fuori servizio) sia per l'approntamento delle autoscale.

A seguito dei sezionamenti effettuati dal DOTE, con l'ausilio dell'agente TE intervenuto sul posto, si individuava a terra la Zona Doppia Rossa in stazione di Castelguelfo.

Durante visita a piedi si rilevava al palo 80 che il tirantino di poligonazione, del filo fuori servizio del deviatore 06b, si era incastrato con il collarino di attacco del suo braccio di poligonazione mettendo francamente a terra la ldc.

Dopo aver disincastrato il tirantino di poligonazione si provvedeva a rialimentare la zona Doppia Rossa tramite chiusura del sez. 24 e a far partire il treno regionale 29xx arrivato nel frattempo in I° binario.

Per sicurezza veniva controllato a vista lo spazio d'aria lato Bologna della stazione di Castelguelfo e solo successivamente veniva richiuso il sezionatore aereo n° 4 e fatto entrare in stazione il treno merci 68xxx rimasto fermo al segnale di protezione. Successivamente, con interruzione n° 20xx, veniva montato un pendino rigido per scongiurare il ripetersi del guasto.

In tutti e tre gli avvisi di avaria si nota l'intervento tempestivo del DOTE che, tramite i sezionamenti individua la zona di guasto (come descritto nel Paragrafo 4.2). Poi avviene l'intervento da parte dei tecnici della manutenzione per individuare il punto di guasto, controllando accuratamente la zona indicata dal DOTE. Una volta che il guasto è stato localizzato, si interviene con l'utilizzo di strumentazione e ricambi, per la riparazione delle parti danneggiate.

Uno degli obiettivi della procedura di localizzazione del guasto proposta è ridurre i tempi di localizzazione, fin dal primo momento in cui avviene la ricerca del guasto da parte del DOTE. La miglioria consiste nel localizzare il punto di guasto invece che la zona, riducendo le tempistiche di risoluzione e soprattutto il disagio recato alla circolazione.

5. Metodo proposto per individuare il guasto franco a terra lungo le linee ferroviarie

Come anticipato, nel presente lavoro di tesi si propone una metodologia per l'identificazione distanziometrica del guasto nella linea di contatto alimentata in corrente continua, attraverso l'uso di misure di parametri elettrici di corrente e di tensione rilevati nelle sottostazioni elettriche lungo le linee ferroviarie interessate dal guasto. Tale metodo si basa sulla variazione della resistenza dell'anello di guasto in funzione della distanza del punto di guasto dalla SSE.

5.1. Aspetti teorici

Al fine di calcolare i parametri elettrici teorici relativi alla linea ferroviaria oggetto di prove, i parametri più importanti che bisogna considerare sono le resistenze della linea di contatto (r_{ldc}) e la resistenza del binario (r_b) che complessivamente forniscono il valore della resistenza unitaria al chilometro.

La resistenza della linea di contatto, con nota la sezione equivalente di rame (A_c) in mm^2 (corda più fili di contatto), è espressa così:

$$r_{ldc} = \rho \frac{l}{S}$$

conoscendo la resistività del rame a 0.00177Ω per mm^2/m , la resistenza r_{ldc} di un chilometro di condotta di contatto risulta:

$$r_{ldc} = \rho \frac{l}{S} = 0,0177 \cdot \frac{1000}{A_{ldc}} \cong 18/A_c \quad (\Omega/\text{Km})$$

alla temperatura normale.

Inoltre, per considerare l'usura media dei fili, si considera nei calcoli una riduzione della sezione del 10 o 15% (vedi par 5.2).

La resistenza di un chilometro di binario, cioè delle due rotaie in parallelo, è caratterizzata dalla massa lineare m (Kg/m) e dalla lunghezza dei singoli tronchi di rotaia che possono essere collegati tra loro con giunti o tramite saldature (lunga rotaia saldata).

Nel sistema ferroviario di solito si utilizza una rotaia continua, rispetto alla condizione di tronchi di rotaie uniti con dei giunti, per migliorare le condizioni di

marchia dei convogli e anche ai fini della riduzione della resistenza del circuito di trazione. Per questa trattazione, considerando la linea oggetto di prove, si considerano rotaie continue, trascurando gli effetti dei giunti. Si calcola la resistenza per unità di lunghezza con la formula:

$$r_b = \frac{7,85 \cdot \rho}{2 \cdot m \cdot 10^3} = \frac{0,75}{m} \quad (\Omega/\text{Km})$$

dove la densità dell'acciaio è $7,85 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ e la sua resistività è $\rho = 190 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$.

Nelle rotaie più diffuse (UNI 50 e UNI 60), con massa lineare $m = 50 \div 60 \text{ kg/m}$, risulta $r_b = 0,018 \div 0,015 \Omega/\text{Km}$.

L'effettiva resistenza del circuito di ritorno è anche influenzata dalla resistenza di isolamento delle rotaie rispetto al terreno, in quanto una parte di corrente attraversa il terreno stesso. Questo fenomeno dà luogo alle correnti disperse, chiamate anche "vaganti", che possono comportare problemi nelle vicinanze dei binari interessati, con effetti sulle strutture metalliche (tubazioni nelle zone vicine alle SSE e rotaie nelle zone più lontane dalle SSE) poiché ne provocano la corrosione per effetto elettrolitico. Uno dei provvedimenti utilizzato per ostacolare o limitare questo fenomeno è l'isolamento delle rotaie, che riduce la conduttanza di dispersione (S/km) delle rotaie.

L'isolamento è ottenuto con i sistemi di posa in vigore tuttora costituiti da traverse in cemento armato precompresso, ancoraggi rotaia/traversa con sotto-piastra isolante, chiamata "soletta", e boccola isolante.

Quindi, in generale, si ottiene così la resistenza r per unità di lunghezza, misurata in Ω/Km :

$$r = r_{1dc} + r_b$$

5.2. Simulazioni

Al fine di poter scegliere correttamente la strumentazione da utilizzare sul campo, in base all'analisi teorica considerata, sono state effettuate alcune simulazioni.

Partendo dai dati ferroviari di impianto teorici, è stato sviluppato un tabulato con la simulazione della corrente di prova a terra e la caduta di tensione dell'anello del circuito di guasto. Ciò è stato fatto alle stesse chilometriche della campagna sperimentale di prove (vedi Cap. 6). A tale fine sono stati presi i dati dei parametri ferroviari di linea con le stesse caratteristiche della linea in esame, utilizzando i valori di tensione e corrente teorici, come si vede dalla Figura 5.1.

Considerata la linea di contatto costituita da una sezione di 320 mm^2 si ottiene la resistenza $R_{ldc} = 0,075 \text{ } \Omega/\text{km}$, come si vede in Figura 5.2. La SSE ha al suo interno un trasformatore di gruppo da $132/2,710 \text{ kV}$ con potenza 4 MVA con resistenza interna $R_i = 0,20 \text{ } \Omega$. Inoltre la prova a terra, ha valori di corrente contenuti vista la presenza della resistenza limitatrice $R_l = 20 \text{ } \Omega$. Il conduttore che collega la SSE con la linea di contatto, chiamato feeder, ha resistenza $R_f = 0,003 \text{ } \Omega$. La resistenza di binario per chilometro è $R_{bin} = 0,014 \text{ } \Omega$. La tensione teorica di alimentazione è 3600 V in CC. La resistenza di guasto, per le condizioni di prova, è nulla ($R_g = 0 \text{ } \Omega$).

Quindi la corrente di prova a terra I_{pt} , fuori dalla SSE è di:

$$I_{pt} = \frac{V}{R_i + R_{pt} + R_f + R_{ldc} + R_{bin}} = 180 \text{ A}$$

Inoltre la caduta di tensione, fuori dalla SSE è di:

$$C_{dt} = I_{pt} \cdot (R_f + R_{ldc} + R_{bin}) \cong 0 \text{ V}$$

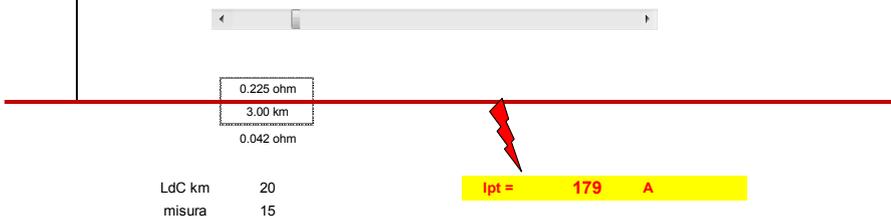
1 CALCOLO CORTO CIRCUITO IN REGIME PERMANENTE

 EROGAZIONE

Porto maggiore	
VERO	
0.20	3,600 V
179 A	II

RV 2,200	3,564 V
R PT	20 ohm

Feeder	300 mm ²
50 m	0.003 ohm



$$R_{km} + R_{bin} + R_f = 0.2281 \text{ Ohm}$$

$$I_{pt} = \frac{V}{R_i + R_{pt} + R_f + R_{km} + R_{bin}} = 178.588 \text{ A}$$

$$C_{dt} = I_{pt} \cdot (R_{km} + R_{bin}) = 40.7418676 \text{ V}$$

LdC km 20
misura 15

Ipt = 179 A

Fig. 5.1 - Simulazione del calcolo del cortocircuito a distanze prestabilite.

filo sagomato			
spessore	consumo	sezione	
11.80	0.00	97.80	
11.00	3.20	94.60	
10.00	10.53	87.27	
9.00	19.83	77.97	
8.50	25.02	72.78	
8.10	29.31	68.49	

diametro	sez. nom.	sez. teorica	spessore min
11.80	100	97.80	7.50
14.50	150	151.70	8.50

diametro nominale (mm)	11.80	14.50	14.50
Attenzione	8.30	9.90	10.50
Intervento a 30 gg	7.90	9.20	10.00
Difetto Rilevante	7.50	8.50	9.70

note	tiro 1500	tiro 1850
------	-----------	-----------

filo sagomato	11.80	mm
spessore misurato	10.00	mm
temperatura CC	50.0	°C
resistività a 20°	0.01777	ohm mm ² /m
coefficiente termico	0.00428	
sezione tondo	109.36	mm ²
sezione teorica	97.80	mm ²
sezione sagomatura	11.56	mm ²
usura	1.80	mm
h segmento	4.10	mm
coseno angolo	0.695	
angolo °	45.980	
seno angolo	0.719	
cateto segmento	4.24	mm
area triangolo	8.70	mm ²
area settore circolare	13.37	mm ²
sezione effettiva	87.26	mm ²
sezione consumata	10.54	mm ² 11%
resistività CC	0.0201	ohm mm ² /m
R km filo sagomato	0.230	ohm/km

formazione Ldc						
tipo filo sagomato	numero fili	fune portante	numero funi	sezione nominale	sezione effettiva	ohm/km
11.80	2	120	1	320	-8%	295
						0.0681

binario			
massa	rotale in //	campata	Cl 15...20%
60	2	120	20%
			ohm/km
			0.0139
			0.0167

resistenza unitaria LdC + binario			
ldc	320	+	armamento
			60
			R unitaria = 0.0820

resistenza complessiva linea + binario			
km linea	1.00	Resistenza linea =	0.0820
			0.0139
			0.0681

Fig. 5.2 - Valori teorici: Linea di contatto e Resistenze.

Il risultato della simulazione è riportato nella Tabella 5.3. Si nota una variazione della corrente da km a km di circa 0,60 A e una variazione della caduta di tensione da km a km di circa 13,05 V.

DATI TEORICI				
Distanza al guasto (m)	Corrente di prova a terra I_{pt} (A)	Caduta di tensione ΔV (V)	Variazione corrente (A) da km a km	Variazione tensione (V) da km a km
0+400	177,93	5,89	0,66	13,28
1+400	177,27	19,17	0,65	13,17
2+400	176,62	32,34	0,65	13,08
3+400	175,97	45,42	0,64	12,98
4+400	175,33	58,40	0,64	12,90
5+400	174,69	71,30	0,63	12,79
6+400	174,06	84,09	0,63	12,70
7+400	173,43	96,79	0,63	12,62
8+400	172,80	109,41	0,62	12,52
9+400	172,18	121,93	0,61	12,43
10+400	171,57	134,36	0,61	12,34
11+400	170,96	146,70		

Tab. 5.3 - Prove teoriche distanziometriche.

Come visibile nel grafico (Figura 5.4), si riscontra l'andamento lineare del valore della corrente di prova a terra, che decresce all'aumentare della distanza e viceversa per la caduta di tensione partendo da un valore di circa 0 per arrivare a una caduta, dopo la distanza di 11 chilometri, di 143,62 V.

Si nota che le variazioni di corrente al km sono molto piccole, inferiori all'1%, mentre le variazioni di tensione sono di almeno il 10%. Una volta confermato con i dati delle prove, ciò consentirebbe di focalizzarsi sulle misure di tensione solamente, richiedendo quindi una strumentazione di misura meno sensibile e meno accurata, e quindi più facilmente reperibile.

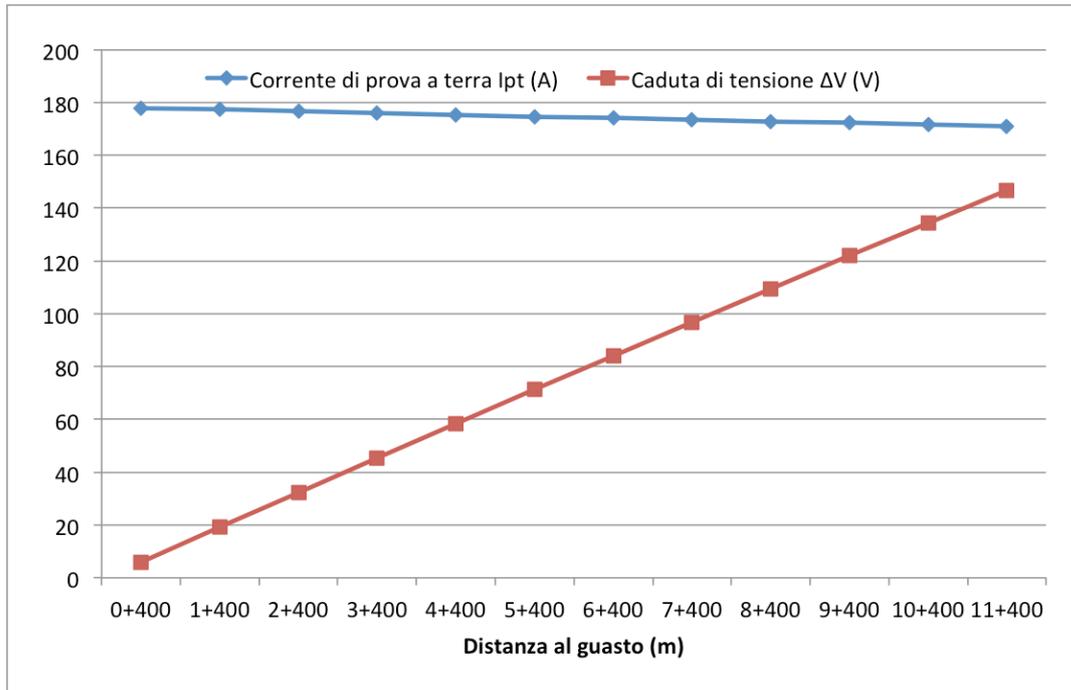


Fig. 5.4 - Caratteristica di tensione e corrente.

5.3. Analisi degli impianti esistenti

Nella prima parte dell'elaborato (paragrafi 1.3 ed 2.3), è stata descritta in dettaglio la sottostazione elettrica, dall'arrivo dell'alta tensione a 132 kV all'erogazione alla linea di contatto della tensione in corrente continua di 3 kV.

Si analizzerà ora la parte all'interno della cella di alimentazione dei 3 kV, come mostrano le Figure 5.5 e 5.6. È in questa cella che si garantiscono le funzioni di interruzione della corrente affidate all'interruttore extrarapido a seguito di avarie dovute a sovraccarico o corto circuito. La disalimentazione e il sezionamento della linea di contatto sono affidate al sezionatore a corna posto a valle dello scarto di alimentazione.

È in questa parte della SSE che saranno collegati gli strumenti di misura e dove, quindi, avverranno le misure dei segnali di tensione e corrente.

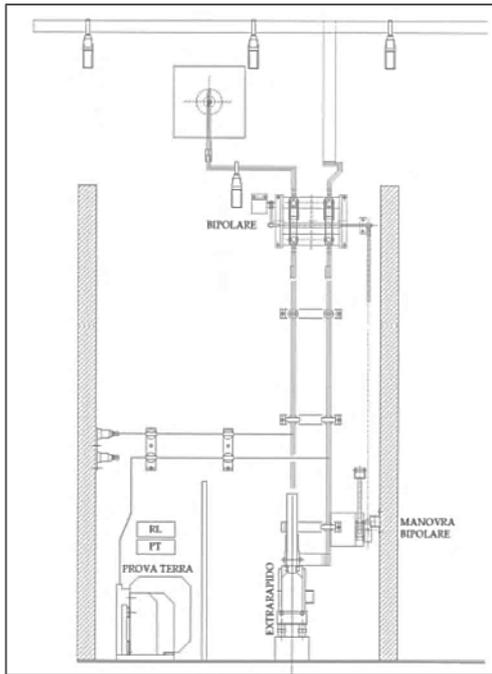


Fig. 5.5 - Cella alimentatore.

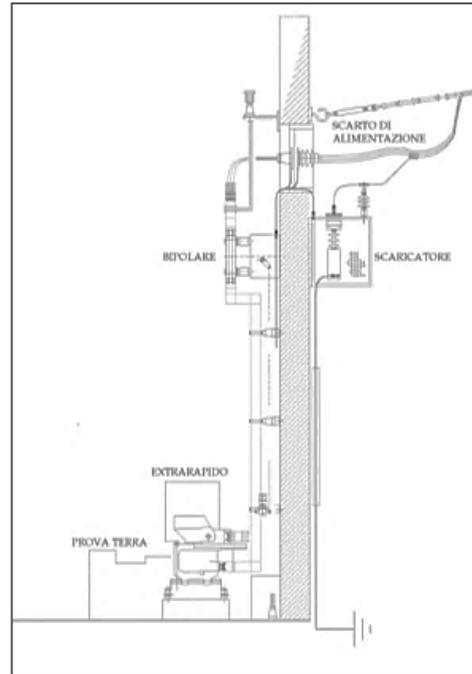


Fig. 5.6 - Scarto d'alimentazione.

5.4. Circuito di prova a terra

Il circuito di prova a terra serve a testare la linea dopo l'intervento dell'interruttore di protezione "J", extrarapido. Questo intervento avviene a causa di un passaggio di corrente superiore alla soglia di taratura, che implica un'interruzione dell'alimentazione alla linea di contatto.

Il circuito generale di prova a terra è visibile dalle Figure 5.7 e 5.8. La verifica della linea viene fatta tramite una resistenza di carico R_L da 20Ω . In caso di guasto, la resistenza provoca una caduta tale da ridurre la tensione ad un valore per cui il relè voltmetrico (RV) non si eccita. La mancata eccitazione impedisce l'inserzione dell'interruttore J, che alimenta la linea di contatto.

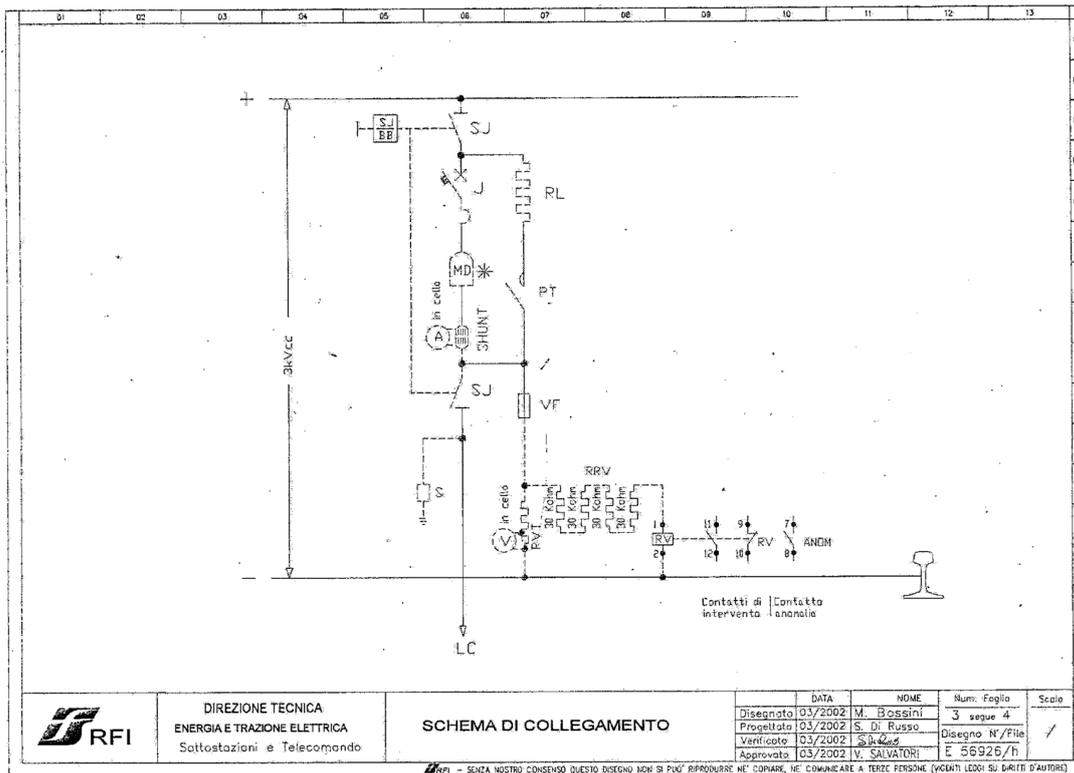


Fig. 5.7 - Schema di collegamento del circuito di prova a terra [13].

SICLA	DESCRIZIONE
J	INTERRUTTORE EXTRARAPIDO (ALIMENTATORE)
SJ	SEZIONATORE BIPOLARE
PT	CONTATTORE DI PROVA TERRA -TE 608 Ediz.1994
RL	RESISTENZA LIMITATRICE PER PROVA TERRA (20 Ohm) TE 60 Ediz.1992
A	AMPERMETRO (4000/A)
VF	FUSIBILE DI PROTEZIONE PARTITORE RESISTIVO RRV E RELE' RV
RRV	PARTITORE RESISTIVO PER RELE' RV (50 k Ohm - 75 W/4)
RV	RELE' DI "MIN-MAX TENSIONE A 3 kVcc" (STF TE 155) IMPOSTATO IN POSIZIONE "MAX" REGOLABILE
V	VOLTMETRO (0-4500 Vcc)
S	SCARICATORE DI PROTEZIONE ALIMENTATORE
AI	INTERR. BIP. MAGNETOTERMICO (6 A) UNICO PER OGNI COPPIA EXTR.-SEZ DI PRIMA FILA
A2	INTERR. BIP. MAGNETOTERMICO (2 A) PER SEGN. TUTTI EXTRA. E SEZ. A CORONA
AS	INTERR. BIP. MAGNETOTERMICO (2 A) PER SEGN. TUTTI EXTRA. E SEZ. A CORONA
AVD	SEGNALAZIONE - LOCALE ED IN TELECOMANDO ALLARME VOLTMETRICO BICECCITATO
RA-S	RELE' A CARTELLINO PER SEGNALAZIONE SCATTO STOTZ AS
SU	SILURERIA UNICA PER TUTTI GLI ALIMENTATORI 125Vcc
DV	DEVIATORE PER FACILITAZIONE SUGNERIA
RA	RELE' AUSILIARIO PER SEGNALAZIONE DI DISCORDANZA
RV1	PARTITORE RESISTIVO PER VOLTMETRO
SHUNT	SHUNT AMPEROMETRICO IN 4/4 A 7,69 mV
SR	SERRATURA ELETTRICA DI BLOCCO PORTELLA DI ACCESSO DELLA ALIMENT. SERRATURA CHIUSA A BOBINA BICECCITATA
PS	PULSANTE DI SLOCCO DELLA SERRATURA DI BLOCCO
CS	MANIPOLATORE PER COMANDO EXTRARAPIDO TIPO DA QUADRO CON MOSTRINA QUADRATA SEGNALAZIONE LUMINOSA DI BISSORDANZA A DOPPIO DEVIATORE
Lv	SEGNALAZIONE DI J APERTO LAMPADA VERDE Frontale cella
Lr	SEGNALAZIONE DI J CHIUSO LAMPADA ROSSA Frontale cella
P	CONTATTO DELLA PORTELLA DELLA EXTRARAPIDO APERTO A CELLA APERTA
SJ-BB	BOBINA DI BLOCCO MANOVRA DEL SEZIONATORE BIPOLARE SJ
TI	RELE' TEMPORIZZATO (1-10 s sec. ECCITAZIONE TIPO MURATORI
TE	RELE' TEMPORIZZATO (0,5-5 sec. ECCITAZIONE) - DISSECCAZIONE 300ms TIPO MURATORI
PC-PT	PULSANTE CON CONTATTO NC PER COMANDO CHIUSURA DI J PROVA TERRA AUTOM. INCDRF. NEL MANIPOL. CS
PA	PULSANTE CON CONTATTO NC PER COMANDO APERTURA DI J
D-D	TELERUTTORE DI ALIMENTAZIONE TIPO RL16/A
RVs	RELE' AUSILIARIO PER CHIUSURA EXTRARAPIDO (CAT. 795/298)
TER	CONTATTO TEMPORIZZATO (sulla resistenza prova terra)
TE-TI	COMUTATORE SCELTA SERVIZIO (spezione escluso-incluso)
TA	RELE' FINALE DEL TELECOM. comando apertura extrarap.
TC	RELE' FINALE DEL TELECOM. comando chiusura extrarap.
SA	SEGNALAZIONE DI EXTRAPAP. aperto al telecom.
SC	SEGNALAZIONE DI EXTRAPAP. chiuso al telecom.
IT	TARGA CON SEGNALAZIONE LUMINOSA "ALIMENTI IN SERVIZIO" Frontale cella
ES	TARGA CON SEGNALAZIONE LUMINOSA "ALIMENTI FUORI SERVIZIO" Frontale cella

LEGENDA SCHEMI
2-3-4

	DIREZIONE TECNICA ENERGIA E TRAZIONE ELETTRICA Sottostazioni e Telecomando	LEGENDA SCHEMI 2-3-4	DATA	NOME	Num. Foglio	Scala
			Disegnato 03/2002	M. Bossini	5 segue 6	
			Progettato 03/2002	S. Di Russo	Disegno N°/File	
			Verificato 03/2002	S. Di Russo	E 56926/h	
			Approvato 03/2002	V. SALVATORI		

RFI - SENZA NOSTRO CONSENSO QUESTO DISEGNO NON SI PUO' RIPRODURRE, NE' COPIARE, NE' COMUNICARE A TERZE PERSONE (VIGENTI LEGGI SU DIRITTI D'AUTORE)

Fig. 5.8 - Legenda schema di collegamento circuito di prova a terra [13].

In caso di guasto, il circuito di prova a terra si modifica, come esposto nelle Figure 5.9 e 5.10, con un partitore resistivo con R_g , resistenza di guasto, in parallelo con RV.

Nel caso in cui il guasto è presente, la resistenza R_g ha un valore molto basso. Questo comporta che il partitore R_L ed R_g genera un basso potenziale ai capi di RV, che non si eccita e, di conseguenza, non comanda la richiusura di J.

Se la linea è integra, R_g ha un valore molto elevato, per cui il partitore R_L ed R_g genera un elevato potenziale, tale da eccitare RV che dà il consenso alla richiusura di J.

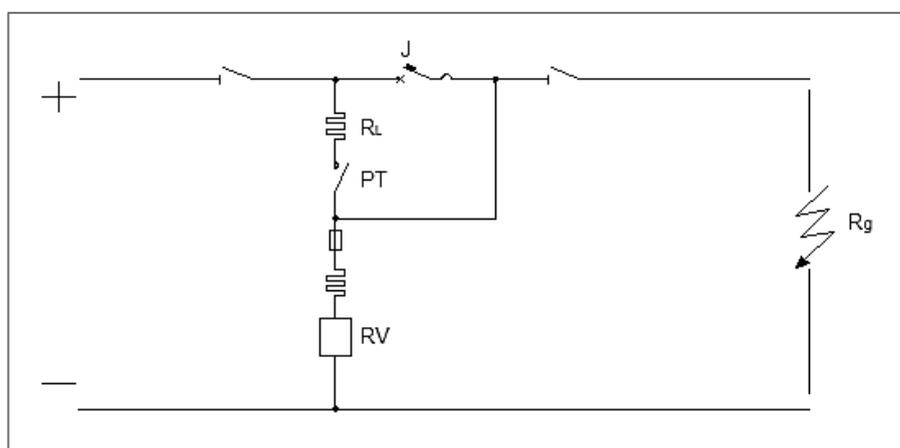


Fig. 5.9 – Schema circuitale di prova a terra.

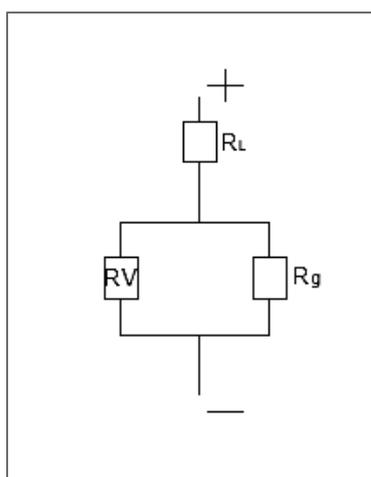


Fig. 5.10 – Schema circuitale del partitore resistivo.

5.5. Analisi dei circuiti di misura distanziometrica

Nel periodo antecedente alle prove sul campo sono stati sviluppati circuiti di misura nel laboratorio di ingegneria e, in parallelo, nel laboratorio delle ferrovie sono state fatte delle simulazioni con strumentazione in uso alle ferrovie stesse.

5.5.1. Strumenti di misura in corrente continua

Lo strumento di misura utilizzato per le prove nella sottostazione elettrica di Portomaggiore è prodotto dalla casa costruttrice Microelettrica Scientifica S.p.A. Come illustrato in Figura 5.11, la misurazione avviene tramite il Trasmettitore MHIT-TVI, con scheda tecnica in Figure 5.12a e 5.12b, collegato direttamente all'impianto principale della sottostazione tramite uno shunt (3000A/80mV), che acquisisce la grandezza in ingresso (in tensione e in corrente). Poi, tramite un collegamento in fibra ottica, si portano le misure acquisite al Ricevitore (MHIT-RI ed MHIT-RV), in modo da avere una misura in corrente e in tensione totalmente isolata e sicura.

Poi i ricevitori convertono il segnale da ottico ad elettrico e, tramite un collegamento in rame, il segnale elettrico viene portato all'Unità di Misura e Registrazione di grandezze elettriche in CC (U-MLC-M), con scheda tecnica alla Figura 5.13, che elabora e registra le misure e le salva su una memoria flash.

Dall'U-MLC-M, utilizzando la porta seriale RS 232, collegandosi a un personal computer si possono quindi estrarre, elaborare e plottare i dati misurati, utilizzando il software dedicato, fornito dalla Microelettrica Scientifica S.p.A., chiamato MCom2 (Programma per l'interfacciamento dei relè).

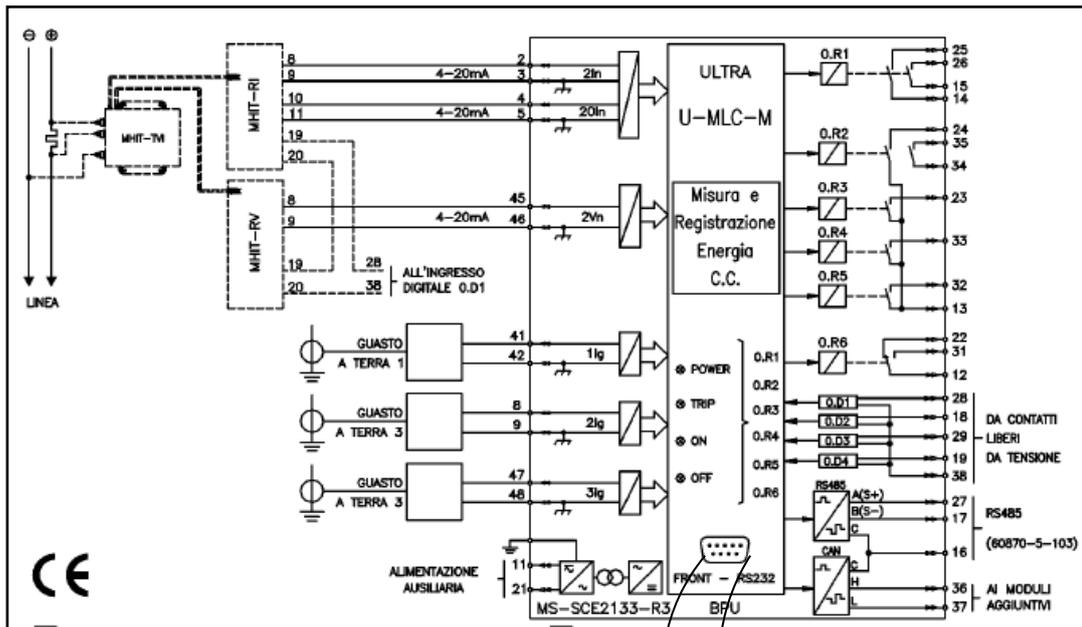


Fig. 5.11 – Schema a blocchi del complesso di misura.



MHIT-TVI - Direttamente collegabile alla linea ad alta tensione ed allo shunt (sul positivo).	
Tensione nominale	(1) 1000 Vcc; (2) 2000 Vcc; (3) 4000 Vcc (Altri valori a richiesta)
Impedenza ingresso	>22 MΩ
Dinamica della misura	(0 ± ±2)Vn
Corrente nominale	(1) 60 mVcc; (2) 80 mVcc; (3) 100 mVcc (Altri valori a richiesta)
Dinamica della misura	(0 ± ±10)In
Prestazioni complesso Trasmettitore / Ricevitore	
Precisione della misura	0.1% Vn / 0.05% F.S. per convertitore in tensione (2Vn) 0.05% In / 0.05% F.S. per convertitore in corrente (canali 0...1xIn) 0.5% In / 0.05% F.S. per convertitore in corrente (canali 0...10xIn)
Classe di precisione	0.2
Tempo di risposta	200 μsec.
Caratteristiche Tipiche	
Precisione ai valori di riferimento delle grandezze di influenza	Classe 0.2
Consumo massimo alimentazione ausiliaria TX	5 VA
Consumo massimo alimentazione ausiliaria RX	7 VA
Relè di Uscita	portata 6 A; Vn = 250 V potenza resistiva commutabile in C.A. = 1500W (400V max) chiusura= 30 A (picco) 0.5 sec. - interruzione = 0.3 A, 110 Vcc, L/R = 40 ms (100.000 op.) - Durata meccanica 10 ⁷ op.

Fig. 5.12a – Scheda tecnica del MHIT-TVI.

Trasmittitore di Tensione/Corrente - Esempio di Codifica : MHIT-TVI - 3-2-1			
MHIT-TVI	3	2	1
	Tensione Nominale	Corrente Nominale	Dinamica Ingresso
	1 = 1000 Vcc	1 = 60 mVcc	1 = 1x
	2 = 2000 Vcc	2 = 80 mVcc	2 = 10x(*)
	3 = 4000 Vcc	3 = 100 mVcc	
	4 = ____ Vcc (indicare valore)	4 = ____ mVcc (indicare valore)	

Ricevitore di Tensione - Esempio di Codifica : MHIT-RV - 1-2-1-3				
MHIT-RV	1	2	1	3
	Canale 1 (CH1)	Canale 2 (CH2)	Canale 3 (CH3)	Canale 4 (CH4)
	1 = (0 ÷ 20)mA(*)	1 = (0 ÷ 20)mA(*)	1 = (0 ÷ 20)mA	1 = (0 ÷ 20)mA
	2 = (4 ÷ 20)mA	2 = (4 ÷ 20)mA	2 = (4 ÷ 20)mA(*)	2 = (4 ÷ 20)mA(*)
	3 = (0 ÷ 10)mA			

Ricevitore di Corrente - Esempio di Codifica : MHIT-RI - 1-2-1-3-1					
MHIT-RI	1	2	1	3	1
	Canale 1 (CH1)	Canale 2 (CH2)	Canale 3 (CH3)	Canale 4 (CH4)	Dinamica Ingresso
	1 = (0 ÷ 20)mA(*)	1 = (0 ÷ 20)mA(*)	1 = (0 ÷ 20)mA	1 = (0 ÷ 20)mA	1 = 1x
	2 = (4 ÷ 20)mA	2 = (4 ÷ 20)mA	2 = (4 ÷ 20)mA(*)	2 = (4 ÷ 20)mA(*)	2 = 10x(*)
	3 = (0 ÷ 10)mA				

(*) Default

Fibra Ottica - Esempio di Codifica : MHIT-FO - 1	
MHIT-FO	1
	Fibra Ottica
	1 = 5 mt (standard)
	2 = _____ mt (indicare lunghezza)

Fig. 5.12b – Scheda tecnica del MHIT-RI-RV.

CARATTERISTICHE		
<input type="checkbox"/> Precisione ai valori di riferimento delle grandezze di influenza	1% In 2% + to (to=20÷30ms)	per misure (0.5%+0.5%f.s.) per tempi
<input type="checkbox"/> Ingresso di corrente	-20/4/+20 mA = -3/0/+2 In -20/4/+20 mA = -3/0/+20 In	
<input type="checkbox"/> Ingresso di tensione	-20/4/+20 mA = -3/0/+2 Un	
<input type="checkbox"/> Ingressi di corrente di terra	-20/4/+20 mA = -3/0/+2 Ign	
<input type="checkbox"/> Consumo medio alimentazione ausiliaria	< 10 VA	
<input type="checkbox"/> Relé di uscita	portata 5 A; Vn = 380 V potenza resistiva nominale commutabile in c.a. = 1100W (380V max); chiusura = 30 A (picco) per 0,5 sec. interruzione = 0,3 A, 110 Vcc; L/R = 40 ms (100.000 op.)	

PARAMETRI DI COMUNICAZIONE	
<input type="checkbox"/> Porta seriale sul retro	RS485 – 9600 to 38400 bps – 8,n,1 – Modbus RTU – IEC60870-5-103
<input type="checkbox"/> Porta seriale sul fronte	RS232 – 9600 to 57600 bps – 8,n,1 – Modbus RTU

Fig. 5.13 – Scheda tecnica del UMLC-M.

Per le finalità inerenti l'elaborato di tesi, il software MCom2 (Programma per l'interfacciamento dei relè) è stato sfruttato per impostare i parametri dello strumento di misura U-MLC-M.

A tale fine, prima di tutto occorre lanciare il programma MCom2 sul personal computer, poi, per poter colloquiare con l'U-MLC-M, bisogna connetterlo ad essa tramite la porta seriale RS 232 (oppure utilizzando la RS 485), e poi impostare i parametri e dare il comando connetti come mostrato in Figura 5.14.

Dopo essersi connessi, si vanno a modificare le impostazioni di scrittura dell'U-MLC-M. Ciò consente di cambiare le impostazioni predefinite dalla casa costruttrice, in modo da effettuare una scrittura continuativa delle letture delle misure di corrente e tensione dell'impianto a intervalli regolari al massimo di 0,5 secondi.

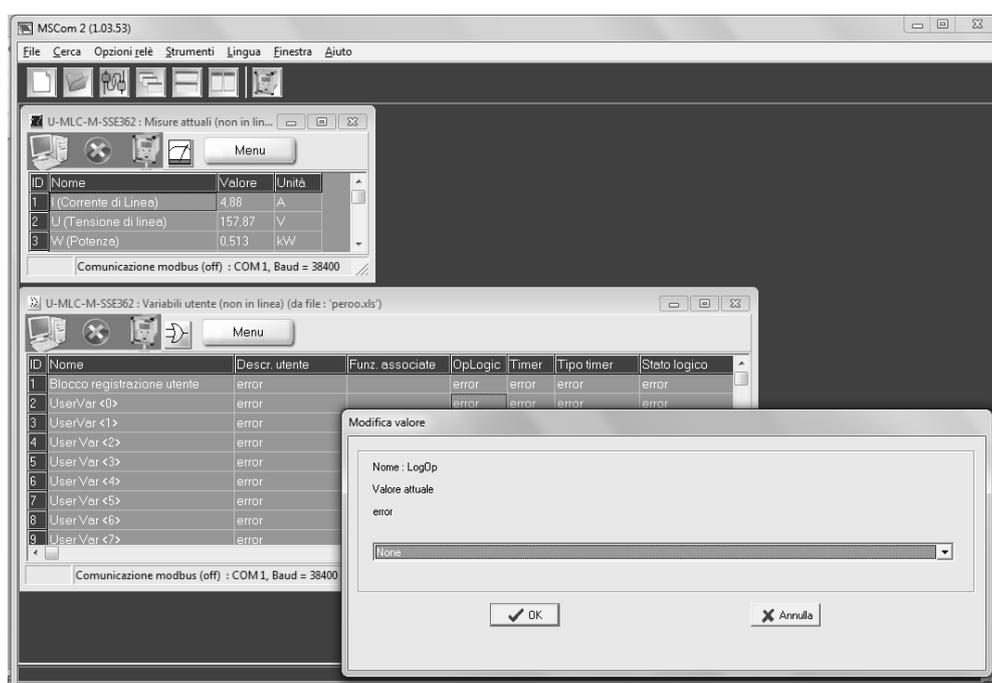


Fig. 5.14 – Screenshot delle impostazioni del software MCom2.

5.5.2. Prove in laboratorio e sul campo

La simulazione fisica di collegamento dei vari componenti dello strumento di misura descritto è stata effettuata presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Elettrica. Come illustrato in Figura 5.15, sono stati utilizzati

alimentatori in corrente continua e multimetri digitali e sono state simulate le condizioni di impianto, creando un partitore resistivo. È stato verificato il funzionamento degli strumenti per le finalità della tesi.

In campo, nella SSE di Portomaggiore, sono stati installati gli strumenti di misura sull'impianto in servizio, il quale eroga l'alimentazione alla linea di contatto per la trazione dei treni.

Seguendo la procedura descritta nei paragrafi precedenti, si arriva ad estrarre dalla memory card presente all'interno dell'U-MLC-M, i file di testo (in formato .txt) che contengono le letture delle misure di corrente e tensione dell'impianto rilevate ogni 0,5 secondi come illustra la Figura 5.16.

Tali dati possono essere elaborati, tramite un calcolatore e, con l'ausilio di programmi di calcolo (es., Excel), è possibile creare tabulati e grafici che facilitino l'interpretazione delle misure rilevate, Figura 5.17.



Fig. 5.15 – Simulazione fisica di collegamento dei vari componenti in laboratorio al Dipartimento di Ingegneria Elettrica.

Res	Station Name	Lin	Line Name	n	1	SN	xxxx-10-01-001-----
Cab					tag	UMLC-M-SSE362	----
2014/10/04 00:00:00:020	3858	V		29	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:00:050	3856	V		35	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:01:040	3858	V		31	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:01:550	3854	V		31	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:02:050	3855	V		30	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:02:560	3858	V		31	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:03:070	3860	V		28	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:03:580	3858	V		31	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:04:090	3855	V		32	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:04:600	3858	V		30	A	4751	kwh
2014/10/04 00:00:05:110	3855	V		29	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:05:620	3855	V		28	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:06:130	3855	V		32	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:06:640	3858	V		32	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:07:150	3854	V		30	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:07:660	3856	V		30	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:08:170	3856	V		32	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:08:680	3855	V		30	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:09:190	3852	V		32	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:09:700	3856	V		31	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:10:210	3855	V		30	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:10:720	3852	V		34	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:11:230	3854	V		32	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:11:740	3856	V		32	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:12:250	3854	V		29	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:12:760	3855	V		30	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:13:280	3855	V		31	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:13:790	3854	V		31	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:14:300	3850	V		33	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:14:810	3851	V		30	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:15:320	3850	V		38	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:15:830	3850	V		46	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:16:340	3848	V		53	A	4752	kwh
2014/10/04 00:00:16:850	3848	V		57	A	4752	kwh

Fig. 5.16 – Esempio di un file formato .txt presente nella flash card.

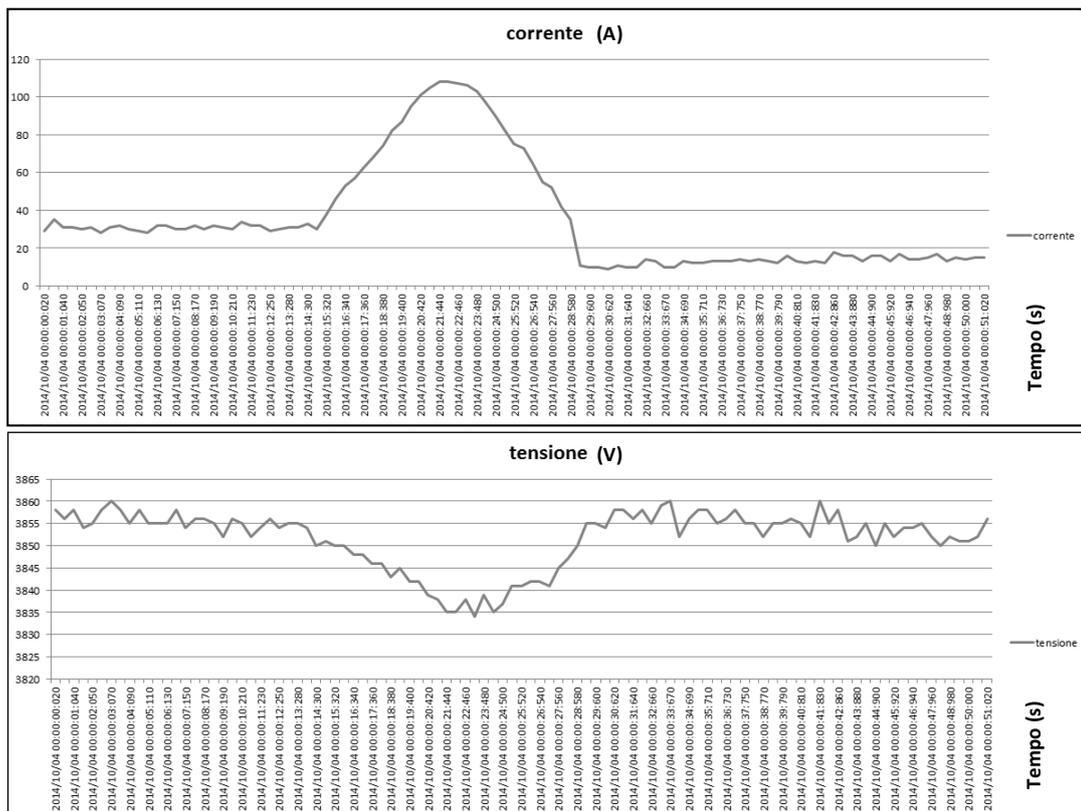


Fig. 5.17 – Grafici delle misure della Ldc in servizio nella SSE di Portomaggiore.

Il tempo utile per effettuare la misura è di massimo 1,5 secondi, per le modalità costruttive dell'impianto, in quanto il contattore di prova a terra rimane azionato per tale durata. Il campionamento dell'U-MLC-M è risultato troppo limitato. Le prestazioni del circuito sono state migliorate utilizzando un oscilloscopio differenziale. Inoltre, si è migliorato il segnale della corrente grazie a un rilevatore magnetico per corrente continua TO64-RFI.

5.5.3. Variazione del circuito di misura di prova

Dal collegamento di partenza è stato introdotto un rilevatore magnetico per corrente continua TO64-RFI, la cui scheda tecnica è riportata nelle Figure 5.18a e 5.18b, un trasduttore magnetico ad alta sensibilità ed, infine, un oscilloscopio differenziale. Come illustra la Figura 5.19, la modifica consiste nell'aggiunta dell'oscilloscopio in parallelo all'U-MLC-M. Dopo il MHIT-RI e MHIT-RV (ricevitori per misure di corrente e di tensione), è stata infatti aggiunta una resistenza da 120Ω, dalla quale viene preso il segnale, sia di tensione che di corrente, per analizzarlo con l'oscilloscopio differenziale.

F64 (I>): Primo elemento di massima corrente		
Abilitazione Funzione	: Abilitata/Disabilitata	
Soglia di intervento	: I> = (4 ÷ 100)%In	passo 1%In
Soglia istantanea	: ≤0.03s	
Ritardo di intervento	: tI> = (0.03 ÷ 60)s	passo 0.01s
Modo di funzionamento	: Bidirezionale / Positiva / Negativa	
F64 (I>>): Secondo elemento di massima corrente		
Abilitazione Funzione	: Abilitata/Disabilitata	
Soglia di intervento	: I> = (4 ÷ 100)%In	passo 1%In
Soglia istantanea	: ≤0.03s	
Ritardo di intervento	: tI> = (0.03 ÷ 60)s	passo 0.01s
Modo di funzionamento	: Bidirezionale / Positiva / Negativa	
F51BF : Mancata apertura interruttore		
Ritardo di intervento	: tBF = (0.05 ÷ 0.75)s	passo 0.01s

Caratteristiche Tipiche - N-DIN						
Precisione ai valori di riferimento delle grandezze di influenza	5%	della misura con massimo 1% del fondo scala				
	2% ±10ms	per tempi				
Ingresso	da sensore TO64					
Consumo medio alimentazione ausiliaria	<10VA					
Relè di Uscita	portata 6 A; Vn = 250 V					
	potenza resistiva commutabile = 1500VA (400V max)					
	chiusura= 30 A (picco) 0.5 sec. interruzione = 0.2 A, 110 Vcc,					
	L/R = 40 ms (100.000 op.)					
Relè in opzione al relè R1	4 ÷ 20mA (0 ÷ 12)mA					
Caratteristiche Tipiche - Sensore Toroidale						
Risposta in frequenza	0 ÷ 100 kHz					
Distanza massima tra trasduttore e relè	<10 metri (cavo schermato)					
Tipo	In (A) Corrente Nominale	(*) Ith (A) Massima corrente continuativa	Vn (Vcc) Tensione Nominale	Campo di Misura (A)	Tensione prova isolamento 1'@50Hz (kV)	Massima corrente Dinamica (kA per 1s)
TO64 - 100	100	1000	1000	4 ÷ 100	10	100

Fig. 5.18a – Scheda tecnica TO64-RFI.

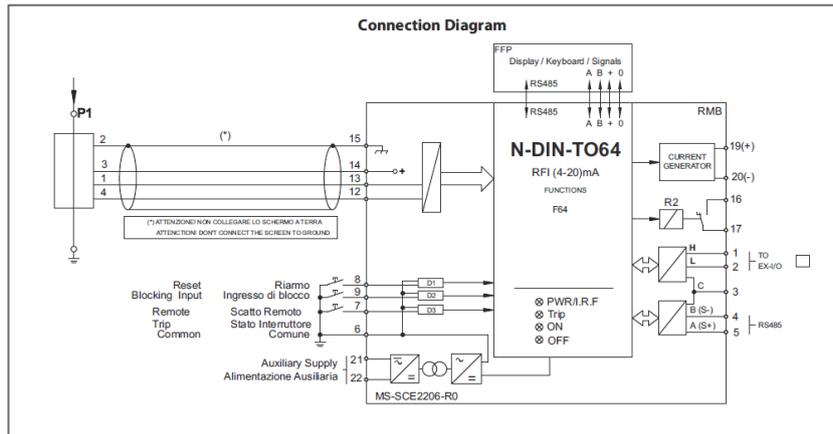


Fig. 5.18b – Scheda tecnica TO64-RFI.

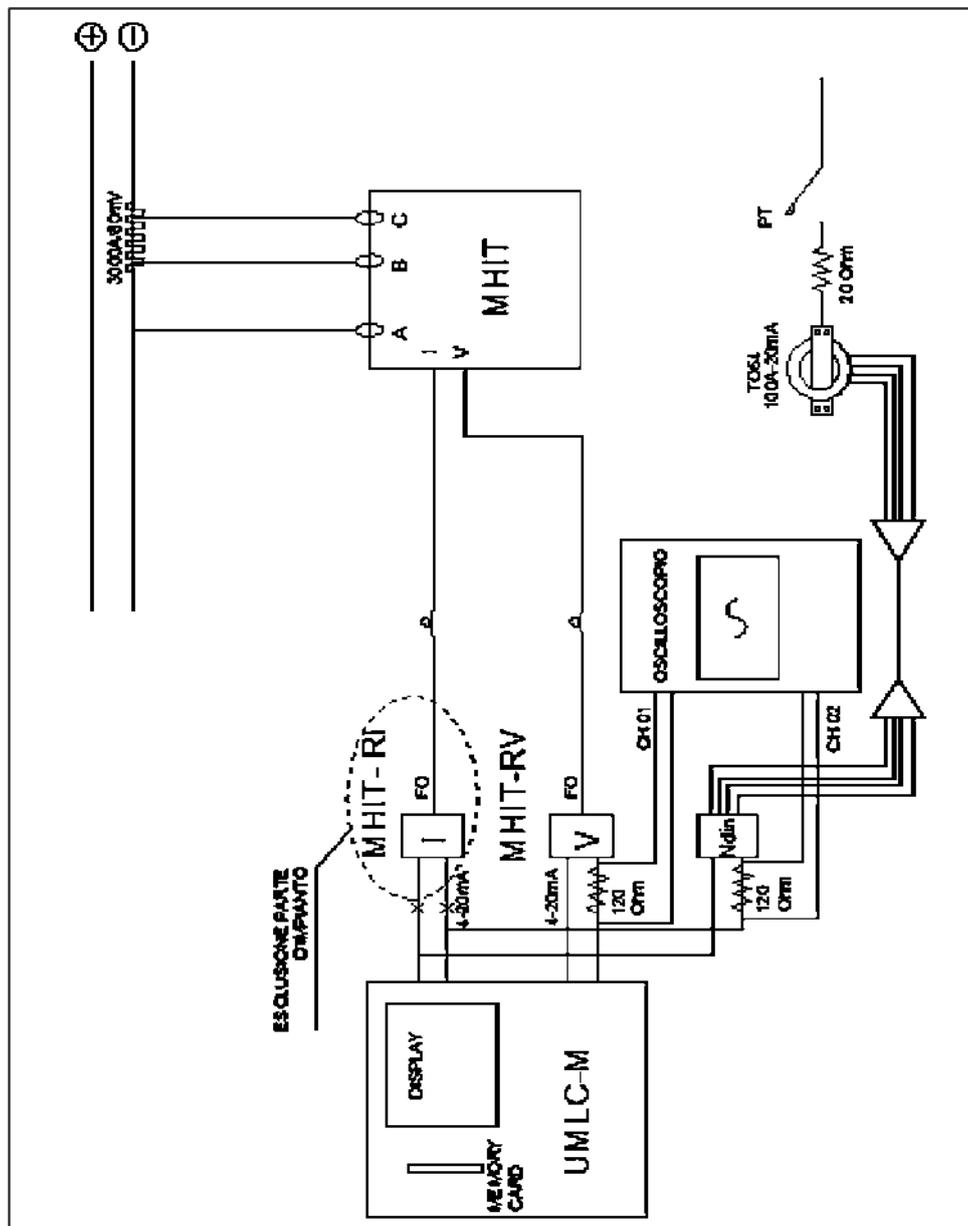


Fig. 5.19 – Schema di massima prove in laboratorio di RFI.

Per una simulazione di funzionamento del circuito di misura distanziometrico, sia della lettura dell'oscilloscopio, sia della funzionalità del TO64, è stato fatto un reale impulso di corrente, come illustrano le Figure 5.20 e 5.21, per simulare la corrente di prova a terra, cercando di ottenerne lo stesso ordine di grandezza.

Si è riscontrato che il TO64-RFI risponde positivamente con un segnale 4÷20 mA da convertire in misura reale e l'oscilloscopio lo rappresenta con valori sull'asse delle ascisse dell'ordine dei micro secondi.

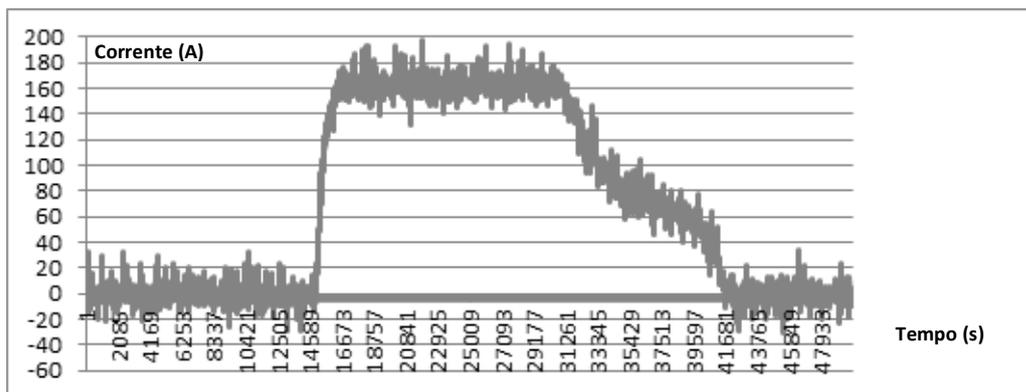


Fig. 5.20 – Impulso di corrente di prova.

Tempo	Corrente
0.3348	160.73
0.33482	160.52
0.33484	162.36
0.33486	161.54
0.33488	161.34
0.3349	158.90
0.33492	160.52
0.33494	158.08
0.33496	159.10
0.33498	162.97
0.335	161.54

Fig. 5.21 – Stralcio del tabulato dei tempi e del segnale di corrente convertito.

6. Prove sul campo

Dopo l'analisi di funzionamento del circuito di prova a terra vista nel Capitolo 5, si descrivono le modifiche per lo sviluppo del circuito di rilevazione di tensione e corrente. Circuito con lo scopo di valutare la localizzazione del punto di guasto della trazione elettrica, sfruttando misure elettriche dell'anello di guasto durante il test di prova a terra.

6.1. Parziali modifiche degli impianti in sottostazione

Le modifiche circuitali degli impianti in SSE a Portomaggiore sono state fatte con strumenti e materiali già presenti in RFI. La scelta ha facilitato lo sviluppo delle prove e potrà agevolare la futura applicazione del sistema distanziometrico negli impianti esistenti.

Il circuito è mostrato nella Figura 6.1. All'interno della cella alimentatore, è presente l'interruttore extrarapido J_1 . In parallelo si ha il contattore di prova a terra PT e la resistenza di carico limitatrice R_L , in serie è collegato il rilevatore magnetico TO64. Il trasmettitore MHIT-TVI è collegato direttamente all'impianto della sottostazione. Nell'area di misure ci sono due ricevitori N-DIN TO64 RFI che forniscono segnali da 4÷20 mA, dal TO64 RFI e dal MHIT-TVI, da inviare allo strumento Fluke 1760, atto a registrare la qualità della potenza, idoneo alla oscillografia (Figura 6.2). Tramite il collegamento ethernet, il Fluke 1760 invia i dati ad un personal computer per la loro visualizzazione e successiva registrazione. La parte destra del disegno schematizza la linea ferroviaria. Le saette rappresentano i punti della linea nei quali, attraverso un collegamento franco tra la linea di contatto e il conduttore negativo, si simulano i guasti. La simulazione del guasto è fatta con dispositivi di cortocircuito a resistenza quasi nulla.

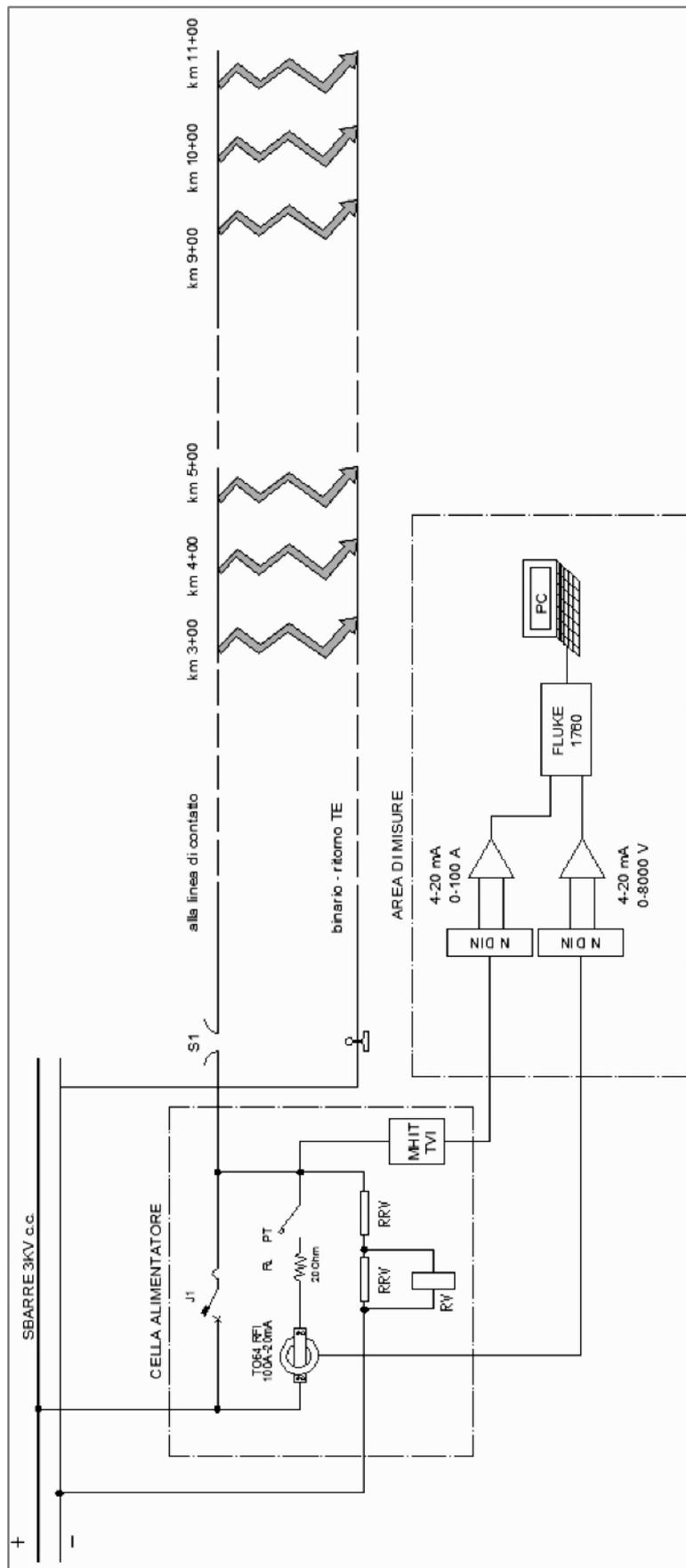


Fig. 6.1 - Schema delle prove distanziometriche.

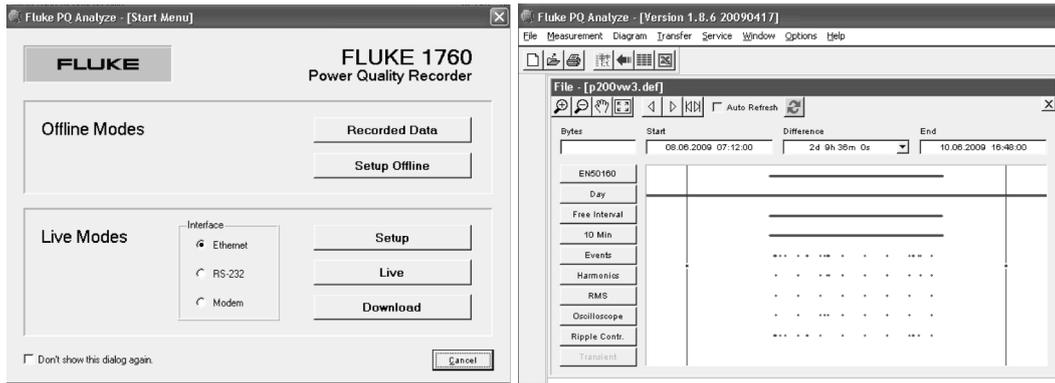


Fig. 6.2 – Strumento, Fluke 1760, per misure di tensione e corrente.

6.2. Svolgimento delle prove

Le prove si sono svolte lungo la linea ferroviaria da Ferrara a Ravenna, nel periodo della seconda metà di Novembre 2014, con la collaborazione del personale ferroviario TE ed SSE.

Le prove sono state organizzate in due squadre distinte: una posizionata all'interno della sottostazione di Portomaggiore, a presidio della strumentazione di misura, l'altra, dotata di simulatori di guasto, in movimento con carrello lungo la tratta in prova da Portomaggiore verso Ferrara.

6.2.1. Descrizione della procedura operativa

E' stata sviluppata una procedura di prova per ottimizzare le risorse a disposizione in termini di uomini, mezzi e tempo.

Ogni prova è articolata in due fasi:

1. Prova a terra:

Erogazione di corrente, da parte della SSE alla linea di contatto, limitata dalla R_L a un valore teorico di 180 A;

2. Prova a vuoto:

Alimentazione del circuito di prova a terra senza erogare corrente in linea, tenendo aperti i sezionatori di prima fila, con lo scopo di misurare la tensione a vuoto.

A seguire si descrivono i passi della procedura operativa:

- A circolazione dei treni terminata, all'interno della SSE:
 - a. Interruzione di binario di linea e stazione da Portomaggiore verso SSE di Ferrara con distanza di circa 22 km;
 - b. Disalimentazione della linea di contatto da Portomaggiore a Ferrara;
 - c. Presenza di agente della manutenzione (AM) della TE per la messa in opera del fioretto di corto circuito ai chilometri prestabiliti;
 - d. Presenza dell'AM della squadra delle SSE per intervento di supporto alle prove, nonché al presenziamento;
 - e. Presenza del coordinatore delle prove con personale ferroviario e universitario;

- Prima delle prove:
 - f. Dopo la conferma dell'interruzione di binario e di stazione;
 - g. Dopo la conferma visiva impiantistica dell'assenza di tensione;
 - h. Accesso alla cella dell'extrarapido;
 - i. Preparazione e controllo dell'impianto di prova a terra per l'utilizzo durante le prove, con verifiche degli strumenti di misura;
 - j. Strumenti di misura (Fluke 1760) portati in modalità di scrittura;
 - k. Misura della resistenza limitatrice.

Procedura da ripetere per ogni prova:

1. Far procedere AM TE al cippo chilometrico prestabilito;
2. Mettere il dispositivo di corto circuito alla chilometrica prestabilita;
3. Azionare in chiusura il PT;
4. Riaprirlo con automatismo dopo 0,5-1,5 secondi;
5. Aprire il sezionatore di prima fila S_1 e chiudere l'interruttore bipolare;
6. Lettura del valore di temperatura, con termo camera, della resistenza limitatrice R_L ;
7. Azionare il ventilatore sulla resistenza limitatrice per consentire il suo raffreddamento;
8. Controllare che si siano registrati i dati di corrente e tensione necessari per la localizzazione del guasto;
9. Sincerarsi se il valore misurato sia coerente con le aspettative teoriche.

Ripetizione dei punti appena descritti da 1 a 9 per le seguenti chilometriche dalla SSE di Portomaggiore:

- Km 3+400 (cippo km 20+000):
 - Svolte prove 1, 2, 3 e 4;
- Km 4+400 (cippo km 19+000):
 - Svolte prove 5,6 e 7;
- Km 5+400 (cippo km 18+000):
 - Svolte prove 8, 9 e 10;
- Km 9+400 (cippo km 14+000):
 - Svolte prove 11, 12 e 13;
- Km 10+400 (cippo km 13+000):
 - Svolte prove 14 e 15;
- Km 11+400 (cippo km 12+000):
 - Svolte prove 16 e 17.

Si riportano, per completezza, nelle Figure 6.2.1 e 6.2.2 stralci della procedura operativa di RFI dello sviluppo delle prove notturne.

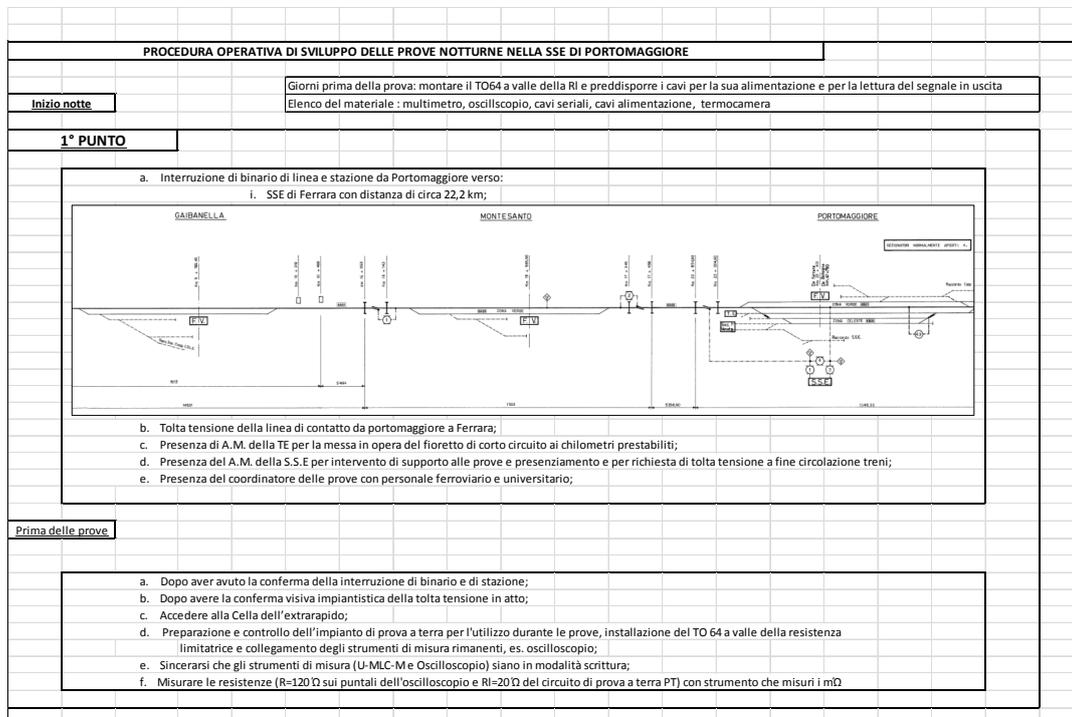


Fig. 6.2.1 - Stralcio procedura operativa di sviluppo delle prove notturne SSE di Portomaggiore.

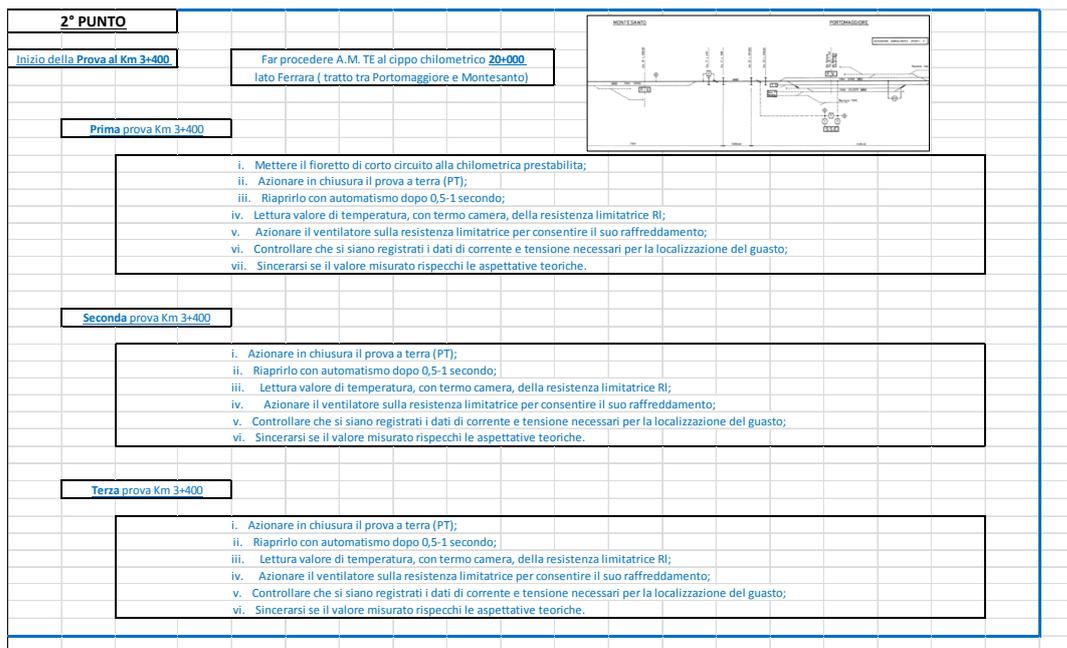


Fig. 6.2.2 - Stralcio procedura operativa di sviluppo delle prove notturne SSE di Portomaggiore.

6.3. Condizioni di prova

Perché il circuito di rilevazione distanziometrica del guasto sia disponibile per una applicazione su larga scala alle linee ferroviarie nazionali, esso deve essere il più possibile universale. Bisogna però tener presente che i test effettuati, descritti in questo elaborato, si riferiscono ad un caso di funzionamento specifico, sia a livello impiantistico, che a livello ambientale.

A livello impiantistico, ad esempio, i test sono stati svolti nelle condizioni d'impianto con linea ferroviaria in assenza di treni. A livello ambientale, invece, la temperatura rilevata lungo linea si stabilizzava intorno alla decina di gradi centigradi. Tali condizioni potrebbero variare, ad esempio il guasto nella linea di contatto potrebbe avvenire durante le ore diurne, quando è in atto la circolazione dei treni e con condizioni ambientali estremamente differenti, come temperature diurne estive.

Quindi, nel caso generico di guasto, i parametri elettrici e fisici della linea potrebbero assumere valori che in parte si differenziano dalle condizioni di prova trattate in questo elaborato di tesi.

Nelle condizioni di prova, rispetto alle condizioni di esercizio, si ricade nel caso di linea "fredda". Infatti, non essendoci la circolazione treni in atto, non ci sono carichi che impongono una circolazione di corrente nei conduttori. Si ipotizza che, in presenza di circolazione dei treni, il valore di resistenza della linea di contatto possa subire delle variazioni. La circolazione dei treni comporta valori di corrente elevati (ad esempio 1000 A o maggiori). Nel caso di un guasto reale, i valori di corrente crescono con il superamento delle tarature delle protezioni, che intervengono disalimentando la linea. Queste condizioni fanno aumentare la temperatura lungo la linea di contatto, ed in gergo si parla di linea "calda".

Inoltre c'è da valutare l'incognita dell'usura del filo. Anche questo parametro, infatti, va ad incidere, in parte, sul valore di resistenza della linea di contatto per chilometro. Di solito a livello teorico si considera sempre un 15% di usura, come citano i manuali ferroviari [5].

Un ulteriore fattore da non sottovalutare sono le condizioni dei binari, che possono influenzare il valore di resistenza verso terra (o conduttanza) che potrebbe variare a seconda della composizione del sotto suolo e degli impianti di sicurezza per il distanziamento dei treni.

Anche la temperatura esterna potrebbe influire sui parametri elettrici della linea.

Tutte queste variabili potrebbero influire sui dati raccolti durante le prove. Si deve quindi tenere presente che i risultati ottenuti si applicano alle specifiche condizioni di prova descritte, mentre rimane da verificare se siano confermati in altre condizioni.

Oltre alle condizioni già esposte, anche la resistenza limitatrice (R_L) può contribuire a variazioni delle misure rilevate durante la prova. Infatti, facendo ripetute prove a terra, la R_L raggiunge valori elevati di temperatura in poco tempo.

La resistenza limitatrice della SSE di Portomaggiore è della casa costruttrice Microelettrica Scientifica e le sue caratteristiche sono esposte nella Figura 6.3.

<u>Costruttore:</u>		MICROELETTRICA SCIENTIFICA SpA
<u>Materiali:</u>	Resistenza	: acciaio Fe-Cr-Al
	Telaio	: lamiera 3mm
	Isolatori	: ceramici
	Grado di protezione	: IP00
<u>Caratteristiche:</u>	Tensione nominale	: 6 kV
	Classe d'isolamento	: 7,2 kV
	Tensione di prova a 50Hz x 1'	: 22 kV
	Valore ohmico (a 20°C)	: 20 Ω \pm 5%
	Corrente transitoria	: 300 A per 5 sec.
	Corrente transitoria	: 500 A per 50 ms.
<u>Disegno dimensionale:</u>		: DR 46258
Peso (valore appross.)	: 130 kg.	
Larghezza	: 900 mm	
Profondità	: 490 mm	
Altezza	: 850 mm	

Fig. 6.3 – Scheda tecnica della resistenza limitatrice.

Si è misurato il valore iniziale della $R_L = 19.73 \Omega$, ad una temperatura del materiale resistivo di 18 °C. Vedendo le caratteristiche della scheda tecnica, si nota che tale valore rientra tra i valori della casa costruttrice.

Durante ogni prova si è misurata la temperatura della resistenza limitatrice mediante una termocamera. Si è cercato di mantenere il valore di temperatura di inizio per ogni prova a 28÷29°C, grazie ad un sistema di raffreddamento ventilante reperito appositamente, per ridurre i tempi di attesa tra un test e l'altro. Mantenendo valori standard di temperatura si riesce a apprezzare le misure ad errori contenuti.

Si riporta, come esempio, la Figura 6.4, che mostra la rilevazione termografica dopo la prova numero 13 al Km 14+000 (9+400 dalla SSE). Si nota che la temperatura raggiunge i 45,6 °C dopo il passaggio di 179,8 A di corrente per una durata di 1,13 s.

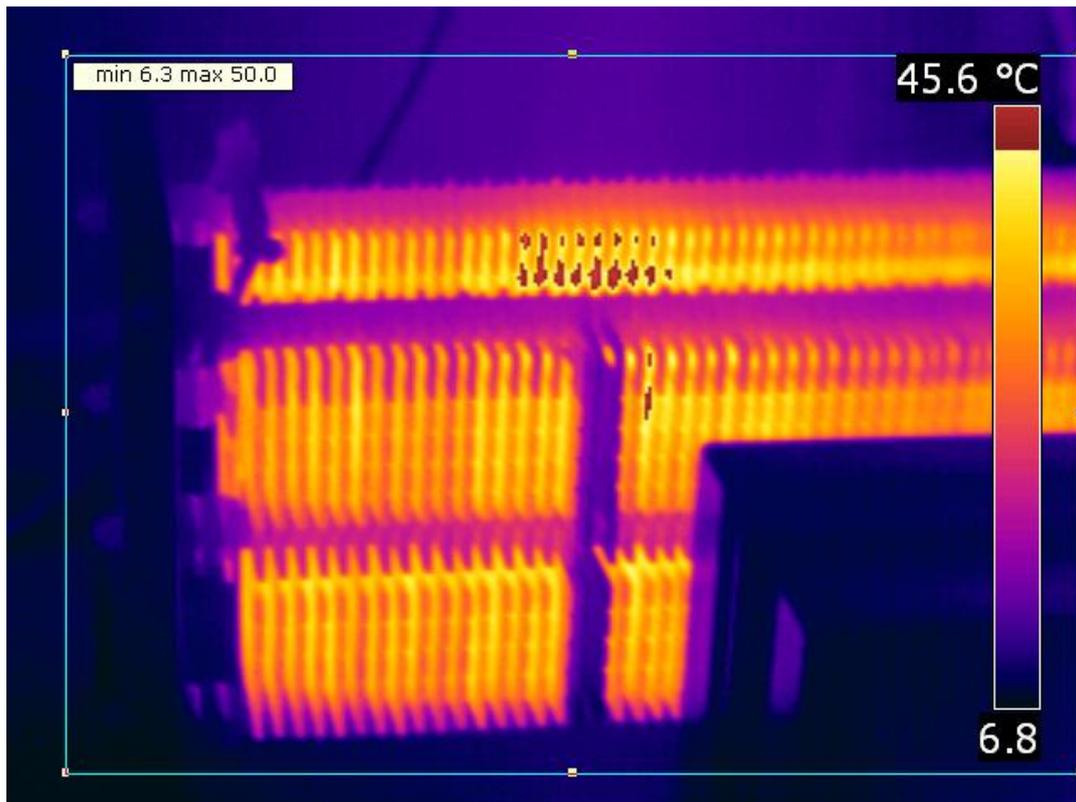


Fig. 6.3 - Rilevazione termografica dopo la prova numero 13 al Km 14+000.

6.4. Elaborazioni dati e misure

Tutte le prove sono state registrate su file tramite lo strumento di misura oscillografico, Fluke 1760, con tempi di campionamento dell'ordine di 0,1 ms.

In prima valutazione si è riscontrato un segnale con molte oscillazioni, sia in tensione che in corrente, come si può notare nelle Figura 6.4a e 6.4b, che riportano i dati riferiti alla prima prova al km 20+000, a 3+400 dalla SSE di Portomaggiore.

Questo disturbo è attribuibile alla presenza delle raddrizzatore esafase di gruppo, al filtro di cresta e al filtro aperiodico (descritti dei paragrafi 2.2 e 2.3), dimensionati nelle condizioni di esercizio con la presenza di carichi induttivi, i treni, di una certa importanza sotto l'aspetto dell'assorbimento di potenza.

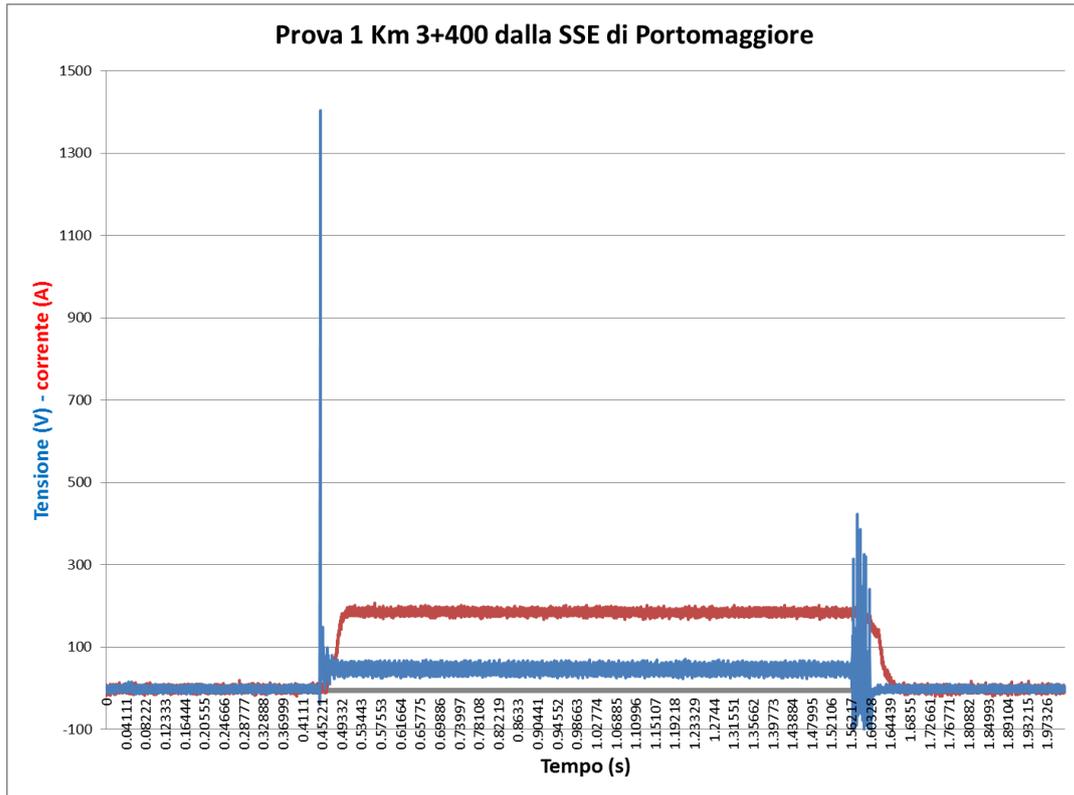


Fig. 6.4a - Prima prova al Km 3+400 dalla SSE di Portomaggiore.

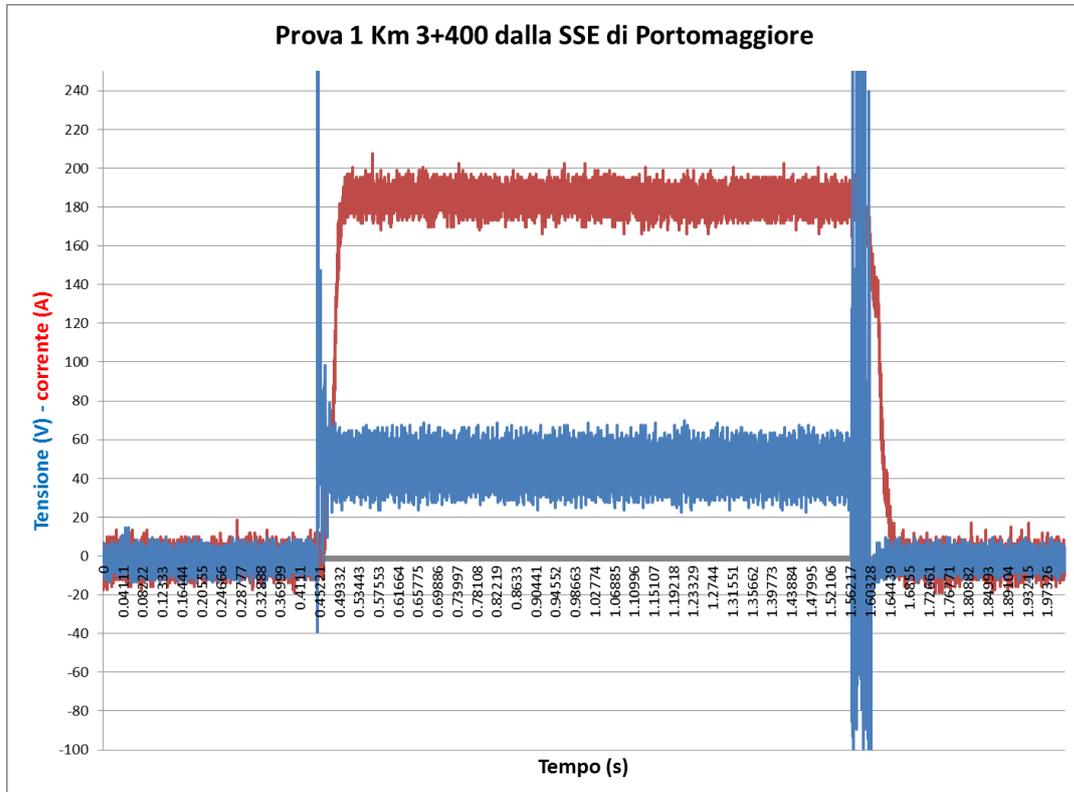


Fig. 6.4b - Prima prova al Km 3+400 dalla SSE di Portomaggiore con focalizzazione dello zoom nei valori di interesse.

I due segnali di tensione e corrente sono molto disturbati e ciò incicia la ricerca della correlazione con la distanza al guasto. Si è quindi deciso di costruire un circuito che filtrasse il disturbo, filtro del sesto ordine, come mostra la figura 6.5, a frequenza da 150 Hz, utilizzando il programma Lab View.

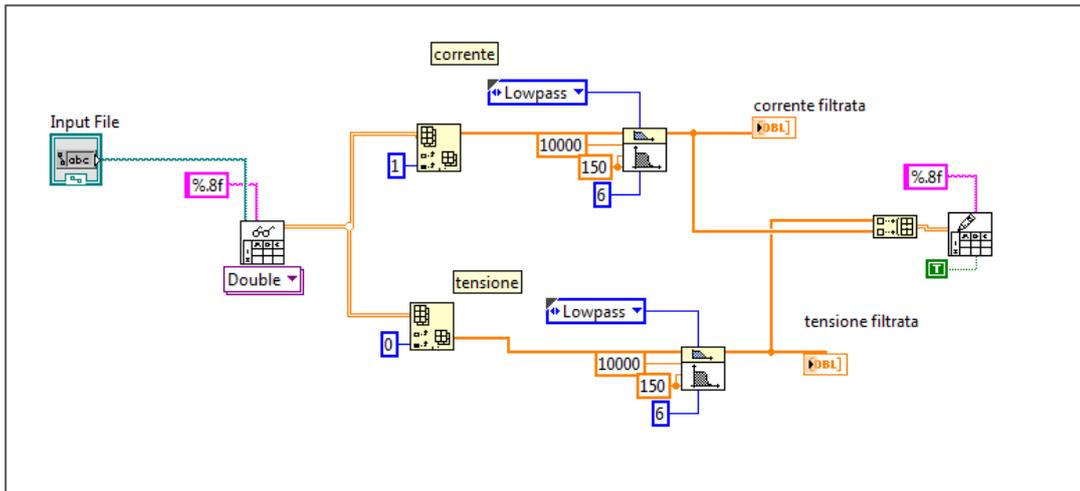


Fig. 6.5 - Circuito sviluppato con il software Lab View.

Il segnale filtrato è visibile nelle Figure 6.6a, 6.6b e 6.6c. Rispetto al segnale non filtrato (Figure 6.4a e 6.4b), l'impulso è più pulito ed ha meno disturbi.

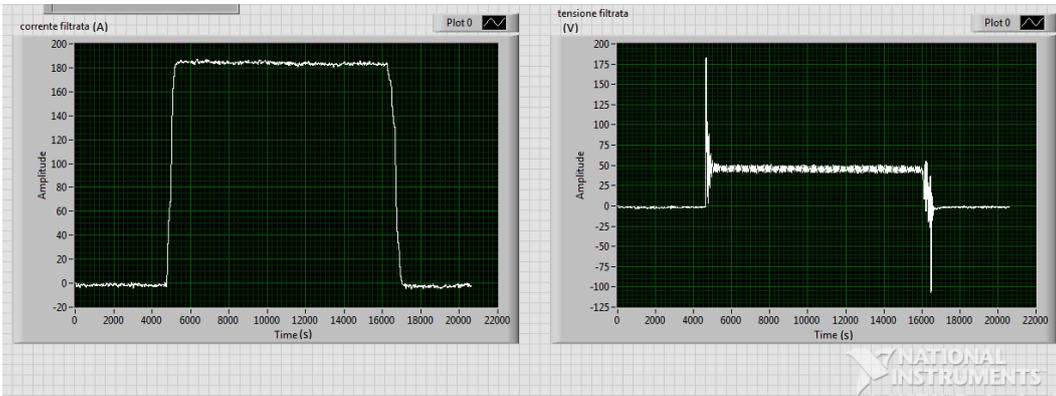


Fig. 6.6a - Plot Prima prova al Km 3+400 dalla SSE in Lab View.

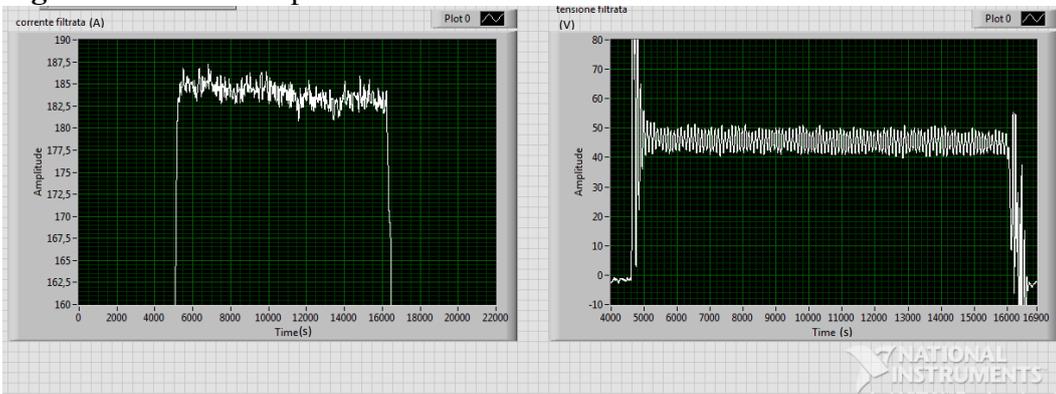


Fig. 6.6b - Zoom del plot Prima prova al Km 3+400 dalla SSE in Lab View.

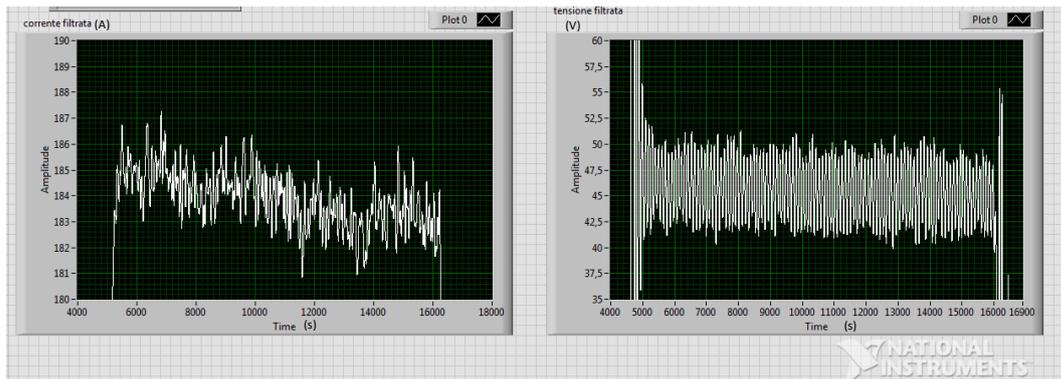


Fig. 6.6c - Zoom del plot Prima prova al Km 3+400 dalla SSE in Lab View.

Dopo aver ottenuto un risultato positivo con l'utilizzo del filtro, con il programma Lab View, si è proceduto con la sua applicazione a tutte le 17 misurazioni.

6.5. Risultati ottenuti

Al fine di eliminare il transitorio dell'impulso di tensione ottenuto con la prova a terra e per avere un valore di tensione medio, per ognuna delle 17 prove sono stati considerati i valori di tensione dell'intervallo di 500 ms centrale dell'impulso e ne è stata calcolata la media. Infine, è stata calcolato il valore medio di tensione ad ogni chilometrica considerata, come riepilogato nella Tabella 6.7.

Si noti che, durante la campagna di prove, è stato scelto di posizionare il dispositivo di cortocircuito ad ogni cippo chilometrico, per agevolare l'esecuzione delle prove in condizioni con il collocamento del fioretto di cortocircuito nel punto di guasto esatto deciso in precedenza. Ad esempio la prima prova è fatta al cippo km 20+000. Quindi la distanza dalla sottostazione alla prima prova è di km 3+397, visto che la sottostazione elettrica è al km 23+397 ed è il punto di partenza delle prove. Le altre distanze sono a multipli del chilometro.

Inoltre, rispetto ai dati della Tabella 6.7, si può fare una considerazione relativa ai valori misurati. La variazione di tensione di prova dal km 10+400 al km 11+400 è di circa 9 V, mentre le altre variazioni da un chilometro all'altro hanno valori di circa 12 V. Questo risultato può essere attribuito al valore di temperatura elevato della resistenza limitatrice, intorno ai 50°C all'atto della prova. Quindi, ipotizzando la resistenza completamente in rame, la sua variazione è dello 0.4% per ogni °C. Si

riscontra un delta di temperatura, rispetto alle altre prove, di 20°C che influisce sul valore di R_L di 1,58 Ω .

Nr Prova	Chilometrica dalla SSE	Cippo chilometrico	Tensione (V)	
			Val Medio per prova	Val Medio prove
1	Km 3+400	Km 20+000	45.58	45.23
2	Km 3+400	Km 20+000	44.64	
3	Km 3+400	Km 20+000	45.54	
4	Km 3+400	Km 20+000	45.16	
5	Km 4+400	Km 19+000	57.61	58.06
6	Km 4+400	Km 19+000	58.59	
7	Km 4+400	Km 19+000	57.99	
8	Km 5+400	Km 18+000	68.52	69.20
9	Km 5+400	Km 18+000	69.52	
10	Km 5+400	Km 18+000	69.55	
11	Km 9+400	Km 14+000	113.48	112.33
12	Km 9+400	Km 14+000	111.13	
13	Km 9+400	Km 14+000	112.39	
14	Km 10+400	Km 13+000	126.03	126.05
15	Km 10+400	Km 13+000	126.08	
16	Km 11+400	Km 12+000	135.28	134.82
17	Km 11+400	Km 12+000	134.36	

Tab. 6.7 - Misura finale delle 17 prove per ogni chilometrica di interesse

Prendendo il valore medio di tensione ad ogni chilometrica, si è creato un grafico (Figura 6.8) nel quale si vede l'andamento lineare dei dati raccolti, che come era prevedibile, si allineano lungo una linea retta.

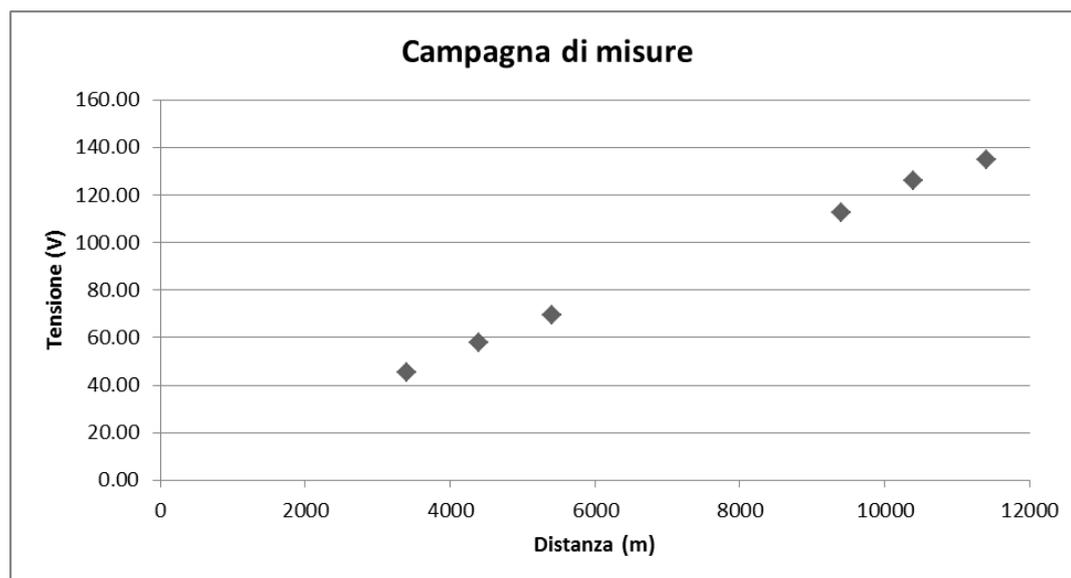


Fig. 6.8 - Grafico campagna misure di tensione per ogni chilometrica.

Sui sei valori così ottenuti è stato applicato il metodo dei minimi quadrati, questi sono stati oggetto di una regressione lineare semplice, ottenendo così i parametri di un'equazione:

$$D_G = a + b \cdot \Delta V = -726.37 + 89.35 \cdot \Delta V$$

che consente di calcolare la distanza attesa in funzione del valore di tensione ottenuto. Dove a è l'intercetta e b, la pendenza, fornisce l'informazione di retta crescente con una correlazione positiva tra a e b. Il modello ottenuto (Figura 6.9) ha un coefficiente $R^2 = 0,9992$.

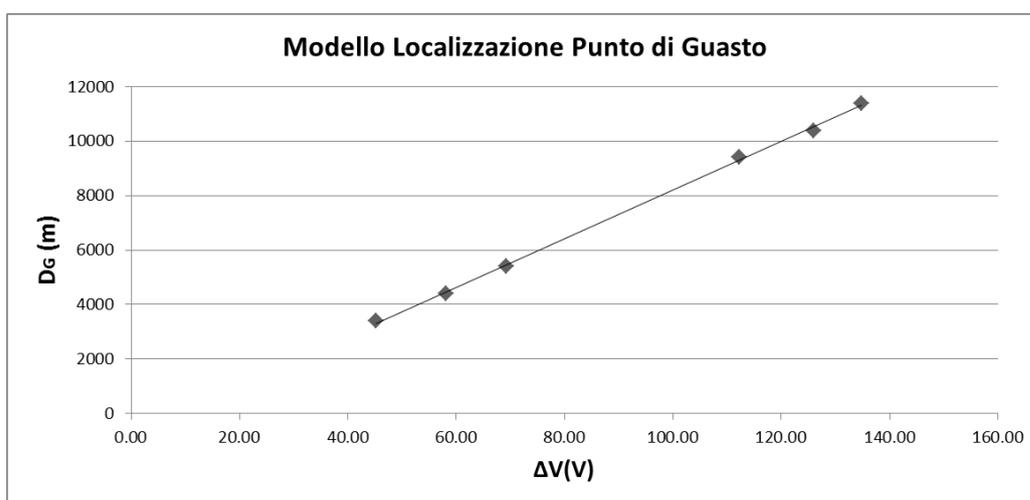


Fig. 6.9 - Modello di localizzazione del punto di guasto.

Infine, è stato fatto un confronto di dati del modello con i dati risultanti dalle misure effettuate in campo (Tabella 6.10). Per ogni valore di tensione misurato è stata calcolata la distanza del guasto prevista dal modello. La differenza tra la previsione del modello e l'effettiva distanza di guasto varia tra 57 e 136 m e lo scostamento medio è di 85 m. Quindi, applicando questo modello, la misura della tensione consente di localizzare il guasto con una notevole precisione.

Tensione misurata (V)	Distanza effettiva (m)	Distanza modello (m)	Differenza (m)
45,23	3400	3315	85
58,06	4400	4462	62
69,20	5400	5457	57
112,33	9400	9311	89
126,05	10400	10536	136
134,82	11400	11320	80

Tab. 6.10 - Confronto dati modello e dati misurati.

Come già studiato dalla simulazione (si veda il Par. 5.2), si conferma l'esclusione del segnale di corrente per lo scopo della localizzazione a causa della variazione dello 0,6% da un km all'altro. Però può però evidenziare una considerazione colta durante le prove. Il valore teorico, ricavato durante la simulazione, della corrente di prova a terra, I_{pt} , al km 3+400, è di circa 176 A, mentre il valore reale, misurato, è di circa 181 A. Se ne deduce quindi che il valore di tensione di alimentazione della SSE è ben maggiore di 3600 V.

Ciò è stato confermato dalle prove a vuoto, facendo le letture della tensione di alimentazione. La Figura 6.11 mostra che il valore si avvicina ai 4000 V. Analizzando la misura, purificata dalle rampe di salita e discesa d'impulso, è stato eseguito un valore medio di tensione di tutte le prove a vuoto e si è riscontrato la misura finale della tensione di alimentazione di 3982 V. La SSE non stava erogando energia in quel momento, per questo motivo è ragionevole che la tensione misurata sia più elevata di quella teorica, essendo il valore maggiorato del 10% circa.

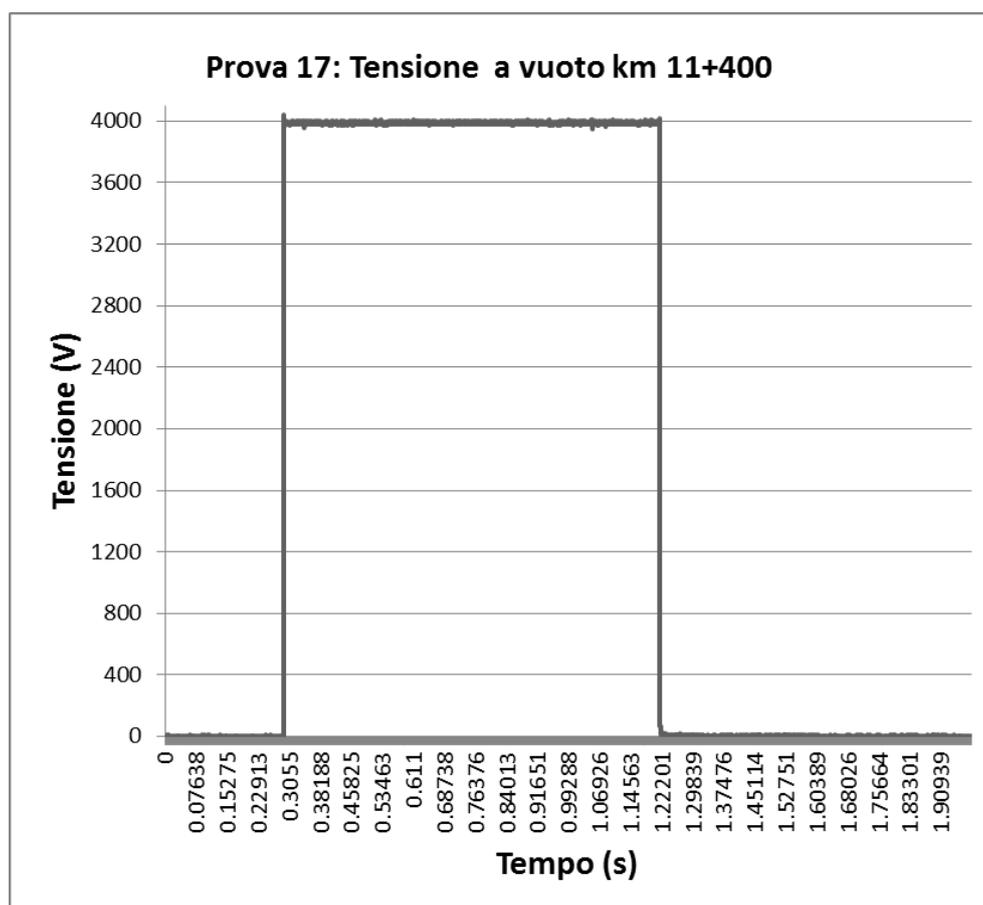


Fig. 6.11 - Prova 17, Misura della Tensione con la prova a vuoto al Km 11+400.

Si continua con l'analisi del confronto delle misure teoriche con le reali. Si analizza la misura della caduta di tensione delle campagna di prove. Il circuito di richiusura che si crea ogni volta in cui si è effettuata la prova a terra è chiamato anello di guasto (Figura 6.12). Anello composto dalla resistenza della linea di contatto dalla resistenza di guasto e dalla resistenza del binario al km e il circuito schematizzato in figura, in cui la parte tratteggiata rappresenta la SSE.

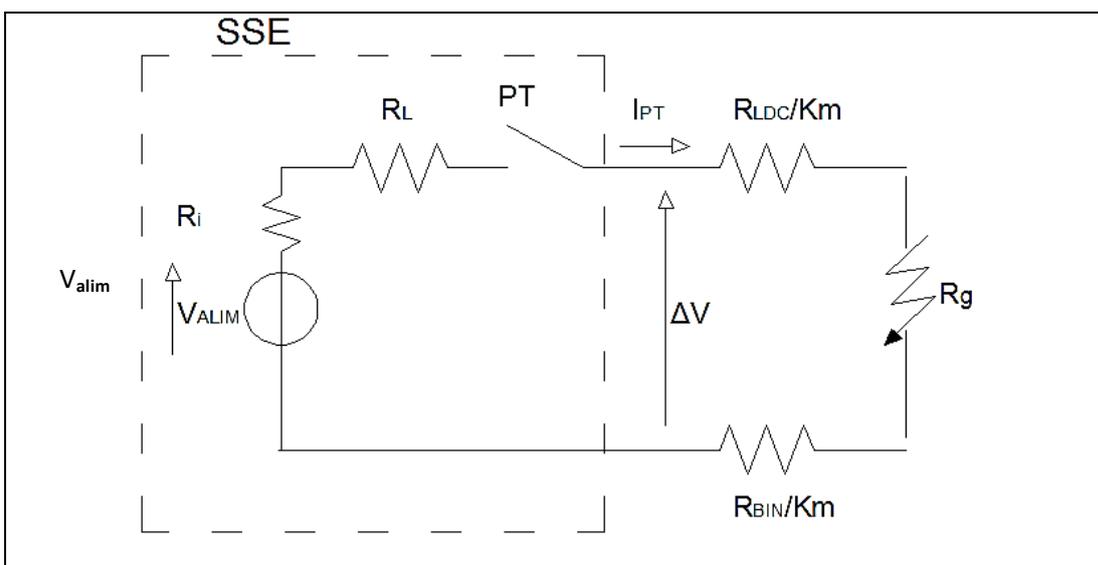


Fig. 6.12 - Schematizzazione dell'anello di guasto.

Distanza al guasto (m)	Caduta di tensione ΔV (V)	
	Simulazione	Prove
0	0.56	
400	5.89	
1400	19.17	
2400	32.34	
3400	45.42	45.23
4400	58.4	58.06
5400	71.3	69.20
6400	84.09	
7400	96.79	
8400	109.41	
9400	121.93	112.33
10400	134.36	126.05
11400	146.7	134.82

Tab. 6.13 - Confronto tra dati teorici e dati reali.

Dalla Tabella 6.13 si nota un crescere progressivo del valore della tensione al crescere della distanza del guasto dalla SSE, con variazione di circa 11.6 V al km. Questo risultato si avvicina al dato teorico della variazione della tensione, di 12.97 V al km.

In Figura 6.14, che rappresenta i dati della Tabella 6.13, si riscontra l'andamento molto simile delle misure reali confrontate con quelle della simulazione. Inoltre, si evidenzia che nel primo tratto di prove, quello più vicino alla SSE di Portomaggiore (km 3+400, km 4+400, km 5+400), i valori della simulazione si sovrappongono quasi perfettamente ai valori reali. Cosa che non si può affermare nel secondo tratto più lontano dalla SSE di Portomaggiore (km 9+400, km 10+400, km 11+400), nel quale si nota uno scostamento maggiore dei dati misurati dai dati teorici. Tale scostamento può essere attribuito alla presenza, tra le due tratte di misura delle prove, di una stazione ferroviaria (Montesanto), che con gli impianti che la compongono, crea una variazione nei parametri elettrici.

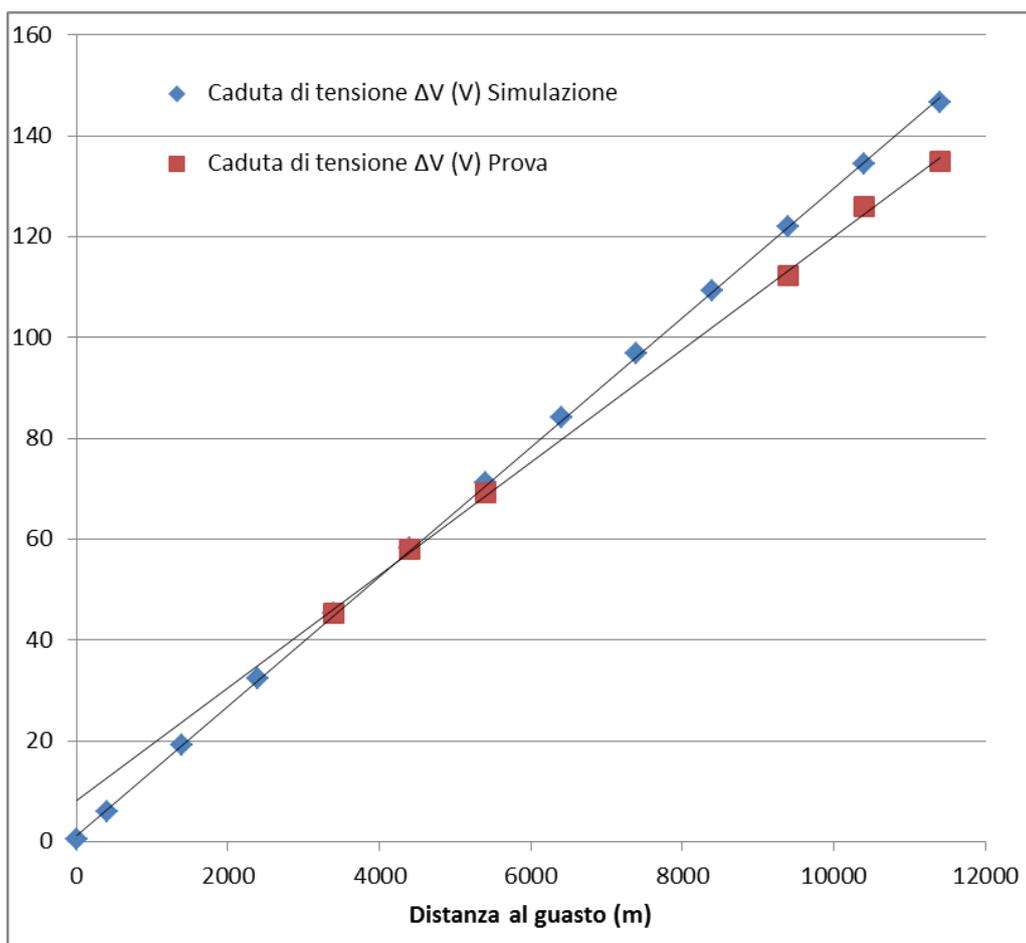


Fig. 6.14 - Confronto dati teorici con dati reali.

7. Conclusioni

Il metodo di localizzazione basato sulla misura della caduta di tensione nell'anello di guasto proposto nel lavoro di tesi è in grado di localizzare il punto di guasto con un errore minimo, dell'ordine del centinaio di metri. È quindi un metodo di localizzazione efficace, soprattutto se confrontato con l'attuale metodo di localizzazione che individua la zona di guasto, che in alcune linee ferroviarie si estende fino a 40 km.

Al fine di minimizzare i costi per una successiva implementazione del metodo su larga scala, si è deciso di utilizzare componenti e strumentazione che normalmente sono in uso alle ferrovie. Quindi si propone di implementare questo metodo in sottostazioni di ultima generazione utilizzando la versione più evoluta dello strumento U-MLC-M, visto nella parte della descrizione degli strumenti di misura in corrente continua (Capitolo 5). Questa versione evoluta è l'U-MLC, che è un relè di protezione e controllo per le linee di trazione in CC che svolge le stesse misure del Fluke 1760, con tempi di campionamento dell'ordine dei millisecondi. Pertanto occorre implementare all'interno del U-MLC il modello studiato tramite modifiche di programmazione.

Inoltre si propone di mettere a disposizione l'informazione relativa alla distanza del guasto al DOTE, che da remoto localizza il punto di guasto sui monitor, leggendo la distanza dalla SSE più vicina e che la comunica agli agenti della manutenzione, in modo che possano raggiungere il guasto nel più breve tempo possibile.

Quindi, rispetto a localizzazione di zona guasto attuale, applicando questo metodo ci si aspetta una riduzione delle tempistiche di intervento da parte del personale della manutenzione e, a sua volta, una riduzione dell'impatto sulla circolazione ferroviaria.

Come prossimi sviluppi per poter applicare questo metodo è necessario calcolare il modello dedicato ad ogni linea ferroviaria, a causa della presenza di impianti di diversa natura presenti lungo i binari che servono per il distanziamento dei treni. Questi impianti variano a seconda delle linee ferroviarie, come visto nel capitolo 3 al paragrafo 2, ad esempio si hanno casi di condizioni di circuito di ritorno con presenza di connessioni induttive che potrebbero far variare la resistenza del

binario al chilometro. Ciò comporta il ripetere la campagna di prove eseguendo la stessa procedura proposta della localizzazione del punto di guasto per poi calcolare il modello che identifica la distanza del guasto ricavato con i parametri di linea della tratta ferroviaria in esame.

Infine, per migliorare il modello studiato, si propone un'ulteriore campagna di prove in periodi dell'anno con condizioni climatiche differenti dalle condizioni ambientali presenti all'atto delle prove, avvenute nel mese di Novembre durante le ore notturne. Ad esempio si propone, per il completamento del modello della linea Ferrara-Ravenna un'ulteriore campagna di prove sperimentali nel periodo estivo e nelle ore diurne. Questa proposta consente di verificare la bontà del modello in presenza di possibili variazioni dei parametri elettrici dovuti al cambiamento di temperatura esterna.

Bibliografia

- [1] Manuale del Ferelettrico III Trazione Elettrica - 2° edizione ristampa - C.I.F.I. Collana di testi per la formazione e l'aggiornamento professionale – 1978.
- [2] Sistemi elettrici per i trasporti, Trazione Elettrica - Seconda edizione – Francesco Perticaroli.- 2001.
- [3] Analisi di un sistema di alimentazione innovativo per reti ferroviarie in corrente continua tramite software EMTP-RV- Bottin, Simone - 2013.
- [4] Dispense Corso di Trazione Elettrica Laurea, - Alberto Minoia Università degli studi di Pavia - 2011.
- [5] Impianti ferroviari Volume I e II , 3° edizione - C.I.F.I. Pier Luigi Guida e Eugenio Milizia – Lucio Mayer. - 2005
- [6] Prefazione Generale all'Orario di Servizio, Allegato VI, Art.4, 2006 RFI, Regolamento per la Circolazione dei Treni - 1962 (Ultimo aggiornamento 2009).
- [7] Abilitazioni “AB3” Comune B impianti, oggetti e attrezzature di tutti i settori specialistici, Trazione Elettrica Parte Prima - RFI - Marchetti Alfieri - - 2006.
- [8] Fascicolo Linea, Ferrara-Rimini 85 - CT 1/2013- dicembre 2003.
- [9] Earth Fault location in railways single track line, - Margheri Lorenzo – 2013.
- [10] “Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno. Parte 1: Provvedimenti di protezione contro lo shock elettrico” - CEI EN 50122-2 - Agosto 2012.
- [11] “Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno. Parte 2: Provvedimenti contro gli effetti delle correnti vaganti causate da sistemi di trazione a corrente continua,” - CEI EN 50122-1 - Agosto 2012.

- [12] “Apparecchiature per l’interruzione di corrente, disalimentazione e il sezionamento della linea di contatto“ - RFI DTP di Bologna SO Ingegneria e Tecnologie Reparto IT2- Capitolo 3 - (allegato 1/Disegno E 56926/h – Foglio 3).
- [13] Manuali didattici della manutenzione schema di alimentazione 3KVCC - RFI DTP di Bologna SO Ingegneria e Tecnologie Reparto IT2.
- [14] “Protezione della linea di contatto” - Capitolo 6 - RFI DTP di Bologna SO Ingegneria e Tecnologie Reparto IT2.
- [15] “Organizzazione e Tecnica Ferroviaria” – CIFI - G. Vicuna.

Ringraziamenti

Ringrazio il Prof. Roberto Tinarelli e Rete Ferroviaria Italiana per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro così interessante.

Ringrazio i miei colleghi, Pierpaolo Fellini, Paride Delucca e Claudio Baldo, per la disponibilità nello svolgimento di questo lavoro e soprattutto nel chiarirmi i tanti dubbi in ambito di trazione elettrica e di sottostazioni elettriche. In particolare ringrazio Eugenio Pavan per tutti i consigli, l'aiuto e gli insegnamenti nel mondo degli impianti elettrici ferroviari e la disponibilità che mi ha dato anche quando era già in pensione. Da non dimenticare Cesidio Bove, le cui idee e il cui supporto tecnico sono stati fondamentali durante la campagna di prove sperimentali. Infine sono grato a tutti i colleghi che mi hanno supportato in vari modi nel portare a termine il percorso di studi.

Un ringraziamento alla mia famiglia che è sempre stata presente in ogni occasione, incoraggiandomi e sostenendomi in ogni momento del mio percorso di formazione.

Un ringraziamento speciale a Teresa, che con la sua testardaggine è riuscita a farmi concludere il mio percorso di studi, aiutandomi, stando sempre al mio fianco, consigliandomi e incitandomi, in particolar modo con consulenze sull'italiano.

Un ringraziamento ad Elia, il mio bimbo, già ormai di 3 mesi, che mi ha dato la spinta per riuscire a terminare gli studi da quando abbiamo scoperto con Teresa di essere in dolce attesa.

Ringrazio tutti gli amici di ingegneria, in particolar modo Giancarlo, Alessandro, Fabio e Elena, per i bei momenti e serate passate assieme.

Ringrazio tutti gli amici, sia quelli che ho incontrato in questi anni e sia quelli di vecchia data, per aver contribuito, spesso in modo piacevole, oltre che costruttivo, a formare quello che sono ora.

Lorenzo