

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Perfezionamento e validazione
sperimentale delle tarature delle
protezioni per la rete tranviaria
torinese**

Relatori:

Prof. Enrico Pons

Prof. Pietro Colella

Ing. Roberto Rizzoli

Candidato:

Simone Aral

Marzo 2018

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Obiettivo della tesi	1
1.2	La rete tranviaria torinese	3
1.3	Relè DIA-IGTv	7
1.3.1	Descrizione e caratteristiche principali	7
1.3.2	Funzione di registrazione e gestione dei dati	10
1.3.3	Tarature proposte	11
2	Setup delle prove di laboratorio	13
2.1	Memory Hicorder HIOKI MR8880-20	13
2.1.1	Descrizione dello strumento	13
2.1.2	Funzione di registrazione	15
2.1.3	Registrazione con trigger	16
2.2	Generatore di funzioni AGILENT 33220A	17
2.2.1	Descrizione dello strumento	17
2.2.2	Allestimento del banco di prova	18
2.2.3	Test preliminari	20
2.2.4	Preparazione dei file di prova	21
2.2.5	Calcolo dei parametri Waveform Editor	24
2.2.6	Test conclusivo	25
2.3	Simulatore real-time OPAL-RT OP5600	26
2.3.1	Descrizione dello strumento	26
2.3.2	Preparazione del modello Simulink	27
2.3.3	Test preliminari	29
3	Prove di funzionamento ordinario - Passaggio sotto divisore di zona	31
3.1	Descrizione del fenomeno	31
3.2	Preparazione dei file di prova	32
3.3	Motrice 2800	33
3.3.1	Presentazione delle registrazioni	33
3.3.2	Risultati dei test	33
3.3.3	Conclusioni	33
3.4	Motrice 5000	35
3.4.1	Presentazione delle registrazioni	35
3.4.2	Risultati dei test	37
3.4.3	Conclusioni	39

3.5	Motrice 6000	41
3.5.1	Presentazione delle registrazioni	41
3.5.2	Risultati dei test	41
3.5.3	Conclusioni	41
4	Prove di funzionamento ordinario - Assorbimento giornaliero	45
4.1	Descrizione delle prove	45
4.2	Modello per il simulatore Real-Time	45
4.3	Risultati delle prove	48
4.3.1	Registrazione con alti gradienti	48
4.4	Conclusioni	51
5	Analisi scatti storici	53
5.1	Descrizione dei dati	53
5.2	Elenco generale degli scatti	53
5.3	Analisi dettagliata	55
5.3.1	Scatti per $dI >$	55
5.3.2	Scatti per $I >$	60
5.3.3	Scatti per sovratensioni	61
5.3.4	Altro tipo di scatti	62
5.4	Conclusioni	64
5.4.1	Risultati generali	64
5.4.2	Interventi dubbi	65
6	Prove di cortocircuito	67
6.1	Descrizione delle prove	67
6.2	Preparazione dei file di prova	69
6.3	Risultati delle prove	70
6.3.1	Prove di Caio Mario (SSE)	70
6.3.2	Prove di Piazza Campanella	71
6.3.3	Prove di Via Nicola Fabrizi	72
6.3.4	Prove di San Paolo	72
6.4	Conclusioni	74
7	Prova delle tarature in cabina	75
7.1	Misure in cabina	75
7.1.1	Installazione del primo registratore e primi test	75
7.1.2	Scatti DIA-IGTv di gennaio 2018	79
7.1.3	Installazione del secondo registratore e nuovi test	79
7.2	Prove in laboratorio sul trasduttore	84
7.2.1	Presentazione del trasduttore	84
7.2.2	Prove con forme d'onda campione	85
7.2.3	Taratura del filtro equivalente	88
7.2.4	Verifica del filtro sugli scatti reali	92

8	Simulazioni di cortocircuito	97
8.1	Determinazione del modello	97
8.1.1	Modello semplificato della linea	97
8.1.2	Calcolo dei parametri di cabina	99
8.1.3	Calcolo dei parametri di linea	100
8.1.4	Riepilogo dei parametri complessivi	103
8.2	Modifica del modello Simulink per RT-LAB	103
8.3	Risultato delle simulazioni	104
8.3.1	Linea di lunghezza elevata	105
8.3.2	Linea con bassa induttanza	108
8.4	Conclusioni	110
9	Conclusioni	111
9.1	Prove in laboratorio	111
9.1.1	Verifica delle tarature	111
9.1.2	Test sul trasduttore di tensione	113
9.2	Prove in cabina	114
9.3	Riepilogo finale e sviluppi futuri	115
	Elenco delle figure	117
	Elenco delle tabelle	121
	Bibliografia	123

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Obiettivo della tesi

Questo lavoro si propone l'obiettivo della validazione di una serie di tarature proposte per il relè DIA-IGTv, un dispositivo di protezione della rete trianviaria torinese. Questo strumento, installato nelle cabine di alimentazione, ha il compito di analizzare la corrente istantaneamente assorbita in linea. Tramite un ciclo di misura ed analisi determina se deve comandare l'apertura dell'interruttore extrarapido associato, nel momento in cui una delle grandezze calcolate supera il valore di soglia impostato. Il problema è costituito dal fatto che questo relè non è sempre in grado di distinguere tra una situazione relativa al funzionamento ordinario ed un guasto in linea. Ciò può portare ad un'interruzione dell'alimentazione elettrica, con conseguente disservizio nel caso in cui la procedura automatica di richiusura non vada a buon fine. Al momento, tali dispositivi non sono impiegati con funzione di protezione ma si limitano a misurare e registrare eventuali guasti rilevati, visto l'elevato numero di interventi ingiustificati registrati negli ultimi anni.

Il punto di partenza del lavoro è costituito dai risultati ottenuti da Leonardo Bramardi, nello svolgimento della sua tesi [3]. Bramardi, nel suo lavoro, si è in primo luogo concentrato sul funzionamento effettivo del DIA-IGTv, tramite l'analisi del ciclo di misura. Una volta riprodotto il flow-chart con una simulazione in ambiente Matlab è stata utilizzata una forma d'onda appositamente costruita per verificare tutti i vari sottocicli che lo strumento compie ad ogni misurazione. Il passo successivo è stato l'analisi in laboratorio della catena di misura in cui il relè è inserito, in modo tale da individuare e caratterizzare errori e disturbi introdotti dai vari dispositivi coinvolti. L'obiettivo principale del suo lavoro si è basato sull'analisi statistica di una serie di forme d'onda reali, in modo tale da individuare i parametri principali (gradiente di corrente e differenza di corrente) che contraddistinguono ogni situazione. Sono stati impiegati dati relativi a misurazioni svolte per l'occasione, concernenti inizialmente il funzionamento ordinario, suddiviso tra passaggio sotto al divisore di zona e assorbimento normale di una linea. Per facilitare questo lavoro si è resa necessaria l'interpolazione delle forme d'onda originali, così da eliminare l'effetto dei disturbi presenti nelle misure. Stesso tipo di analisi è stata svolta per le registrazioni delle prove di cortocircuito, sia in cabina che a fondo linea. Tramite l'impiego di formule tratte dalla letteratura scientifica sono

stati inoltre individuati i parametri del circuito equivalente di una linea tranviaria in condizioni di guasto, sempre utilizzando come punto di partenza le forme d'onda reali. In questo modo sono state proposte una serie di nuove tarature per il DIA-IGTv, decisamente più appropriate, in quanto specifiche per la rete tranviaria torinese.

Il mio lavoro consiste invece nella verifica di queste tarature tramite una serie di prove sperimentali sul DIA-IGTv, prima in laboratorio e poi, successivamente, sul campo.

Nel primo capitolo sono presentati alcuni cenni alla rete tranviaria torinese e al dispositivo al centro delle mie analisi. Questo strumento deve essere in grado di riconoscere situazioni quali avviamenti simultanei di più motrici e transiti di divisore a piena accelerazione che, per quanto sporadici, si manifestano durante il funzionamento ordinario. Queste circostanze, pur caratterizzate da parametri anche elevati, non devono provocare lo scatto del DIA-IGTv. Al contrario, eventi di guasto non particolarmente eclatanti, come i cortocircuiti a fondo linea, devono essere comunque rilevati, per garantire la protezione e la sicurezza della rete.

Nel secondo capitolo sono illustrati gli strumenti utilizzati nel corso della mia tesi: il data recorder HIOKI MR8880-20, il generatore di funzioni Agilent 33220A e il simulatore real-time OP5600. La quasi totalità delle registrazioni in nostro possesso sono state svolte tramite il primo dispositivo (o con modelli equivalenti); sono presentate le principali caratteristiche e funzionalità. Per quanto riguarda gli altri due strumenti, oltre ad una breve descrizione, sono descritti in dettaglio i banchi di misura allestiti per connetterli al DIA-IGTv; sono mostrati i test di caratterizzazione e taratura per assicurare la corretta riproduzione ai terminali del relè dei segnali originali.

Nel terzo capitolo sono descritte le prove relative ad un particolare fenomeno che contraddistingue il funzionamento ordinario: il passaggio di una motrice al di sotto del divisore di zona. L'analisi è condotta separatamente per i tre tipi di motrici esistenti, in quanto il loro comportamento presenta differenze significative in questo frangente. Sono state sottoposte al DIA-IGTv le forme d'onda originali raccolte negli anni precedenti, senza alcuna interpolazione.

Nel quarto capitolo sono descritte le prove relative all'assorbimento giornaliero di una sottostazione di alimentazione, la SSE Duca d'Aosta. Sono state utilizzate le registrazioni originali raccolte tra il 25 e il 27 maggio 2017.

Nel quinto capitolo sono descritte le prove relative alle registrazioni di cortocircuito raccolte negli anni precedenti, nelle quali sono stati simulati guasti sia in cabina che a fondo linea, con l'impiego o meno di resistenze di carico per limitare le correnti. Le modalità con cui queste forme d'onda sono state sottoposte al DIA-IGTv sono le medesime dei test dei passaggi dei divisori di zona.

Nel sesto capitolo sono analizzati dati storici forniti da Infra.To, relativi ad una serie di scatti avvenuti nella rete torinese tra il 2014 e il 2016. L'obiettivo di questa sezione consiste nel determinare quanti di questi eventi siano relativi ad assorbimenti effettivamente anomali, individuando nel contempo le situazioni in cui il dispositivo ha provocato uno scatto intempestivo.

Nel settimo capitolo sono illustrati i risultati ottenuti dalla prova sul campo delle tarature proposte, applicate su di un DIA-IGTv installato nella SSE Duca d'Aosta. Per avere maggiori informazioni su eventuali scatti è stato installato un

registratore HIOKI comandato dal relè stesso. Nel corso di questo periodo di prova è emersa la presenza di un errore di misura introdotto da un componente, ossia un trasduttore di tensione contenuto in un disaccoppiatore ottico. L'effetto di questo dispositivo è assimilabile ad un filtro passa-basso che attenua i gradienti dei segnali in ingresso. Tramite prove di laboratorio il comportamento del trasduttore è stato caratterizzato, individuando così i parametri di un filtro equivalente del primo ordine.

Nell'ottavo capitolo sono ricalcolati i parametri del circuito equivalente della linea, alla luce della scoperta dell'errore di misura introdotto dal trasduttore. Vista l'impossibilità di ricavare le forme d'onda originali (la procedura di filtratura inversa amplifica enormemente i disturbi), l'individuazione delle curve corrette si è svolta per confronto tra la registrazione originale e il risultato di una simulazione in ambiente Simulink, debitamente filtrato. Una volta corretti questi parametri, lo stesso modello è stato utilizzato per simulare cortocircuiti in punti qualsiasi della linea. Le forme d'onda così ottenute sono state sottoposte al DIA-IGTv tramite il simulatore real-time, per verificare che siano correttamente individuate.

1.2 La rete tranviaria torinese

La rete tranviaria torinese è suddivisa in 49 zone elettriche, alimentate da 21 cabine di conversione dette sottostazioni elettriche (SSE). Ogni zona può essere connessa ad almeno due SSE affinché l'affidabilità dell'alimentazione delle linee presenti sia sempre adeguata alle esigenze di servizio. Tra le possibili alimentazioni, una sola ha funzione prioritaria, mentre le altre possono essere impiegate come riserva. Con eccezione della zona 25, in tutte le altre l'alimentazione non avviene connettendo in parallelo le SSE possibili, bensì da un solo punto per volta. Al momento le varie zone sono collegabili in fibra ottica per sostenere una doppia alimentazione, ma mancano le necessarie apparecchiature e i collegamenti agli interruttori extrarapidi per l'allestimento di un efficace piano di protezione.

I tram sono alimentati tramite le linee di contatto da una tensione continua a 600 V. I dispositivi di conversione dell'energia, situati in ogni SSE, sono costituiti da un trasformatore trifase a tre avvolgimenti ed un raddrizzatore a doppio ponte di Graetz con bobina interfascia; un secondo trasformatore è presente come riserva fredda. In uscita dal blocco di conversione si trovano la sbarra positiva (Omnibus) e quella negativa. Alla prima sono connessi i pannelli positivi, ognuno di essi relativo alla propria zona, mentre la seconda raccoglie quelli negativi. Ogni pannello positivo raccoglie i principali strumenti di diagnostica e protezione della rete: i sezionatori di linea e di terra, l'interruttore extrarapido, lo scaricatore per sovratensioni, i trasduttori per gli strumenti di misura, il complesso test di linea e il dispositivo per il controllo dell'isolamento del cavo. In generale, l'insieme di convertitore e pannelli vede la presenza di numerosi relè, tra i quali massima corrente, massima e minima tensione, massima e minima frequenza, direzionale di corrente, temperatura, guasto a terra. Essi sono tutti connessi ad un interruttore automatico modello IR6000, unipolare in corrente continua, isolato in aria.

Tra i dispositivi di protezione si trova il DIA-IGTv, il quale ha la funzione di

valutare la forma d'onda della corrente di linea e comandare l'apertura dell'interruttore, nel caso in cui sia stato rilevato un possibile guasto. Il segnale di corrente è prelevato dal pannello positivo tramite una resistenza di shunt e viene inviato allo strumento tramite l'insieme di un trasmettitore e di un ricevitore, connessi tramite fibra ottica. Dopo aver tarato i DIA-IGTv secondo le indicazioni contenute in [1], per più di un anno sono stati impiegati in tutte le zone elettriche di Torino. A causa della sensibile riduzione dell'affidabilità del servizio, dovuta agli scatti intempestivi del relè per cause diverse dalle condizioni di cortocircuito, GTT ha deciso di scollegarli. Al momento funzionano "in bianco", ossia sono attivi e funzionanti, ma non comandano l'apertura dell'interruttore.

In cabina è presente un ulteriore strumento specifico, il Dispositivo di Prova Linea (DPL). Esso entra in funzione automaticamente ad ogni tentativo di auto-richiusura dell'interruttore extrarapido, per verificare preventivamente l'assenza di guasti in linea. La sua azione consiste nell'imporre una tensione alternata di 30 V ai terminali dei conduttori e nel valutare la corrente che si stabilisce, prima che sia ridata tensione a 600 V alla zona elettrica in cui è avvenuta l'apertura; se il circuito da alimentare presenta un valore di isolamento abbastanza alto la corrente misurata è approssimativamente nulla, se invece supera la soglia impostata significa che è affetto da un guasto. Per evitare di rilevare eventuali guasti transitori, in seguito al fallimento della prima prova, ne vengono eseguite ulteriori due in successione, a 10 s di distanza una dall'altra. Se anche il terzo tentativo fallisce, il sistema va in blocco e non è più possibile richiudere il circuito automaticamente.

L'alimentazione diretta delle motrici avviene tramite la linea aerea di contatto, mentre i binari fungono da conduttore di ritorno. La continuità della connessione è garantita dal pantografo, il quale è dotato di un contatto strisciante in grafite che aderisce alla linea di contatto, sospesa tramite un sistema di tiranti in materiale isolante. L'isolamento elettrico tra sottozone contigue è garantito dalla presenza del divisore di zona, illustrato in figura 1.1. È costituito da un dispositivo in materiale isolante, di lunghezza approssimativa di 70 cm, che ha la duplice funzione di separare galvanicamente i due conduttori aerei e, allo stesso tempo, mantenere la continuità della linea aerea, evitando così possibili danneggiamenti al pantografo.

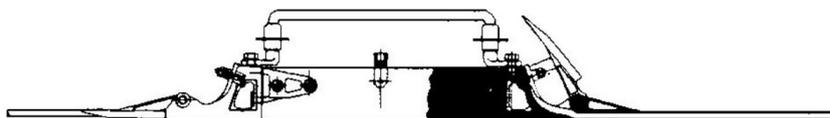


Figura 1.1. Divisore di zona

La rete tranviaria torinese vede l'impiego di tre categorie di vetture, che presentano notevoli differenze di funzionamento dal punto di vista elettrico. È importante avere presente il modello con cui sono state eseguite le varie registrazioni, dal momento che ognuno di essi si comporta in maniera assai specifica in certe circostanze, soprattutto nel passaggio sotto ad un divisore. Tali disparità sono da imputare al diverso tipo di azionamento installato. Di seguito sono elencati i tre modelli al momento impiegati:

1. **Motrice serie 2800:** è il modello più datato in circolazione, è alimentata da motori DC gestiti in serie o in parallelo tramite l'utilizzo di resistori, senza l'impiego di alcun azionamento elettronico. Un esempio è raffigurato in figura 1.2.
2. **Motrice serie 5000:** più moderna rispetto alle 2800, è alimentata da due grandi azionamenti composti da un chopper e da un motore DC. Un esempio è raffigurato in figura 1.3.
3. **Motrice serie 6000:** è il modello più moderno e complicato dal punto di vista dell'azionamento; è alimentata da motori trifase connessi ad un inverter. Un esempio è raffigurato in figura 1.4.



Figura 1.2. Motrice serie 2800



Figura 1.3. Motrice serie 5000



Figura 1.4. Motrice serie 6000

1.3 Relè DIA-IGTv

1.3.1 Descrizione e caratteristiche principali



Figura 1.5. Relè DIA-IGTv

Il dispositivo raffigurato in figura 1.5 è il componente centrale delle prove e delle analisi svolte nel corso della mia tesi. È un sistema di protezione e diagnostica DIA che offre le funzioni di fornire informazioni sia sullo stato dell'interruttore, per poter gestire al meglio il piano di manutenzione preventiva, sia sulla condizione del circuito alimentato. All'interno di un unico modulo sono integrate le seguenti funzioni: diagnostica dell'interruttore (DIA-I), analisi del carico (DIA-G) e immagine termica (DIA-T). Nel svolgimento di questo lavoro l'attenzione è stata rivolta alla capacità del dispositivo di analizzare l'andamento della corrente assorbita in modo tale da distinguere tra fenomeni transitori ordinari ed eventuali situazioni di guasto, svolta dal modulo G. Questo tipo di intervento risulta essere di fondamentale importanza in tutte quelle eventualità in cui le altre protezioni presenti non sono in grado di intervenire, come per casi di cortocircuito a fondo linea (quando sia i valori di picco che i gradienti di corrente possono essere inferiori ai medesimi registrati in situazioni ordinarie). Per questo motivo, è fondamentale verificare la capacità del relè di intervenire o meno anche nelle circostanze più complicate, corrispondenti ai casi limite raccolti nel corso delle registrazioni compiute in precedenza.

In sede di installazione, la catena di misura con cui il segnale di corrente viene condotto al dispositivo è schematizzata in figura 1.6.

1. Tramite una resistenza di shunt, si ottiene un valore in tensione proporzionale alla corrente istantaneamente assorbita; in particolare, nel nostro caso si tratta di uno shunt 4000 A/60 mV (corrispondenti alla tensione che si ottiene quando al suo interno transita una corrente pari al valore nominale).

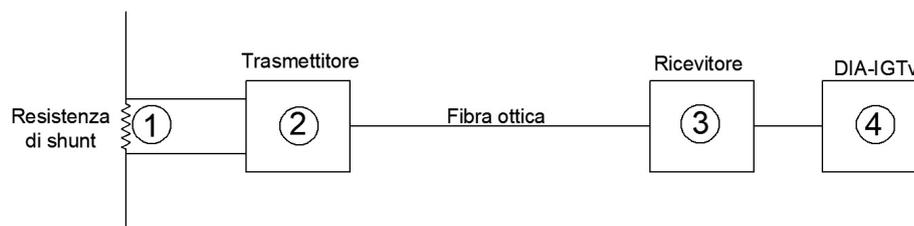


Figura 1.6. Catena di misura DIA-IGTv

2. Il segnale di tensione viene affidato ad un trasmettitore, connesso ad un ricevitore tramite fibra ottica, per ridurre i disturbi.
3. All'interno del ricevitore, il segnale in tensione viene convertito in corrente e sdoppiato, dal momento che il relè presenta un doppio ingresso. I due canali presentano tra di loro un rapporto pari a 10, e vengono impiegati a seconda del valore in corrente equivalente alla misurazione reale, in modo tale da avere maggiore risoluzione (il valore di soglia è pari a $1.5 \cdot IP$, quindi 6000 A).
4. Il DIA-IGTv analizza il segnale di corrente e comanda eventualmente l'apertura dell'interruttore automatico, nel caso in cui non sia già scattato lui stesso autonomamente.

In figura 1.7 è illustrato il flow-chart di funzionamento del modulo DIA-G del relè, il quale era già stato oggetto di studio approfondito [3]. In questa sede mi limiterò quindi ad elencare i principali parametri del dispositivo e il relativo tipo di intervento previsto. In breve, il dispositivo registra il valore di corrente misurato ad ogni iterazione e ne calcola il gradiente rispetto al precedente: a seconda dei risultati ottenuti, stabilisce se avviare o meno il ciclo di analisi o, se si è già all'interno di quest'ultimo, continuare le misurazioni o uscirne; ovviamente, nel momento in cui una delle grandezze calcolate supera il valore di soglia, il dispositivo invia all'interruttore il comando di apertura. I parametri che regolano quindi questo tipo di azioni sono i seguenti:

1. **$I >$: soglia di sovracorrente.** Adibito alla protezione del cavo dal sovraccarico.
2. **A/msD : soglia di riconoscimento della discontinuità.** Adibito all'avvio del ciclo di controllo del relè o del reset dello stesso in caso di avviamento di più motrici in sequenza.
3. **$A/ms >$: soglia di massimo gradiente:** Adibito al controllo del gradiente massimo calcolato.
4. **A/msE : soglia di riconoscimento avviamento di un treno.** Adibito all'interruzione del ciclo di controllo se il gradiente calcolato diventa inferiore.
5. **$DR >$: soglia di controllo della differenza di corrente:** Adibito alla verifica che la differenza tra la corrente attuale I e il valore di inizio ciclo I_0

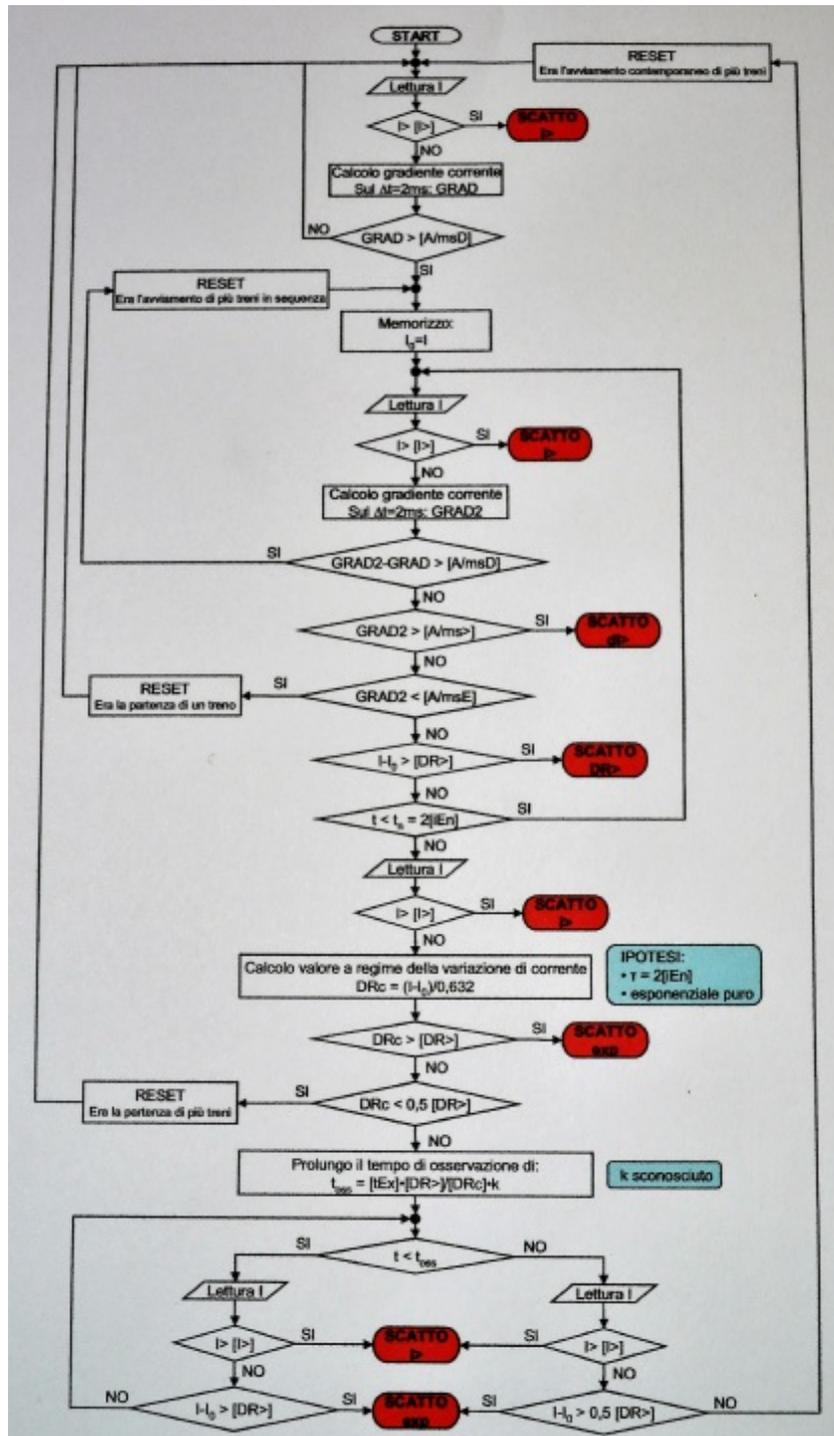


Figura 1.7. Flow-chart DIA-G

non superi una certa soglia; la corrente di inizio ciclo dipende da eventuali reset del controllo.

6. **iEn: numero di campionamenti.** Adibito alla regolazione del tempo per il quale il ciclo di controllo compie le proprie analisi rispetto ai parametri precedenti.
7. **tEx: tempo di prolungamento del controllo.** Adibito alla regolazione dell'ulteriore tempo di controllo della corrente rispetto alle soglie $I>$ e $DR>$, in caso di mancato scatto nel tempo iEn.

In base alla regolazione dei parametri sopra elencati, possiamo quindi avere i seguenti tipi di intervento del dispositivo, con accensione del relativo led sul pannello frontale e conseguente comando di apertura inviato all'interruttore eventualmente connesso:

- **$I>$:** avviene se la corrente misurata supera il valore impostato.
- **$dI>$:** avviene se il gradiente di corrente misurato supera il valore impostato.
- **$DR>$:** avviene se la differenza tra la corrente misurata, rispetto al valore di inizio ciclo I_o , supera il valore impostato.
- **EXP:** avviene se, trascorso il tempo iEn, il dispositivo non è riuscito ad interrompere il ciclo di controllo vuoi per uscita o per reset.

Il modulo DIA-IGTv è dotato di quattro relè interni ai quali è possibile associare uno o più tipi di intervento, a seconda delle necessità. È possibile utilizzare una di queste unità come fonte di un segnale di trigger per uno strumento esterno, funzione che verrà impiegata nel momento in cui si procederà alla verifica delle tarature in una cabina attiva.

1.3.2 Funzione di registrazione e gestione dei dati

Il dispositivo è dotato di una memoria interna non volatile in cui sono registrate le informazioni relative agli ultimi tre scatti avvenuti; una volta che i primi tre eventi sono stati memorizzati, l'intervento successivo viene sovrascritto ai dati meno recenti. Tramite una porta seriale è garantita la comunicazione con un PC. Grazie al software MSCom2, una schermata del quale è illustrata in figura 1.8, è possibile compiere le seguenti operazioni:

- Leggere le misure attuali del DIA-IGTv, se attivo;
- Leggere i valori massimi registrati;
- Leggere i dati relativi all'ultimo intervento;
- Leggere i contatori relativi al tipo di scatti;
- Configurare il tipo di intervento dei relè interni;
- Modificare le tarature dei parametri;
- Visualizzare le registrazioni in memoria.

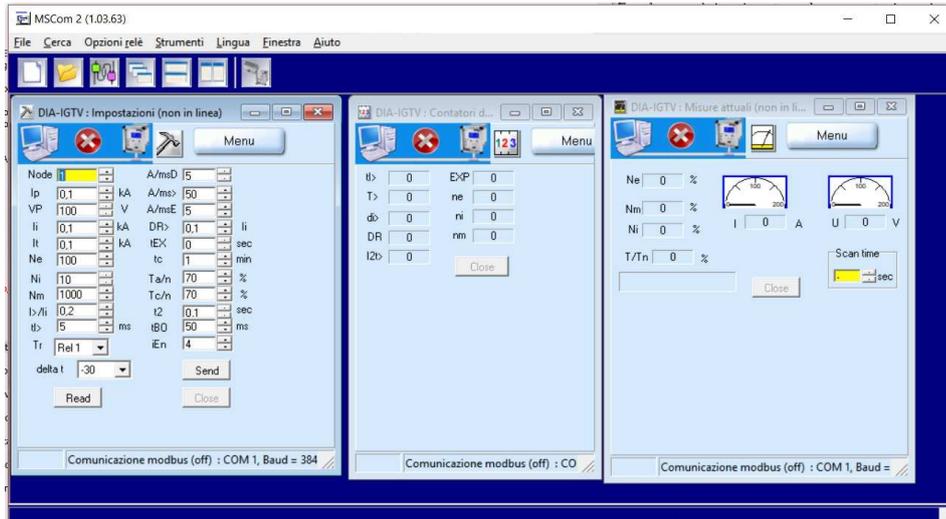


Figura 1.8. Schermata MScCom2

1.3.3 Tarature proposte

Sul manuale del dispositivo [8] sono suggeriti i seguenti intervalli di taratura, basati sulle grandezze caratteristiche del circuito che deve essere protetto: **gL** (gradiente di corrente in caso di guasto lontano), **IL** (valore della corrente di regime in caso di guasto lontano), **IM** (valore massimo della corrente istantanea erogata), **Dsp** (massima variazione di corrente nella fase di avviamento).

- $A/msD = 0.7 \div 0.9 \text{ gL}$
- $A/msE = 0.1 \div 0.3 [A/msD]$
- $A/ms> = 2 \div 3 \text{ gL}$
- $DR> = 0.7 \div 2 \text{ Dsp}$
- $iEn = IL/4gL$

Le tarature precedentemente applicate ai dispositivi installati nella rete torinese seguivano queste direttive, ma si basavano su considerazioni di carattere generale. La volontà congiunta di ridurre al minimo il numero di disservizi e di riconoscere eventuali guasti ha fatto emergere la necessità di disporre di parametri migliori. Tramite l'analisi delle numerose forme d'onda relative all'assorbimento di corrente delle varie vetture in diverse situazioni è stato possibile trovare valori teoricamente migliori, in modo tale da consentire al dispositivo di individuare in modo più efficace come intervenire. In tabella 1.1 troviamo confrontati i valori inizialmente stabiliti e quelli proposti da Bramardi alla conclusione della sua tesi [3].

Come si può facilmente notare, non sono state effettuate modifiche significative; di seguito sono brevemente illustrate le considerazioni eseguite.

- **A/msD**: questo valore è stato abbassato da 50 A/ms a 30 A/ms per consentire al dispositivo di rilevare eventi difficili da individuare come, ad esempio,

Parametro	Taratura precedente	Taratura proposta
I_n [A]	4000	4000
$I_{>}$ [A]	$0,9 \cdot I_n$	$0,9 \cdot I_n$
A/msD [A/ms]	50	30
$A/ms>$ [A/ms]	150	$100 \div 150$
A/msE [A/ms]	10	10
$DR_{>}$ [A]	$0,825 \cdot I_n$	$0,625 \cdot I_n$
iEn	6	18
tEx [s]	20	1

Tabella 1.1. Confronto tra tarature

cortocircuiti a fondo linea, che possono presentare gradienti alquanto bassi. In questo modo si garantisce che tali fenomeni vengano tempestivamente individuati.

- **$A/ms >$** : per questo parametro è stato proposto un intervallo di valori, dal momento che bisogna conciliare due esigenze contrapposte. Una taratura minore facilita l'intervento per A/ms in caso di cortocircuiti, ma aumenta la probabilità di scatti intempestivi in situazioni ordinarie. Al contrario, una taratura maggiore riduce il numero di disservizi ma rende più difficoltoso l'intervento in presenza di guasti lontani. Come punto di partenza per le prove a seguire si è scelto di partire da 100 A/ms .
- **$DR >$** : questo valore è stato scelto in base al confronto tra l'assorbimento maggiore rilevato in situazioni ordinarie (passaggio sotto al divisore di una motrice 6000) e la minima corrente di guasto ottenibile (cortocircuito a fondo linea). L'abbassamento di questo parametro aumenta la capacità di intervento del dispositivo in questo secondo frangente.
- **iEn** : questo valore è stato calcolato secondo la formula proposta dal costruttore, una volta simulato il peggior cortocircuito a fondo linea.

La verifica della validità di queste tarature rappresenta quindi la parte principale del lavoro svolto per questa tesi. Bramardi aveva condotto un'analisi statistica sulle numerose forme d'onda relative a diverse condizioni di funzionamento, in modo tale da caratterizzarle tramite l'individuazione di grandezze caratteristiche, come il gradiente massimo e la massima differenza di corrente. Per svolgere le mie prove ho utilizzato le stesse forme d'onda originali, sottoponendole di volta in volta al relè e valutandone il comportamento. Questi test si sono incentrati sia su situazioni di funzionamento ordinario (passaggio del divisore di zona e assorbimento giornaliero) che di guasto (cortocircuito in cabina e a fondo linea). La seconda parte della validazione di queste tarature si è svolta direttamente sul campo, applicando i parametri testati in laboratorio ad un DIA-IGTv attivo. Questo tipo di osservazione si è prolungata per diverse settimane, in modo tale da aumentare la probabilità che si verificano fenomeni inconsueti. Contemporaneamente, sono state effettuate una serie di simulazioni di cortocircuito tramite un modello equivalente della rete, per verificare che un qualsiasi guasto di questo tipo sia rilevato dal dispositivo.

Capitolo 2

Setup delle prove di laboratorio

In questo capitolo sono descritti i principali strumenti impiegati nel corso delle prove svoltesi in laboratorio. A seconda del dispositivo sono descritte le procedure di preparazione dei file di prova utilizzati e il tipo di connessione effettuata con il relè DIA-IGTv. Sono inoltre presentati alcuni test preliminari svolti per la verifica e la taratura dei banchi di prova allestiti.

2.1 Memory Hicorder HIOKI MR8880-20

2.1.1 Descrizione dello strumento

Tutte le registrazioni utilizzate per questa tesi sono state svolte tramite lo strumento illustrato in figura 2.1 o con modelli equivalenti. Si tratta di un dispositivo portatile in grado di misurare e memorizzare simultaneamente quattro segnali in tensione. È dotato di un ampio display con il quale visualizzare sia i segnali misurati istantaneamente che le registrazioni salvate sulla memoria esterna rimovibile. Le principali caratteristiche tecniche sono elencate nella tabella 2.1.

Frequenza massima di campionamento	1 Msample/s
Memoria interna	14 bit x 1 Mwords/canale
Memoria esterna	1 CF card x 1 GB
Tensione massima verso terra	600 V
Resistenza di ingresso	1 M Ω
Range di misura	10 mV/div ÷ 100 V/div
Risoluzione	1/640 dell'intervallo di misura
Incertezza di misura	$\pm 1.5\%$ del fondo scala

Tabella 2.1. Caratteristiche tecniche HIOKI MR8880-20



Figura 2.1. HIOKI MR8880-20

Le funzioni per cui è stato utilizzato nel corso del mio lavoro sono le seguenti:

- Visualizzazione oscillografica: è possibile visualizzare forma d'onda e ampiezza dei segnali in ingresso via display, tramite il settaggio di parametri quali il range degli assi orizzontali e verticali, zoom, fattore moltiplicativo della tensione misurata. In pratica, può essere impiegato come un normale oscilloscopio. Questa funzione ha svolto un ruolo importante in tutta la fase di taratura dei vari strumenti, consentendo di verificare direttamente la presenza di eventuali errori o disturbi.
- Registrazione: è possibile registrare le misurazioni dei quattro canali sulla memoria interna del dispositivo, con i dati organizzati in una serie di file di vario formato. L'azione di memorizzazione può essere manuale, automatica o innescata da un comando esterno. Tra le impostazioni si possono scegliere la modalità di registrazione (real-time o high-speed), il tempo di campionamento, la durata della misurazione. Si possono inoltre salvare le impostazioni dello strumento o le schermate ottenute. Per valutare analiticamente i risultati dei test preliminari eseguiti sulla strumentazione, si è reso necessario registrare le forme d'onda prodotte per poterle studiare e confrontare in ambiente Matlab. Tale funzione è stata sfruttata in seguito nel momento in cui si è deciso di testare le tarature in cabina, in modo tale da avere le registrazioni di eventuali scatti del DIA-IGTv.

2.1.2 Funzione di registrazione

La funzione principale del registratore HIOKI consiste nella capacità di memorizzare i segnali in ingresso ai quattro canali analogici. Tale operazione può svolgersi in modalità SINGLE o REPEAT. Con la prima, ad ogni comando di START corrisponde un'unica misurazione della durata prefissata. Con la seconda si hanno una serie di registrazioni in sequenza, ognuna delle quali inizia una volta che i dati della precedente sono stati salvati. Il procedimento con cui il registratore memorizza le registrazioni può essere svolto in due modi differenti:

1. **Real-Time:** il campionamento è eseguito a bassa velocità, così da poter memorizzare i dati direttamente sulla memoria esterna del dispositivo durante la misurazione stessa. È adatto se si ha a che fare con fenomeni che non presentano brusche variazioni o dinamiche eccessivamente rapide e che necessitano di registrazioni di lunga durata. Il tempo di campionamento varia da 100 ms a 1 m.
2. **High-Speed:** il campionamento è eseguito ad alta velocità; in questo caso, i dati misurati sono memorizzati temporaneamente sulla memoria interna di buffer del dispositivo, per poi essere copiati in quella esterna solo al termine della misurazione. È adatto nel caso in cui sia necessaria un'alta frequenza di campionamento, per valutare fenomeni transitori di breve durata. Tutte le registrazioni utilizzate o prodotte si sono svolte in questa modalità. Il tempo di campionamento minimo utilizzabile è pari a 1 μ s.

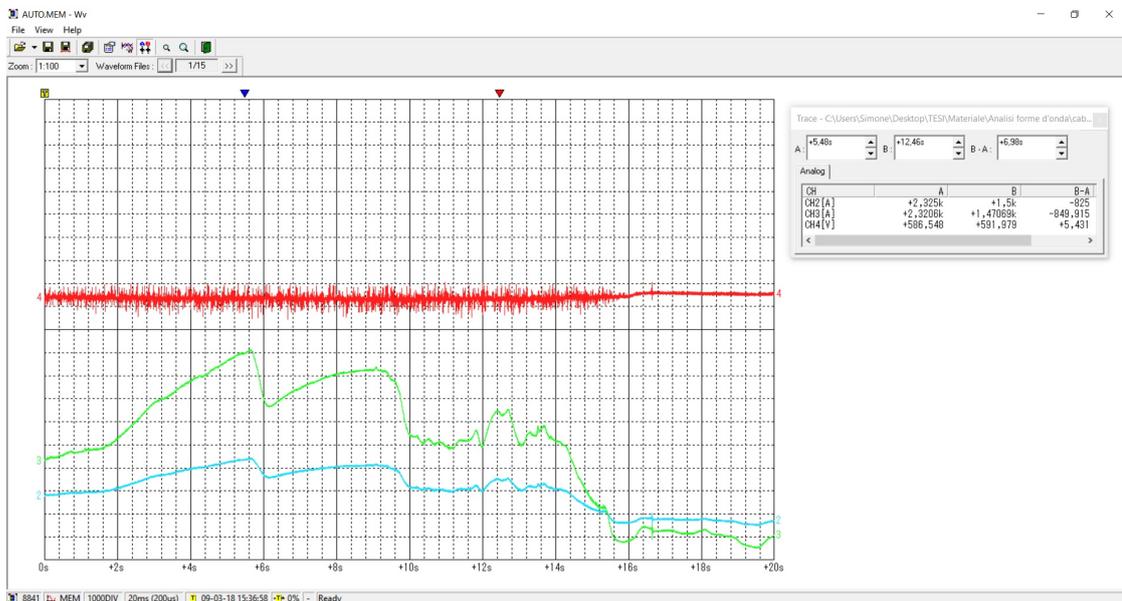


Figura 2.2. Schermata Wave Viewer

In modalità high-speed, i dati sono salvati sulla memoria esterna in formato binario, organizzati in file in formato **.MEM**. È possibile connettere il registratore direttamente ad un PC tramite porta USB per scaricarne le registrazioni o estrarre

la memoria rimovibile. Per visualizzare ed utilizzare questi file è necessario aprirli tramite un software specifico prodotto dalla HIOKI: Wave Viewer. Oltre alla possibilità di visualizzare le forme d'onda, come illustrato in figura 2.2, il programma consente di convertire i dati registrati in formati che possono essere gestiti più comodamente. Nelle successive elaborazioni delle registrazioni originali sono stati impiegati i seguenti formati, a seconda delle esigenze:

- **File di testo (.txt):** le registrazioni dei canali attivi sono salvate in un file di testo, allineate in colonna. È inoltre indicato l'istante di campionamento di ogni singolo valore. L'unico problema è costituito dall'utilizzo della virgola come separatore decimale, cosa che risulta essere incompatibile con alcune funzioni di lettura dati di software come Matlab. Tramite un editor di testo è possibile sostituire tutte le virgole con punti, ma tale operazione diventa eccessivamente lunga in presenza di un numero di valori superiore a 100000. Tale formato è stato impiegato con registrazioni di breve durata o in presenza di tempi di campionamento non troppo ridotti (al massimo 200 μs), come per le prove dei passaggi dei divisori o di cortocircuito.
- **Comma-separated values (.csv):** le registrazioni dei canali attivi sono salvati in una tabella di dati, senza uno specifico tipo di formattazione. In questo caso Matlab è in grado di leggere direttamente il file prodotto. L'utilizzo di questa estensione consentirebbe di poter gestire forme d'onda composte da un numero imprecisato di campioni, ma al di sopra del milione di valori i tempi di computazione diventano eccessivi. Tale formato è stato impiegato con le registrazioni relative all'assorbimento giornaliero di una zona elettrica, organizzate in file contenenti 1000001 di valori ciascuno.

2.1.3 Registrazione con trigger

Tale configurazione corrisponde ad una variante della modalità REPEAT, utile nel caso in cui si vogliano rilevare solo eventi specifici. Con l'impostazione su high-speed, il registratore memorizza in continuo i dati sulla memoria interna di buffer, ma il salvataggio degli stessi sulla memoria esterna avviene solo in presenza di un segnale proveniente dal dispositivo stesso o esternamente. Questa opzione è stata utilizzata per verificare le tarature su di un DIA-IGTv attivo, utilizzando come segnale di trigger l'intervento del relè stesso. La finestra di registrazione di quest'ultimo è di 300 ms, un intervallo di tempo talvolta insufficiente per individuare le cause dello scatto. Con questa modalità è quindi possibile coordinare la misurazione dei due strumenti. Affinché lo HIOKI registri anche gli istanti antecedenti al segnale di trigger è sufficiente regolare adeguatamente in anticipo il pretrigger, corrispondente all'istante di inizio della finestra di salvataggio dei dati sulla memoria di buffer.



Figura 2.3. Generatore di funzioni Agilent 33220A

2.2 Generatore di funzioni AGILENT 33220A

2.2.1 Descrizione dello strumento

Tramite questo strumento (illustrato in figura 2.3) è possibile generare una serie di forme d'onda periodiche, precostruite o arbitrarie, con frequenza variabile fino a 20 MHz. Sul pannello anteriore sono situati i comandi con i quali gestire funzioni standard, come sinusoidi, onde quadre e triangole, tramite il settaggio dei parametri fondamentali come l'ampiezza picco-picco, la frequenza e l'offset rispetto al livello di zero. Le potenzialità di questo strumento sono decisamente maggiori dal momento che può essere controllato tramite PC, tramite il software Waveform Editor della Agilent Intuilink. Oltre alla capacità di poter comporre funzioni più elaborate tramite operazioni matematiche come la somma o il prodotto, è possibile generare la forma d'onda desiderata tramite la costruzione diretta punto a punto o la lettura di un file di testo contenente i valori. Proprio quest'ultima funzionalità rappresenta il motivo della scelta di questo strumento per la prima parte delle prove eseguite, nelle quali forme d'onda estrapolate dalle registrazioni originali sono state sottoposte al DIA-IGTv, per valutarne il comportamento. In tabella 2.2 sono elencate le principali caratteristiche tecniche relative alla gestione di funzioni arbitrarie.

Numero di campioni massimo	64000
Frequenza massima di campionamento	50 Msamples/s
Range di frequenza	1 μ Hz \div 6 MHz
Incertezza sulla frequenza	$\pm(10 \text{ ppm} + 3\text{pHz})$ a 90 giorni
Range di ampiezza	20 mVpp \div 20 Vpp
Incertezza sull'ampiezza	$\pm(1\% \text{ range} + 1 \text{ mVpp})$ a 1 kHz
Impedenza output	1 Ω \div High Z

Tabella 2.2. Caratteristiche tecniche Agilent 33220A

2.2.2 Allestimento del banco di prova

Come illustrato in figura 2.4, in laboratorio sono a disposizione tutti i componenti della catena di misura del relè: il trasduttore (1), il ricevitore (2) e il DIA-IGTv (3). La resistenza di shunt presente in cabina può essere sostituita da un resistore di valore 1Ω . La caratterizzazione di questa catena di misura è già stata oggetto di studio [3], con un'analisi dettagliata riguardante gli errori introdotti dai vari stadi e le differenze tra il segnale originale e l'equivalente letto dal DIA-IGTv. Nel mio caso, per ottenere una maggior risoluzione da parte del generatore di funzioni, si è ritenuto opportuno optare per una connessione diretta, eliminando quindi il trasmettitore e il ricevitore. L'utilizzo della resistenza di shunt avrebbe implicato un range di uscita del generatore mediamente inferiore ai 20 mV, il minimo valore impostabile come ampiezza picco-picco. Anche la risoluzione del segnale stesso ne avrebbe risentito, con un errore relativo superiore al 5%.



Figura 2.4. Componenti catena di misura DIA-IGTv

Il collegamento diretto ci permette di disporre di forme d'onda di qualità decisamente maggiore. Il relè presenta due canali in corrente come ingressi, il cui utilizzo dipende dall'entità della lettura; dal momento che in tutte le prove eseguite il valore massimo non ha mai superato i 4000 A, si è deciso di utilizzare solo il canale 1 (attivo fino a 6000 A). La connessione è stata realizzata tramite l'impiego di un cavo BNC con le due uscite connesse rispettivamente ai morsetti 25 e 26 del DIA-IGTv, individuabili sullo schema in figura 2.5. In figura 2.6 è invece schematizzato il banco di misura nel suo insieme, mentre in figura 2.7 sono presenti il generatore di funzioni (1), il relè (2) e il registratore HIOKI (3), utilizzato come oscilloscopio.

L'ampiezza del segnale prodotto dal generatore di funzioni è adattato in base alla resistenza vista ai terminali del cavo BNC, e deve essere impostata al momento dell'accensione dello strumento. In questo caso, non essendo presente alcun stato

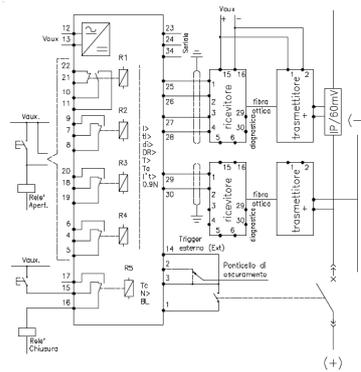


Figura 2.5. Connessioni DIA-IGTv

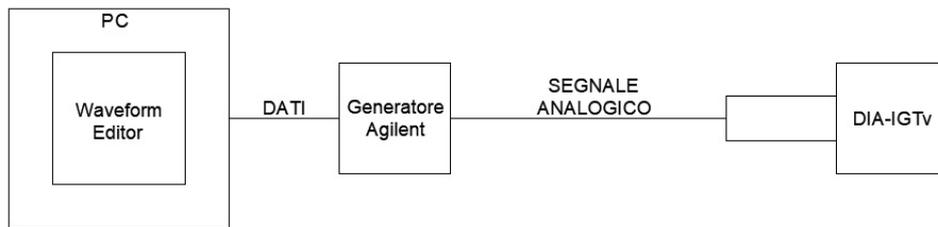


Figura 2.6. Schema banco di misura con generatore di funzioni

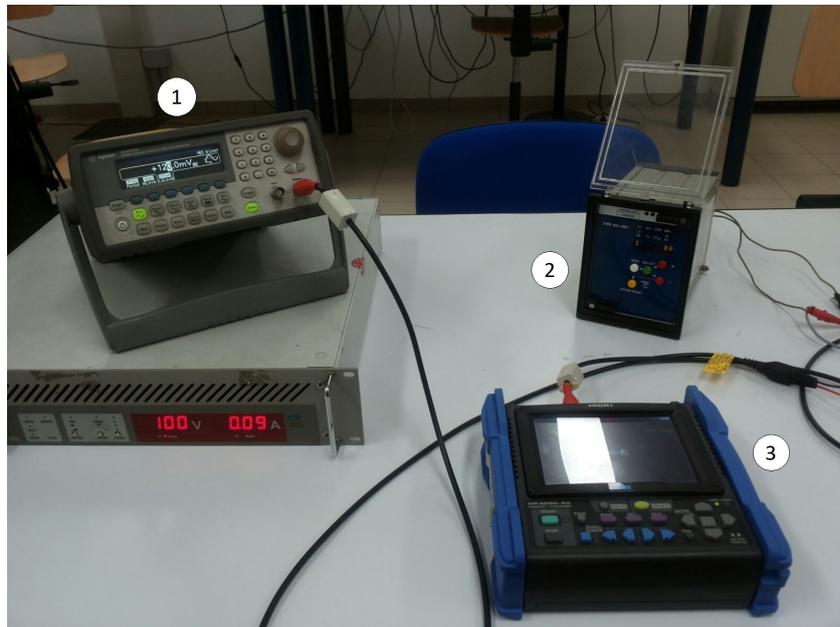


Figura 2.7. Banco di prova DIA-IGTv

intermedio, deve essere considerata la resistenza di ingresso del relè, del valore di 163Ω , calcolata con metodo voltamperometrico [3].

2.2.3 Test preliminari

Inizialmente sono state svolte alcune prove con l'obiettivo di caratterizzare il comportamento del generatore. Da un confronto sommario tramite oscilloscopio risultavano disparità significative tra il file sorgente e la forma d'onda in output, riguardanti soprattutto la riproduzione dell'ampiezza picco-picco impostata, unita alla presenza di un offset di entità non costante.

Determinazione del fattore di scala

In figura 2.8 sono confrontate la forma d'onda originale sottoposta al software del generatore e la registrazione ottenuta tramite un registratore HIOKI della forma d'onda ai morsetti del generatore. Si può facilmente notare come l'output risulti essere scalato di un fattore pressoché costante rispetto alla prima. È stata utilizzata questa determinata forma d'onda in modo tale da verificare l'entità della riduzione in presenza sia di valori costanti che di rampe. Dalla divisione valore per valore delle due forme d'onda e dal calcolo della media nei tratti non nulli si è ottenuto un fattore pari a **1.0986** (approssimato a 1.1 nelle prove successive). Questo fattore moltiplicativo deve essere considerato nel momento della preparazione dei file di prova, in modo tale da garantire la corretta riproduzione del segnale originale ai morsetti del relè.

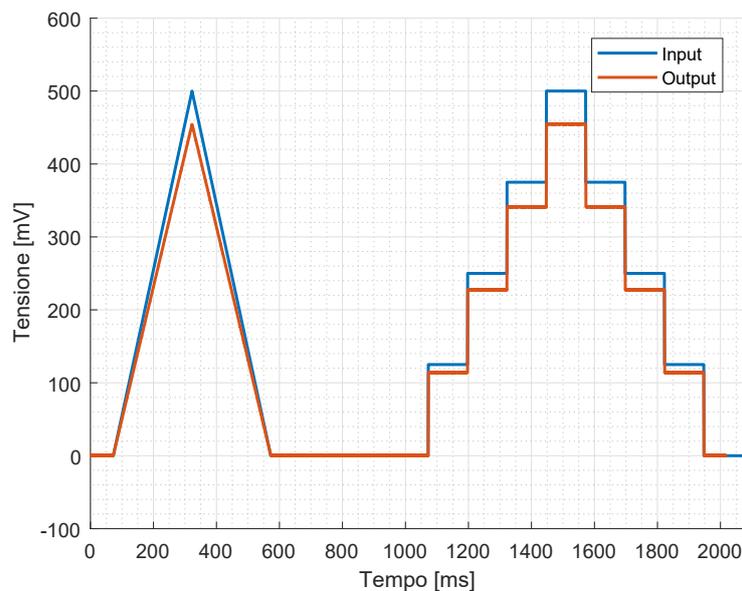


Figura 2.8. Confronto input-output Agilent senza scalatura

Determinazione dell'offset

Un simile procedimento è stato svolto per la determinazione dell'offset presente nei segnali in output. In questa serie di test si è notato che l'entità di questo disturbo non risulta essere costante, ma dipende principalmente dalla resistenza di uscita impostata e dai parametri del segnale generato. Nel nostro caso, considerata la resistenza di ingresso del relè pari a 163Ω e una frequenza che si aggira intorno a 1-2 Hz a seconda della prova, si vede che, a seconda del range di tensione picco-picco, si presentano i valori illustrati in tabella 2.3. In realtà, nell'intervallo di tensioni compreso tra 0.7 e 0.8 V possono coesistere entrambi i valori di offset, ma il fatto non costituisce un problema dal momento che, nel corso delle prove, si ha un riscontro diretto sul registratore HIOKI, impiegato in questa occasione come oscilloscopio. L'impostazione errata dell'offset può quindi essere rilevata direttamente. La compensazione viene applicata nel momento dell'invio del segnale al generatore da PC.

V_{pp}	Offset
<0,75 V	-122 mV
>0,75 V	-243 mV

Tabella 2.3. Offset Agilent 33220A

Confronto input-output

Per verificare la correttezza delle considerazioni effettuate nelle due sezioni precedenti è stata utilizzata come forma d'onda campione una delle registrazioni che saranno sottoposte in seguito al DIA-IGTv. I risultati sono illustrati in figura 2.9, dove è evidente l'allineamento quasi perfetto tra il riferimento di input del generatore e il segnale di uscita.

2.2.4 Preparazione dei file di prova

Le registrazioni utilizzate come punto di partenza per le prove consistono in una serie di file in formato .MEM, ottenuti tramite l'ausilio del registratore HIOKI. In figura 2.10 è illustrata una delle registrazioni originali utilizzate per le prove, così come appare sulla schermata del software Wave Viewer. In questa sezione è descritto il procedimento seguito per ottenere i file definitivi da passare al generatore di funzioni, tramite l'impiego di uno script Matlab.

- La maggior parte delle registrazioni in nostro possesso presentano una durata di 20 s e un tempo di campionamento pari a $200 \mu s$: si ha quindi a che fare con file contenenti all'incirca 100000 valori. Dal momento che il generatore consente di gestire forme d'onda composte al massimo da 64000 campioni, si è optato per estrapolare il segmento in cui avviene il fenomeno di interesse, della durata media inferiore al secondo. Stesso procedimento è stato adottato per le registrazioni relative alle prove di cortocircuito, anche se i minori tempi di campionamento impiegati (dai 2 a $10 \mu s$) hanno reso necessaria una

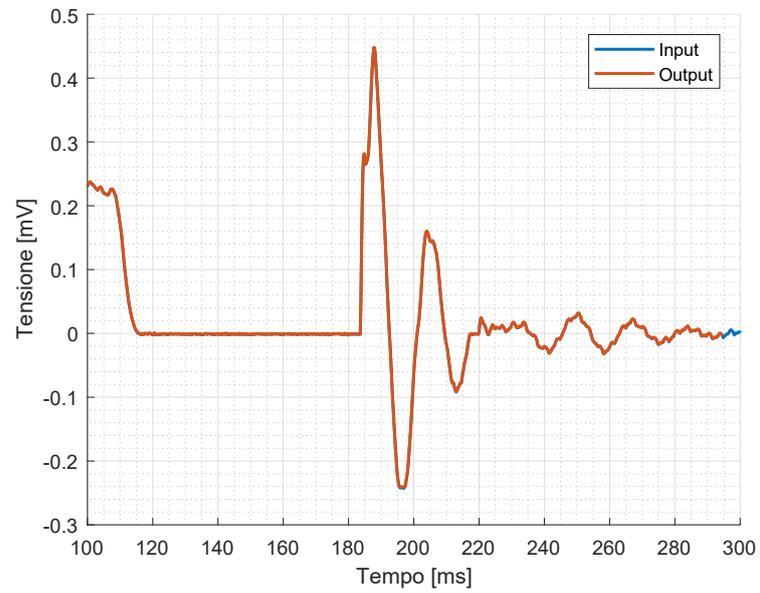


Figura 2.9. Confronto input-output Agilent con scalatura

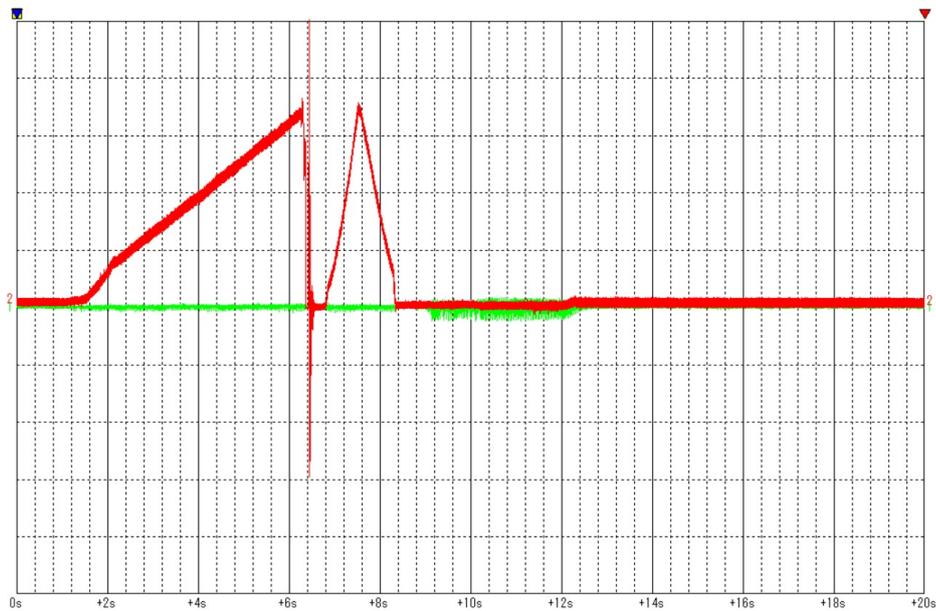


Figura 2.10. Registrazione originale

successiva interpolazione a $200 \mu s$, per limitare il numero di valori e, allo stesso tempo, uniformarsi alle prove dei passaggi. È noto che il DIA-IGTv campiona la corrente a 1 ms , ma in questo modo si hanno a disposizione forme d'onda dotate di una maggiore risoluzione.

- Il generatore produce in output un segnale di tipo periodico, ripetendo in sequenza la forma d'onda alla frequenza impostata; in caso di un'eccessiva differenza tra il primo e l'ultimo valore si avrebbe una discontinuità a gradino tale da poter essere rilevata dal relè all'interno del suo ciclo di misura. Questo inconveniente è stato risolto tramite l'aggiunta di una rampa (tra l'ultimo valore di ogni forma d'onda e il primo della seguente) alla fine di ogni registrazione, in modo tale da avere un'uscita periodica senza la presenza di scalini, come illustrato in figura 2.11. Tramite questo procedimento sono state inoltre uniformate le varie prove dal punto di vista del numero di campioni: indipendentemente dalla lunghezza del segmento estrapolato, l'aggiunta della rampa genera una serie di file di uguale lunghezza.

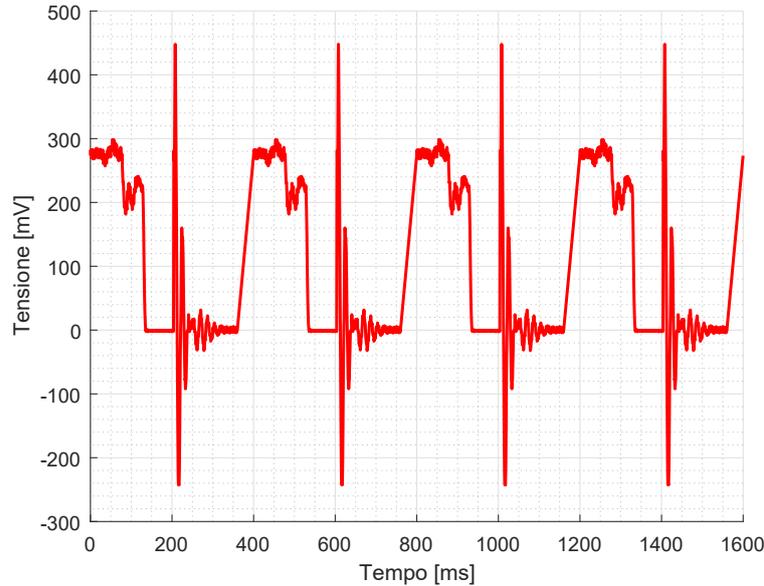


Figura 2.11. Forma d'onda di uscita

- Le registrazioni sono relative all'assorbimento della vettura o della linea in corrente, mentre il generatore di funzioni presenta un'uscita in tensione; per capire come convertire correttamente i dati in nostro possesso bisogna analizzare il tipo di connessione. Come illustrato in precedenza, è stato impiegato uno dei due ingressi del relè, che presenta le seguenti caratteristiche: $20 \text{ mA} = I_n$, nel nostro caso pari a 4000 A . Fornendo una tensione ai terminali del dispositivo, la corrente risultante dipende dalla resistenza di ingresso R_{in} , pari a 163Ω . Chiamando i_{real} la corrente reale registrata dallo HIOKI, I_{rele} il range di ingresso del DIA-IGTv (20 mA) e v_{gen} la tensione equivalente che deve essere fornita dal generatore, otteniamo la seguente equivalenza,

che verrà impiegata nel momento in cui dovrà essere calcolata l'ampiezza effettiva del segnale.

$$v_{gen} = R_{in} \cdot \frac{I_{rele}}{I_n} \cdot i_{real} \quad (2.1)$$

- I file da sottoporre al generatore di funzioni devono essere costituiti da valori in p.u. compresi tra +1 e -1 (l'effettiva ampiezza picco-picco del segnale in valore assoluto di tensione viene impostata in seguito). Per semplicità, si sarebbe potuto normalizzare tutti i dati rispetto alla corrente nominale I_n pari a 4000 A, così da poter mantenere costante l'ampiezza impostata (in questo caso pari a 3.26 V, valore ottenuto fissando i_{real} pari a 4000 A nella formula 2.1). In questo modo i segnali così prodotti avrebbero però goduto di una minore risoluzione, dal momento che, escluse alcune prove di cortocircuito, le correnti misurate difficilmente superano i 1000 A. Si è quindi preferito scalare di volta in volta ogni forma d'onda rispetto al valore massimo registrato, in modo tale da sfruttare interamente il range a nostra disposizione. I dati così elaborati sono stati quindi scritti in un file di testo, pronti per essere sottoposti al software del generatore.

2.2.5 Calcolo dei parametri Waveform Editor

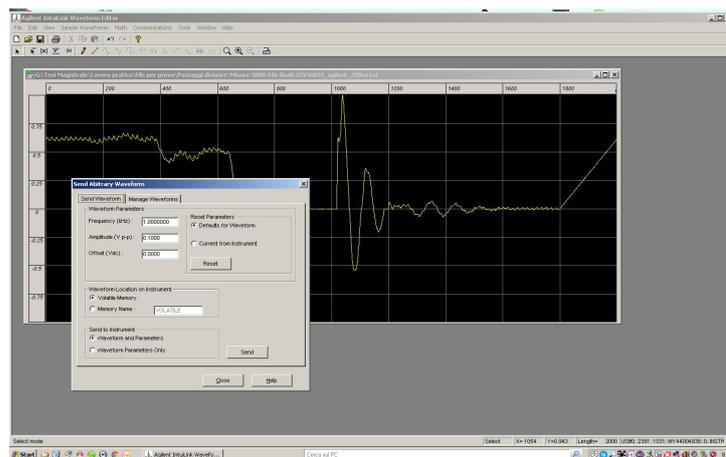


Figura 2.12. Schermata Waveform Editor

In figura 2.12 è illustrata la schermata del programma Waveform Editor, nella quale impostare i parametri utili alla generazione della forma d'onda desiderata.

Una volta aperto il file di testo contenente i valori in p.u., bisogna settare le seguenti grandezze:

1. **Frequenza** f : per garantire che il fenomeno riprodotto nella prova conservi la durata reale della registrazione originale, si deve considerare il tempo di campionamento T_s e il numero di campioni totale N_s (compresa l'aggiunta della rampa), secondo la seguente formula:

$$f = \frac{1}{N_s \cdot T_s} \quad (2.2)$$

2. **Ampiezza** V_{pp} : dal momento che i dati relativi ad ogni registrazione sono scalati rispetto al valore massimo, questo parametro deve essere ricalcolato per ogni prova; una volta determinate il valore, lo si moltiplica per la costante k_{gen} pari a 1.1 (per compensare l'errore sulle ampiezze determinato in precedenza). Riutilizzando la formula 2.1, è possibile scrivere:

$$V_{pp} = k_{gen} * \left[R_{in} \cdot \frac{I_{rele}}{I_n} \right] \cdot \left(\max(i_{real}) - \min(i_{real}) \right) \quad (2.3)$$

3. **Offset**: dipende fondamentalmente dall'ampiezza V_{pp} calcolata al punto precedente. Per verificarne la correttezza è sufficiente controllare l'allineamento del tratto nullo della forma d'onda con l'asse x del registratore HIOKI, utilizzato come oscilloscopio.

2.2.6 Test conclusivo

Per ultimo è stata verificata la correttezza di tutti i passaggi precedentemente illustrati, tramite il confronto tra il file sorgente, la registrazione dello HIOKI ai morsetti del generatore e la registrazione interna del DIA-IGTv. Per rendere possibile questo è stato necessario utilizzare una forma d'onda tale da provocare uno scatto del relè, unico modo per attivarne la funzione di registrazione interna. In figura 2.13 sono confrontate le tre forme d'onda: la forma d'onda originale, la registrazione tramite HIOKI ai morsetti del generatore e la registrazione sulla memoria interna del DIA-IGTv. Quest'ultimo misura esclusivamente il valore assoluto della corrente, ragione per cui è stato applicato anche agli altri due segnali.

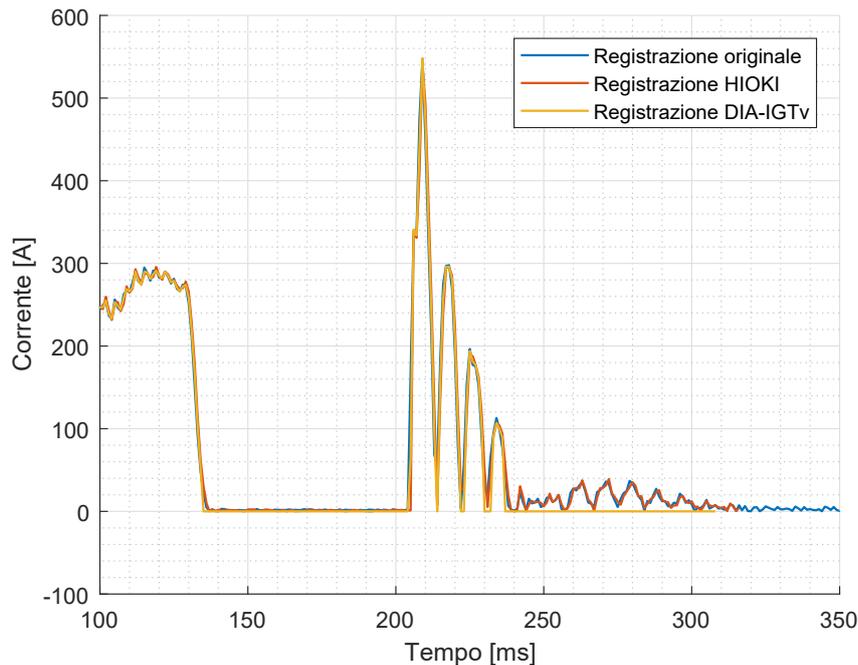


Figura 2.13. Confronto conclusivo

2.3 Simulatore real-time OPAL-RT OP5600

2.3.1 Descrizione dello strumento



Figura 2.14. Simulatore Real-Time OP5600

In figura 2.14 è raffigurato il secondo strumento utilizzato per svolgere le prove in laboratorio sul DIA-IGTv. Si tratta di un simulatore real-time della OPAL-RT, modello OP5600. Nella parte superiore sono contenuti i moduli atti alla gestione dei segnali I/O analogici e digitali. Nella parte inferiore si trovano il processore multi-core e il FPGA che consentono di gestire ogni aspetto della simulazione real time. Alcune caratteristiche tecniche sono elencate nella tabella 2.4. Il software

Sistema operativo	Red Hat Enterprise Linux
Processore	Intel Xeon E5 32-cores, 3.2 GHz
FPGA	Xilinx Spartan-3
Prestazioni	7 ms di passo minimo
Numero slot I/O	8
Numero canali analogici per slot	16
Numero canali digitali per slot	32
I/O di monitoraggio	16 Mini-BNC

Tabella 2.4. Caratteristiche tecniche OPAL-RT OP5600

di simulazione è eMEGASIM, il quale si basa sullo standard Simscape Power Systems. È gestito tramite il software RT-LAB, una piattaforma che permette di implementare simulazioni da modelli sviluppati in ambiente Simulink.

Questo tipo di dispositivi offre enormi potenzialità dal punto di vista della capacità di modellizzare e simulare sistemi anche molto complessi, ma in questo caso la scelta del suo utilizzo deriva da esigenze specifiche relative ai seguenti tipi di test:

- **Assorbimento giornaliero:** queste registrazioni presentano una durata di 200 s. Considerando un tempo di campionamento impiegato pari a $200 \mu s$, si è in presenza di una serie di file contenenti un milione di valori l'uno. A causa del limite di memoria del generatore di funzioni (64000 campioni), è stato necessario utilizzare il simulatore, che, in questo caso, si limita a leggere i dati da un file d'ingresso e restituire un'uscita analogica debitamente scalata, secondo la formula 2.1.
- **Simulazioni di cortocircuito:** oltre a sottoporre al DIA-IGTv le registrazioni di prove reali di cortocircuito svolte negli anni precedenti, si è deciso di svolgere una serie di simulazioni aggiuntive, attraverso l'impiego di un circuito equivalente semplificato della rete. Le registrazioni utilizzate per le prove sono relative a cortocircuiti effettuati in cabina o a fondo linea. Tramite una simulazione in ambiente Simulink è invece possibile simulare una casistica maggiormente variegata, ipotizzando un guasto in un punto casuale della linea o modificando alcuni parametri per valutarne le differenze.

2.3.2 Preparazione del modello Simulink

Il primo passo consiste nel partire da un modello Simulink funzionante. Il nucleo principale è rappresentato dalle operazioni di conversione dei dati in corrente nell'equivalente in tensione e alla compensazione di eventuali disturbi introdotti dallo strumento, similmente a quanto descritto per il generatore di funzioni. La compensazione di questo tipo di errori deve essere applicata direttamente sullo schema a blocchi, in maniera diretta. La differenza tra i due tipi di test svolti tramite il simulatore consiste principalmente nell'origine dei dati: nelle prove di assorbimento giornaliero si utilizzano come file sorgente delle registrazioni reali, mentre per le simulazioni di cortocircuito il punto di partenza è rappresentato dal circuito equivalente della rete riprodotto direttamente in ambiente Simulink. Maggiori dettagli

riguardo l'effettiva struttura dei due modelli saranno forniti nei capitoli relativi ai risultati delle prove stesse.

I passaggi descritti in questa sezione sono tratti da un'altro lavoro di tesi [4]. La prima modifica da compiere consiste nel dividere il modello Simulink di partenza in due sottosistemi, il Master e la Console: il primo contiene il nucleo della simulazione, mentre il secondo rappresenta l'unica sezione dello schema a blocchi originale con cui è possibile interagire nel corso delle prove. In questo caso, è costituito essenzialmente da strumenti tramite i quali monitorare il corretto funzionamento dell'insieme, quali display numerici ed oscilloscopi virtuali. L'interfacciamento tra il modello Simulink e il software RT-LAB è reso possibile tramite l'aggiunta dei seguenti blocchi:

- La possibilità di scambiare segnali tra i diversi sottosistemi durante l'esecuzione real-time è garantita dal blocchetto OpComm (figura 2.15), in questo caso impiegato per poter visualizzare l'andamento della simulazione sullo schermo del PC che controlla il simulatore.

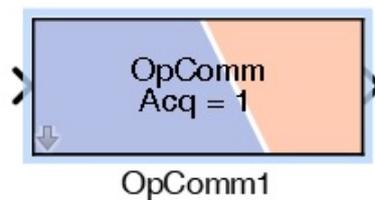


Figura 2.15. Blocco Simulink OpComm

- L'attivazione degli input e output analogici e digitali tramite FPGA del simulatore è affidata al blocchetto OpCtrl OP5142EX1 (figura 2.16), attraverso un file di configurazione con il quale stabilire la porta di uscita e i pin attivi della stessa. Per le simulazioni sarà necessario disporre di un unico output analogico tramite il blocchetto OP5142EX1 AnalogOut (figura 2.17), con il quale connettere lo strumento al DIA-IGTv.



Figura 2.16. Blocco Simulink OpCtrl

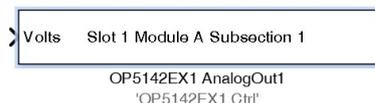


Figura 2.17. Blocco Simulink OpAnalogOut

Una volta verificato il funzionamento del modello modificato, è quindi possibile caricare la simulazione sul simulatore e gestire il tutto dalla console di RT-LAB. La connessione con il relè è stata effettuata tramite un cavo BNC connesso all'output analogico dell'OP5600. In figura 2.18 è schematizzato il banco di prova allestito.

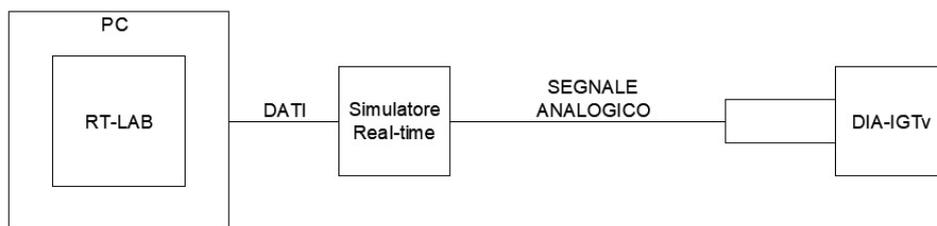


Figura 2.18. Schema banco di misura con simulatore real-time

2.3.3 Test preliminari

Come per il generatore di funzioni, anche in questo caso sono stati svolti alcuni test per verificare il corretto accoppiamento tra i vari strumenti e per individuare eventuali errori o disturbi da compensare.

Confronto input-output

Il simulatore real-time è dotato di due tipi di output: sul pannello anteriore sono presenti i morsetti di monitoraggio, mentre sul retro sono situati i veri terminali, sia analogici che digitali. In questa prova è stata utilizzata una registrazione di assorbimento giornaliero. In figura 2.19 sono confrontati la forma d'onda sorgente, la registrazione ai terminali di monitoraggio anteriori e quella dell'output posteriore. Si nota bene come i tre segnali siano praticamente coincidenti. A differenza del generatore Agilent, il simulatore non introduce riduzioni significative sulle ampiezze; inoltre, entrambi i segnali in output risultano essere maggiormente definiti.

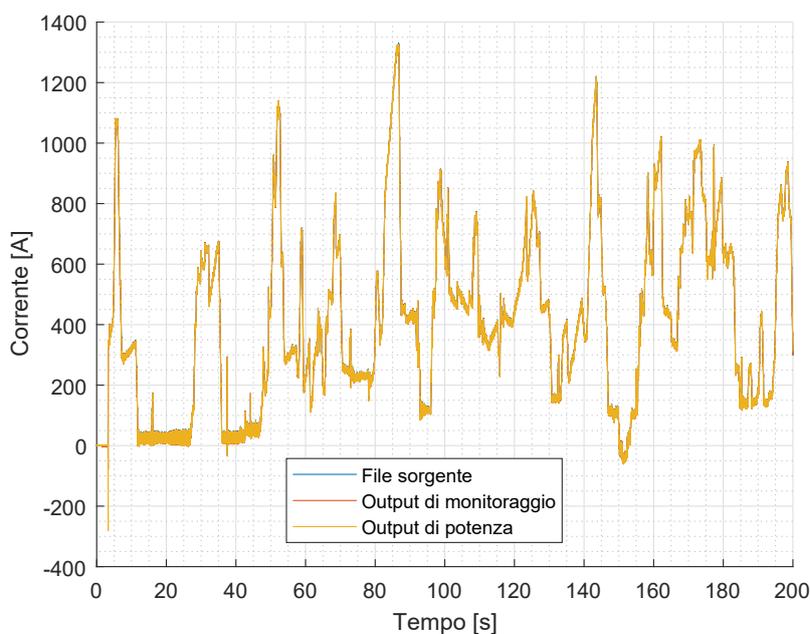


Figura 2.19. Confronto output simulatore real-time

Parallelamente a questo confronto, è stata inoltre verificata la presenza di un eventuale offset rispetto al riferimento, disturbo assai rilevante nel generatore di funzioni. Dai calcoli effettuati tale errore è risultato pari a -0.657 mV. Considerando che tale tensione, in termini di misura di corrente vista dal relè, risulta essere pari a 0.8 A, si è deciso di trascurarlo, in quanto pressoché ininfluenza sui test che saranno effettuati.

Confronto input-lettura DIA-IGTv

Per questioni logistiche, la connessione tra i terminali di output del simulatore e il DIA-IGTv è stata realizzata tramite un cavo BNC di lunghezza non trascurabile, pari a diversi metri. Conduttori di tale estensione possono condizionare le misure in maniera anche significativa, soprattutto in presenza di segnali in tensione. Si è quindi deciso di effettuare una prova completa provocando uno scatto del relè, in modo tale da disporre della registrazione. In questo caso, la forma d'onda utilizzata risulta essere un semplice gradino di tensione con valore di partenza pari a 1 V e arrivo pari a 4 V. Al brusco aumento della tensione il relè scatta istantaneamente, in quanto il segnale in input corrisponde ad una corrente superiore a 4900 A. In figura 2.20 è illustrata la prova in questione, nella quale è evidente la presenza di una certa scalatura tra le due forme d'onda. Dai calcoli effettuati la registrazione del DIA-IGTv risulta essere ridotta di un fattore pari a 1.03 rispetto all'equivalente misurata ai terminali del simulatore. Tale coefficiente sarà applicato a tutti i test eseguiti in modo tale da garantire la corretta riproduzione delle correnti delle registrazioni che intendiamo utilizzare.

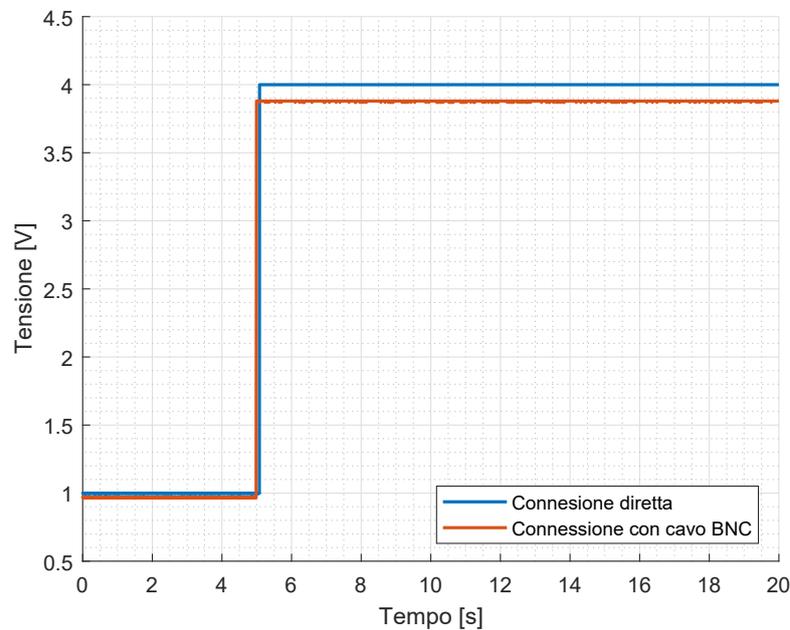


Figura 2.20. Effetto del cavo BNC di 5 m

Capitolo 3

Prove di funzionamento ordinario - Passaggio sotto divisore di zona

3.1 Descrizione del fenomeno

Come accennato nel capitolo introduttivo, la rete tranviaria torinese è suddivisa in 49 sottozone isolate tra di loro. Le linee di contatto relative a due zone contigue sono unite da un dispositivo chiamato divisore di zona. La natura isolante dello stesso è all'origine delle particolari forme d'onda che si registrano nell'assorbimento in corrente di una vettura nel momento in cui il pantografo attraversa questo divisore. Al netto del differente comportamento delle varie motrici in base al tipo di azionamento, è comunque possibile individuare tre fasi che contraddistinguono questo fenomeno, individuabili in figura 3.1:

1. Uscita dal primo settore: in questa fase si assiste all'annullamento della corrente assorbita, coincidente con l'ingresso del pantografo nel tratto isolante del divisore;
2. Passaggio sotto al divisore: in questa fase la corrente assorbita rimane nulla. La durata media dipende dalla velocità del tram: 100 ms a 30 km/h, 150 ms a 20 km/h.
3. Ingresso nel secondo settore: in questa fase si assiste ad un brusco aumento della corrente assorbita, provocato dalla presa di tensione dell'azionamento nel momento in cui il pantografo entra in contatto con la linea alimentata della nuova zona.

Come si può intuire, le criticità risiedono proprio in quest'ultima fase, con correnti che possono assumere pendenze tali da provocare scatti intempestivi del relè, con conseguente disservizio. Nel corso degli studi eseguiti in precedenza [3] erano state rilevate differenze anche molto marcate nei comportamenti delle differenti motrici, motivo per cui l'analisi relativa ad ogni vettura è stata condotta separatamente. Le forme d'onda che sono state utilizzate per questo tipo di test sono state registrate in occasione del lavoro precedente.

Nel corso di queste prove le singole forme d'onda sono state passate tramite il generatore di funzioni al relè, annotando di volta in volta il comportamento del

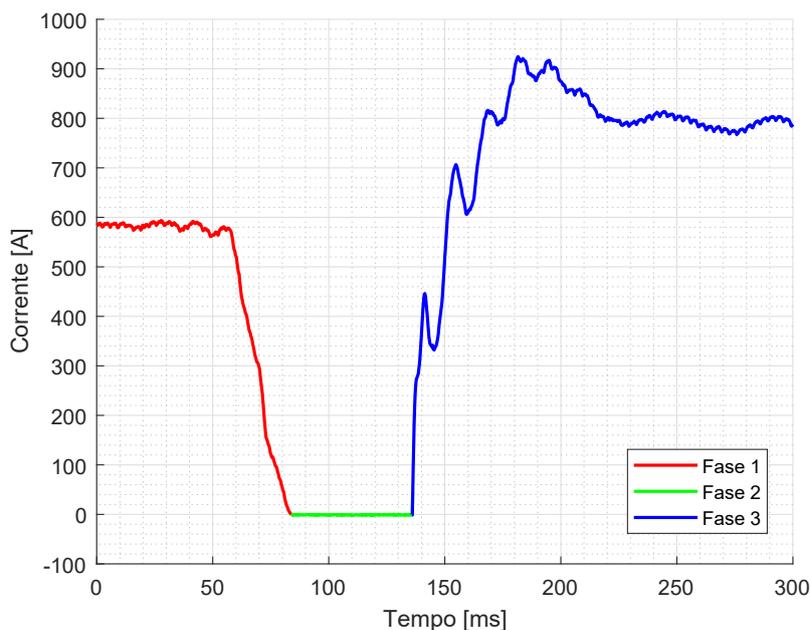


Figura 3.1. Esempio di passaggio sotto al divisore di zona

dispositivo. Dal momento che il generatore è in grado di emettere forme esclusivamente periodiche, ogni registrazione è stata quindi sottoposta svariate volte; eventuali scatti sono quindi stati presi in considerazione solo se manifestatisi un numero ragionevole di volte (in modo tale da evitare possibili letture errate dello strumento).

3.2 Preparazione dei file di prova

Le registrazioni originali consistono in una serie di file, raccolti tramite un registratore HIOKI, aventi le caratteristiche elencate in tabella 3.1.

Durata singola registrazione	20 s
Tempo di campionamento	200 μ s
Numero di campioni	100001

Tabella 3.1. Parametri registrazioni originali

La preparazione dei file destinati al generatore di funzioni è stata descritta nel capitolo 2, in quanto valida per tutte le prove eseguite con tale strumento. Rispetto all'insieme di tutte le registrazioni a disposizione, sono state utilizzate solo quelle in cui l'effettivo transito al di sotto del divisore è stato individuato. Ogni singola prova si è svolta tramite il passaggio del relativo file al DIA-IGTV, con conseguente annotazione di eventuali scatti verificatisi. In alcuni test il relè non è scattato al primo ciclo della forma d'onda, ma a volte ha richiesto anche numerosi tentativi. Questo fenomeno si è verificato esclusivamente per interventi per $\mathbf{A/ms}$. Tutto ciò può essere spiegato se si considera che il dispositivo misura

la corrente assorbita ogni millisecondo. In presenza di oscillazioni ripide di breve durata, è quindi possibile che il vertice di tale picco sia situato a metà strada tra i due istanti di campionamento, restituendo quindi un valore del gradiente calcolato ben minore di quello reale. Questo problema risulta essere tanto più frequente in presenza di forme d'onda con parametri di poco superiori alle tarature impostate, con la conseguente diminuzione della probabilità di intervento. Per verificare a fondo la bontà delle tarature proposte ogni registrazione è stata quindi sottoposta diverse volte al DIA-IGTv.

3.3 Motrice 2800

3.3.1 Presentazione delle registrazioni

Le forme d'onda sono state effettuate nella giornata del 24 maggio 2017, tramite la registrazione dell'assorbimento di corrente della motrice misurato sulla vettura stessa, grazie ad una pinza amperometrica posizionata attorno ai cavi in uscita dal pantografo e connessa ad un registratore HIOKI. In questo modo, è possibile assistere a tutte e tre le fasi del fenomeno del passaggio sotto il divisore di zona. I file, una volta elaborati, presentano le seguenti caratteristiche, elencate in tabella 3.2.

Numero file di prova	20
Campionamento impiegato	200 μ s
Numero di campioni	2000
Frequenza forma d'onda	2.5 Hz

Tabella 3.2. Parametri file di prova motrice 2800

Per quanto riguarda questo fenomeno, la motrice 2800 risulta essere la vettura che presenta le minori criticità, con correnti di picco contenute, gradienti poco rilevanti e assenza quasi totale di oscillazioni al momento dell'ingresso nella nuova zona. L'unico effetto rilevante consiste in una sovraelongazione della corrente assorbita. Un tipico esempio è illustrato in figura 3.2.

3.3.2 Risultati dei test

In tabella 3.3 sono elencati nel dettaglio i risultati delle prove eseguite con le registrazioni relative alla motrice 2800.

3.3.3 Conclusioni

In tabella 3.4 sono riassunti i risultati delle prove. Nel corso di tutti i test non si è verificato alcuno scatto del DIA-IGTv. Apparentemente il dispositivo sarebbe dovuto intervenire, dal momento che svariate registrazioni presentano gradienti superiori alla taratura impostata (100 A/ms). Questo non avviene perchè il relè misura la corrente ogni ms, mentre la forma d'onda originale ha un tempo di campionamento pari a 200 μ s; il gradiente calcolato risulta quindi essere inferiore

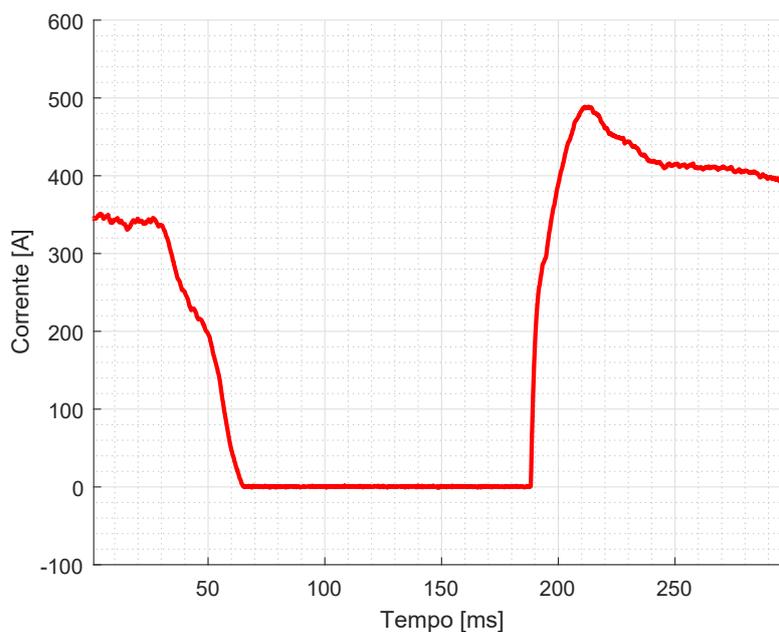


Figura 3.2. Esempio motrice 2800

2800 Nome file	Grandezze misurate		Scatto rilevato		
	Imax (A)	Gradmax (A/ms)	I>	A/ms>	DR>
2884_001	250.00	85.63	-	-	-
2884_002	488.75	117.66	-	-	-
2884_003	421.90	115.00	-	-	-
2884_005	189.69	102.66	-	-	-
2884_007	461.72	129.06	-	-	-
2884_009	265.31	152.97	-	-	-
2884_011	346.25	107.81	-	-	-
2884_012	286.72	121.56	-	-	-
2884_015	447.34	126.88	-	-	-
2884_017	180.94	95.47	-	-	-
2884_021	409.84	140.78	-	-	-
2884_022	300.31	127.19	-	-	-
2884_023	286.72	108.28	-	-	-
2884_024	309.84	145.47	-	-	-
2884_025	169.84	108.44	-	-	-
2884_026	107.81	59.84	-	-	-
2884_029	316.56	117.34	-	-	-
2884_030	310.00	132.66	-	-	-
2884_031	329.38	78.75	-	-	-
2884_033	161.56	94.53	-	-	-

Tabella 3.3. Elenco prove motrice 2800

al valore reale. Questa differenza era già stata evidenziata [3]. Le motrici 2800, anche se decisamente più datate rispetto agli altri modelli, sono anche le meno problematiche dal punto di vista di questo fenomeno.

Numero prove	20
Numero scatti relè	0
Corrente massima registrata [A]	488,75
Gradiente massimo registrato [A/ms]	152,97

Tabella 3.4. Riassunto prove motrice 2800

3.4 Motrice 5000

3.4.1 Presentazione delle registrazioni

Le registrazioni inerenti a questo tipo di vettura, svoltesi in data 29 marzo 2017, sono state eseguite con le stesse modalità descritte per le prove sulla motrice 2800. I file, una volta elaborati, presentano le seguenti caratteristiche, elencate in tabella 3.5.

Numero file di prova	34
Campionamento impiegato	200 μ s
Numero di campioni	2000
Frequenza forma d'onda	2.5 Hz

Tabella 3.5. Parametri file di prova motrice 5000

La differente struttura dell'azionamento fa in modo che si possano presentare due differenti comportamenti al momento dell'ingresso nella nuova zona:

- In caso di RESET dell'azionamento, la corrente assorbita si assesta su di un valore nullo dopo una serie di oscillazioni che possono avere gradienti decisamente elevati, tanto da poter causare scatti intempestivi del relè; questa situazione è tanto più probabile se il valore della corrente assorbita in uscita dalla zona precedente ha valori non elevati. Un tipico esempio è illustrato in figura 3.3.
- In caso di NON RESET dell'azionamento, la corrente assorbita si assesta su di un valore medio non nullo dopo una serie di oscillazioni che presentano gradienti meno elevati, risultando quindi non problematica dal punto di vista del DIA-IGTv; questa situazione è tanto più probabile quando il valore della corrente assorbita in uscita dalla zona precedente ha valori più elevati. Al netto del maggior numero di oscillazioni sul fronte di risalita, l'andamento ricorda vagamente la forma d'onda tipica della motrice 2800. Un tipico esempio è illustrato in figura 3.3.

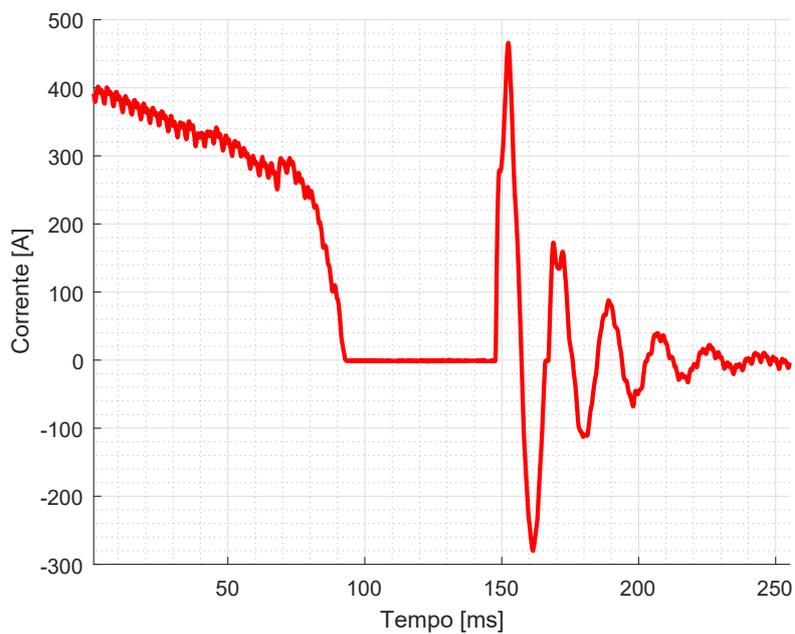


Figura 3.3. Esempio motrice 5000 - RESET dell'azionamento

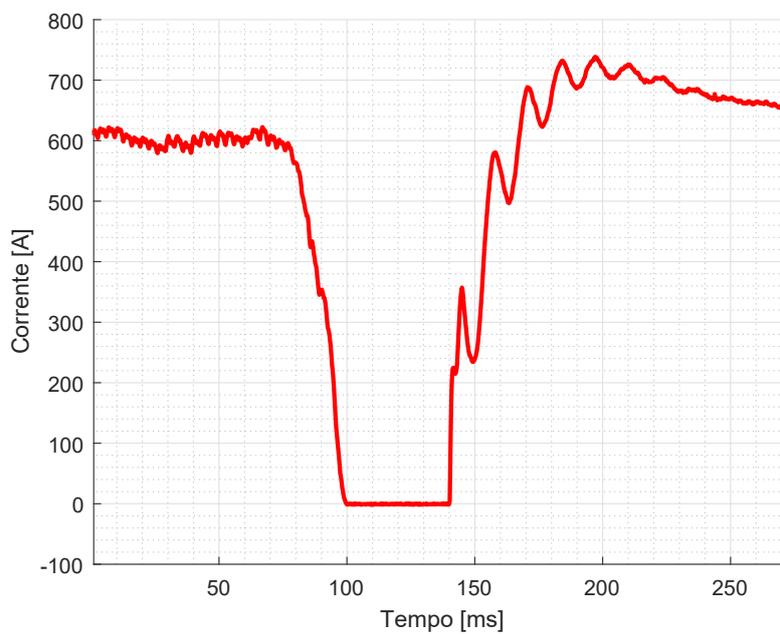


Figura 3.4. Esempio motrice 5000 - NON RESET dell'azionamento

3.4.2 Risultati dei test

I risultati effettivi dei test sono elencati di seguito; in questo caso, visto il diverso andamento delle forme d'onda a seconda della situazione, si è preferito stilare due elenchi separati. In tabella 3.6 troviamo quindi i casi in cui non si è verificato il reset dell'azionamento, mentre in tabella 3.7 le prove restanti.

5000 - NO RESET	Grandezze misurate		Scatto rilevato		
	Nome file	Imax (A)	Gradmax (A/ms)	I>	A/ms>
DIV50039	856.25	259.06	-	-	-
DIV50040	738.44	211.56	-	-	-
DIV50042	635.00	114.06	-	-	-
DIV50046	733.44	197.81	-	-	-
DIV50054	562.81	188.75	-	-	-
DIV50057	752.50	180.94	-	-	-
DIV50059	698.44	129.06	-	-	-
DIV50061	1033.13	295.63	-	-	-
DIV50062	609.69	146.25	-	-	-
DIV50069	924.69	215.63	-	-	-
DIV50074	844.69	200.31	-	-	-
DIV50076	772.19	273.13	-	-	-

Tabella 3.6. Elenco prove motrice 5000 - NO RESET

5000 - RESET	Grandezze misurate		Scatto rilevato		
	Nome file	I _{max} (A)	Gradmax (A/ms)	I>	A/ms>
DIV50032	437.81	148.13	-	-	-
DIV50033	549.53	340.63	-	x	-
DIV50034	493.44	309.69	-	x	-
DIV50035	510.94	171.88	-	-	-
DIV50037	465.94	251.56	-	-	-
DIV50041	497.81	255.00	-	-	-
DIV50044	627.81	116.56	-	-	-
DIV50045	549.69	149.38	-	-	-
DIV50051	538.44	130.94	-	-	-
DIV50052	476.56	190.94	-	-	-
DIV50053	525.00	94.06	-	-	-
DIV50056	504.69	260.63	-	-	-
DIV50060	489.69	145.63	-	-	-
DIV50063	384.38	243.75	-	-	-
DIV50065	420.94	232.81	-	-	-
DIV50066	518.44	241.25	-	-	-
DIV50067	404.69	149.06	-	-	-
DIV50068	434.69	220.31	-	-	-
DIV50070	537.50	304.69	-	x	-
DIV50071	464.69	258.13	-	-	-
DIV50072	516.25	114.38	-	-	-
DIV50077	483.75	243.75	-	-	-

Tabella 3.7. Elenco prove motrice 5000 - RESET

3.4.3 Conclusioni

NO RESET dell'azionamento

I risultati relativi ai passaggi in cui non è avvenuto il reset dell'azionamento sono riassunti in tabella 3.8. I valori di corrente massima e gradiente massimo sono in generale maggiori rispetto alle registrazioni della motrice 2800; nonostante ciò, non si è verificato alcun scatto nel corso delle prove.

Numero prove	12
Numero scatti relè	0
Corrente massima registrata [A]	1033.13
Gradiente massimo registrato [A/ms]	295.63

Tabella 3.8. Riassunto prove motrice 5000 - NO RESET

RESET dell'azionamento

I risultati relativi ai passaggi in cui si è verificato il reset dell'azionamento sono riassunti in tabella 3.9. Nel corso di questa serie di prove si sono verificati tre scatti, tutti per $\mathbf{A/ms}$. La taratura impiegata è pari a 100 A/ms, l'estremo inferiore dell'intervallo di taratura proposta.

Numero prove	22
Numero scatti relè	3
Corrente massima registrata [A]	627.81
Gradiente massimo registrato [A/ms]	340.63

Tabella 3.9. Riassunto prove motrice 5000 - RESET

In dettaglio si decide di analizzare una delle tre registrazioni che hanno provocato l'intervento del dispositivo. In figura 3.5 è illustrata la forma d'onda relativa al file DIV50033, corrispondente al primo dei tre scatti. Il DIA-IGTV ha rilevato un gradiente eccessivo sulla prima oscillazione e si è attivato. In figura 7.1 è illustrata la schermata di MScOm2 relativa ai dati dell'ultimo intervento in memoria. Nella tabella 4.3 sono confrontati i valori reali con i corrispondenti registrati dal relè. Il valore di corrente massima corrisponde, mentre il gradiente misurato risulta essere decisamente inferiore al reale, a causa del maggiore tempo di campionamento del relè rispetto alla forma d'onda, così come rilevato già per le prove delle motrici 2800.

Per evitare scatti intempestivi in queste circostanze, si propone di alzare la taratura del parametro $\mathbf{A/ms}$ ad un valore pari a 120 A/ms; con questa modifica non è stato rilevato alcun scatto.

Grandezza	Originale	Misurata
Corrente massima [A]	549,53	549
Gradiente massimo [A/ms]	340,63	106

Tabella 3.10. Confronto misure reali - DIA-IGTV

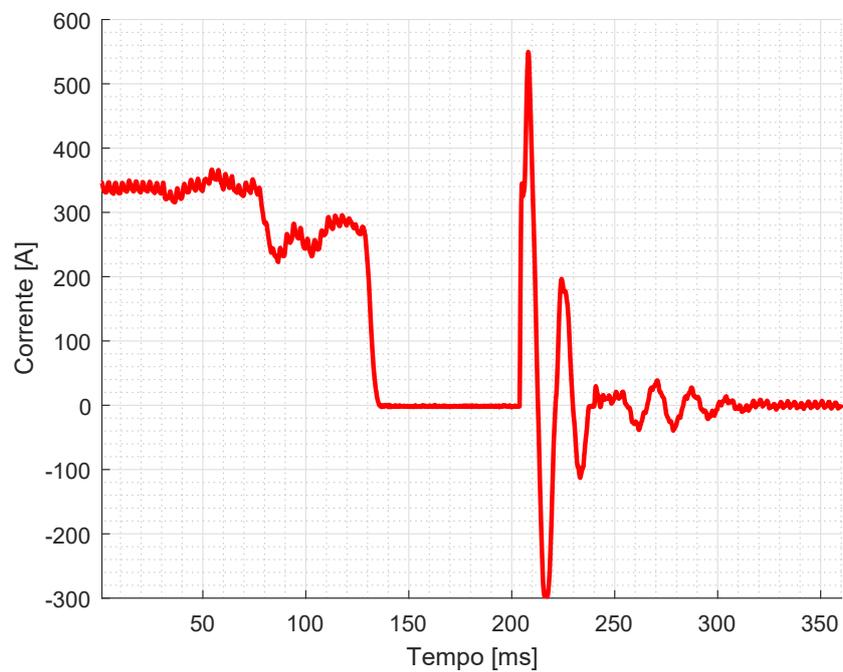


Figura 3.5. File DIV50033



Figura 3.6. Misure DIA-IGTv

3.5 Motrice 6000

3.5.1 Presentazione delle registrazioni

Le registrazioni relative a questo tipo di vettura, svoltesi in data 18 marzo 2009, presentano una sostanziale differenza rispetto a quelle effettuate con le altre due motrici trattate in precedenza. Lo strumento di misurazione è stato infatti posto non sul tram (rilevando quindi la corrente che attraversa il pantografo) ma nella cabina della SSE della zona di ingresso della vettura. Per questo motivo, i dati in nostro possesso non descrivono la prima fase del transito sotto il divisore. Tutto ciò non rappresenta affatto un problema ai fini della nostra analisi, in quanto le criticità si presentano nella terza fase di questo fenomeno. I file, una volta elaborati, presentano le seguenti caratteristiche, elencate in tabella 3.11.

Numero file di prova	12
Campionamento impiegato	200 μ s
Numero di campioni	5000
Frequenza forma d'onda	1 Hz

Tabella 3.11. Parametri file di prova motrice 6000

Una forma d'onda tipica delle motrici 6000 è raffigurata in figura 3.7. Rispetto alle 2800 e alle 5000, in presenza di un divisore l'andamento è alquanto differente, prossimo ad un arco di esponenziale. Questa differenza è determinata dal diverso tipo di azionamento installato, costituito da un motore trifase alimentato tramite inverter. Le criticità di questa vettura risiedono nei valori massimi che la corrente può assumere in determinate circostanze, di molto superiori alle ampiezze riscontrate nelle altre vetture. Al contrario, i gradienti risultano essere molto contenuti. Risulta quindi evidente che questa serie di registrazioni ha svolto un ruolo chiave nella determinazione del valore ottimale della taratura relativa al parametro $\mathbf{DR}>$, dal momento che il primo tratto della curva può essere facilmente scambiato per un cortocircuito a fondo linea. La differenza risiede nel fatto che in presenza di un guasto il picco di corrente raggiunto si mantiene costante, mentre nei casi qui analizzati decresce in pochi istanti.

3.5.2 Risultati dei test

In tabella 3.12 sono elencati nel dettaglio i risultati delle prove eseguite con le registrazioni relative alla motrice 6000.

3.5.3 Conclusioni

In tabella 3.13 sono riassunti i risultati delle prove. Nel corso di tutti i test non si è verificato alcuno scatto del DIA-IGTv. Gli elevati valori di corrente massima registrati nelle prove AUTO6 e AUTO7 sono dovuti al passaggio del tram a piena accelerazione, circostanza che difficilmente si presenta durante il servizio ordinario. Si tratta comunque di un evento che non deve provocare lo scatto del DIA-IGTv, quindi il valore proposto del parametro $\mathbf{DR}>$, pari a 2500 A ($0.625 \cdot I_n$), è stato

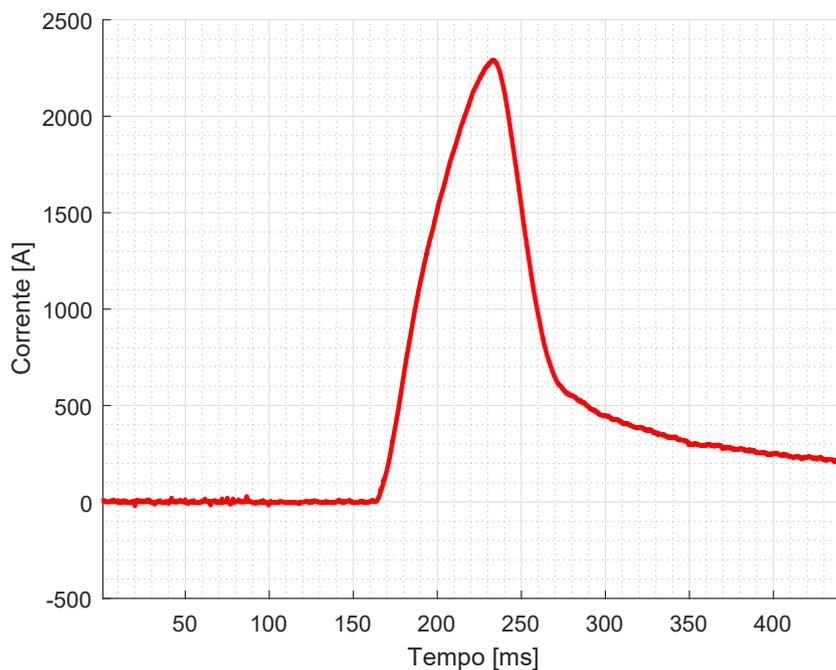


Figura 3.7. Esempio motrice 6000

6000	Grandezze misurate		Scatto rilevato			
	Nome file	Imax (A)	Gradmax (A/ms)	I>	A/ms>	DR>
	AUTO2	558.28	20.83	-	-	-
	AUTO3	679.10	58.33	-	-	-
	AUTO4	683.26	41.66	-	-	-
	AUTO5	962.40	25.00	-	-	-
	AUTO6	887.41	25.00	-	-	-
	AUTO7	2291.44	58.33	-	-	-
	AUTO8	1229.04	45.83	-	-	-
	AUTO9	287.47	33.33	-	-	-
	AUTO10	716.60	54.16	-	-	-
	AUTO11	749.92	54.16	-	-	-
	AUTO13	370.80	41.66	-	-	-
	AUTO14	391.63	37.50	-	-	-

Tabella 3.12. Elenco prove motrice 6000

tarato proprio per rispondere a questa necessità. L'abbassamento dello stesso rispetto al valore originario (3200 A corrispondenti a $0.8 \cdot I_n$) facilita la rilevazione di cortocircuiti a fondo linea, le cui correnti di regime non presentano valori così elevati.-

Numero prove	12
Numero scatti relè	0
Corrente massima registrata [A]	2291.44
Gradiente massimo registrato [A/ms]	58.33

Tabella 3.13. Risultati prove motrice 6000

Capitolo 4

Prove di funzionamento ordinario - Assorbimento giornaliero

4.1 Descrizione delle prove

Le forme d'onda utilizzate in questa serie di prove sono state registrate nella SSE Duca d'Aosta tra il 25 e il 27 maggio 2017. Si tratta dell'assorbimento giornaliero di un'intera zona della rete. Il segnale di corrente è stato prelevato tramite una resistenza di shunt e, attraverso un disaccoppiatore ottico, rilevato da due registratori HIOKI. Il componente intermedio ha la funzione di garantire l'isolamento galvanico tra i due lati del circuito, restituendo in output una tensione amplificata di un fattore pari a 100. I due strumenti sono stati lasciati in misura continuativa per l'intero intervallo di tempo, con il secondo che è entrato in funzione una volta esauritasi la memoria esterna del primo.

L'obiettivo di questa sezione consiste nel testare il relè in una situazioni più simili alla realtà, quando misura e analizza non l'assorbimento di una singola vettura, ma quello relativo all'intera zona. A causa del limite del tempo di registrazione dello strumento di misurazione, i dati sono suddivisi in un grande numero di file. Le registrazioni originali presentano i seguenti parametri, elencati in tabella 4.2, mentre in figura 4.1 è illustrata una di queste.

4.2 Modello per il simulatore Real-Time

Visto l'enorme numero di campioni di cui è costituita ogni singola registrazione, è apparsa evidente l'impossibilità di condurre le prove tramite il generatore di funzioni. Si è quindi deciso di utilizzare un simulatore real-time, in modo tale da non dover ulteriormente frammentare i file originali. La realizzazione del modello

Numero file di prova	924
Campionamento impiegato	200 μ s
Durata singolo file	200 s
Numero di campioni	1000001

Tabella 4.1. Parametri file originali assorbimento giornaliero

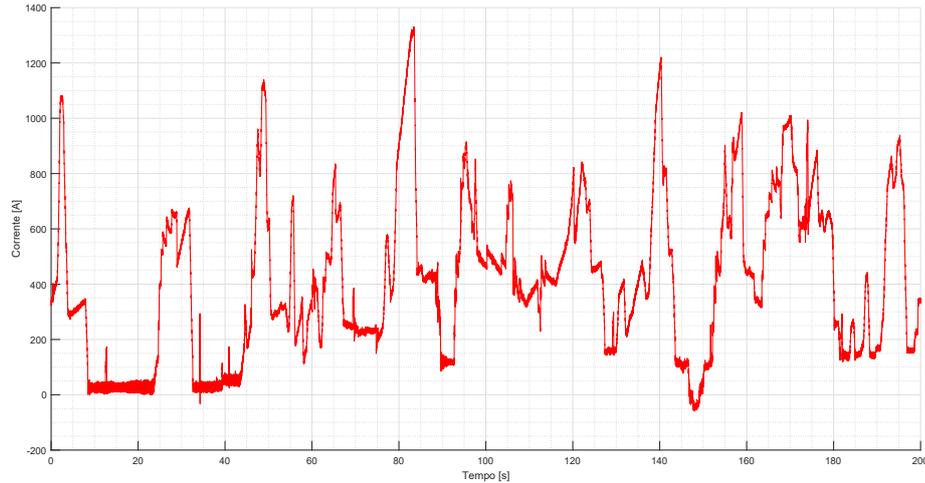


Figura 4.1. Esempio di registrazione giornaliera

Simulink è molto semplice, dal momento che è sufficiente leggere i dati da un file .csv e scolarli opportunamente, per convertire i dati dalla corrente reale in tensione equivalente ai morsetti del relè. La forma d'onda così ottenuta viene trasformata in un segnale analogico dal simulatore, i cui terminali della porta di uscita sono connessi al DIA-IGTv tramite un cavo BNC. La lunghezza non trascurabile di quest'ultimo provoca un effetto di riduzione delle ampiezze tra la forma d'onda generata e quella rilevata dal relè. Tale errore è compensato amplificando il segnale in uscita di un fattore pari alla riduzione introdotta. In questo modo la corrente vista dal dispositivo corrisponde a quella misurata nelle registrazioni. In figura 4.2 e 4.3 sono illustrate le due sezioni dello schema a blocchi utilizzato, rispettivamente il Master e l'Interface; le due costanti di proporzionalità sono le seguenti:

- $V \rightarrow I$: attua la conversione descritta nel capitolo 2, considerando il canale d'ingresso del DIA-IGTv (20 mA corrispondono a 4000 A reali) e la resistenza di ingresso dello stesso (163Ω).

$$V \rightarrow I = \frac{163\Omega \cdot 20mA}{4000A}$$

- K_{BNC} : compensa la riduzione provocata dal cavo BNC.

$$K_{BNC} = 1.03$$

Inizialmente si era pensato di accorpare più registrazioni, della durata approssimativa di tre minuti l'una, per ottenere un'unica forma d'onda, ma i tempi di elaborazione del simulatore sono risultati eccessivi. Sono state quindi eseguite una serie di prove in successione, relative a registrazioni consecutive. In seguito sono state sottoposte al DIA-IGTv alcune forme d'onda, tra le 924 a disposizione, che

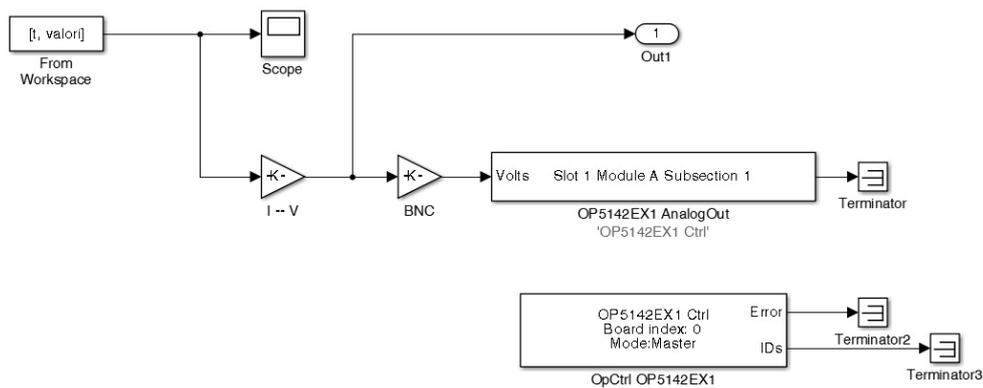


Figura 4.2. Modello Simulink - Master

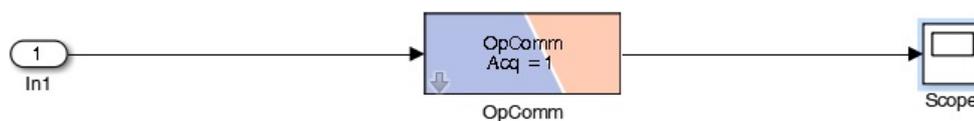


Figura 4.3. Modello Simulink - Console

presentano andamenti anomali o con valori massimi particolarmente elevati. Numerosi file risultano essere pressoché inutili ai fini delle prove, in quanto relativi alle ore notturne, con nessuna vettura circolante in quell'intervallo di tempo. In figura 4.4 è illustrata la schermata visualizzata sull'oscilloscopio virtuale sull'Interface, al termine dell'esecuzione della simulazione relativa ad una singola registrazione.

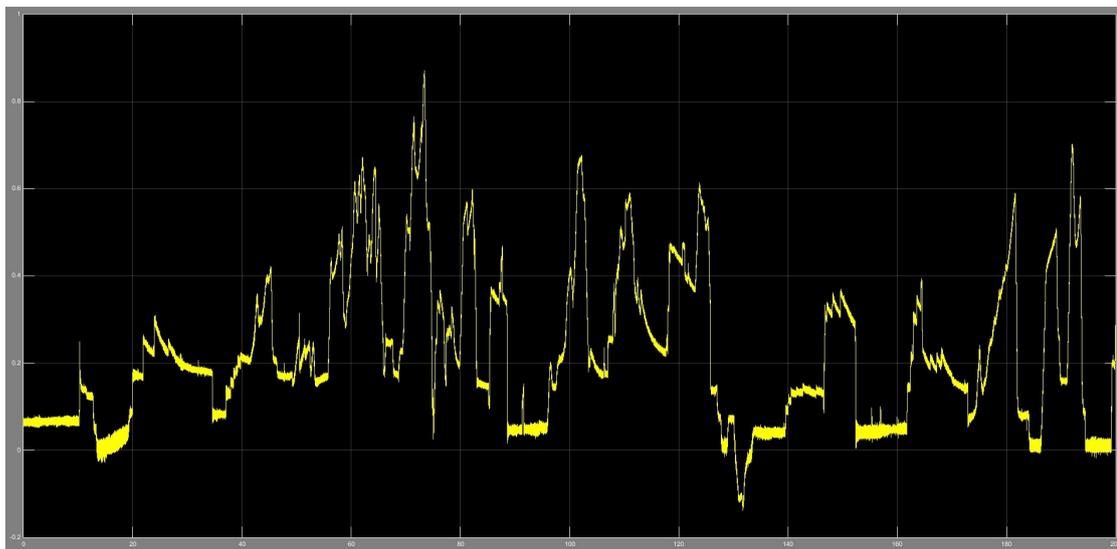


Figura 4.4. Scope - Console

4.3 Risultati delle prove

Nella tabella 4.2 sono elencati i dati relativi alle prime venti registrazioni giornaliere sottoposte al DIA-IGTv tramite il simulatore. I valori di corrente massima e gradiente sono stati calcolati tramite Matlab, considerando un tempo di campionamento pari a 1 ms, lo stesso del DIA-IGTv. Nel corso dell'intero set di prove non si è avuto alcuno scatto del dispositivo. In alcuni file sono stati rilevati gradienti anche superiori ai 300 A/ms; nonostante ciò non sono stati rilevati interventi, sempre per la minore frequenza di campionamento del relè rispetto alla forma d'onda misurata. In seguito sono state testate alcune registrazioni prese a campione, con valori massimi di corrente ben superiori ai 2000 A; anche in questo frangente le tarature si sono dimostrate corrette.

Nome file	Imax [A]	Gradmax [A/ms]
GIORN_01	1330.00	181.00
GIORN_02	1500.00	41.70
GIORN_03	1490.00	99.00
GIORN_04	1580.00	37.60
GIORN_05	1360.00	70.90
GIORN_06	1630.00	69.90
GIORN_07	1310.00	102.20
GIORN_08	1140.00	118.40
GIORN_09	1080.00	79.30
GIORN_10	1040.00	178.17
GIORN_11	1560.00	39.62
GIORN_12	1320.00	51.07
GIORN_13	1270.00	193.10
GIORN_14	1220.00	58.39
GIORN_15	843.00	56.00
GIORN_16	1560.00	335.70
GIORN_17	813.00	59.38
GIORN_18	1810.00	34.40
GIORN_19	1260.00	333.00
GIORN_20	1070.00	76.00

Tabella 4.2. Elenco file di prova giornalieri

4.3.1 Registrazione con alti gradienti

In figura 4.5 è illustrata la registrazione oscillografica corrispondente al file GIORN_64, relativo al primo giorno di misurazione. Tale file era stato già analizzato [3], per via della particolare forma d'onda che presenta gradienti molto elevati. In figura 4.6 si ha l'ingrandimento del segmento di nostro interesse, lo stesso sottoposto al DIA-IGTv per verificare che un evento con tali caratteristiche venga rilevato. Il risultato della prova ha confermato l'ipotesi di partenza: il relè ha reagito al gradiente molto elevato ed è scattato. In figura 4.7 sono illustrate le letture del

dispositivo, tramite il software MScCom2; in tabella 4.3 tali grandezze sono confrontate con i valori calcolati analiticamente a partire dalla forma d'onda originale. In figura 4.8 sono infine confrontate la registrazione originale con quella memorizzata dal DIA-IGTv al momento dello scatto; è evidente il valore assoluto applicato sul secondo segnale.

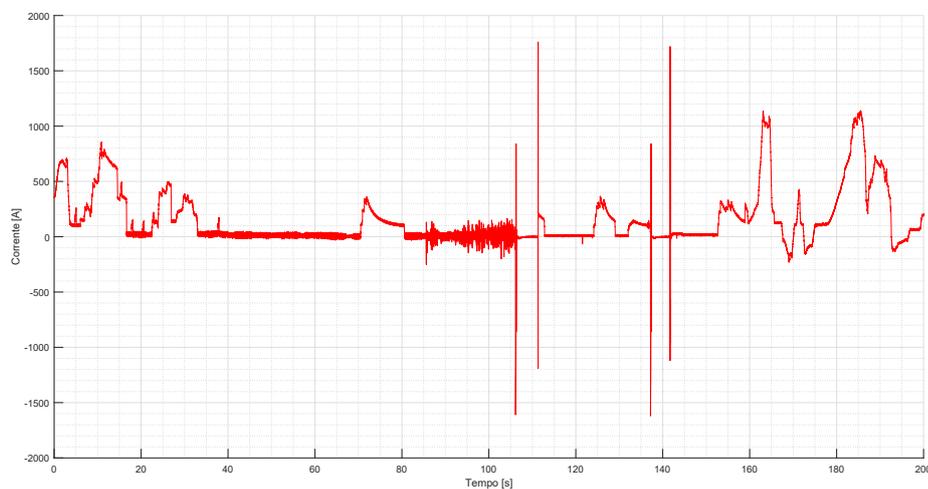


Figura 4.5. Registrazione GIORN_64

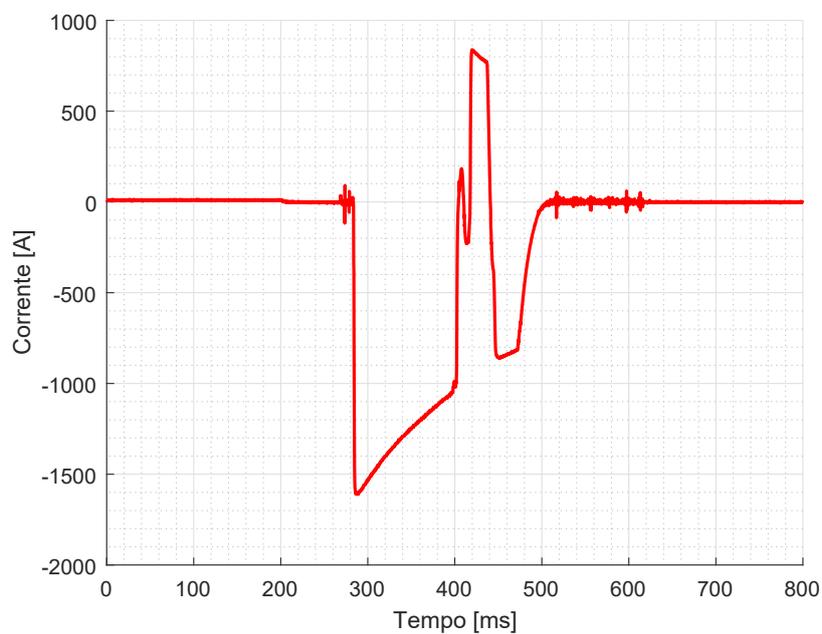


Figura 4.6. Particolare file GIORN_64

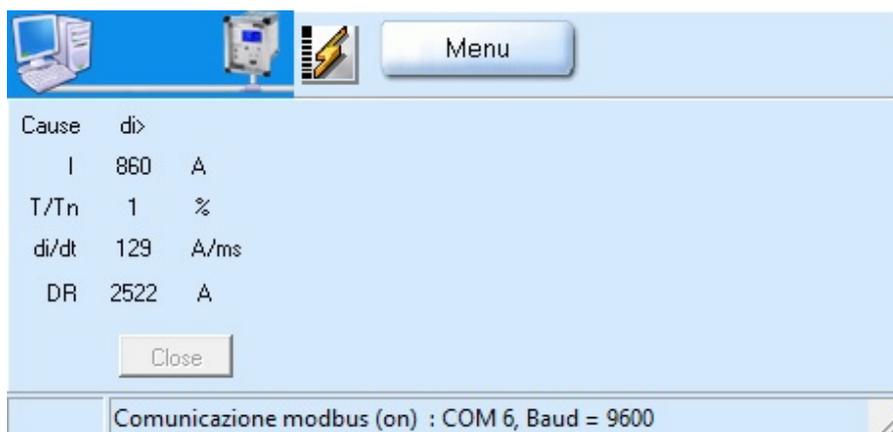


Figura 4.7. Schermata MSCom2 - Scatto DIA-IGTv

Grandezza	Originale	Misurata
Corrente massima [A]	839	860
Gradiente massimo [A/ms]	739	129

Tabella 4.3. Confronto misure reali - DIA-IGTv

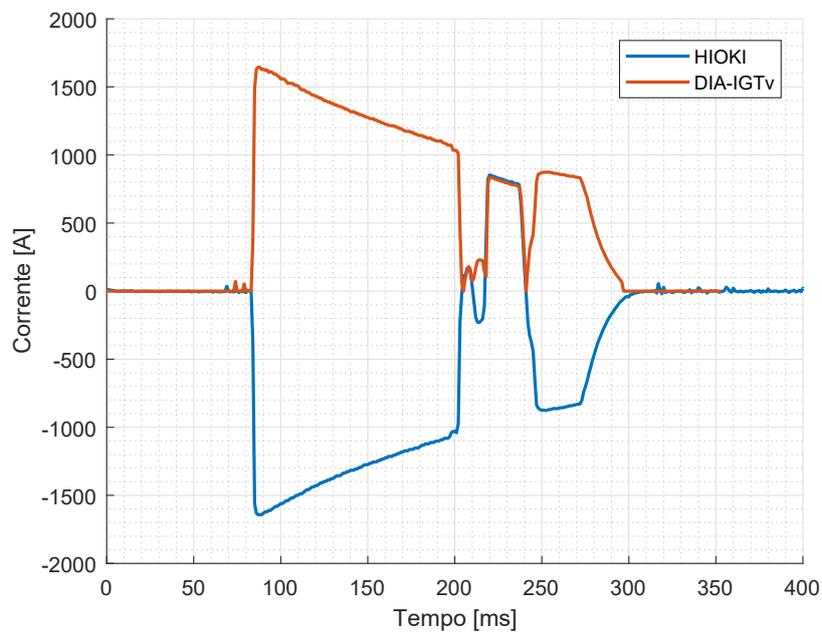


Figura 4.8. Confronto tra registrazione originale e lettura DIA-IGTv

4.4 Conclusioni

Questo set di prove ha confermato ancora una volta la validità delle tarature proposte. Se nel capitolo precedente l'attenzione era rivolta ad un fenomeno specifico con caratteristiche particolari, i test descritti in questa sezione sono maggiormente significativi, in quanto relativi alla vera funzione del DIA-IGTv. Il suo vero compito consiste infatti nel valutare l'assorbimento in corrente dell'intera sottozona. D'altro canto, il numero veramente esiguo di eventi non ordinari registrati nel corso delle tre giornate di misurazione non consente di avere molte possibilità di valutare il comportamento del dispositivo in presenza di eventi anomali.

Capitolo 5

Analisi scatti storici

5.1 Descrizione dei dati

In questa sezione sono elencati ed analizzati una serie di scatti reali di vari DIA-IGTv installati nella rete tranviaria torinese, avvenuti in un periodo compreso tra il 27 gennaio 2014 e il 22 gennaio 2016. Il materiale utilizzato è stato fornito da Infra.To. Per ognuno di essi viene presentato il tipo di intervento, i valori massimi raggiunti dalle grandezze coinvolte e, quando possibile, cause ed effetti di tali scatti. Le informazioni relative a forme d'onda e valori sono state registrate dai DIA-IGTv e scaricate tramite il software MScOm2. L'insieme degli scatti è stato suddiviso in base al tipo di intervento, in modo tale da facilitarne l'analisi e il confronto.

Tutto questo ha l'obiettivo di capire se questi interventi sono relativi a situazioni effettivamente anomale o se si trattano di scatti intempestivi con conseguente disservizio ingiustificato. Proprio l'alto numero di interruzioni giudicate non corrette aveva spinto GTT a scollegare i DIA-IGTv dai relativi interruttori, mantenendoli con sola funzione di monitoraggio e registrazione. In questo modo si è tentato di migliorare l'affidabilità dell'alimentazione elettrica, a discapito però della sicurezza. Questo relè risulta fondamentale in presenza di guasti difficilmente rilevabili dalle normali protezioni, come i cortocircuiti a fondo linea. La verifica della validità di queste nuove tarature consentirebbe di riportare in piena funzione questi dispositivi, con tutti i relativi vantaggi.

5.2 Elenco generale degli scatti

In tabella 5.1 sono elencati tutti gli scatti analizzati. In questa prima sezione sono indicate la data, la zona della rete e il tipo di intervento. Per alcuni scatti il giorno esatto non è indicato, dal momento che il DIA-IGTv non registra questa informazione quando memorizza i dati. Per **SSE** si intende la sottostazione dove il relè che è scattato è installato, mentre **zona** indica il conduttore che alimenta la zona interessata dall'azione del dispositivo; talvolta non è stato possibile risalire a questi dettagli. L'analisi più approfondita con tarature, valori misurati ed eventuali cause sarà condotta nelle sezioni successive.

Nei tre scatti indicati con i numeri 15, 18 e 22 si è assistito allo scoppio degli scaricatori per sovratensione; in questi casi sono intervenute le protezioni di media tensione delle relative SSE.

Numero	Data	SSE	Zona	Scatto
1	27/01/2014	Valdo Fusi	Madama Cristina	dI>
2	19/03/2014	Trapani	Deposito Trapani	dI>
3	25/03/2014	Caio Mario	Zona 37	dI>
4	28/03/2014	Caio Mario	Zona 37	dI>
5	Marzo 2014	Caio Mario	Tazzoli	dI>
6	Marzo 2014	Caio Mario	Tazzoli	dI>
7	Marzo 2014	Caio Mario	Tazzoli	dI>
8	Marzo 2014	Trapani	Zona 20 - 52	dI>
9	Marzo 2014	San Paolo	-	dI>
10	29/03/2014	Trapani	San Paolo	dI>
11	08/04/2014	Trapani	Deposito Trapani	dI>
12	09/04/2014	Trapani	Zona 52	dI>
13	04/06/2014	Stura	Vercelli	dI>
14	05/06/2014	Stura	Romolo e Remo	I>
15	31/08/2014	Valdo Fusi	Zona 19 - 24	Sovratensione
16	29/10/2014	Caio Mario	Settembrini	I>
17	09/10/2014	Trapani	Zona 20	dI>
18	02/11/2014	Valdo Fusi	-	Sovratensione
19	06/11/2014	Trapani	Deposito Trapani	dI>
20	Novembre 2014	Caio Mario	Caio Mario	dI>
21	11/11/2014	Caio Mario	Settembrini	dI>
22	17/11/2014	Mughetti	Pervinche	Sovratensione
23	14/11/2014	Trapani	San Paolo	dI>
24	14/11/2014	Trapani	Deposito Trapani	dI>
25	17/01/2015	Trapani	Deposito Trapani	dI>
26	18/01/2015	Caio Mario	Settembrini	DR>
27	27/01/2015	Valdo Fusi	Vittorio	dI>
28	03/02/2015	Trapani	San Paolo	dI>
29	04/02/2015	Trapani	San Paolo	dI>
30	05/02/2015	Caio Mario	Settembrini	I>
31	11/02/2015	Trapani	San Paolo	dI>
32	11/02/2015	Valdo Fusi	Vittorio	dI>
33	16/02/2015	Caio Mario	Settembrini	EXP
34	17/02/2015	Caio Mario	Settembrini	dI>
35	21/02/2015	Trapani	San Paolo	dI>
36	25/02/2015	Caio Mario	Tazzoli	I>
37	28/02/2015	Trapani	Deposito Trapani	dI>
38	28/02/2015	Trapani	San Paolo	dI>
39	02/05/2015	Trapani	Zona 52	dI>
40	02/05/2015	Trapani	Zona 20	dI>

Numero	Data	SSE	Zona	Scatto
41	11/05/2015	Trapani	Zona 21	dI>
42	09/05/2015	Valdo Fusi	Vittorio	dI>
43	04/06/2015	Valdo Fusi	Madama Cristina	dI>
44	13/07/2015	Caio Mario	Settembrini	dI>
45	13/07/2015	Caio Mario	Settembrini	dI>
46	13/07/2015	Caio Mario	Settembrini	dI>
47	14/08/2015	Valdo Fusi	Madama Cristina	dI>
48	03/09/2015	Valdo Fusi	Zona 19	dI>
49	06/10/2015	Trapani	San Paolo	dI>
50	Ottobre 2015	Trapani	Zona 20	dI>
51	27/10/2015	Caio Mario	Settembrini	dI>
52	28/10/2015	Valdo Fusi	Vittorio	dI>
53	30/10/2015	Trapani	San Paolo	dI>
54	09/11/2015	Trapani	Deposito Trapani	dI>
55	14/11/2015	Trapani	Zona 20	dI>
56	05/12/2015	Trapani	Zona 52	dI>
57	11/12/2015	Valdo Fusi	Vittorio	dI>
58	21/12/2015	-	-	dI>
59	21/12/2015	-	-	dI>
60	07/01/2016	Caio Mario	Settembrini	dI>
61	22/01/2016	Stige	Zona 12 - 13	dI>

Tabella 5.1: Elenco generale scatti storici

5.3 Analisi dettagliata

5.3.1 Scatti per dI>

Gli interventi per massimo gradiente di corrente rappresentano la quasi totalità degli scatti analizzati. La taratura di tale parametro rappresenta quindi un punto fondamentale della messa a punto dei relè. Nella tabella 5.2 questi eventi sono elencati in dettaglio; quando possibile è presente il valore massimo di corrente, il valore di gradiente per cui il DIA-IGTv è scattato e le cause dell'evento all'origine dello scatto. Le grandezze relative alla forma d'onda sono state ricavate dai dati memorizzati dal relè, quando disponibili. Nella colonna relativa ai dettagli, le seguenti espressioni hanno questo significato:

- **Apertura + Richiusura:** in seguito all'apertura dell'interruttore comandata dal DIA-IGTv, la manovra di richiusura si è conclusa con successo; in generale non si sono verificati disservizi.
- **Apertura → Blocco:** in seguito allo scatto del dispositivo, la manovra di richiusura non è andata a buon fine; la zona è andata in blocco e si è reso necessario l'intervento manuale di un operatore.

- **Solo misurazione:** il relè non è connesso all'interruttore extrarapido.

Numero	I _{max}	Grad. scatto	Dettagli
1	8800	-	Apertura+Richiusura
2	7200	-	Apertura → Blocco (cortocircuito motrice)
3	900	-	Apertura+Richiusura
4	1100	-	Apertura+Richiusura
5	1000	-	Oscillazioni periodiche
6	1100	-	Oscillazioni periodiche
7	850	-	Oscillazioni periodiche
8	1000	-	-
9	2700	-	-
10	2800	-	Apertura+Richiusura
11	10000	-	Apertura+Richiusura (cortocircuito)
12	1400	-	Apertura → Blocco (cortocircuito motrice)
13	3500	207 A/ms	Solo misurazione (apertura)
17	2300	-	Apertura → Blocco
19	2700	-	Apertura → Blocco (probabile guasto motrice)
20	-	-	Solo misurazione (passaggio divisore ??)
21	1300	-	Apertura+Richiusura (manovra)
23	2700	272 A/ms	Apertura → Blocco
24	7500	932 A/ms	-
25	2300	249 A/ms	Apertura+Richiusura
27	2100	193 A/ms	Apertura+Richiusura
28	2600	-	Apertura+Richiusura
29	2400	228 A/ms	Apertura+Richiusura
31	2900	253 A/ms	Apertura+Richiusura
32	2400	210 A/ms	Apertura+Richiusura
34	1300	210 A/ms	Apertura+Richiusura
35	3200	307 A/ms	Apertura+Richiusura
37	10000	958 A/ms	Apertura → Blocco (cortocircuito interruttore)
38	1500	246 A/ms	Apertura → Blocco
39	2800	266 A/ms	Apertura → Blocco (passaggio divisore ??)
40	800	184 A/ms	Apertura → Blocco (passaggio divisore ??)
41	2800	271 A/ms	Apertura → Blocco
42	1900	182 A/ms	Apertura → Blocco
43	1600	180 A/ms	Apertura+Richiusura
44	2400	-	Apertura+Richiusura
45	1300	-	Apertura+Richiusura
46	2000	-	Apertura+Richiusura
47	2200	-	Apertura+Richiusura
48	5500	231 A/ms	Apertura → Blocco (cortocircuito)
49	2500	316 A/ms	Apertura → Blocco (guasto motrice)
50	2500	269 A/ms	Apertura+Richiusura
51	2000	182 A/ms	Apertura+Richiusura

Numero	Imax	Grad. scatto	Dettagli
52	2500	234 A/ms	Apertura+Richiusura
53	2900	305 A/ms	Apertura → Blocco
54	3500	451 A/ms	Apertura → Blocco (guasto motrice)
55	2700	308 A/ms	Apertura → Blocco
56	4000	478 A/ms	Apertura → Blocco (guasto motrice)
57	2200	190 A/ms	Apertura → Blocco
58	4500	208 A/ms	Solo misurazione
59	1300	209 A/ms	Apertura+Richiusura
60	700	603 A/ms	Solo misurazione (apertura extrarapido → blocco)
61	4700	-	Solo misurazione (apertura extrarapido → blocco)

Tabella 5.2: Elenco scatti per dI>

In tabella 5.3 sono invece riassunti alcuni dati relativi agli scatti elencati in questa sezione.

Scatti analizzati	52
Aperture con richiusura	23
Aperture con blocco	18
Misurazioni senza scatti	5
Altro tipo di eventi	6
Gradiente massimo registrato	958 A/ms
Corrente massima registrata	10000 A

Tabella 5.3. Riepilogo scatti per dI>

In generale, le forme d'onda relative a questi scatti presentano un improvviso picco di corrente, con conseguente annullamento della stessa per l'apertura dell'interruttore. Un tipico esempio è illustrato in figura 5.1. Il valore massimo di corrente è solitamente superiore ai 1000 A, con punte che arrivano fino ai 10000 A. In questi casi il relè è comunque scattato per **dI>**, anticipando di qualche millisecondo l'intervento per **I>**, a causa del brusco gradiente stabilitosi nei primi istanti. Di seguito sono presentate le forme d'onda relative ad alcuni eventi che presentano delle caratteristiche particolari.

Scatto 21

In figura 5.2 è illustrato l'andamento della corrente registrato dal DIA-IGTv relativo alla zona Settembrini, alimentata dalla SSE Caio Mario. In questo caso non si è in presenza di un evento anomalo, ma di una manovra di richiusura in parallelo dell'interruttore Caio Mario dalla SSE Passo Buole per pochi istanti, effettuata per evitare un buco di tensione. Il DIA-IGTv nella SSE Caio Mario è intervenuto, ma non si è verificato alcun disservizio.

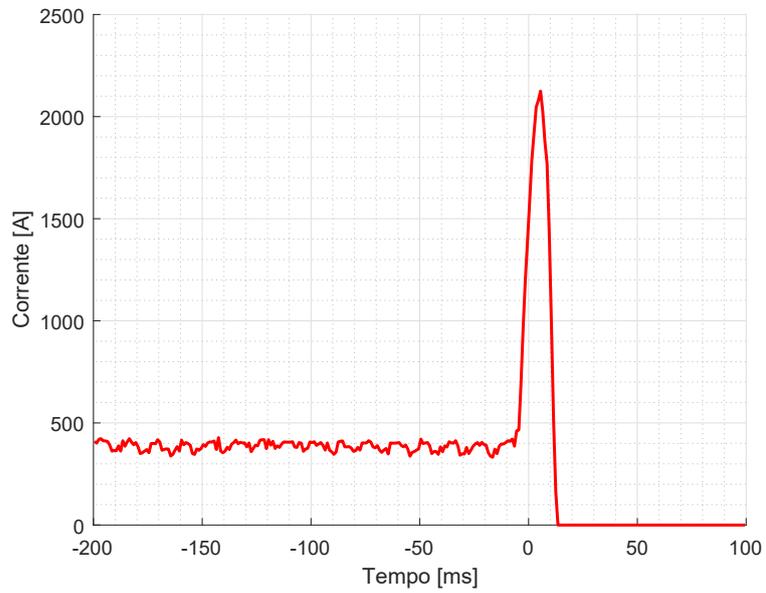


Figura 5.1. Scatto 27 - 27-01-2015

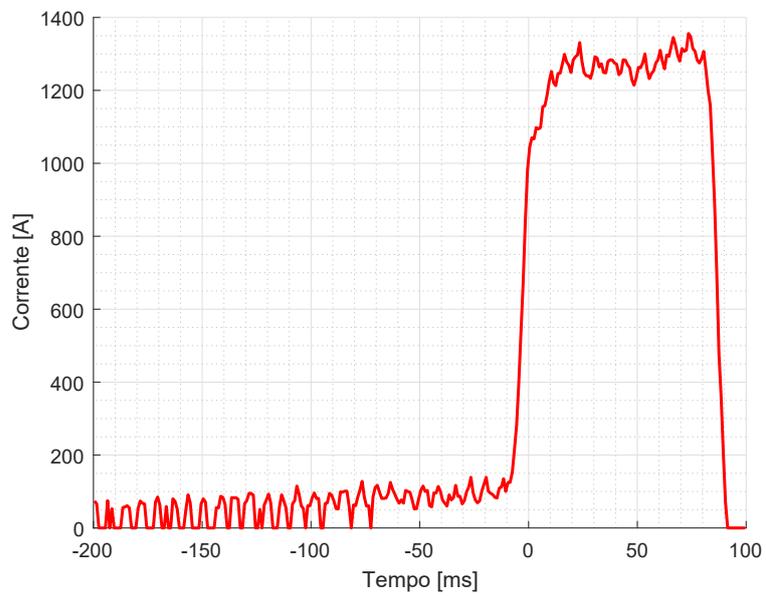


Figura 5.2. Scatto 21 - 11-11-2014

Scatto 37

In figura 5.3 è illustrato l'andamento della corrente registrato dal DIA-IGTv relativo al Deposito Trapani, nel quale si sono registrati i valori maggiori tra quelli analizzati. Il guasto è stato provocato dalla rottura di un interruttore in officina, con il conseguente cortocircuito. Questo spiega i valori molto elevati di corrente e gradiente massimo, decisamente superiori rispetto ad un qualsiasi guasto in linea.

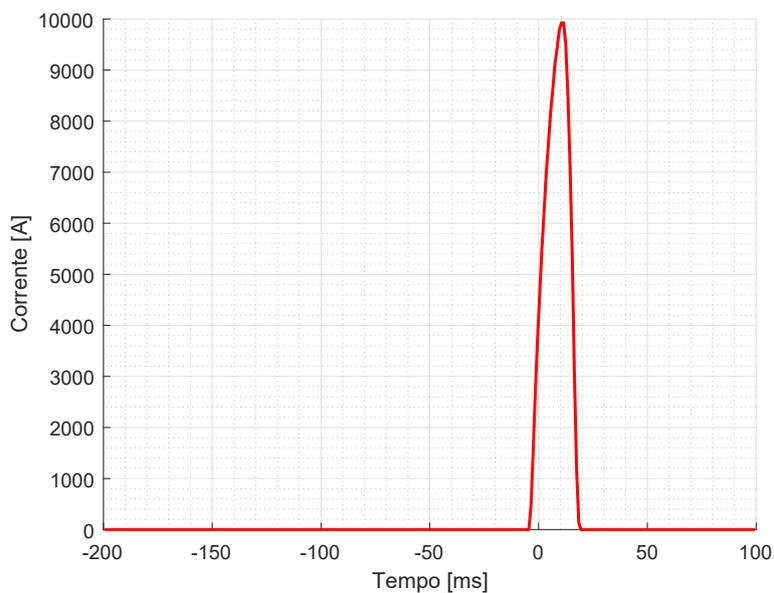


Figura 5.3. Scatto 37 - 28-02-2015

5.3.2 Scatti per I>

Gli interventi per massima corrente sono in numero nettamente minore. In tabella 5.4 sono elencati i valori massimi registrati e alcune informazioni relative agli scatti. In tutti i casi, si tratta di un picco di corrente che ha oltrepassato di poco il valore della taratura, provocando lo scatto del dispositivo. Non si è in presenza di eventi eclatanti, in quanto l'assorbimento negli istanti precedenti e successivi è comunque molto prossimo alla soglia impostata sul DIA-IGTv, come per lo scatto 16 illustrato in figura 5.4. La manovra di richiusura automatica ha avuto successo in tre casi su quattro.

Numero	I _{max}	Dettagli
14	4650	Apertura+Richiusura
16	4500	Apertura → Blocco (sovraccarico)
30	4300	Apertura+Richiusura (sovraccarico)
36	3000	Apertura+Richiusura

Tabella 5.4. Elenco scatti per I>

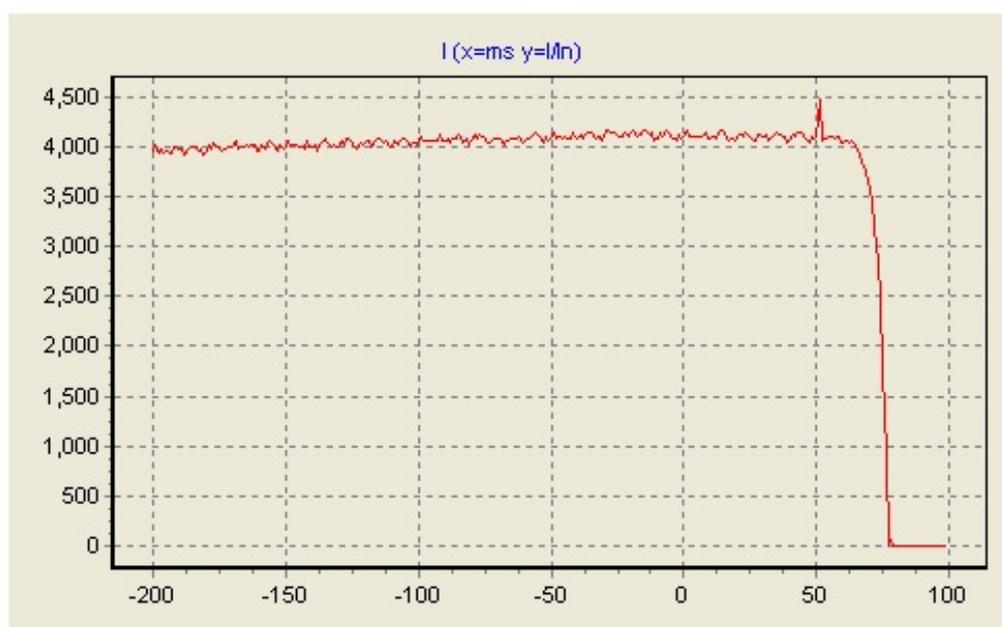


Figura 5.4. Scatto 16 - 29-10-2014

5.3.3 Scatti per sovratensioni

In tre casi (15,18 e 22) il guasto, consistente nello scoppio degli scaricatori di tensione in SSE, ha causato l'intervento delle protezioni di MT, in seguito ad una sovratensione; rispetto ai casi precedenti, si è in presenza di un diverso tipo di fenomeno elettrico. La rottura dei componenti in cabina ha causato un parziale danneggiamento della stessa e il conseguente disservizio. In figura 5.5 è illustrato l'andamento della tensione registrato nel corso del primo evento; il valore massimo raggiunto è stato di 943 V, ben maggiore rispetto al livello normale, non superiore ai 650 V.

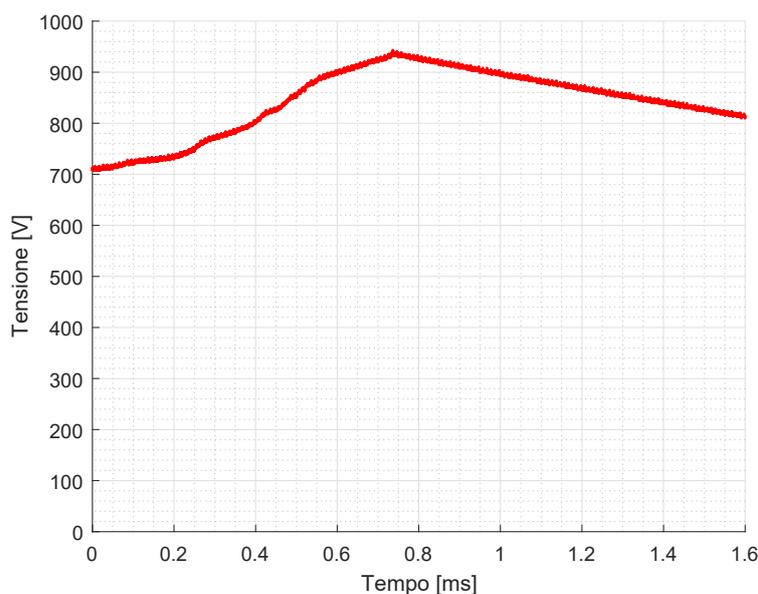


Figura 5.5. Sovratensione scatto 15 - 31-08-2014

5.3.4 Altro tipo di scatti

I restanti due scatti non rientrano nelle categorie precedenti, ma rappresentano dei casi unici. Sono trattati in dettaglio dal momento che presentano delle forme d'onda che non trovano riscontri nei casi già analizzati.

Scatto per DR>

Lo scatto 26 rappresenta l'unico caso in cui si è verificato l'intervento per massima differenza di corrente. In figura 5.6 è illustrato l'andamento della corrente registrata dal DIA-IGTv. In seguito all'apertura, la manovra di richiusura automatica ha avuto successo. Al momento dello scatto erano segnalate in zona due motrici 6000, senza che nessuna riscontrasse anomalie. Il picco raggiunto, superiore ai 5000 A, è eccessivo vista la presenza di due sole vetture, ma non sono state individuate le possibili cause.



Figura 5.6. Scatto 26 - 18-01-2015

Scatto per EXP

Lo scatto 33 rappresenta l'unico caso in cui si è verificato questo tipo di intervento, avvenuto sul cavo Settembrini alimentato dalla SSE Caio Mario. Il relè non è stato in grado di uscire dal proprio ciclo di misura e ha reagito intervenendo. In figura 5.7 è illustrato l'andamento della corrente registrata dal DIA-IGTv. In seguito all'apertura, la manovra di richiusura automatica ha avuto successo. Anche in questo caso non sono emerse le cause, tanto più che quel giorno la linea 10 era servita da autobus, con conseguente riduzione del carico visto dalla linea.

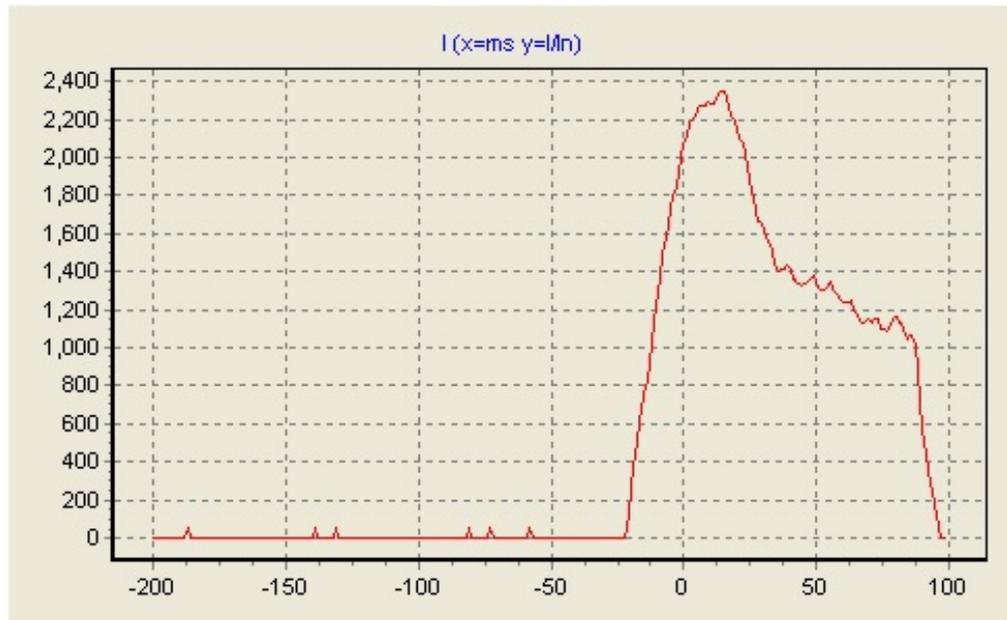


Figura 5.7. Scatto 33 - 16-02-2015

5.4 Conclusioni

5.4.1 Risultati generali

I numeri relativi agli scatti sopra analizzati sono riassunti in tabella 5.5. Risulta evidente la netta prevalenza degli interventi per gradiente di corrente. In certi casi il DIA-IGT_v sarebbe potuto scattare anche per I>, visto il valore massimo di corrente raggiunto; lo scatto per dI> ha semplicemente anticipato il comando di apertura di qualche istante. Tutto ciò rappresenta un vantaggio ai fini della protezione della rete, dal momento che, nella maggior parte dei casi analizzati, gli elevati gradienti misurati sono connessi a fenomeni anomali che implicano l'intervento del DIA-IGT_v.

Scatti totali analizzati	61
Scatti per dI>	52
Scatti per I>	4
Scatti per DR>	1
Scatti per EXP	1
Sovratensioni	3

Tabella 5.5. Riepilogo generale scatti analizzati

Numero	Scatto	Dettagli
3	dI>	Possibile passaggio divisore
5	dI>	Oscillazioni periodiche
6	dI>	Oscillazioni periodiche
7	dI>	Oscillazioni periodiche
20	dI>	Possibile passaggio divisore
40	dI>	Possibile passaggio divisore
60	dI>	Possibile passaggio divisore

Tabella 5.6. Elenco scatti dubbi

5.4.2 Interventi dubbi

In tabella 5.6 sono invece elencati gli interventi che possono essere definiti “dubbi”, legati ad eventi per i quali non sono state individuate le cause o che presentano forme d’onda non convenzionali. Sono tutti scatti avvenuti per gradiente di corrente, dal momento che un eventuale superamento della soglia di massima corrente è sicuramente associato ad una situazione di guasto. Possono essere divisi in due categorie:

- Oscillazioni periodiche: queste tre registrazioni presentano una serie di oscillazioni che hanno provocato l’intervento del dispositivo. Sono state rilevate dal DIA-IGTv installato sul cavo Tazzoli nella SSE Caio Mario. Un tale fenomeno non è stato riscontrato in nessun altro caso. In figura 5.8 è illustrato un esempio, nel quale è evidente l’operazione di valore assoluto applicata dal dispositivo durante la misurazione. Non sono note le possibili cause.

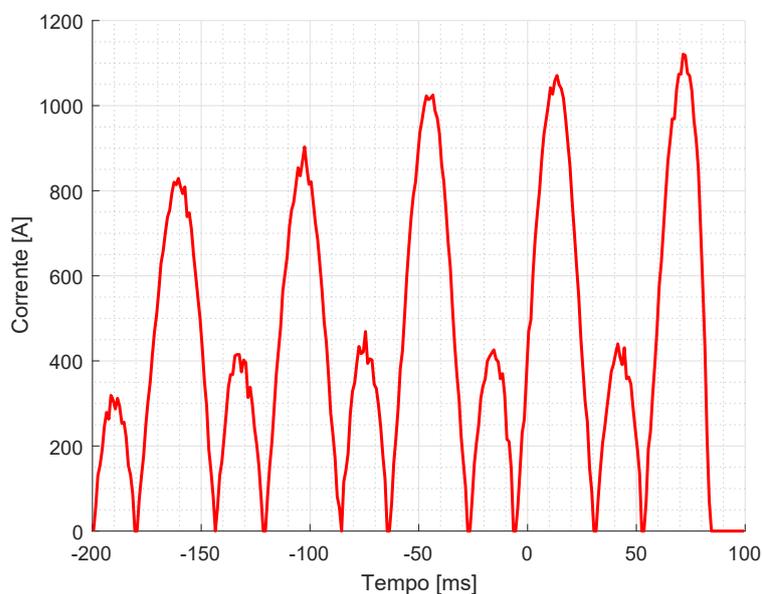


Figura 5.8. Scatto 6 - Oscillazioni periodiche

- Possibile passaggio di divisore: le restanti quattro registrazioni presentano forme d'onda alquanto insolite, che talvolta ricordano l'andamento provocato dal passaggio della motrice al di sotto di un divisore di zona. Un esempio è illustrato in figura 5.9, che ricorda fortemente le registrazioni relative a questo fenomeno delle motrici 2800.

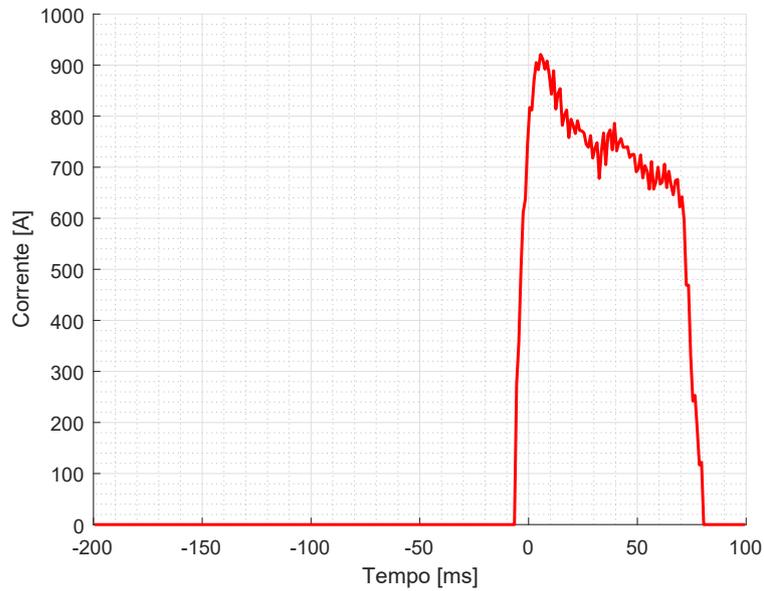


Figura 5.9. Scatto 3 - 25-03-2014

Capitolo 6

Prove di cortocircuito

6.1 Descrizione delle prove

In questo capitolo sono descritti i risultati dei test basati su di una serie di prove di cortocircuito reali effettuate tra il 2006 e il 2016. Come per le registrazioni dei passaggi di divisore, anche queste forme d'onda erano state analizzate per la ricerca delle migliori tarature del DIA-IGTv. Il procedimento seguito è il medesimo delle prove di funzionamento ordinario descritte nel capitolo 3, sia per l'utilizzo dello stesso banco di prova che per la preparazione dei file.

Le registrazioni utilizzate si possono dividere in due categorie:

- **Prove in cabina:** prove di cortocircuito effettuate in SSE, per simulare un guasto a inizio linea. Per contenere l'entità della corrente sono state impiegate una o più resistenze di carico di valore pari a 0.5Ω connesse in serie o in parallelo.
- **Prove in linea:** prove di cortocircuito effettuate lungo la linea tranviaria, per simulare un guasto a fondo linea. Vista la presenza della linea di contatto e dei binari è stato possibile effettuare un cortocircuito franco (senza impedenza); in questi ultimi casi si è verificata l'apertura dell'interruttore extrarapido.

La presenza o meno delle resistenze di carico fa in modo che la corrente misurata assuma due differenti tipi di forme d'onda:

- **Cortocircuito con resistenza:** l'impiego di uno o più resistori opportunamente connessi limita l'entità della corrente di guasto, che così può assestarsi al valore di regime senza che l'interruttore intervenga, come illustrato in figura 6.1. In determinati casi si assiste ad un fenomeno di riscaldamento delle resistenze, con la corrente che, una volta terminato l'arco esponenziale, non rimane costante ma diminuisce gradualmente in maniera lineare. Un esempio di questo tipo è illustrato in figura 6.2.
- **Cortocircuito franco:** l'intervento dell'interruttore fa in modo che il transitorio non arrivi a regime, ma si ha un arco di esponenziale troncato, con la corrente che si annulla rapidamente in seguito all'apertura dei contatti. Un tipico esempio è illustrato in figura 6.3.

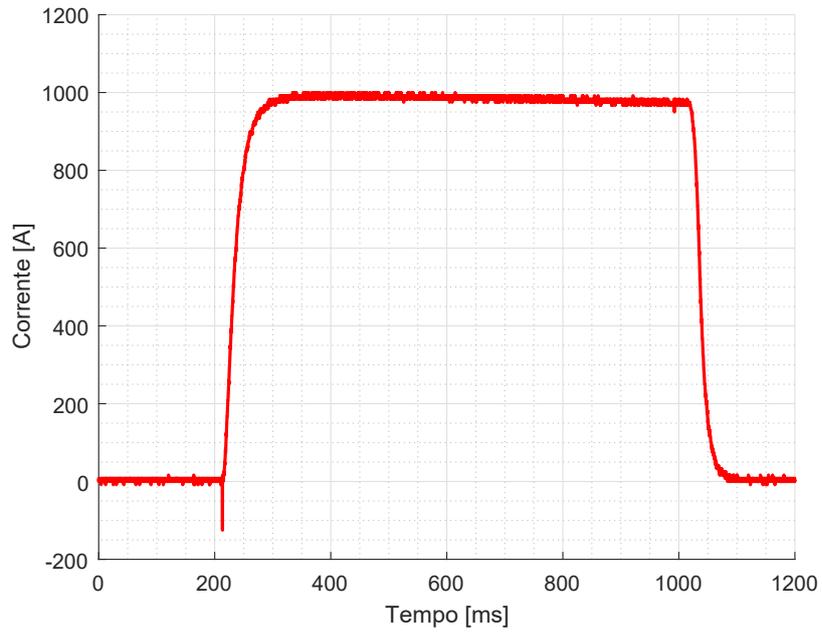


Figura 6.1. Cortocircuito con resistenza

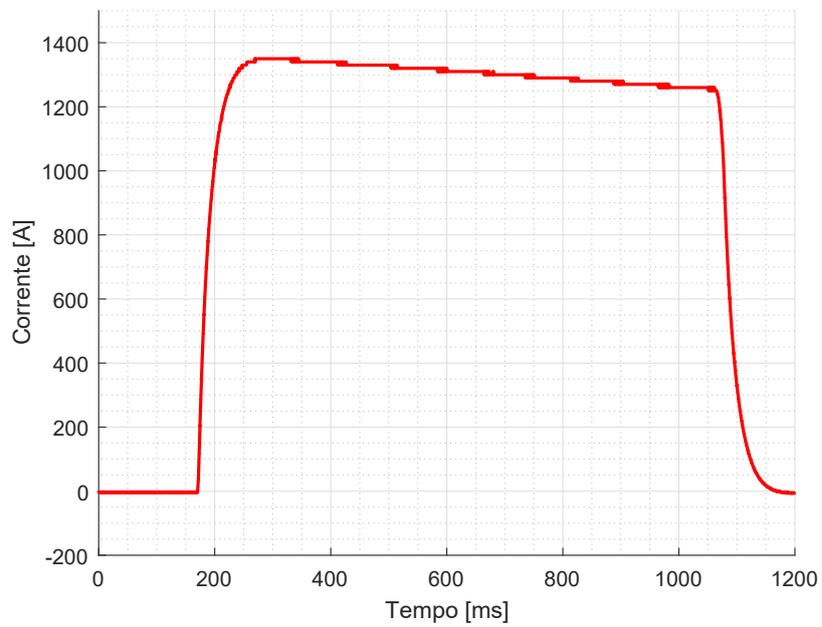


Figura 6.2. Cortocircuito con resistenza con riscaldamento della stessa

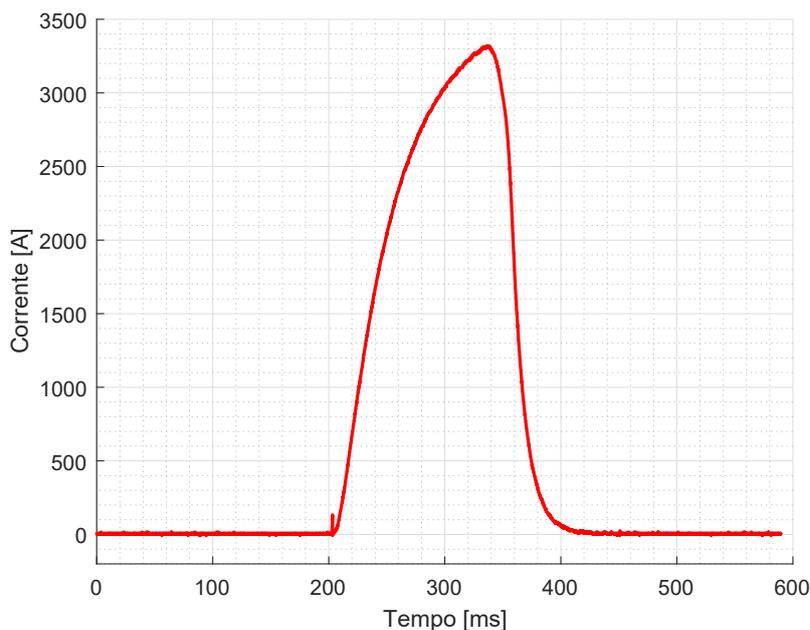


Figura 6.3. Cortocircuito senza resistenza

6.2 Preparazione dei file di prova

Le registrazioni originali delle prove di cortocircuito presentano parametri diversi tra di loro, elencati in tabella 6.1. Anche in questo caso si è proceduto all'estrapolazione del tratto utile, corrispondente al fronte di salita esponenziale.

Registrazioni	Tempo di campionamento	Durata	Numero di campioni
Caio Mario (SSE)	2 μs	4 s	2000001
Piazza Campanella	10 μs	10 s	1000001
Via Nicola 22	10 μs	10 s	1000001
Via Nicola 22	200 μs	93.7 s	468501
San Paolo	2 μs	4 s	2000001

Tabella 6.1. Parametri registrazioni di cortocircuito

L'eccessivo numero di campioni rimanenti ha reso necessaria una successiva interpolazione dei segmenti di forme d'onda ad un nuovo tempo di campionamento pari a 200 μs , così da uniformarsi ai precedenti test relativi ai passaggi del divisore di zona. I file conclusivi presentano quindi le caratteristiche elencate in tabella 6.2.

Campionamento impiegato	200 μs
Numero di campioni	5000
Frequenza forma d'onda	1 Hz

Tabella 6.2. Parametri file di prove cortocircuito

6.3 Risultati delle prove

6.3.1 Prove di Caio Mario (SSE)

Le registrazioni provengono da una serie di prove eseguite nella SSE di Caio Mario il 5 aprile 2006. Come carico sono stati impiegati uno o più resistori da 0.5Ω , connessi in serie o in parallelo per ottenere diversi valori di corrente massima. In figura 8.2 sono confrontate le forme d'onda derivanti dalle tre configurazioni di resistenze di carico impiegate. Nella tabella 6.3 sono elencati i risultati di questa serie di test.

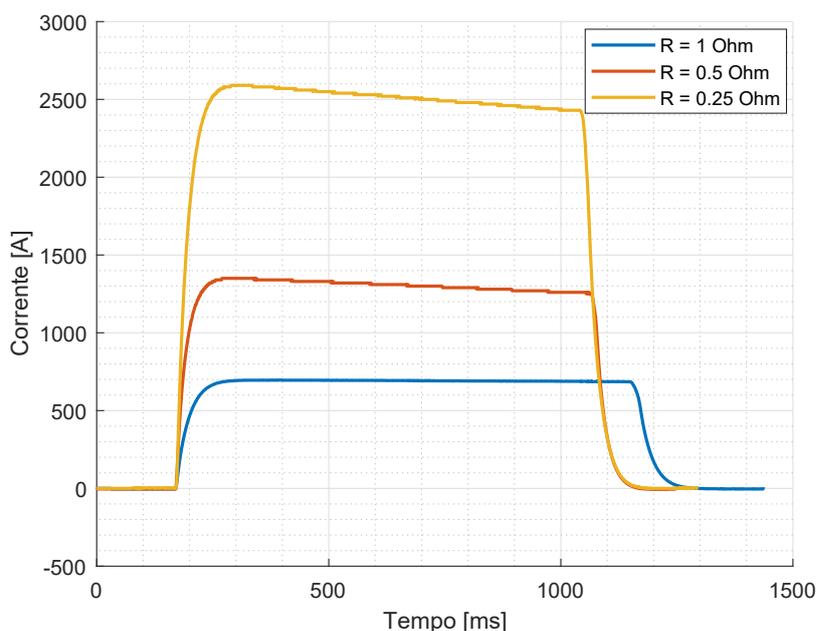


Figura 6.4. Confronto tra configurazioni di resistenze - SSE Caio Mario

Caio Mario		Grandezze misurate		Scatto rilevato		
Nome file	Resistenza	I _{max} (A)	Grad _{max} (A/ms)	I>	A/ms>	DR>
NONAME	1 Ω	696.25	25.00	-	-	-
NONAME1	1 Ω	693.75	25.00	-	-	-
NONAME2	0.5 Ω	1362.50	66.25	-	-	-
NONAME3	0.5 Ω	1350.00	62.50	-	-	-
NONAME4	0.5 Ω	1338.75	62.50	-	-	-
NONAME5	0.25 Ω	2590.63	103.13	-	-	x
NONAME6	0.25 Ω	2525.00	100.00	-	-	x

Tabella 6.3. Elenco prove cortocircuito Caio Mario

6.3.2 Prove di Piazza Campanella

Le registrazioni provengono da una serie di prove svolte in linea all'altezza di Piazza Campanella il 25 febbraio 2014. Si tratta di un settore che è possibile alimentare da due SSE, San Paolo e Martinetto. Sono stati svolti otto test in totale, quattro per ogni punto di alimentazione, equamente ripartiti tra prove con resistenza di valore 0.5Ω e prove senza impedenza. Non è stato possibile utilizzare la prima registrazione in quanto il fronte di salita del transitorio non è presente; l'unica informazione a nostra disposizione è il valore di regime della corrente di guasto. In figura 6.5 sono confrontate due forme d'onda relative ad un cortocircuito con resistenza ed uno senza, in entrambi i casi con alimentazione da San Paolo. In tabella 6.4 sono elencati i risultati in dettaglio.

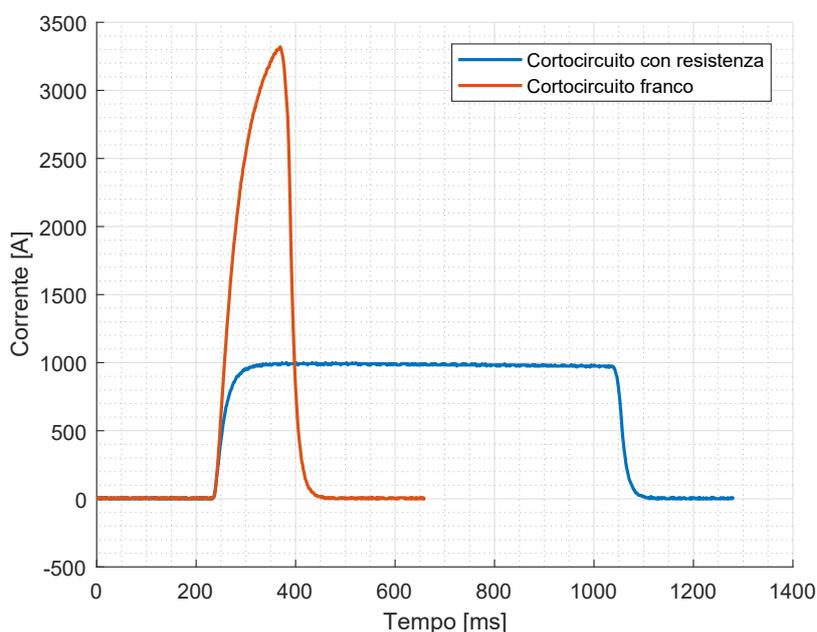


Figura 6.5. Confronto tra tipi di cortocircuito - Piazza Campanella

P.za Campanella		Grandezze misurate		Scatto rilevato		
Nome file	Resistenza	I _{max} (A)	Gradmax (A/ms)	I>	A/ms>	DR>
AUTO6	SÌ	999.99	41.67	-	-	-
AUTO7	SÌ	1049.99	58.33	-	-	-
AUTO8	SÌ	1041.66	50.00	-	-	-
AUTO9	NO	3316.63	66.67	-	-	x
AUTO10	NO	3324.97	66.67	-	-	x
AUTO11	NO	3624.96	108.33	-	-	x
AUTO12	NO	3708.30	108.33	-	-	x

Tabella 6.4. Elenco prove cortocircuito Piazza Campanella

6.3.3 Prove di Via Nicola Fabrizi

Lo stesso discorso di Piazza Campanella vale per la serie di prove effettuate in Via Nicola Fabrizi, svoltesi nello stesso giorno (25 febbraio 2014). Si è in presenza di undici registrazioni, anche in questo caso distribuite tra cortocircuiti con resistenza (sempre di valore pari a 0.5Ω) o senza, per entrambi i punti di alimentazione. L'unica differenza è costituita dall'impiego di due diversi tempi di campionamento: $200 \mu s$ per le prime cinque e $10 \mu s$ per le restanti sette. L'interpolazione di tutte le forme d'onda al tempo comune di $200 \mu s$ elimina questa disparità. In figura 6.6 sono confrontati i due diversi tipi di forma d'onda. In tabella 6.5 sono elencati i risultati dei test sul DIA-IGTv.

Via Nicola Fabrizi		Grandezze misurate		Scatto rilevato		
Nome file	Resistenza	I _{max} (A)	Gradmax (A/ms)	I>	A/ms>	DR>
AUTO2	SÌ	1083.32	58.33	-	-	-
AUTO6	SÌ	1083.32	58.33	-	-	-
AUTO8	SÌ	1016.66	41.67	-	-	-
AUTO9	SÌ	1024.99	41.67	-	-	-
AUTO10	SÌ	1033.32	41.67	-	-	-
AUTO11	SÌ	1074.99	58.33	-	-	-
AUTO12	NO	3699.96	133.34	-	-	x
AUTO13	NO	3658.30	133.33	-	-	x
AUTO14	NO	3649.96	75.00	-	-	x
AUTO15	NO	3649.96	75.00	-	-	x
AUTO16	NO	3591.63	75.00	-	-	x

Tabella 6.5. Elenco prove cortocircuito Via Nicola Fabrizi

6.3.4 Prove di San Paolo

Le ultime registrazioni utilizzate in questa sezione provengono da una serie di prove effettuate in zona San Paolo il 23 ottobre 2008. In questo caso, sono state testate solo forme d'onda di cortocircuito con resistenza; il file SPTP_Prova00 presenta un andamento alquanto particolare, quasi come se si trattasse di uno scatto, con un valore di picco non riproducibile dal generatore di funzioni. Tale registrazione è riprodotta in figura 6.7 e, anche se non è stata sottoposta al DIA-IGTv, dal momento che provocherebbe di certo l'intervento del dispositivo, vista l'entità della corrente massima e del gradiente. In tabella 6.6 sono elencati i risultati delle prove eseguite.

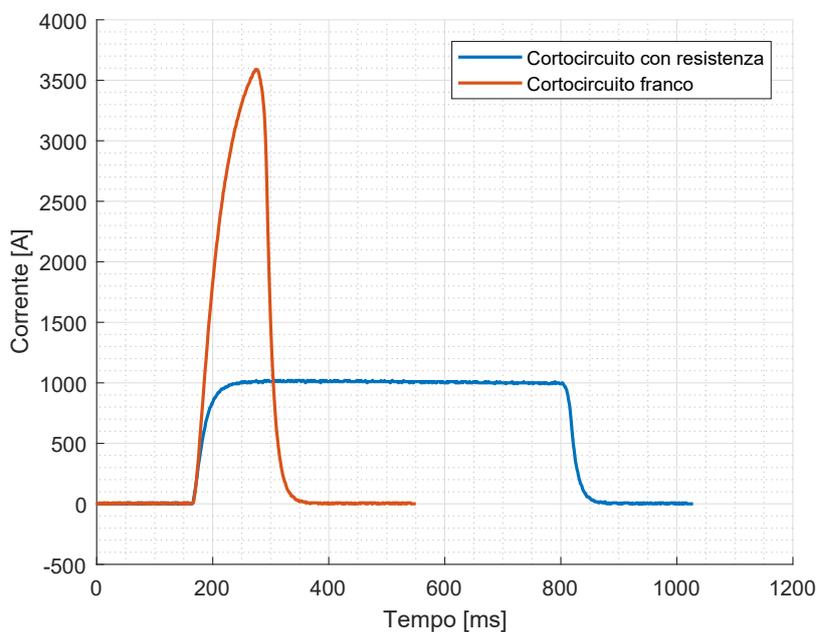


Figura 6.6. Confronto tra tipi di cortocircuito - Via Nicola Fabrizi

Via Nicola 22		Grandezze misurate		Scatto rilevato		
Nome file	Resistenza	Imax (A)	Gradmax (A/ms)	I>	A/ms>	DR>
AUTO0	SÌ	681.25	50.00	-	-	-
AUTO1	SÌ	681.25	50.00	-	-	-
NONAME	SÌ	681.25	50.00	-	-	-
SPTP_Prova00	SÌ	681.25	50.00	-	-	-
SPTP_Prova00	SÌ	681.25	50.00	-	-	-
SP_Prova00	?	14312.50	843.75	?	?	?

Tabella 6.6. Elenco prove cortocircuito San Paolo

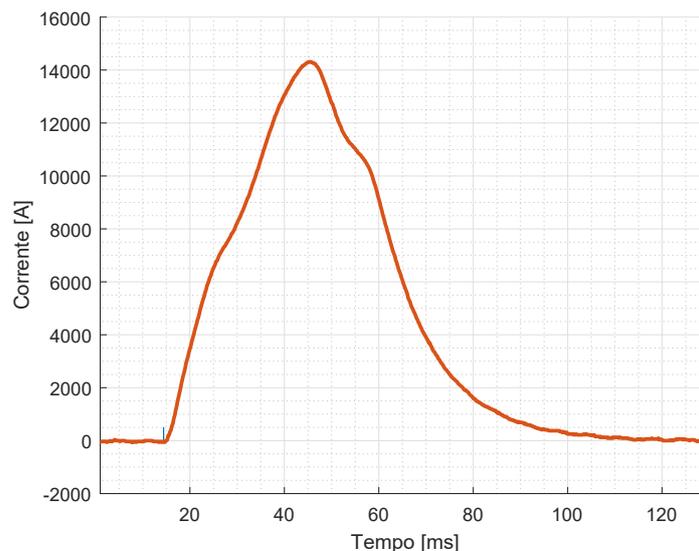


Figura 6.7. File SP_Prova00 - San Paolo

6.4 Conclusioni

L'intero set di prove di cortocircuito eseguite conferma la validità delle tarature proposte. Il ruolo fondamentale nel rilevare questo tipo di guasti è svolto dal parametro $DR>$. L'abbassamento del valore, calcolato sulla base dei peggiori passaggi di divisore in termini di corrente massima (motrici 6000) permette al DIA-IGTv di scattare con maggiore facilità in queste circostanze. Tutto questo è dimostrato dal fatto che il relè è intervenuto in occasione di tutte le registrazioni di cortocircuito franco o con bassa resistenza di carico (0.25Ω). Al contrario, i gradienti misurati risultano essere non elevati, in quanto le uniche prove svolte senza resistenza sono quelle a fondo linea, la quale esercita essa stessa una funzione limitatrice, mentre nei casi restanti abbiamo valori ancora minori.

Nel corso della successiva verifica in cabina delle tarature si è scoperto che le registrazioni utilizzate in questo capitolo non corrispondono alla realtà, in quanto eseguite con un trasduttore di tensione che applica una sorta di filtraggio ai segnali in input. Il risultato consiste in una serie di curve con una pendenza minore rispetto alle forme d'onda originali. Un tentativo di compensazione di questo errore sarà effettuato nell'ottavo capitolo. Questa considerazione non pregiudica comunque la validità delle conclusioni tratte da questa serie di prove, dal momento che, in presenza di cortocircuiti a fondo linea, il parametro base su cui si basa l'operato del DIA-IGTv è la differenza di corrente. I gradienti rilevati sono abbastanza bassi da non creare problemi, anche se minori dei rispettivi valori originali.

Capitolo 7

Prova delle tarature in cabina

7.1 Misure in cabina

7.1.1 Installazione del primo registratore e primi test

Il 19 dicembre 2017 è stato installato nella cabina Sabotino un registratore HIOKI di proprietà Infra.To, (figura 7.2), con l'obiettivo di verificare le tarature del DIA-IGTv testate in laboratorio. In figura 7.3 sono illustrate le impostazioni dei parametri del relè; corrispondono ai valori proposti, con il $\mathbf{A/ms}$ settato a 120 A/ms per evitare che il dispositivo scatti per passaggi di divisore estremi. Il segnale di corrente è prelevato, per entrambi gli strumenti, tramite una resistenza di shunt, ma la catena di misura è diversa: il DIA-IGTv (2) è connesso ad un sistema composto da un trasmettitore (3) ed un ricevitore (1) uniti tramite fibra ottica (raffigurati in figura 7.1), mentre lo HIOKI ad un disaccoppiatore ottico. In figura 7.4 sono schematizzate le due catene di misura.

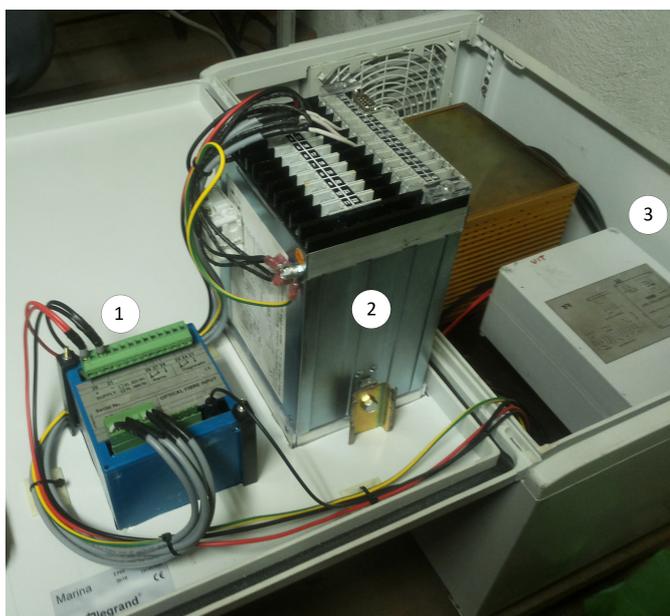


Figura 7.1. Catena di misura DIA-IGTv

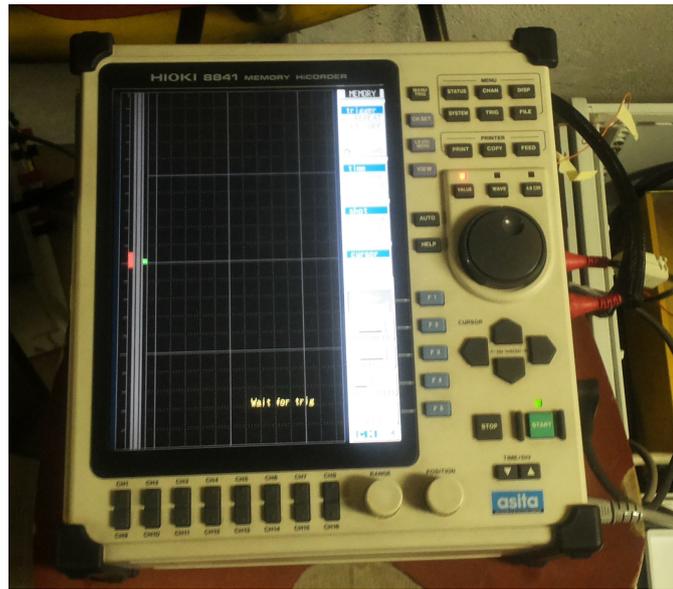


Figura 7.2. Registratore HIOKI Infra.To

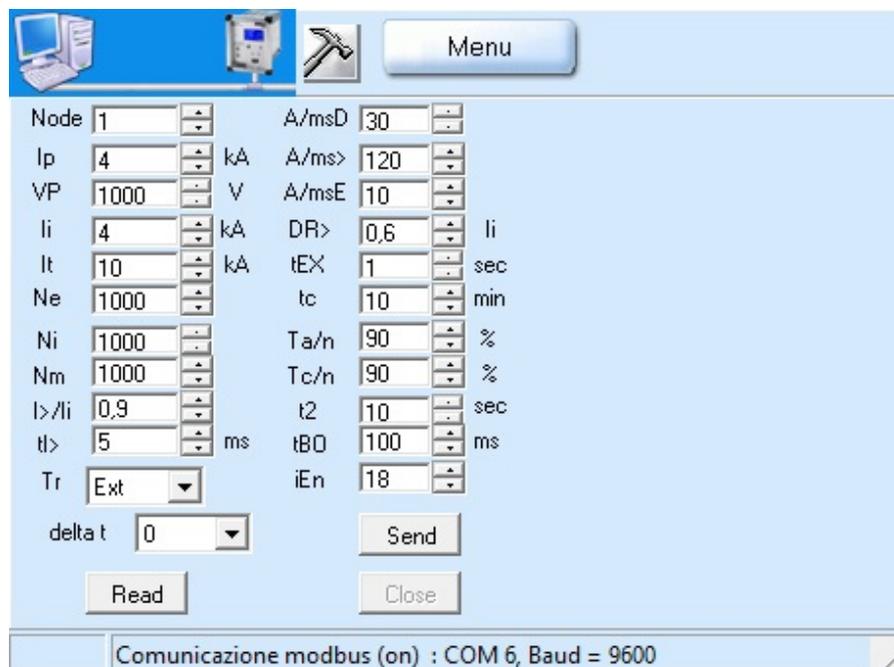


Figura 7.3. Tarature DIA-IGTv in cabina Sabotino

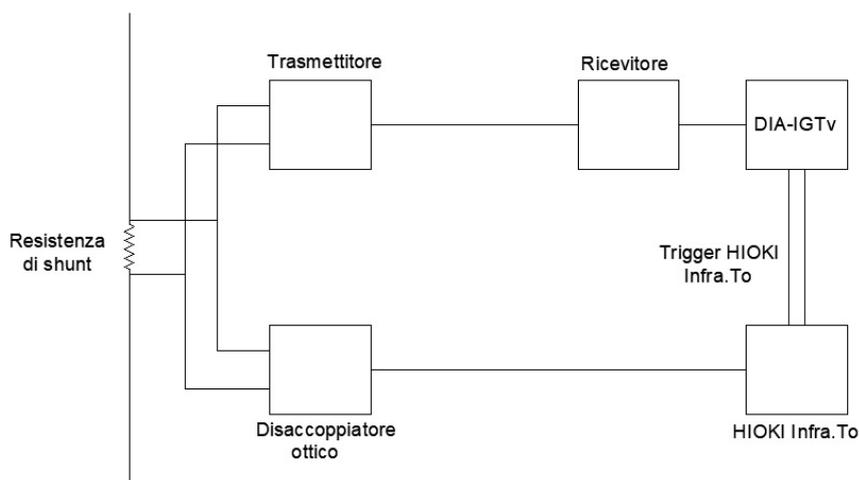


Figura 7.4. Strumentazione installata in cabina Sabotino - 19-12-2017

Il relè è dotato una memoria interna in grado di memorizzare gli ultimi tre eventi registrati, per una durata pari a 300 ms (da 200 ms prima a 100 ms dopo l'istante dello scatto). L'utilizzo dello HIOKI offre i vantaggi di poter registrare un numero di eventi di gran lunga superiore e di poter disporre di un tempo di misurazione maggiore, in modo tale da poter analizzare in maniera migliore gli scatti avvenuti, oltre al fatto di essere caratterizzato da una maggiore frequenza di campionamento. Il registratore è impostato in modalità High-Speed, memorizzando i dati in continuazione sulla memoria interna di buffer per una durata di 4 s. La sincronizzazione tra le registrazioni dei due strumenti è realizzata tramite la funzione di trigger esterno: nel momento in cui il DIA-IGTv rileva uno scatto, invia un segnale allo HIOKI, che individua quindi la finestra temporale che deve essere salvata sulla memoria esterna. L'istante di pretrigger è fissato 3.2 s in anticipo rispetto al comando di trigger del DIA-IGTv; in sintesi, l'80 % della registrazione è relativa agli istanti precedenti allo scatto.

Il 23 dicembre è avvenuto il primo scatto del DIA-IGTv; una volta scaricati i dati dai due strumenti, dal confronto delle letture si è notata una certa disparità tra le due forme d'onda, come illustrato in figura 7.5.

Per capire quale dei due strumenti avesse registrato una lettura errata, il 9 gennaio 2018 sono stati effettuati alcuni test in cabina. In primo luogo si è disconnesso il disaccoppiatore dalla resistenza di shunt e, tramite un generatore portatile, sono state fornite una serie di tensioni costanti. Le letture coincidevano, così è stata ristabilita la connessione originaria. Tramite l'abbassamento della taratura del parametro $I>$ a 800 A sono stati quindi provocati tre scatti del DIA-IGTv, con la conseguente registrazione dei tre eventi da parte dei due strumenti. In questa occasione, non sono state riscontrate differenze significative dal confronto delle forme d'onda, come illustrato in figura 7.6. Il segnale misurato dal relè è meno definito, ma non si assiste alla disparità dello scatto reale del 23 dicembre.

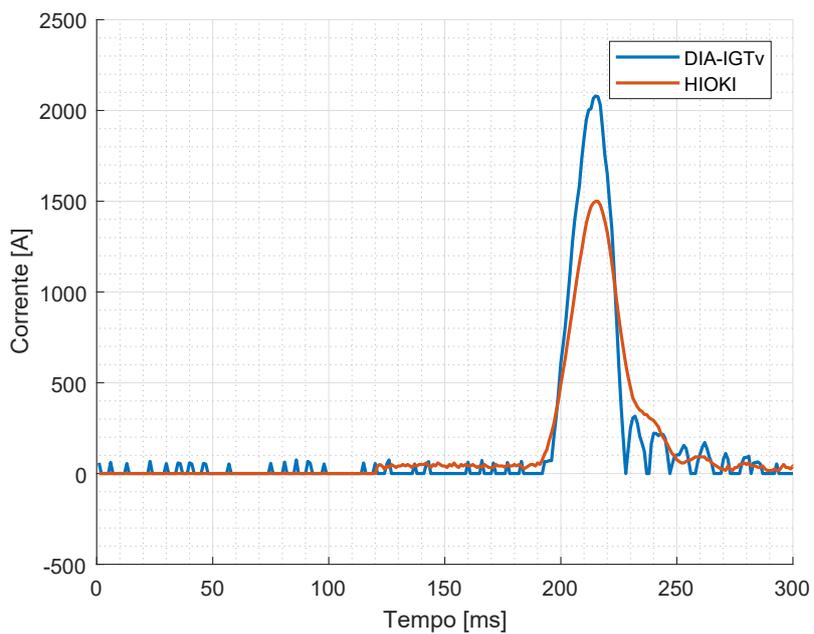


Figura 7.5. Scatto DIA-IGTV 23-12-2017

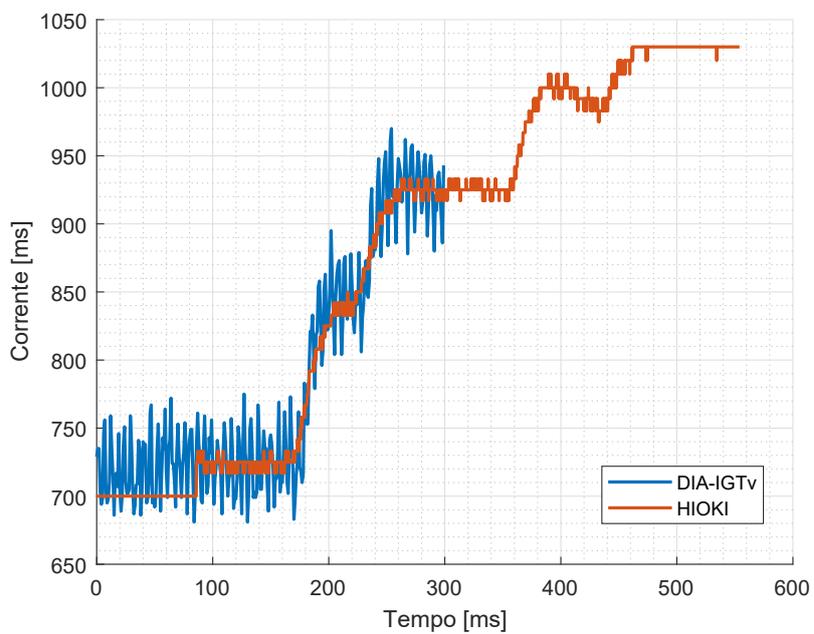


Figura 7.6. Prima prova di scatto 9-1-2018

7.1.2 Scatti DIA-IGTv di gennaio 2018

Nei giorni seguenti sono stati registrati altri tre nuovi scatti, rispettivamente il 19 (figura 7.7), il 20 (figura 7.8) e il 21 gennaio (figura 7.9). Le forme d'onda rilevate non sono riconducibili a eventi studiati in precedenza. Anche in questo caso sono state rilevate differenze significative tra le due registrazioni. In questa occasione, Infra.To ha fornito maggiori informazioni riguardo alle possibili cause di tali interventi:

1. **19 gennaio 2018:** lo scatto è avvenuto alle ore 02:21; dal momento che è avvenuto al di fuori dell'orario di servizio, è probabile che si tratti di uno spostamento di motrice tra depositi. Non è nota la vettura, ma in quei giorni era stata segnalato che a bordo della 5009 l'IR si apriva in corsa. Dalla forma d'onda registrata si vede come la sovracorrente avvenga a partire da un assorbimento non nullo, segno che il tram era in movimento.
2. **20 gennaio 2018:** lo scatto è avvenuto alle ore 15:02; in quel momento sono state registrate le motrici 5042, 2835, 2856, 2891, 5052,2884, 5034, 2895. La forma d'onda consiste in una serie di oscillazioni decrescenti a partire da un assorbimento nullo (il DIA-IGTv registra il valore assoluto della corrente misurata).
3. **21 gennaio 2018:** lo scatto è avvenuto alle ore 07:11; in quel momento sono state registrate le motrici 5009, 2827, 5001, 5012. La forma d'onda è pressoché identica a quella del 20 gennaio. In tale giornata la 5012 è stata segnalata come lenta in partenza; questo potrebbe spiegare la sovracorrente a partire da un assorbimento nullo.

7.1.3 Installazione del secondo registratore e nuovi test

Per cercare di capire la causa di queste differenze, si è deciso di installare un secondo registratore HIOKI di proprietà del Politecnico, con identiche impostazioni di registrazione rispetto allo strumento di Infra.To, in data 23 gennaio. In questo caso, la misurazione è effettuata tramite l'impiego di una pinza amperometrica posta sul conduttore positivo. Le principali caratteristiche tecniche sono illustrate in tabella 7.1. Lo schema delle connessioni tra gli strumenti è illustrato in figura 7.10. Come nel caso precedente, sono stati provocati tre nuovi scatti, con identiche modalità. In figura 7.11 è illustrato il confronto tra le letture dei due registratori HIOKI.

Apparentemente sembrano corrispondere, ma, se si analizza in dettaglio, come nell'ingrandimento di figura 7.12, si nota che, in presenza di un fronte di salita ripido, la lettura del registratore di Infra.To fatica a seguire la forma d'onda del registratore del Politecnico. Lo stesso fenomeno, anche se meno marcato, si presenta durante la successiva discesa della corrente registrata.

Il 3 febbraio è avvenuto il quinto scatto del DIA-IGTv; in figura 7.13 sono confrontate le tre misure a disposizione, questa volta con l'aggiunta del secondo registratore HIOKI. Come nei casi precedenti, la lettura dello strumento di proprietà

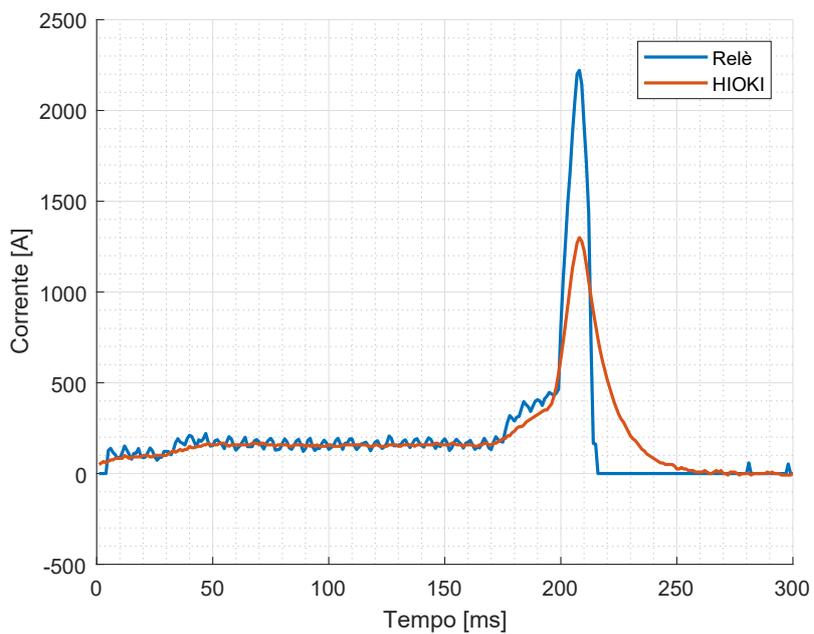


Figura 7.7. Scatto DIA-IGTv 19-01-2018

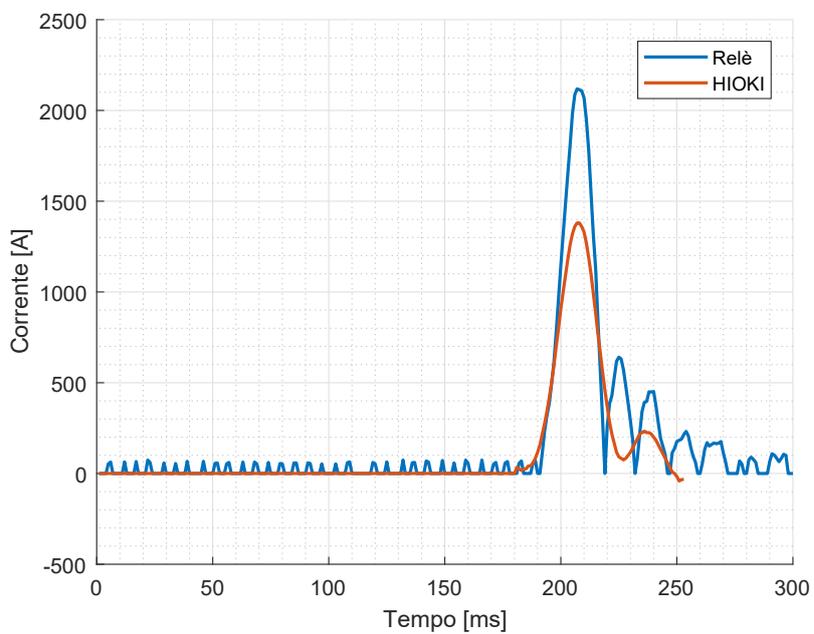


Figura 7.8. Scatto DIA-IGTv 20-01-2018

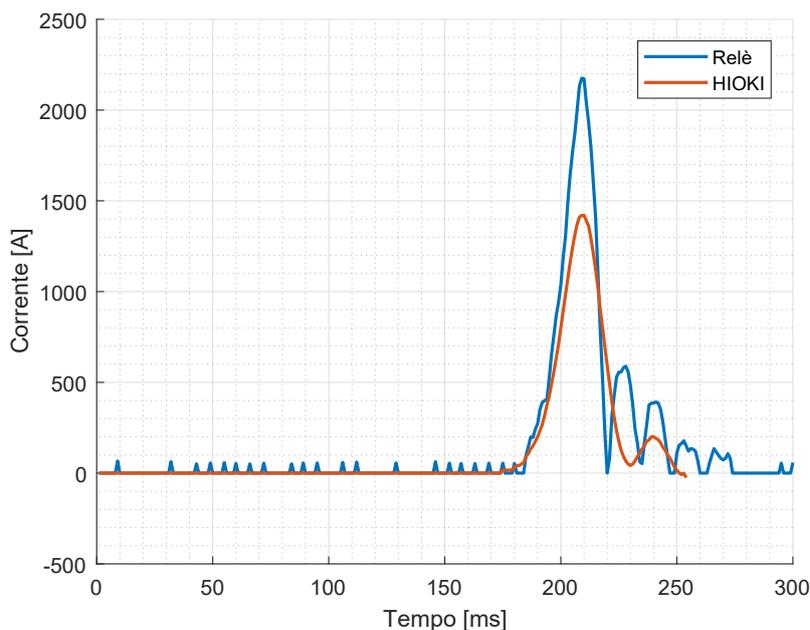


Figura 7.9. Scatto DIA-IGTV 21-01-2018

Modello	HIOKI 3285 AC/DC HiTESTER
Range di corrente	200 - 2000 A
Range di tensione	30 - 300 - 600 V
Range di frequenza	10 Hz ÷ 1 kHz
Incertezza sulla corrente	± 1.3 % range ± 3 dgt
Incertezza sulla corrente	± 1.0 % range ± 3 dgt
Incertezza sulla frequenza	± 0.3 % range ± 1 dgt
Frequenza di campionamento	2 ÷ a time/sec

Tabella 7.1. Caratteristiche tecniche pinza amperometrica HIOKI 3285

di Infra.To risulta essere errata, in maniera analoga agli altri scatti precedenti. La misura del registratore del Politecnico corrisponde invece quasi completamente, al netto del limite a 2000 A imposto dall'utilizzo della pinza amperometrica; anche qui è stato applicato il valore assoluto per facilitare l'allineamento delle tre forme d'onda. Tutto ciò dimostra che, fin dall'inizio, la misura corretta è quella offerta dal relè, e, per l'ultimo scatto analizzato, dal registratore del Politecnico. La registrazione dello strumento di Infra.To sembra invece essere in qualche modo smorzata ed in ritardo rispetto al segnale di riferimento. In particolare, la differenza nell'installazione dei due registratori è costituita sostanzialmente dal modo in cui il segnale di corrente è prelevato: da un lato si hanno una resistenza di shunt e un disaccoppiatore ottico, dall'altro una pinza amperometrica. Si è quindi deciso di concentrare l'analisi sul disaccoppiatore impiegato da Infra.To, dal momento che la seconda misurazione risulta essere affidabile per fenomeni con banda di frequenza fino ad 1 kHz.

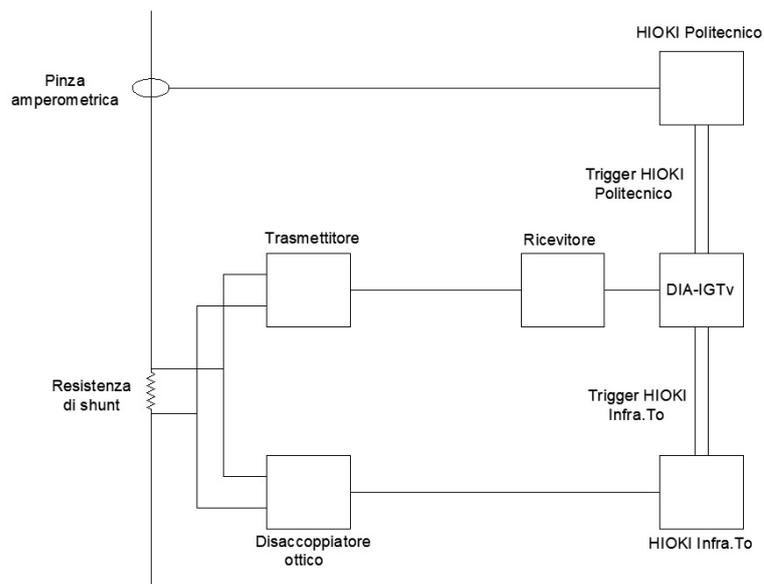


Figura 7.10. Strumentazione installata in cabina Sabotino - 19-12-2017

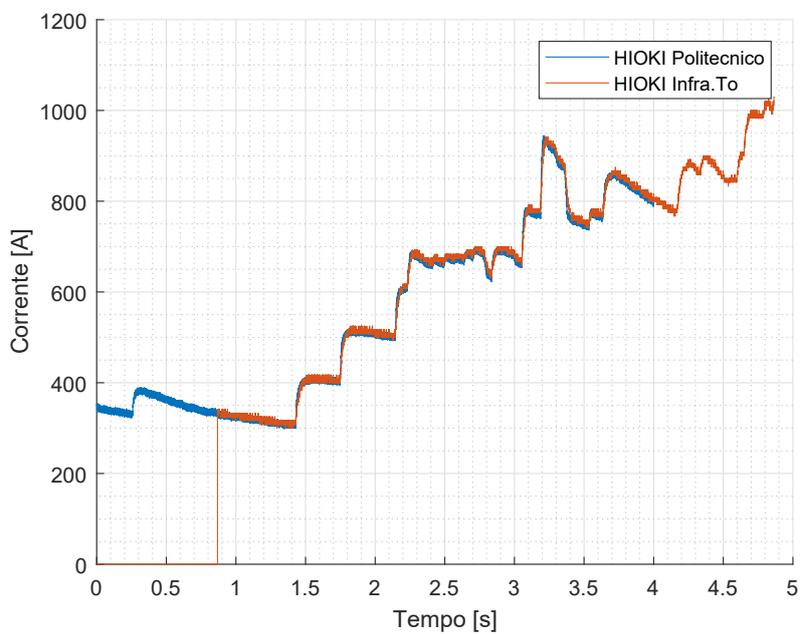


Figura 7.11. Seconda prova di scatto 23-1-2018

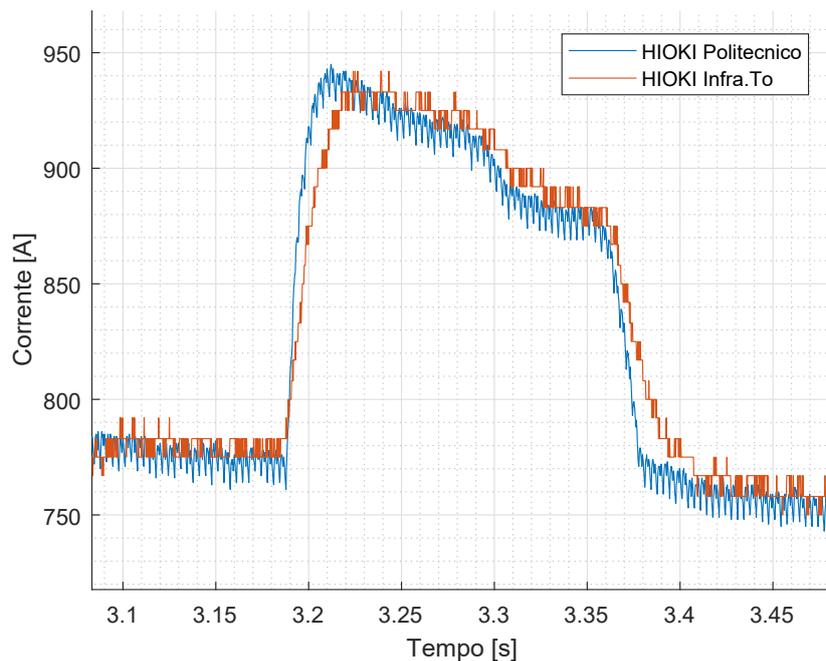


Figura 7.12. Particolare della seconda prova di scatto 23-1-2018

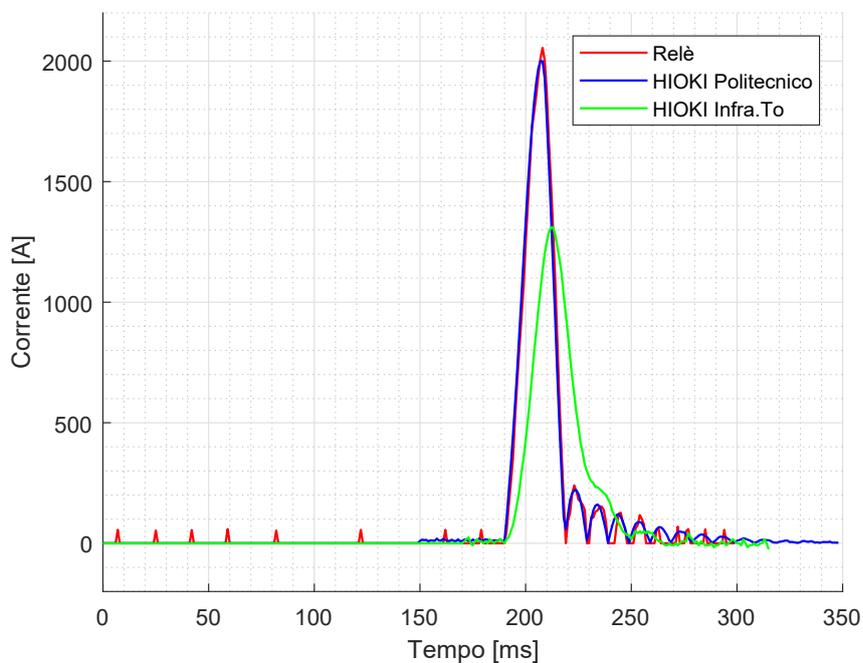


Figura 7.13. Scatto DIA-IGT_v 03-02-2018

7.2 Prove in laboratorio sul trasduttore

7.2.1 Presentazione del trasduttore

L'analisi si è concentrata su di un componente situato all'interno del disaccoppiatore ottico, un trasduttore di tensione DC, modello CV-D della Circutor, raffigurato in figura 7.14. Le prove descritte di seguito non sono state effettuate sullo strumento effettivamente impiegato nelle misure in cabina, ma su di uno identico. Si presume quindi che il comportamento dei due sia simile. Le principali caratteristiche tecniche fornite dal costruttore sono elencate in tabella 7.2.



Figura 7.14. Trasduttore di tensione CV-D

Range tensione input	0 - 100 mV
Range tensione output	0 - 10 V
Resistenza di carico output	> 500 Ω
Tempo di risposta	< 100 ms

Tabella 7.2. Caratteristiche tecniche trasduttore CV-D

In sintesi, questo trasduttore riceve in input una tensione continua e la restituisce in output amplificata di un fattore approssimativamente pari a 100. Viene utilizzato con la funzione di garantire l'isolamento galvanico tra i due circuiti di ingresso e uscita. Il tempo di risposta garantito è inferiore ai 100 ms, un intervallo di tempo di molto superiore alle variazioni tipiche dei fenomeni che si intende misurare. In seguito sono elencate le prove compiute sul componente, tramite l'impiego del generatore di funzioni.

7.2.2 Prove con forme d'onda campione

Onda quadra con duty-cycle 0.5

Come prima prova è stata utilizzata come forma d'onda campione un'onda quadra con i parametri elencati in tabella 8.1. In figura 7.15 sono illustrati i risultati del test, nel quale il segnale in uscita è stato ridotto di un fattore pari a 100 per poter meglio paragonare le due registrazioni. Si vede come l'output non riesca a seguire il gradino dell'input, con il fronte salita che presenta un andamento esponenziale anziché ad onda quadra. Stesso comportamento si ha con il successivo fronte di discesa.

Vpp	47 mV
Duty-cycle	0.5
Frequenza	10 Hz

Tabella 7.3. Parametri onda quadra duty-cycle 0.5

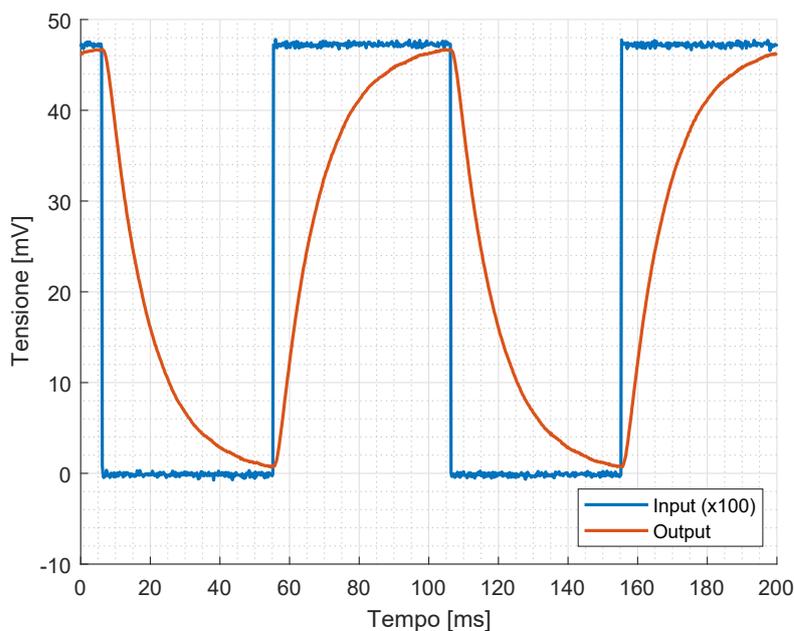


Figura 7.15. Risultati prova onda quadra duty-cycle 0.5

Onda quadra con duty-cycle 0.2

Come seconda prova è stata utilizzata come forma d'onda campione un'onda quadra con i parametri elencati in tabella 7.4; il minor duty-cycle imposto serve per valutare il comportamento del trasduttore in presenza di segnali con variazioni più repentine. In figura 7.16 sono illustrati i risultati della prova. In questo caso l'output non è in grado di raggiungere il valore di riferimento fissato dall'onda quadra e si assiste quindi ad una differenza significativa tra le tensioni di picco raggiunte dalle due curve. Il maggior tempo dedicato al livello zero consente alle due registrazioni di allinearsi, in un tempo non inferiore a 70 ms. La specifica del costruttore sembra essere rispettata, ma non risulta essere molto compatibile con l'intento prefissato dalle misure iniziali.

Vpp	50 mV
Duty-cycle	0.2
Frequenza	10 Hz

Tabella 7.4. Parametri onda quadra duty-cycle 0.2

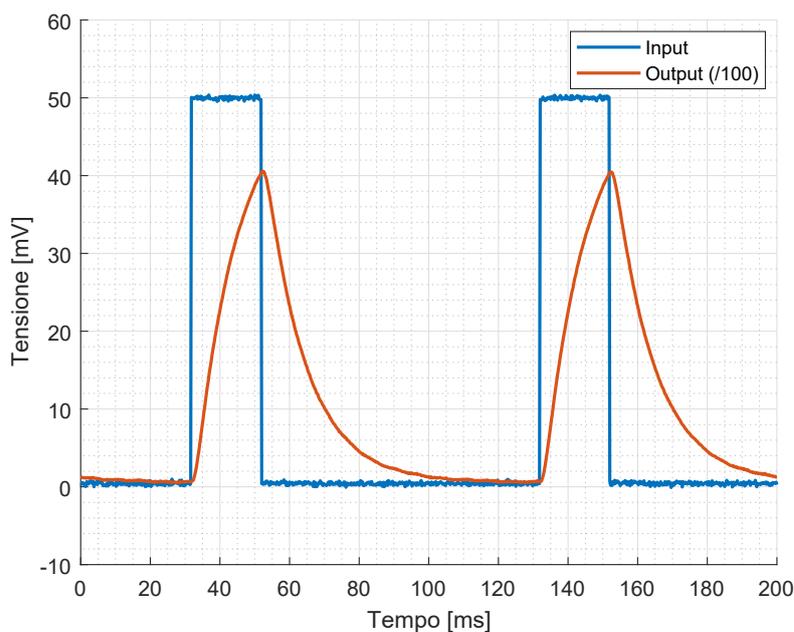


Figura 7.16. Risultati prova onda quadra duty-cycle 0.2

Forma d'onda di passaggio sotto divisore

Come terza prova è stata utilizzata una forma d'onda reale, tratta dalla registrazione dell'assorbimento di corrente di una motrice 5000 durante il transito al di sotto ad un divisore di zona, per valutare il comportamento del trasduttore in presenza di un segnale reale. La tensione picco-picco impostata è stata calcolata in modo tale da rispettare la proporzione introdotta dall'impiego della resistenza di shunt. Per garantire la corretta riproduzione della corrente effettiva si sarebbe dovuto impostare un valore pari a 12,75 mV, purtroppo inferiore al limite inferiore del generatore di funzioni, pari a 16 mV. La frequenza è stata calcolata basandosi sul numero di campioni della registrazione e sul tempo di campionamento impiegato, in modo tale da rispettare la durata originale del fenomeno. I parametri impostati sono elencati in tabella 7.5, mentre i risultati sono illustrati in figura 7.17. Si può notare come le differenze diventino più marcate in presenza di variazioni con gradiente maggiore; in particolare, decisamente errata risulta essere la registrazione dei picchi delle oscillazioni caratteristiche di questo tipo di motrice.

V _{pp}	16 mV
Numero campioni	2000
Tempo campionamento	200 μ s
Frequenza	2.5 Hz

Tabella 7.5. Parametri passaggio sotto divisore

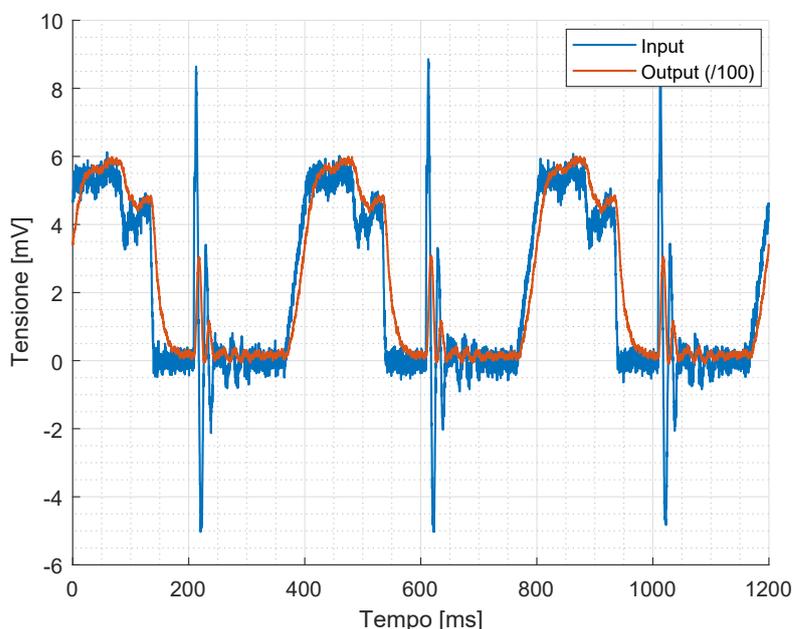


Figura 7.17. Risultati prova passaggio sotto divisore

Conclusioni sui test preliminari

Dai test condotti in laboratorio risulta evidente che le differenze tra le registrazioni riscontrate fin dal primo scatto sono da imputare alla presenza del trasduttore di tensione all'interno del disaccoppiatore ottico. In particolare, il test con l'onda quadra con duty-cycle pari a 0.2 dimostra che, in presenza di segnali con brusche variazioni, l'output del dispositivo non riesce a seguire correttamente l'input, a causa del mancato arrivo al valore di riferimento del fronte di salita o di discesa in uscita. Lo stesso fenomeno si nota nel corso del terzo test, soprattutto nel tratto contraddistinto dalle ripide oscillazioni dovute all'ingresso della motrice in una nuova zona alimentata; in questo frangente la forma d'onda trasmessa risulta essere totalmente distorta. Dai test eseguiti con forme d'onda campione l'azione di questo componente sembra essere assimilabile ad un filtro passa-basso: l'azione di riduzione è applicata ai gradienti dei segnali in ingresso, quasi insignificante con basse pendenze, assai più rilevante con fronti decisamente più ripidi, come i gradini della rettangola. Non pare esserci riduzione apparente sulle ampiezze, dal momento che, nel caso dell'onda quadra con duty-cycle 0.5, l'output riesce a raggiungere l'input, seppure con un certo ritardo dovuto all'andamento esponenziale.

7.2.3 Taratura del filtro equivalente

La scoperta dell'azione di filtraggio introdotta dal disaccoppiatore ottico ha permesso di capire che anche le registrazioni delle prove di cortocircuito in linea raccolte negli anni precedenti sono in un certo modo errate, in quanto tutte eseguite con il medesimo strumento. In particolare, uno degli effetti si riscontra nel momento in cui la corrente si impenna lungo l'arco di esponenziale: l'andamento dovrebbe corrispondere ad uno spigolo alquanto brusco, ma in tutte le registrazioni è presente una sorta di raccordo che smorza lo spigolo. Si è quindi cercato di caratterizzare questo effetto di filtraggio, in modo tale da risalire per quanto possibile alle forme d'onda originali. Per tutte le prove di cortocircuito giunti a regime l'errore sembra riguardare solo la pendenza della curva, dal momento che, in precedenza, si è dimostrato come le ampiezze siano correttamente riprodotte, una volta conclusosi il transitorio. Tale discorso non può invece essere svolto per i test senza resistenza di carico, in cui l'interruttore extrarapido si è attivato prima che la corrente raggiungesse il valore massimo; in questi casi, l'intera curva non sembra corrispondere alla corrispondente reale.

Preparazione forme d'onda e registrazione input-output

Il trasduttore sembra comportarsi come un filtro passa-basso; l'obiettivo di questa sezione consiste proprio nel tentare di tarare i parametri della funzione di trasferimento di tale filtro. Si è deciso di utilizzare come forma d'onda campione la curva che si ottiene in un transitorio di cortocircuito con un modello del primo ordine, composto da un generatore di tensione in continua, una resistenza ed un'induttanza. La corrente che si ottiene alla chiusura del circuito presenta l'andamento descritto nella formula 7.1, dove il termine \mathbf{A} corrisponde al valore della corrente di regime e il termine \mathbf{B} è l'inverso della costante di tempo. Tramite Matlab sono

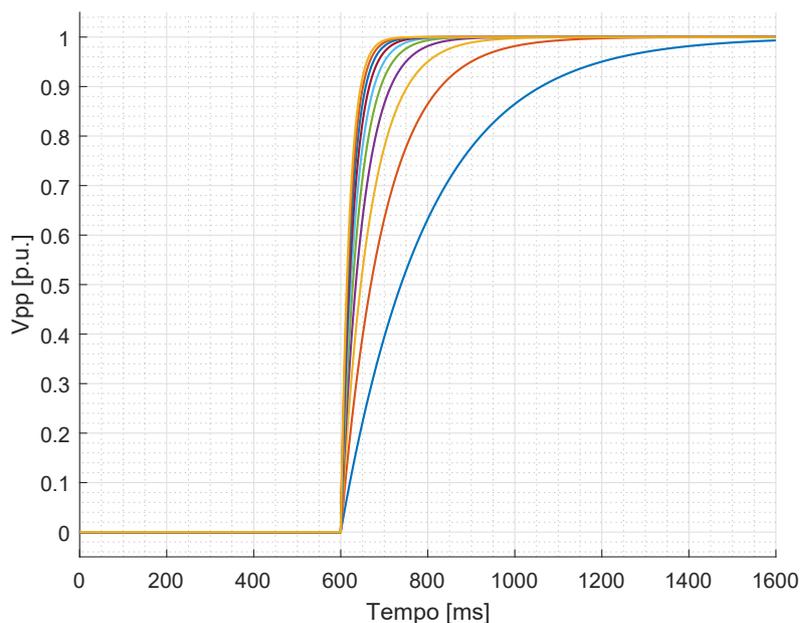


Figura 7.18. Esponenziali per test trasduttore

stati preparati una serie di file per il generatore di funzioni; le caratteristiche delle forme d'onda generate, raffigurate in figura 7.18, sono elencate in tabella 7.6.

$$i = A \cdot \left(1 - e^{(-B \cdot t)}\right) \quad (7.1)$$

Per ognuna delle curve così ottenute sono stati registrati il segnale ai terminali d'input e d'output del trasduttore di tensione con un registratore HIOKI, in modo tale da poter analizzare i risultati su Matlab. In figura 7.19 è illustrata una delle registrazioni, con τ^{-1} pari a 30. Il segnale di output è stato scalato in base al rapporto di conversione di tensione, che una volta calcolato risulta essere pari a **102.80**. È evidente l'effetto di filtraggio, soprattutto in presenza del fronte di salita, con il caratteristico raccordo, e nella successiva discesa a gradino.

Numero campioni	8000
Tempo campionamento	200 μ s
Frequenza	0.625 Hz
Vpp - Input	50 mV
Vpp - Output	5 V
τ^{-1}	5 \div 150 s^{-1}

Tabella 7.6. Parametri esponenziali test per trasduttore

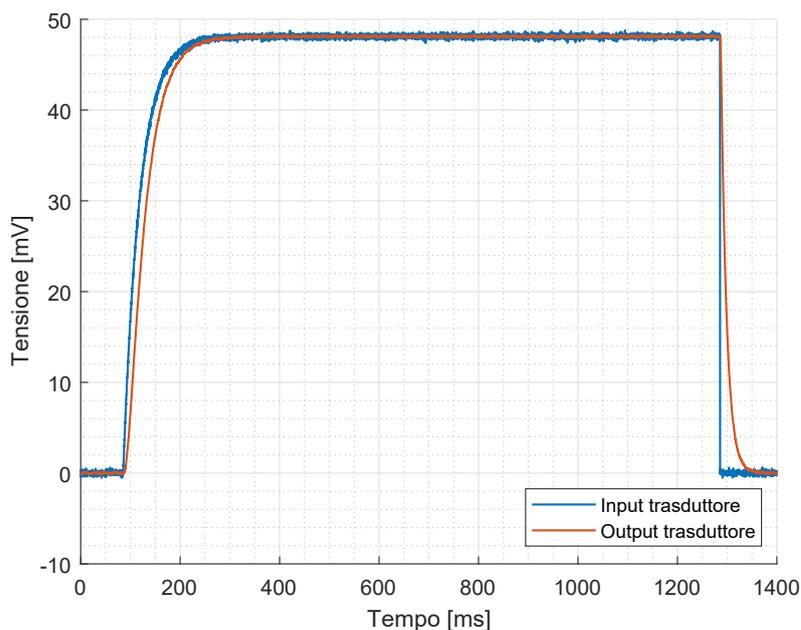


Figura 7.19. Confronto input-output trasduttore con $\tau^{-1} = 30s^{-1}$

Definizione parametri filtro equivalente

L'obiettivo consiste nel trovare un filtro passa basso equivalente che, applicato al segnale originale di input, permetta di ottenere una forma d'onda quanto più simile all'output reale registrato. La ricerca è stata condotta per confronto, testando diversi valori fino a trovare un risultato soddisfacente. La formula 7.2 rappresenta la funzione di trasferimento di un filtro passa basso, dove la costante di tempo τ del filtro si calcola in base alla frequenza di taglio f_o con la formula 7.3.

$$H(s) = \frac{1}{1 + s\tau} \quad (7.2)$$

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_o} \quad (7.3)$$

Dal momento che questa funzione deve essere applicata a segnali discreti, caratterizzati da tempi di campionamento differenti, è necessario passare alla trasformata Z del filtro. La funzione **filter** di Matlab richiede l'espressione della formula in tale notazione. La nuova funzione di trasferimento corrisponde alla formula 7.4

$$H(z) = \frac{a}{1 - (1 - a)z^{-1}} \quad (7.4)$$

In questa forma il filtro è normalizzato, ossia non introduce riduzione delle ampiezze per frequenze nulle. Il termine a si calcola con la formula 7.5, dove T_s corrisponde al tempo di campionamento del segnale in ingresso e f_o la frequenza di taglio:

$$a = \frac{T_s}{T_s + \frac{1}{2\pi f_o}} \quad (7.5)$$

In questo modo è possibile adattare la funzione di trasferimento in base alla serie di registrazioni utilizzate. L'unico parametro incognito è la frequenza di taglio; per determinarla si procede tramite il confronto tra il segnale di output del trasduttore e l'input esponenziale al quale è stato applicato il filtro. Una volta ottenute due forme d'onda il più possibile simili, si ricava il parametro ignoto. Dopo alcuni tentativi si è ottenuta la funzione di trasferimento descritta dalla formula 7.6. In figura 7.20 e 7.21 sono illustrati i confronti con due diverse curve esponenziali, con costante di tempo inversa rispettivamente di 30 e 120 s^{-1} . L'espressione 7.6 risulta valida quindi per tutta la gamma di esponenziali testate, sia per valori di τ^{-1} bassi che alti. Tramite la formula 7.7 si ricava quindi la frequenza di taglio del filtro.

$$H(z) = \frac{0.0172}{1 - 0.9828 \cdot z^{-1}} \quad (7.6)$$

$$f_0 = \frac{a}{2\pi \cdot T_s \cdot (1 - a)} = \frac{0.0172}{2\pi \cdot 200\mu s \cdot (1 - 0.0172)} = 13.927 Hz \quad (7.7)$$

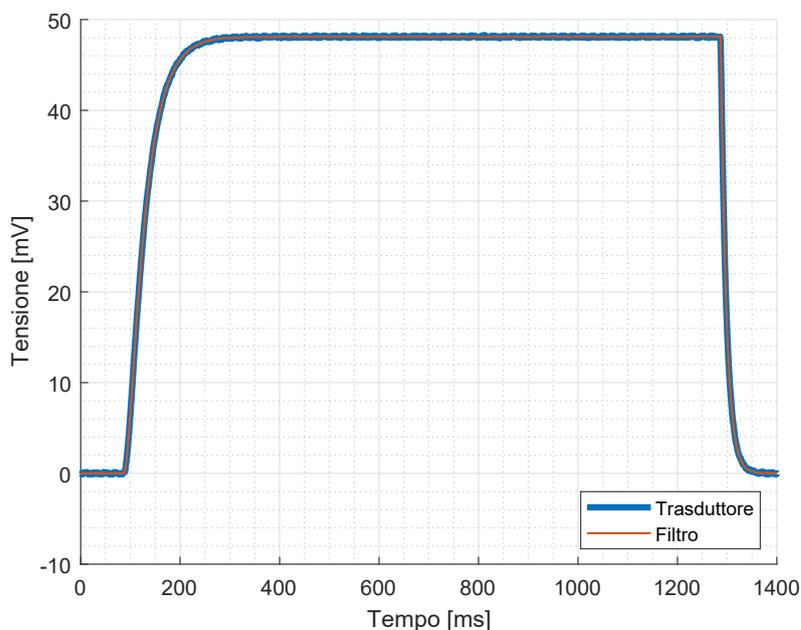


Figura 7.20. Confronto tra output, $\tau^{-1} = 30s^{-1}$

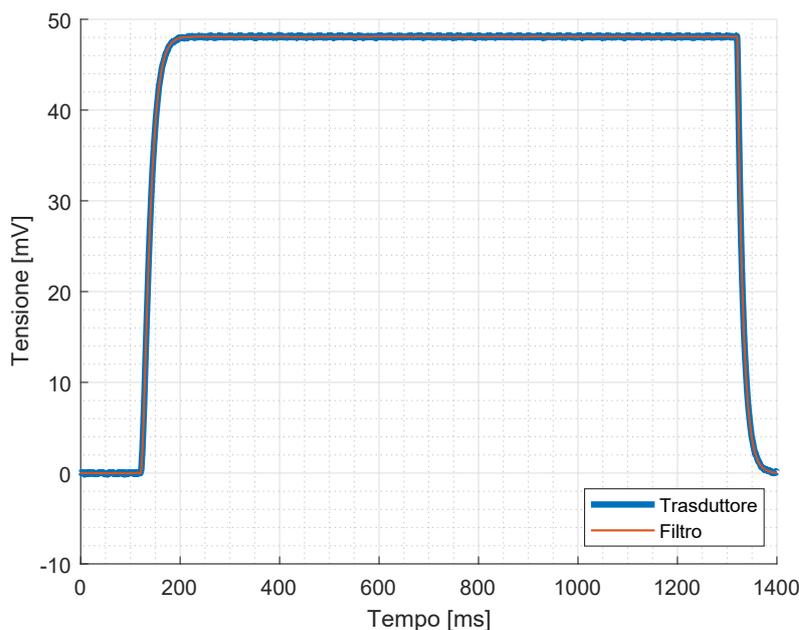


Figura 7.21. Confronto tra output, $\tau^{-1} = 120s^{-1}$

7.2.4 Verifica del filtro sugli scatti reali

Per verificare la correttezza dei parametri trovati, tale filtro è stato applicato alle registrazioni dei cinque scatti del DIA-IGTv. Inizialmente si era pensato di applicare la funzione di trasferimento inversa per risalire ai segnali originali, ma un'operazione di questa sorta amplifica i disturbi presenti sulle forme d'onda originali, rendendo impossibile l'utilizzo di questo procedimento. Un esempio di questo tipo è illustrato in figura 7.22, nella quale il filtro inverso è stato applicato alla registrazione dello HIOKI di Infra.To nello scatto del 2 febbraio.

Si è quindi deciso di filtrare i segnali corretti (ottenuti senza l'impiego del disaccoppiatore ottico): tale compensazione è stata applicata alle forme d'onda registrate dal DIA-IGTv per tutti gli scatti e dallo HIOKI del Politecnico, presente solo per l'ultimo scatto. Le due funzioni di trasferimento applicate ai segnali dei due strumenti sono diverse, in quanto dipendono dai tempi di campionamento impostati, rispettivamente di 1 ms per il relè e di 200 μs per i registratori. Nei successivi confronti si nota come il segnale filtrato del DIA-IGTv presenti un andamento diverso nella parte finale della forma d'onda; questa differenza è dovuta al fatto che il dispositivo registra il valore assoluto della corrente mentre i registratori memorizzano il valore reale. Questo effetto si nota negli scatti illustrati nelle figure 7.23, 7.25, 7.26 e 7.27, mentre non si rileva in figura 7.24. Al netto di questo, i risultati dimostrano che i parametri del filtro ricavati in precedenza sono corretti.

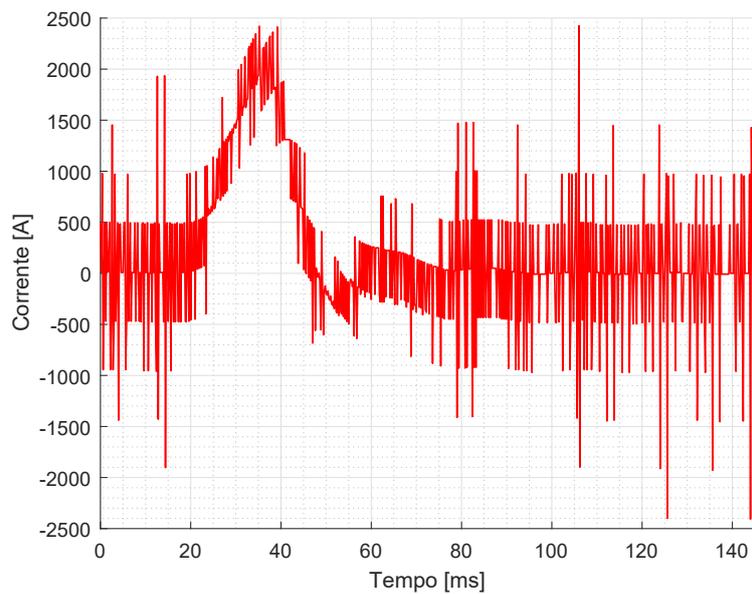


Figura 7.22. Tentativo di filtratura inversa del segnale dello HIOKI Infra.To

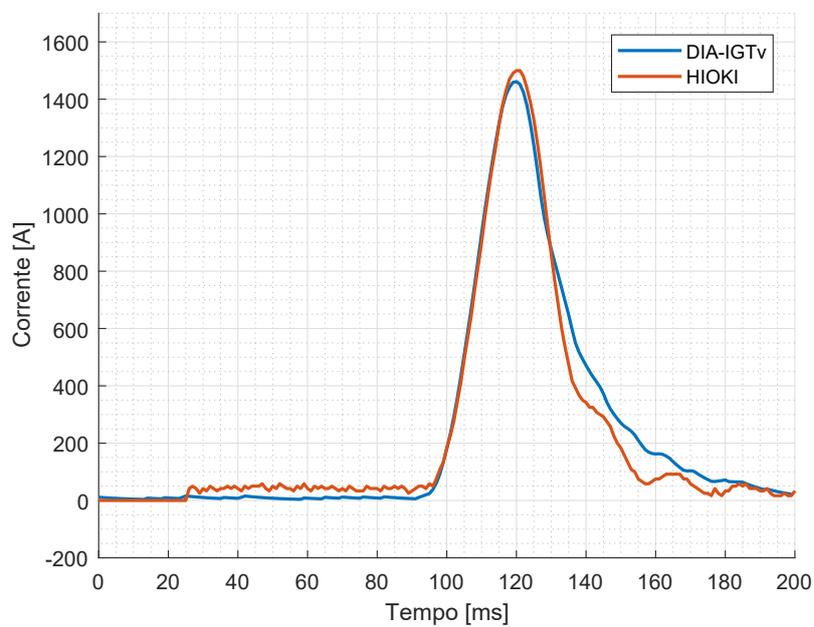


Figura 7.23. Scatto DIA-IGTv 23-12-2017 - Forme d'onda filtrate

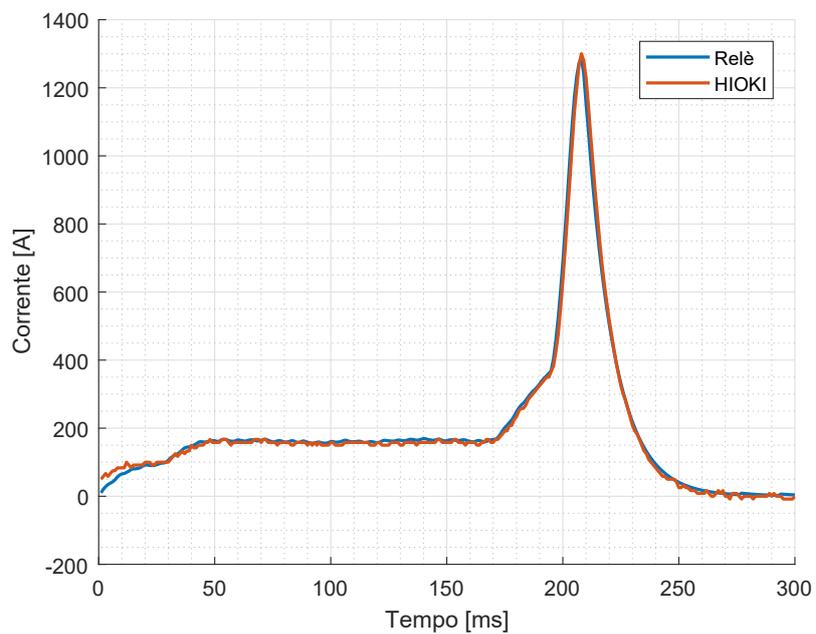


Figura 7.24. Scatto DIA-IGTv 19-01-2018 - Forme d'onda filtrate

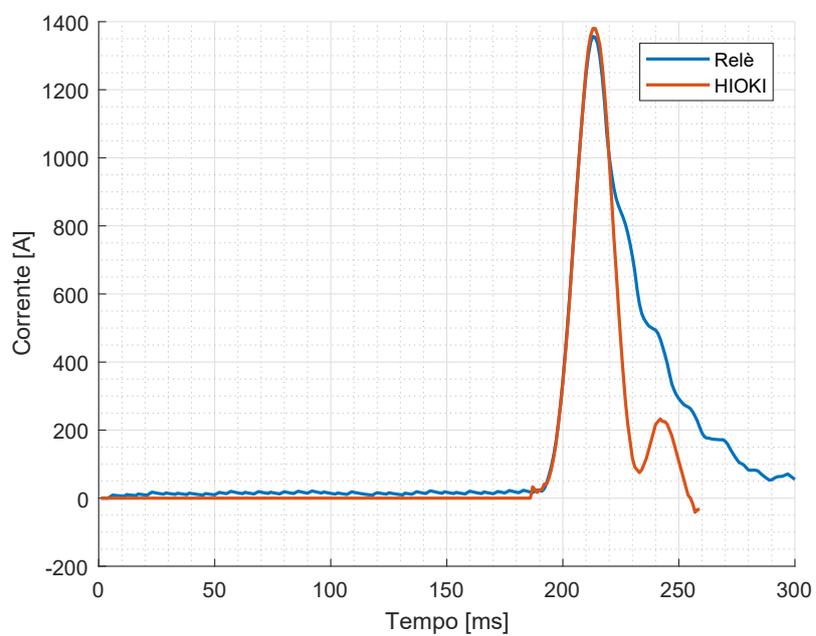


Figura 7.25. Scatto DIA-IGTv 20-01-2018 - Forme d'onda filtrate

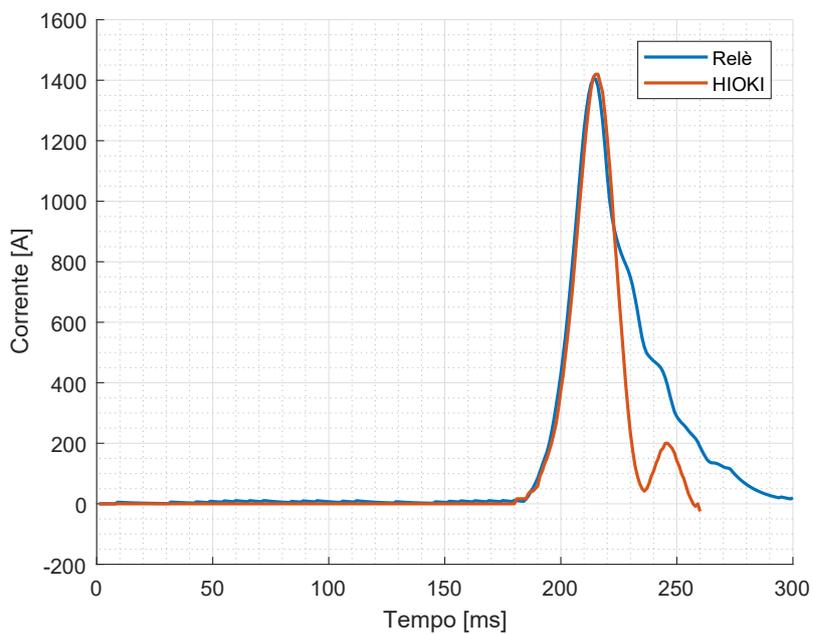


Figura 7.26. Scatto DIA-IGTv 21-01-2018 - Forme d'onda filtrate

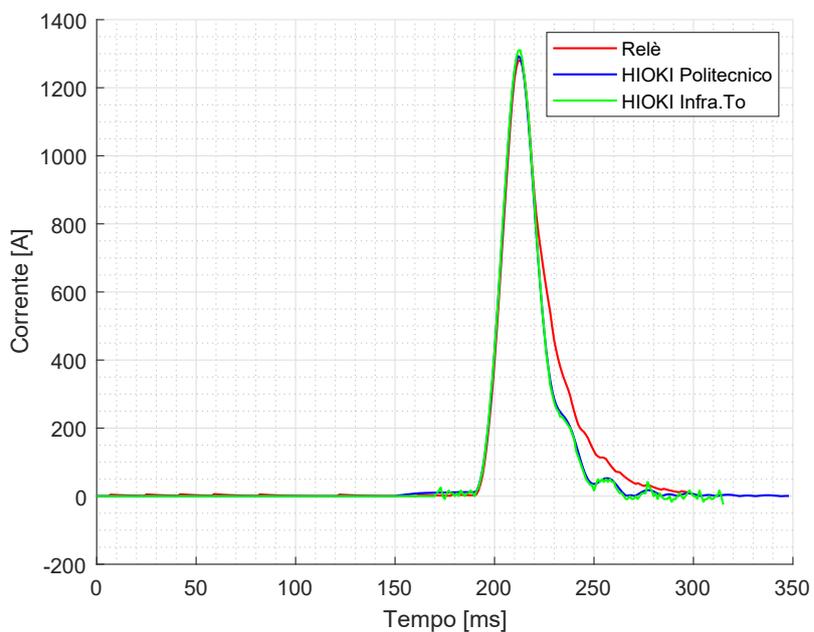


Figura 7.27. Scatto DIA-IGTv 03-02-2018 - Forme d'onda filtrate

Capitolo 8

Simulazioni di cortocircuito

In questa sezione sono descritte le simulazioni di cortocircuito a fondo linea effettuate tramite il simulatore real-time, come completamento delle prove sul DIA-IGTv. I parametri del circuito equivalente della linea sono calcolati a partire dalle registrazioni delle prove di guasto reali. Le forme d'onda utilizzate in precedenza non corrispondono alla realtà, dal momento che sono state eseguite con il disaccoppiatore ottico, il cui comportamento è stato caratterizzato nel capitolo precedente. È quindi opportuno, per quanto possibile, cercare di risalire alle curve reali, in modo tale da poter dimensionare correttamente le grandezze ignote, corrispondenti alla resistenza e all'induttanza del tratto di linea compreso tra convertitore e punto di guasto. Una volta determinati i valori, il modello completo è stato utilizzato per sottoporre il risultato di queste simulazioni al DIA-IGTv, per testare il suo comportamento con un numero di forme d'onda superiore a quelle reali.

8.1 Determinazione del modello

8.1.1 Modello semplificato della linea

L'obiettivo di queste prove consiste nel valutare la capacità di intervento del relè in presenza di guasti a fondo linea, solitamente più complicati da rilevare a causa delle correnti di regime tutt'altro che elevate e gradienti ancora minori. Nel caso in cui si volesse simulare un cortocircuito ad inizio linea, nei pressi della cabina, sarebbe necessario utilizzare un modello più elaborato, dal momento che bisogna considerare anche il comportamento del convertitore. Tali eventi generano però correnti talmente elevate da causare l'intervento immediato dell'interruttore automatico, senza aspettare il comando del DIA-IGTv. Per questo motivo non ci si è concentrati su questo tipo di analisi.

È quindi possibile utilizzare un modello semplificato del primo ordine, illustrato in figura 8.1. Ad un certo istante lo switch si chiude, simulando un guasto senza impedenza. È possibile risolvere analiticamente il circuito, per ottenere delle equazioni che saranno impiegate nelle sezioni seguenti per calcolare le grandezze ignote. Raggruppati i parametri di linea con le formule 8.1 e 8.2, la costante di tempo si calcola con 8.3, mentre la corrente presenta l'andamento descritto da 8.4. I parametri utilizzati sono i seguenti:

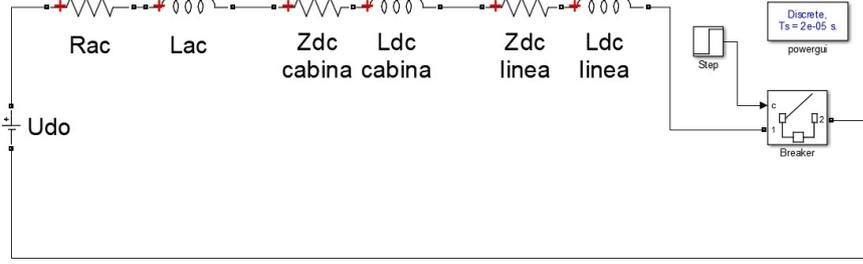


Figura 8.1. Modello Simulink per simulazioni di cortocircuito a fondo linea

1. U_{do} : è la tensione a vuoto sul lato DC del blocco di conversione.
2. R_{AC} e L_{AC} : sono i parametri del circuito monofase equivalente del trasformatore a tre avvolgimenti.
3. $R_{DC,cab}$ e $L_{DC,cab}$: corrispondono ai componenti DC situati in cabina.
4. $R_{DC,linea}$ e $L_{DC,linea}$: corrispondono al tratto di linea, incluso i conduttori di ritorno, compreso tra la cabina e il punto di guasto.

$$R_{tot} = R_{AC} + R_{DC,cab} + R_{DC,linea} \quad (8.1)$$

$$L_{tot} = L_{AC} + L_{DC,cab} + L_{DC,linea} \quad (8.2)$$

$$\tau = \frac{L_{tot}}{R_{tot}} \quad (8.3)$$

$$i = I_o \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \frac{U_{do}}{R_{tot}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (8.4)$$

La tensione DC è nota, mentre resistenza e induttanza relative al trasformatore erano già state calcolate [3]. Le grandezze relative alla linea erano anch'esse state ricavate a partire dalle registrazioni originali, tramite delle formule tratte dalla letteratura scientifica [6]. In questo modo erano stati ottenuti i valori presunti di corrente di regime e massimo gradiente di un guasto a fondo linea, così da consentire al DIA-IGTv di rilevare al meglio questo tipo di guasti. Le curve di partenza presentano però una pendenza minore di quella reale, per l'effetto di filtraggio introdotto dal trasduttore di tensione. Di conseguenza, è necessario ricalcolare i parametri di linea. Si è già visto come sia impossibile applicare il filtro al contrario per risalire alla forma d'onda originale. Si è quindi proceduto ad un confronto tra la registrazione reale e una serie di curve esponenziali alle quali è stato applicato il filtro. Una volta ottenuto un risultato soddisfacente, note la corrente di regime e la costante di tempo, è possibile risalire alla resistenza e all'induttanza totale del circuito. Inizialmente si analizzano le prove svolte in SSE per ricavare i valori di $R_{DC,cab}$ e $L_{DC,cab}$. In seguito si ottengono $R_{DC,linea}$ e $L_{DC,linea}$ a partire dalle registrazioni restanti. Nel corso di questi test sono state impiegate una o più resistenze di carico del valore approssimato di 0.5Ω . I parametri noti del circuito equivalente sono elencati in tabella 8.1.

U_{do}	635 V
R_{AC}	1.277 m Ω
L_{AC}	0.104 mH
R_{load}	453.6 m Ω
L_{load}	0.09963 mH

Tabella 8.1. Parametri del modello noti

8.1.2 Calcolo dei parametri di cabina

Le registrazioni utilizzate in questa sezione derivano dalle prove di cortocircuito svolte nella SSE Caio Mario. Queste forme d'onda erano già state sottoposte al DIA-IGTv per la verifica delle tarature, anche se non propriamente corrispondenti alla realtà. Si è quindi deciso di cercare di risalire alle originali per determinare i parametri di cabina con maggiore precisione. Il modello Simulink utilizzato per generare la curva esponenziale è illustrato in figura 8.2. Come visto nel capitolo precedente, il problema principale causato dal trasduttore consiste nella la riduzione dei gradienti, mentre per i valori di regime non si hanno criticità dal momento che il transitorio giunge a termine. Tramite il confronto tra la registrazione reale e il risultato della simulazione, debitamente filtrato, è quindi possibile risalire alla costante di tempo reale del circuito τ e la corrente di regime I_o . In questo modo si trovano i valori dei parametri di cabina sottraendo le grandezze già note dalla resistenza e dall'induttanza totale. Dalla combinazione delle formule 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4 si ricavano le equazioni 8.5 e 8.6 ($R_{DC,linea}$ e $L_{DC,linea}$ non sono presenti perché si è in presenza di prove svolte in SSE).

$$R_{DC,cab} = \frac{U_{do}}{I_o} - R_{AC} - R_{load} \quad (8.5)$$

$$L_{DC,cab} = \tau \cdot \frac{U_{do}}{I_o} - L_{AC} - L_{load} \quad (8.6)$$

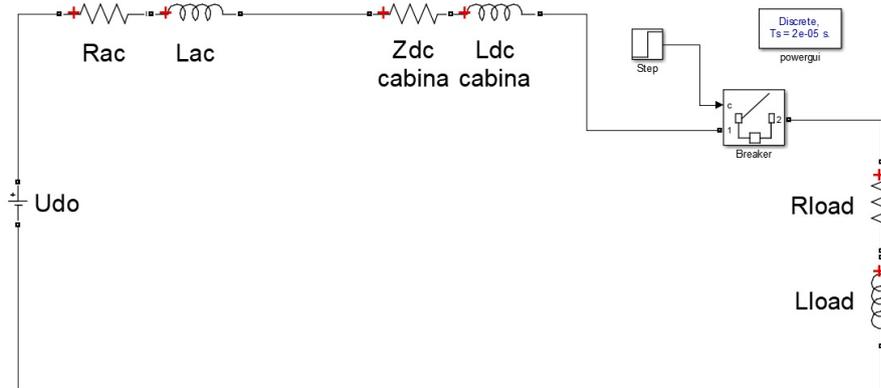


Figura 8.2. Modello Simulink per simulazioni di cortocircuito - Caio Mario

File	Resistenza	I_o	τ	$R_{DC,cab}$	$L_{DC,cab}$
NONAME2	0.5 Ω	1363.8	93	0.0097	0.0048
NONAME3	0.5 Ω	1353.7	68	0.0107	0.0067
NONAME4	0.5 Ω	1343.8	68	0.0111	0.0067
NONAME5	0.25 Ω	2587.4	58	0.0134	0.0041
NONAME6	0.25 Ω	2572.7	57	0.0125	0.0043

Tabella 8.2. Parametri di cabina - SSE Caio Mario

I risultati di questa prima serie di confronti sono elencati in tabella 8.2. Gli intervalli di valori che possono assumere i parametri di cabina sono quindi i seguenti:

$$R_{DC,cab} = 9.7 \div 13.4 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DC,cab} = 4.1 \div 6.7 \text{ mH}$$

8.1.3 Calcolo dei parametri di linea

Lo stesso procedimento è stato applicato per ricavare i valori dei parametri di linea. Le registrazioni utilizzate in questa sezione sono relative alle prove di Piazza Campanella e di Via Nicola. In questo caso si considerano uniti in un'unica resistenza ed induttanza i componenti DC di linea, dal momento che sono stati impiegati come punto di alimentazione due differenti SSE, San Paolo e Martinetto; non è quindi possibile utilizzare i parametri della SSE Caio Mario. Le formule utilizzate sono espresse dalle equazioni 8.7 e 8.8.

$$R_{DC} = \frac{U_{do}}{I_o} - R_{AC} - R_{load} \quad (8.7)$$

$$L_{DC} = \tau \cdot \frac{U_{do}}{I_o} - L_{AC} - L_{load} \quad (8.8)$$

L'unica differenza è rappresentata dalla presenza di prove di cortocircuito senza impedenza, nelle quali l'intervento dell'interruttore ha impedito alla corrente di raggiungere il valore di regime. Tale grandezza è stata quindi ricavata tramite un'interpolazione esponenziale del tratto di curva originale, come illustrato in figura 8.3.

Prove di Piazza Campanella

In tabella 8.3 sono elencati i risultati relativi alle prove con alimentazione da San Paolo, mentre in tabella 8.4 vi sono quelle di Martinetto. Nel file AUTO2 non è presente il fronte di salita del transitorio, quindi può essere impiegato solo per determinare la corrente di regime e, di conseguenza, la resistenza di linea.

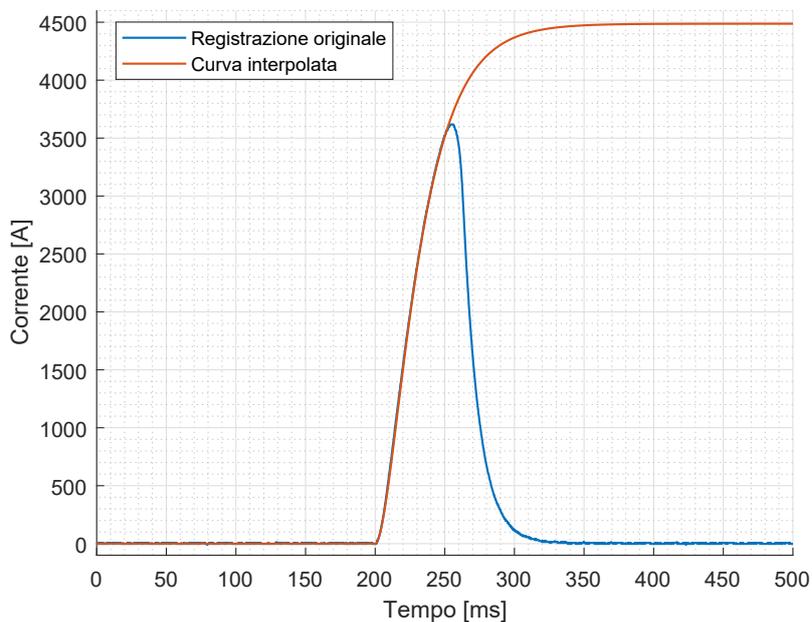


Figura 8.3. Interpolazione curva esponenziale

File	Resistenza	I_o	τ	R_{DC}	L_{DC}
AUTO2	0.5 Ω	980.78	-	0.1926	-
AUTO6	0.5 Ω	986.73	69	0.1887	0.0091
AUTO9	-	3538.3	24	0.1782	0.0074
AUTO10	-	3546	24	0.1778	0.0074

Tabella 8.3. Parametri di linea Piazza campanella - Alimentazione da San Paolo

File	Resistenza	I_o	τ	R_{DC}	L_{DC}
AUTO7	0.5 Ω	1034.5	120	0.159	0.0049
AUTO8	0.5 Ω	1022.6	130	0.1659	0.0046
AUTO11	-	4599.8	41	0.1368	0.0033
AUTO12	-	4487	43	0.1402	0.0032

Tabella 8.4. Parametri di linea Piazza Campanella - Alimentazione da Martinetto

Prove di Via Nicola Fabrizi

In tabella 8.5 sono elencati i risultati relativi alle prove con alimentazione da San Paolo, mentre in tabella 8.6 vi sono quelle di Martinetto.

File	Resistenza	I_o	τ	R_{DC}	L_{DC}
AUTO8	0.5 Ω	1010	75	0.1738	0.0082
AUTO9	0.5 Ω	1012.6	75	0.1722	0.0082
AUTO10	0.5 Ω	1009.9	80	0.1739	0.0077
AUTO14	-	3995	23	0.1577	0.0068
AUTO15	-	3949	25	0.1595	0.0063
AUTO16	-	3937	26	0.16	0.0061

Tabella 8.5. Parametri di linea Via Nicola Fabrizi - Alimentazione da San Paolo

File	Resistenza	I_o	τ	R_{DC}	L_{DC}
AUTO2	0.5 Ω	1068.6	160	0.1394	0.0035
AUTO6	0.5 Ω	1067.9	160	0.1398	0.0035
AUTO7	0.5 Ω	1067.6	160	0.1399	0.0035
AUTO11	0.5 Ω	1065.5	150	0.1411	0.0038
AUTO12	-	4506	70	0.1396	0.0019
AUTO13	-	4410	75	0.1427	0.0018

Tabella 8.6. Parametri di linea Via Nicola Fabrizi - Alimentazione da Martinetto

8.1.4 Riepilogo dei parametri complessivi

Dai risultati dell'analisi delle prove reali si possono ottenere degli intervalli di valori plausibili per i componenti DC. Tale individuazione è comunque solo indicativa dal momento che il procedimento seguito per risalire alle forme d'onda originali è approssimativo. In più si nota come, all'interno del set di test relativi alla stessa zona, i valori di induttanza ricavati dalle prove di cortocircuito franco siano più bassi dei restanti. In ogni caso, l'obiettivo consiste nel trovare degli intervalli di valori ragionevoli su cui basare le successive simulazioni.

Per quanto riguarda i parametri di cabina, i risultati si basano sulle prove eseguite in SSE Caio Mario; è evidente come questi valori siano incompatibili con le altre forme d'onda, relative ad altre SSE. Si può supporre che queste grandezze siano specifiche per ogni cabina. Un simile discorso può essere applicato ai parametri di linea, anche se in questo caso risulta determinante l'effettiva estensione dei conduttori. Bisogna inoltre sottrarre la parte relativa ai parametri di cabina, nel momento in cui si devono determinare le grandezze del circuito equivalente.

Per simulare cortocircuiti a fondo linea tutto ciò non rappresenta un problema, dal momento che si tratta di un'analisi qualitativa per determinare i limiti di intervento del DIA-IGTv. Si possono quindi esprimere i seguenti intervalli:

$$R_{DC,cab} = 10 \div 13 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DC,cab} = 4 \div 6 \text{ mH}$$

$$R_{DC,linea} = 130 \div 180 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DC,linea} = 2 \div 4 \text{ mH}$$

8.2 Modifica del modello Simulink per RT-LAB

Come per le prove giornaliere, per utilizzare il simulatore real-time è necessario compiere alcune modifiche al modello utilizzato per la determinazione dei parametri del circuito. In figura 8.4 è illustrato il blocco Master, mentre in figura 8.5 vi è il display.

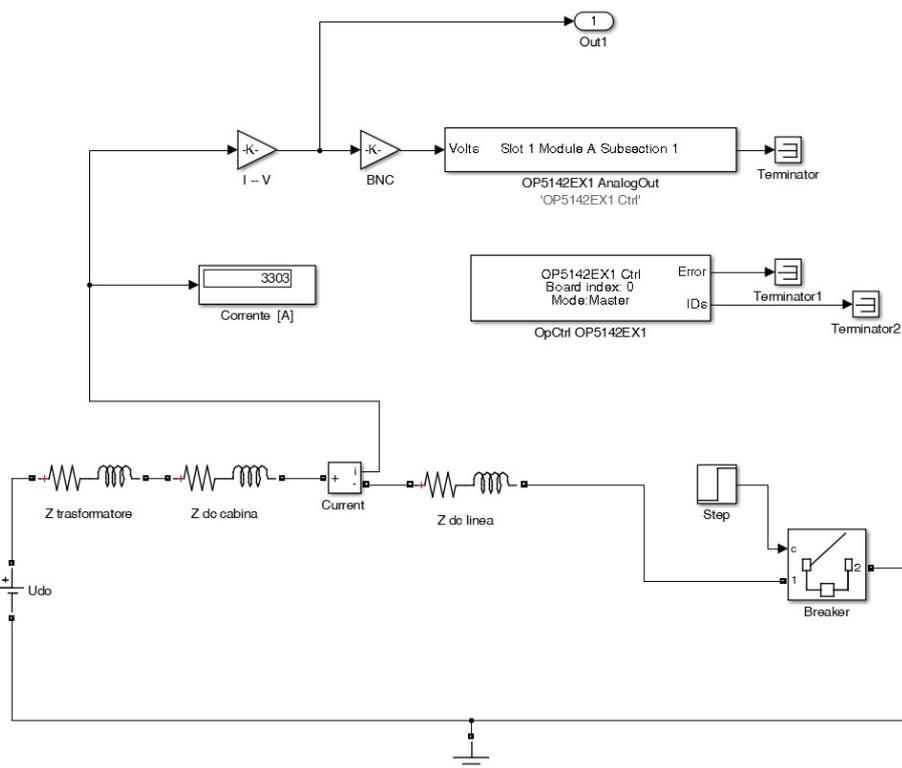


Figura 8.4. Blocco Master - Simulazione di cortocircuito

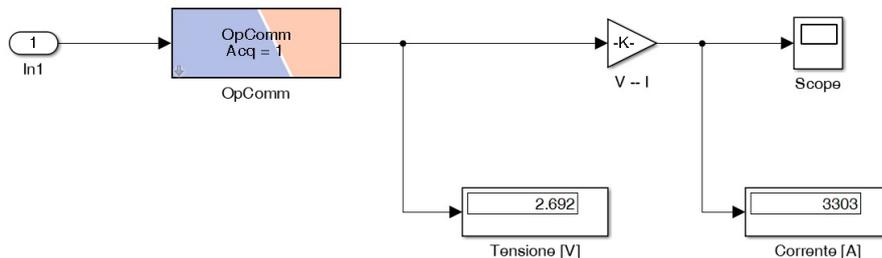


Figura 8.5. Blocco Console - Simulazione di cortocircuito

8.3 Risultato delle simulazioni

In questa sezione sono illustrati i risultati basati sul modello semplificato della rete. In primo luogo il DIA-IGTV è stato testato su di una linea di lunghezza di volta in volta crescente, in modo tale da valutare le differenze di intervento in base all'entità delle forme d'onda ottenute. In seguito si è valutato l'effetto dell'impedenza di linea sul risultato finale. I parametri del circuito equivalente sono elencati in tabella 8.7. Non sono indicate le grandezze relative alla porzione di linea esterna alla SSE perché ne sono stati utilizzati valori differenti a seconda del tipo di prova effettuata.

U_{do}	635 V
R_{AC}	1.277 m Ω
L_{AC}	0.104 mH
$R_{DC,cab}$	10 m Ω
$L_{DC,cab}$	4 mH

Tabella 8.7. Parametri del modello complessivo

8.3.1 Linea di lunghezza elevata

Con questa serie di simulazioni si vuole testare il differente comportamento del DIA-IGT_v nel momento in cui deve valutare un cortocircuito a fondo linea. In caso di linea breve, infatti, i valori di massimi di corrente di picco e gradiente sono tali da provocare l'apertura diretta dell'interruttore extrarapido, rendendo superflua l'azione del relè. Al contrario, oltre una certa lunghezza, la componente resistiva diventa tale da rendere le correnti di guasto difficilmente distinguibili da assorbimenti ordinari, almeno in apparenza. I valori chilometrici di resistenza ed induttanza, tratti dalla letteratura [7], sono:

$$r_{DC,linea} = 140 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$l_{DC,linea} = 2 \text{ mH}/\text{km}$$

Sono state eseguite sei prove di questo tipo, con una lunghezza di linea compresa tra 0.5 km e 3 km. In figura 8.6 sono illustrate le forme d'onda ottenute, in figura 8.7 si vede la correlazione tra lunghezza di linea e valore della corrente di regime, mentre in figura 8.8 tra lunghezza e gradiente massimo. In tabella 8.8 sono elencati i risultati dei test con il tipo di scatto avvenuto.

Linea			Forma d'onda		Scatto			
Lunghezza	R_{DC}	L_{DC}	I_o [A]	dI/dt [A/ms]	I>	dI>	DR>	EXP
0.5 km	80 m Ω	5 mH	7865.0	171.78	x	x	-	-
1.0 km	150 m Ω	6 mH	4306.7	104.29	x	-	x	-
1.5 km	220 m Ω	7 mH	2957.1	91.90	-	-	x	-
2.0 km	290 m Ω	8 mH	2245.4	80.49	-	-	-	x
2.5 km	360 m Ω	9 mH	1816.0	72.88	-	-	-	x
3.0 km	430 m Ω	10 mH	1521.5	61.35	-	-	-	-

Tabella 8.8. Risultati simulazioni per linea lunga

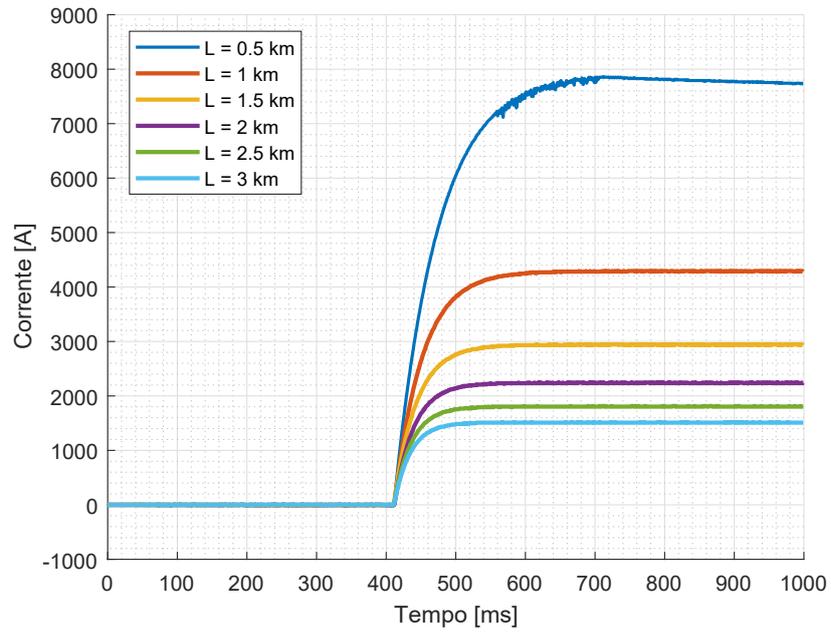


Figura 8.6. Simulazioni cortocircuito per linea lunga

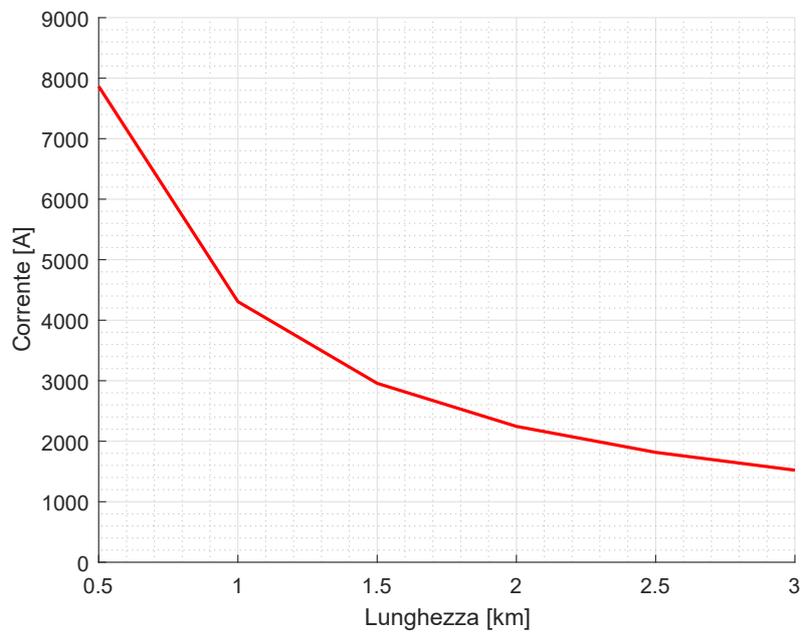


Figura 8.7. Corrente massima in funzione della lunghezza della linea

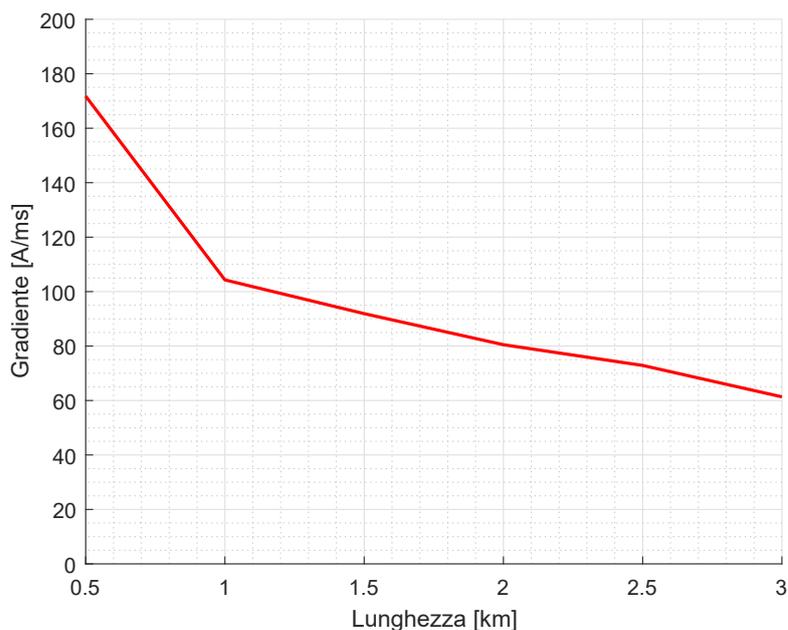


Figura 8.8. Gradiente massimo in funzione della lunghezza della linea

Si possono quindi verificare quattro situazioni differenti:

1. Se la corrente di regime è superiore alla taratura di $I>$, il DIA-IGTv scatta per massima corrente; nel caso di valori molto elevati, si rileva anche lo scatto per gradiente di corrente, che anticipa di qualche istante il comando di apertura. Questa tipologia di guasti non rappresenta un problema perchè implicano l'intervento diretto dell'interruttore.
2. Per correnti inferiori alla taratura di $I>$, il DIA-IGTv scatta per massima differenza di corrente. Questo è il parametro chiave nel riconoscere cortocircuiti a fondo linea, dal momento che la forma d'onda, in seguito al brusco aumento iniziale, tende a stabilizzarsi su di un valore costante.
3. Se la corrente è inferiore alla taratura di $DR>$, non si assiste a questo tipo di intervento. Il DIA-IGTv è comunque in grado di rilevare il cortocircuito, scattando per **EXP**. Se nessuna soglia (corrente, gradiente, differenza di corrente) viene superata, il ciclo di misura viene prolungato per un numero di campioni pari a iEn ; in seguito campiona per un ulteriore intervallo di tempo pari a tEx . Il dispositivo interviene perchè la nuova differenza di corrente, calcolata con il valore finale di corrente, è maggiore della metà della taratura di $DR>$, come spiegato in dettaglio dal flow-chart del DIA-IGTv illustrato in figura 8.9.
4. In presenza di correnti troppo basse il DIA-IGTv non è in grado di intervenire. La situazione è simile al caso precedente, ma in questo caso la differenza finale di corrente è inferiore alla metà della taratura di $DR>$ e il ciclo di controllo si resetta. Questa situazione si è ottenuta una linea di lunghezza particolarmente elevata, difficilmente riscontrabile nella realtà.

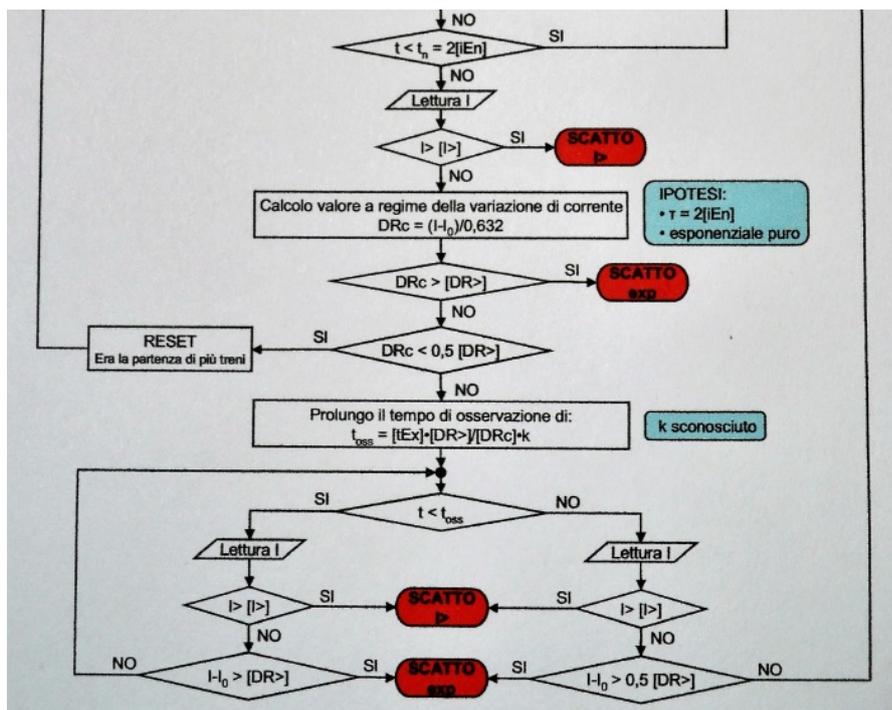


Figura 8.9. Flow-chart del DIA-IGTv - Ciclo di controllo per scatto EXP

In sintesi, l'individuazione dei guasti a fondo linea si basa sostanzialmente sull'entità della corrente durante il transitorio, che dipende dalla componente resistiva del circuito. È quindi possibile stabilire una correlazione tra il punto in cui avviene il cortocircuito e il tipo di scatto del DIA-IGTv, illustrata in tabella 8.9.

Tipo di scatto	Corrente	Lunghezza	R_{DC}
I>	> 4000 A	< 1 km	< 140 mΩ
DR>	2400 ÷ 4000 A	1 ÷ 2 km	150 ÷ 280 mΩ
EXP	1600 ÷ 2400 A	2 ÷ 3 km	290 ÷ 420 mΩ
-	< 1600 A	> 3 km	> 430 mΩ

Tabella 8.9. Tipi di scatto del DIA-IGTv in funzione dei parametri di linea

8.3.2 Linea con bassa induttanza

Con questa prova si è voluto verificare il comportamento del DIA-IGTv in presenza di un cortocircuito in un circuito con bassa induttanza totale. La forma d'onda risultante è quindi provvista di un gradiente abbastanza elevato da causare lo scatto del DIA-IGTv. L'obiettivo di questa prova consiste nel verificare che l'intervento per **di>** anticipi il normale scatto per **DR>** o **I>**, a seconda del valore di corrente raggiunto. Tutto ciò rappresenta un fattore di sicurezza aggiuntivo in presenza di segnali con pendenze eccessive. Per ottenere questo risultato, illustrato in figura 8.10, è stato confrontato il comportamento del relè con due circuiti che hanno gli stessi parametri resistivi, mentre i valori induttivi sono diversi; entrambi sono elencati in tabella 8.10.

Parametro	Prova 1	Prova 2
$R_{DC,cab}$	10 m Ω	10 m Ω
$L_{DC,cab}$	4 mH	2 mH
$R_{DC,linea}$	180 m Ω	180 m Ω
$L_{DC,linea}$	4.2 mH	2 mH

Tabella 8.10. Parametri dei circuiti

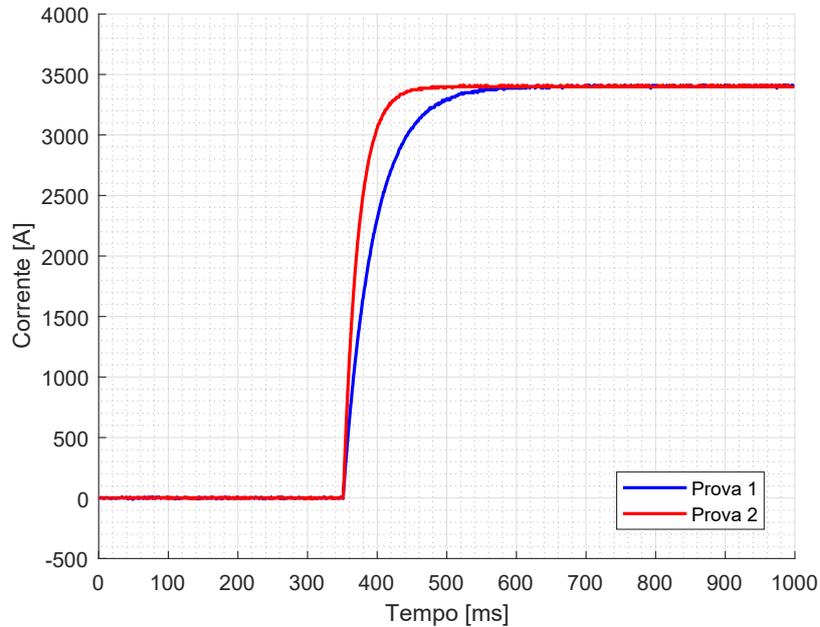


Figura 8.10. Confronto tra cortocircuiti con diversa impedenza

Il valore di regime della corrente (quasi 3400 A) implica lo scatto del DIA-IGT_v per $\mathbf{DR}>$, ma, in presenza della seconda simulazione, nella quasi totalità dei casi, si è verificato lo scatto anticipato per $\mathbf{dI}>$. Si è quindi confermato questo tipo di comportamento del dispositivo.

8.4 Conclusioni

Questa serie di prove hanno confermato la validità delle tarature del DIA-IGTV nell'individuazione di cortocircuiti in linee di lunghezza elevata. Il parametro chiave è rappresentato dalla massima differenza di corrente, ma si è verificato che anche lo scatto per **EXP** svolge un ruolo importante. Un ulteriore vantaggio di cui si ha avuto conferma consiste nell'intervento anticipato per massimo gradiente di corrente, in presenza di pendenze molto accentuate.

Alla luce del problema sulle misure causato dal trasduttore di tensione, si è visto come il minimo gradiente per un guasto a fondo linea sia maggiore di quello inizialmente calcolato. Su questo valore si era basata la taratura di **A/msD**, condizione per cui il DIA-IGTV avvia il ciclo di misura. Si potrebbe suggerire di alzare questa taratura almeno a 50 A/ms, dal momento che gradienti minori sono difficilmente associati a possibili situazioni di guasto, anche se un supplemento di indagine da parte del dispositivo non può che rappresentare un vantaggio.

Capitolo 9

Conclusioni

9.1 Prove in laboratorio

9.1.1 Verifica delle tarature

L'obiettivo di questa tesi consiste nel perfezionamento e nella validazione sperimentale della tarature proposte per il DIA-IGTv, un dispositivo di protezione della rete tranviaria torinese. La sperimentazione si è svolta, in un primo tempo, in laboratorio, tramite l'impiego di numerose registrazioni reali raccolte in precedenza. L'intero set di prove, relative sia al funzionamento ordinario (passaggio del divisore di zona e assorbimento giornaliero) che a situazioni di guasto (cortocircuiti a fondo linea, reali e simulati), ha confermato in generale la validità delle tarature proposte per il DIA-IGTv. Solo in pochi casi si sono rese necessarie delle leggere modifiche, per ottimizzare la capacità di intervento del dispositivo. Di seguito viene trattato separatamente ogni parametro, con la spiegazione della modifica o della conferma del relativo valore.

1. I_n : è la corrente nominale dell'interruttore extrarapido associato. Nel corso delle prove in laboratorio è stata impostata pari a 4000 A, ma in realtà è una grandezza specifica della porzione di rete che si intende proteggere, in quanto dipende dal carico massimo sopportabile dai conduttori e dal valore teorico della corrente di ctocto minima della zona considerata.
2. $I>$: è la soglia di sovracorrente, fissata a $0.9 \cdot I_n$ per proteggere i conduttori dal sovraccarico. Questa taratura non è stata modificata.
3. A/msD : è la soglia di riconoscimento della discontinuità, che permette al relè di avviare il ciclo di controllo. Il valore proposto era stato calcolato sulla base del peggior cortocircuito a fondo linea, un tipo di evento che presenta valori tutt'altro elevati sia di corrente massima che di gradiente, rendendone difficoltosa l'individuazione. La proposta si basava sulle registrazioni delle prove di cortocircuito in linea, le quali però sono errate in quanto raccolte tramite il disaccoppiatore ottico studiato nel capitolo 7. In particolare, la pendenza reale delle curve è nettamente maggiore, in quanto l'effetto di fil-traggio è tanto più intenso in presenza di tempi di campionamento minimi (dai 2 ai 10 μs). Dalle simulazioni svolte nel capitolo 8 si nota che, anche

per una linea alquanto estesa, il gradiente minimo risulta essere intorno ai 60 A/ms. Si potrebbe pensare di alzare la taratura di A/msD da 30 a 50 A/ms, anche se il mantenimento del valore minore non rappresenta in alcun modo uno svantaggio ai fini della protezione della rete.

4. **A/ms>**: è la soglia di massimo gradiente, che comporta lo scatto del DIA-IGTv per **dI>**. La taratura di questo parametro deve rispondere a due esigenze contrapposte. I massimi valori di gradiente di corrente nel funzionamento ordinario si sono riscontrati per i passaggi di divisore delle motrici 5000, quindi un valore maggiore riduce la possibilità di scatti intempestivi. Al contrario, una taratura minore anticipa i tempi di intervento in caso di eventi contraddistinti da correnti molto elevate. I valori proposti tengono inoltre in conto il fatto che il gradiente misurato dal relè è minore di quello reale, per via del tempo di campionamento maggiore. All'inizio delle prove si è deciso di partire dall'estremo inferiore proposto, pari a 100 A/ms. Con questa taratura si sono verificati tre scatti per massimo gradiente, tutti con registrazioni relative alle motrici 5000. È importante sottolineare che tali pendenze si sono verificate con transiti della vettura a piena accelerazione, circostanza che, per quanto inconsueta, non deve comunque provocare l'intervento del dispositivo. Portando la taratura a 120 A/ms non si è verificato alcuno scatto, quindi si propone questo valore.
5. **A/msE**: è la soglia di riconoscimento dell'avviamento di una vettura; se il gradiente scende al di sotto di questo valore, il ciclo di controllo viene resettato. Non si sono verificati problemi con questo parametro, quindi la taratura è proposta è stata mantenuta.
6. **DR>**: è la soglia di controllo della differenza di corrente. È il parametro fondamentale nel riconoscimento di cortocircuiti a fondo linea, contraddistinti da gradienti poco elevati. La taratura proposta si basa sul massimo valore di corrente registrato in condizioni ordinarie, corrispondente ai peggiori passaggi di divisore per la motrice 6000. Come nel caso precedente, valori di tale entità sono raramente riscontrabili nel funzionamento normale, ma non devono comunque essere scambiati per delle situazioni di guasto. Per quanto riguarda l'individuazione di cortocircuiti con correnti non eccessivamente elevate, la taratura risulta essere efficace, con il dispositivo che è scattato in presenza di tutte le prove sottoposte. Il parametro inizialmente suggerito è pari a $0.625 \cdot I_n$, ma il passo minimo impostabile sul DIA-IGTv è di 0.1; la taratura viene quindi fissata a $0.6 \cdot I_n$.
7. **iEn**: è il numero di campionamenti per cui il ciclo di misura viene esteso. Il valore proposto corrisponde al tempo in cui il cortocircuito con costante di tempo maggiore ha concluso il proprio transitorio. Questo parametro risulta importante in caso di cortocircuito a fondo linea, quando la corrente di regime è minore della taratura di **DR>**. Anche se non si sono verificati gli altri tipi di scatti, il mancato reset dell'algoritmo di controllo provoca lo scatto del DIA-IGTv per **EXP**. Anche questa taratura si è dimostrata corretta.

8. **tEx**: è il tempo per cui il ciclo di controllo viene prolungato, in caso di mancato reset o in assenza dello scatto per corrente o differenza di corrente. Non si è reso necessario variare la taratura proposta.

In sintesi, le tarature ottimizzate sono elencate in tabella 9.1.

Parametro	Taratura
In [A]	4000
I> [A]	$0.9 \cdot I_n$
A/msD [A/ms]	$30 \div 50$
A/ms> [A/ms]	120
A/msE [A/ms]	10
DR> [A]	$0.6 \cdot I_n$
iEn	18
tEx [s]	1

Tabella 9.1. Tarature definitive

9.1.2 Test sul trasduttore di tensione

Nel corso delle prove in cabina si è scoperto che il trasduttore di tensione contenuto all'interno di uno strumento di misura introduce un errore non trascurabile, equiparabile all'effetto di un filtro passa basso. Avendo a che fare con segnali discreti, il comportamento del componente dipende dal campionamento utilizzato a seconda della misura. Per poter disporre di dati affidabili, è dunque necessario fare affidamento solo sulle registrazioni del relè.

Il problema principale è rappresentato dal fatto che questo trasduttore è stato utilizzato in occasione di numerose prove eseguite negli anni precedenti, nel corso delle quali sono state raccolte le stesse forme d'onda utilizzate per la ricerca e la verifica delle tarature del DIA-IGTv. In particolare, questo errore riguarda principalmente due serie di misurazioni:

- **Prove di cortocircuito**: l'effetto del filtro consiste in una riduzione dei gradienti, in quanto il trasduttore non riesce ad inseguire l'andamento del segnale in input. Non si rilevano invece particolari differenze sui valori massimi, se il transitorio è giunto a regime. Trattandosi di guasti a fondo linea, le pendenze sono assai basse; l'individuazione di questi eventi si basa sulla differenza di corrente. In questo caso si può quindi affermare che la presenza di questo errore non comporta problemi sulle tarature proposte e verificate.
- **Prove di assorbimento giornaliero**: anche questa serie di registrazioni è afflitta da questo problema. Relativamente ad ogni singolo file, l'intera forma d'onda sembra non corrispondere alla realtà, in quanto l'andamento è assai più irregolare. Il DIA-IGTv è comunque correttamente intervenuto in presenza dell'unico evento eclatante, corrispondente ad una registrazione con gradienti molto elevati.

Tramite una serie di test è stato modellizzato un filtro passa-basso equivalente del primo ordine, individuandone la frequenza di taglio. Il tentativo di risalire alle forme d'onda originali si è rilevato impossibile, dal momento che una tale operazione amplifica di molto i disturbi presenti sui segnali. Per quanto riguarda le registrazioni di cortocircuito, è stato compiuto un confronto tra le curve reali e una serie di esponenziali filtrate. Questo procedimento, per quanto approssimato, ha permesso di individuare con maggiore precisione i parametri di linea del circuito equivalente della rete. È stato quindi possibile simulare una casistica più varia di cortocircuiti, ottenendo così forme d'onda non soggette all'errore di misura.

9.2 Prove in cabina

Una volta concluse positivamente tutte le prove in laboratorio, basate sulle registrazioni reali, le tarature sono state applicate ad un DIA-IGTv installato nella SSE Duca d'Aosta, inizialmente sulla zona Sabotino ed, in seguito, Re Umberto. L'obiettivo consiste nel valutare numero ed entità degli eventuali scatti rilevati dal dispositivo. Il periodo di osservazione è iniziato il 19 dicembre 2017 e si è protratto per diversi mesi. Fin dalla prima misura è stato individuato l'errore di misura introdotto dal disaccoppiatore ottico, in questa occasione utilizzato per connettere il registratore dati di proprietà Infra.To. Per questo motivo, per risalire alle reali forme d'onda si deve fare affidamento esclusivamente sulle registrazioni del DIA-IGTv, anche se meno precise e dettagliate per via del tempo di campionamento maggiore.

Il periodo di prova complessivo può quindi essere diviso in due parti, ognuna relativa ad una diversa zona della rete.

- **Zona Sabotino:** il periodo di osservazione è compreso tra il 19 dicembre 2017 e il 5 febbraio 2018. In questo intervallo sono stati rilevati cinque scatti, i cui dettagli sono elencati in tabella 9.2. Il tipo di intervento è stato sempre per gradiente di corrente, che ogni volta ha superato il valore della taratura pari a 120 A/ms. Maggiori informazioni relative alle possibili cause dei singoli scatti sono state fornite nel capitolo 7.

Data	Imax [A]	Gradmax [A/ms]	Scatto
23/12/2017	2080	164	dI>
19/01/2018	2221	348	dI>
20/01/2018	2119	261	dI>
21/01/2018	2176	233	dI>
03/02/2018	2055	180	dI>

Tabella 9.2. Scatti reali registrati - Zona Sabotino

- **Zona Re Umberto:** visto l'esiguo numero di scatti relativi alla zona Sabotino, si è deciso di applicare il DIA-IGTv in prova sul conduttore relativo ad un settore della rete più trafficato. Il carico medio in zona Sabotino risultava essere inferiore in quanto, nei giorni di osservazione, la linea 10 era servita tramite autobus. Il periodo di osservazione è compreso tra il 5 febbraio e l'8

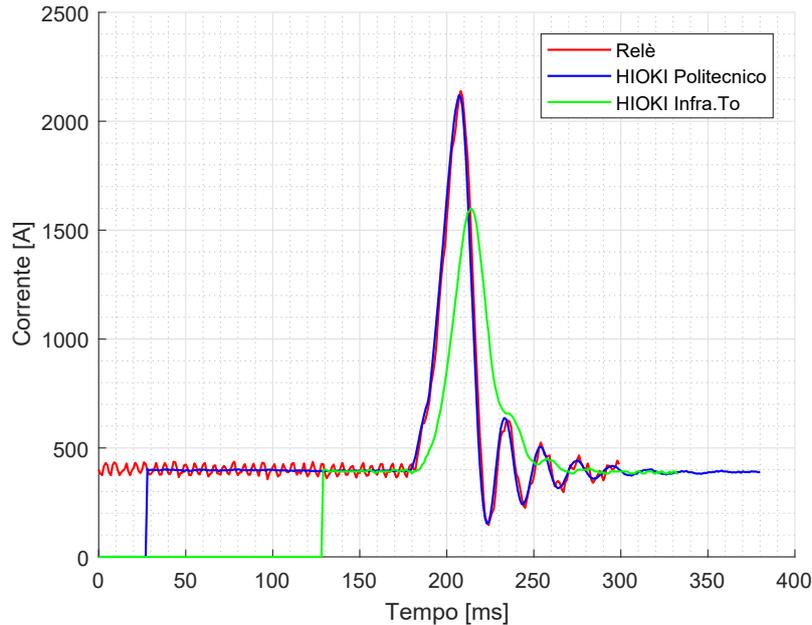


Figura 9.1. Scatto DIA-IGTv Re Umberto - 02-03-2018

marzo 2018. Il 2 marzo il DIA-IGTv è scattato, probabilmente a causa di un cortocircuito avvenuto a bordo di una motrice 2800, la quale, durante il suo percorso, ha provocato l'intervento di diversi dispositivi, relativi a zone differenti. In figura 9.1 sono illustrate le registrazioni dei tre strumenti, tra le quali è evidente l'errore del registratore di Infra.To. Anche in questo caso l'intervento è stato per gradiente di corrente.

9.3 Riepilogo finale e sviluppi futuri

Le prove in laboratorio e il successivo periodo di osservazione sul campo hanno confermato la validità delle tarature proposte per il DIA-IGTv, al netto di leggeri aggiustamenti. Rimane la questione legata all'errore di misura che affligge una parte delle registrazioni, ma in generale questo problema non ha causato particolari complicazioni ai fini della sperimentazione.

I risultati della sperimentazione in cabina sono confortanti, dal momento che, in quasi tre mesi, si sono verificati solo sei scatti del relè, tutti connessi a situazioni anomale, non riconducibili al funzionamento ordinario. È importante sottolineare il fatto che il DIA-IGTv in prova non comanda l'interruttore extrarapido, limitandosi a registrare gli eventi rilevati. Dal momento che non si sono verificate interruzioni del servizio in queste occasioni, si presume che il problema transitorio sia stato risolto dalle altre protezioni, in primis gli interruttori a bordo delle vetture. Tutto ciò è stato possibile perché non si ha avuto a che fare con guasti di natura permanente. Si potrebbe suggerire di ritardare l'intervento del DIA-IGTv in occasione di un eventuale scatto, per permettere alle altre protezioni di risolvere direttamente il problema senza dover interrompere l'alimentazione dell'intera zona.

In ogni caso, si potrebbero applicare queste tarature ad un numero superiore di DIA-IGTv, per verificarne il corretto funzionamento su larga scala.

Un possibile sviluppo potrebbe essere rappresentato dalla completamento delle simulazioni di cortocircuito, per testare il comportamento del relè in situazioni più complicate. Tutte le prove effettuate consistono in guasti a partire da un assorbimento nullo, la condizione migliore ai fini dell'individuazione di questi eventi. Si potrebbe avere un migliore riscontro sulla capacità di intervento del DIA-IGTv simulando un cortocircuito durante l'assorbimento ordinario della linea, sempre tramite il simulatore real-time.

Elenco delle figure

1.1	Divisore di zona	4
1.2	Motrice serie 2800	5
1.3	Motrice serie 5000	6
1.4	Motrice serie 6000	6
1.5	Relè DIA-IGTv	7
1.6	Catena d misura DIA-IGTv	8
1.7	Flow-chart DIA-G	9
1.8	Schermata MScom2	11
2.1	HIOKI MR8880-20	14
2.2	Schermata Wave Viewer	15
2.3	Generatore di funzioni Agilent 33220A	17
2.4	Componenti catena di misura DIA-IGTv	18
2.5	Connessioni DIA-IGTv	19
2.6	Schema banco di misura con generatore di funzioni	19
2.7	Banco di prova DIA-IGTv	19
2.8	Confronto input-output Agilent senza scalatura	20
2.9	Confronto input-output Agilent con scalatura	22
2.10	Registrazione originale	22
2.11	Forma d'onda di uscita	23
2.12	Schermata Waveform Editor	24
2.13	Confronto conclusivo	26
2.14	Simulatore Real-Time OP5600	26
2.15	Blocco Simulink OpComm	28
2.16	Blocco Simulink OpCtrl	28
2.17	Blocco Simulink OpAnalogOut	28
2.18	Schema banco di misura con simulatore real-time	29
2.19	Confronto output simulatore real-time	29
2.20	Effetto del cavo BNC di 5 m	30
3.1	Esempio di passaggio sotto al divisore di zona	32
3.2	Esempio motrice 2800	34
3.3	Esempio motrice 5000 - RESET dell'azionamento	36
3.4	Esempio motrice 5000 - NON RESET dell'azionamento	36
3.5	File DIV50033	40
3.6	Misure DIA-IGTv	40
3.7	Esempio motrice 6000	42

4.1	Esempio di registrazione giornaliera	46
4.2	Modello Simulink - Master	47
4.3	Modello Simulink - Console	47
4.4	Scope - Console	47
4.5	Registrazione GIORN_64	49
4.6	Particolare file GIORN_64	49
4.7	Schermata MSCom2 - Scatto DIA-IGTv	50
4.8	Confronto tra registrazione originale e lettura DIA-IGTv	50
5.1	Scatto 27 - 27-01-2015	58
5.2	Scatto 21 - 11-11-2014	58
5.3	Scatto 37 - 28-02-2015	59
5.4	Scatto 16 - 29-10-2014	60
5.5	Sovratensione scatto 15 - 31-08-2014	61
5.6	Scatto 26 - 18-01-2015	62
5.7	Scatto 33 - 16-02-2015	63
5.8	Scatto 6 - Oscillazioni periodiche	65
5.9	Scatto 3 - 25-03-2014	66
6.1	Cortocircuito con resistenza	68
6.2	Cortocircuito con resistenza con riscaldamento della stessa	68
6.3	Cortocircuito senza resistenza	69
6.4	Confronto tra configurazioni di resistenze - SSE Caio Mario	70
6.5	Confronto tra tipi di cortocircuito - Piazza Campanella	71
6.6	Confronto tra tipi di cortocircuito - Via Nicola Fabrizi	73
6.7	File SP_Prova00 - San Paolo	74
7.1	Catena di misura DIA-IGTv	75
7.2	Registratore HIOKI Infra.To	76
7.3	Tarature DIA-IGTv in cabina Sabotino	76
7.4	Strumentazione installata in cabina Sabotino - 19-12-2017	77
7.5	Scatto DIA-IGTv 23-12-2017	78
7.6	Prima prova di scatto 9-1-2018	78
7.7	Scatto DIA-IGTv 19-01-2018	80
7.8	Scatto DIA-IGTv 20-01-2018	80
7.9	Scatto DIA-IGTv 21-01-2018	81
7.10	Strumentazione installata in cabina Sabotino - 19-12-2017	82
7.11	Seconda prova di scatto 23-1-2018	82
7.12	Particolare della seconda prova di scatto 23-1-2018	83
7.13	Scatto DIA-IGTv 03-02-2018	83
7.14	Trasduttore di tensione CV-D	84
7.15	Risultati prova onda quadra duty-cycle 0.5	85
7.16	Risultati prova onda quadra duty-cycle 0.2	86
7.17	Risultati prova passaggio sotto divisore	87
7.18	Esponenziali per test trasduttore	89
7.19	Confronto input-output trasduttore con $\tau^{-1} = 30s^{-1}$	90
7.20	Confronto tra output, $\tau^{-1} = 30s^{-1}$	91

7.21	Confronto tra output, $\tau^{-1} = 120s^{-1}$	92
7.22	Tentativo di filtratura inversa del segnale dello HIOKI Infra.To	93
7.23	Scatto DIA-IGTv 23-12-2017 - Forme d'onda filtrate	93
7.24	Scatto DIA-IGTv 19-01-2018 - Forme d'onda filtrate	94
7.25	Scatto DIA-IGTv 20-01-2018 - Forme d'onda filtrate	94
7.26	Scatto DIA-IGTv 21-01-2018 - Forme d'onda filtrate	95
7.27	Scatto DIA-IGTv 03-02-2018 - Forme d'onda filtrate	95
8.1	Modello Simulink per simulazioni di cortocircuito a fondo linea	98
8.2	Modello Simulink per simulazioni di cortocircuito - Caio Mario	99
8.3	Interpolazione curva esponenziale	101
8.4	Blocco Master - Simulazione di cortocircuito	104
8.5	Blocco Console - Simulazione di cortocircuito	104
8.6	Simulazioni cortocircuito per linea lunga	106
8.7	Corrente massima in funzione della lunghezza della linea	106
8.8	Gradiente massimo in funzione della lunghezza della linea	107
8.9	Flow-chart del DIA-IGTv - Ciclo di controllo per scatto EXP	108
8.10	Confronto tra cortocircuiti con diversa impedenza	109
9.1	Scatto DIA-IGTv Re Umberto - 02-03-2018	115

Elenco delle tabelle

1.1	Confronto tra tarature	12
2.1	Caratteristiche tecniche HIOKI MR8880-20	13
2.2	Caratteristiche tecniche Agilent 33220A	17
2.3	Offset Agilent 33220A	21
2.4	Caratteristiche tecniche OPAL-RT OP5600	27
3.1	Parametri registrazioni originali	32
3.2	Parametri file di prova motrice 2800	33
3.3	Elenco prove motrice 2800	34
3.4	Riassunto prove motrice 2800	35
3.5	Parametri file di prova motrice 5000	35
3.6	Elenco prove motrice 5000 - NO RESET	37
3.7	Elenco prove motrice 5000 - RESET	38
3.8	Riassunto prove motrice 5000 - NO RESET	39
3.9	Riassunto prove motrice 5000 - RESET	39
3.10	Confronto misure reali - DIA-IGT _v	39
3.11	Parametri file di prova motrice 6000	41
3.12	Elenco prove motrice 6000	42
3.13	Risultati prove motrice 6000	43
4.1	Parametri file originali assorbimento giornaliero	45
4.2	Elenco file di prova giornalieri	48
4.3	Confronto misure reali - DIA-IGT _v	50
5.1	Elenco generale scatti storici	55
5.2	Elenco scatti per dI>	57
5.3	Riepilogo scatti per dI>	57
5.4	Elenco scatti per I>	60
5.5	Riepilogo generale scatti analizzati	64
5.6	Elenco scatti dubbi	64
6.1	Parametri registrazioni di cortocircuito	69
6.2	Parametri file di prove cortocircuito	69
6.3	Elenco prove cortocircuito Caio Mario	70
6.4	Elenco prove cortocircuito Piazza Campanella	71
6.5	Elenco prove cortocircuito Via Nicola Fabrizi	72
6.6	Elenco prove cortocircuito San Paolo	73

7.1	Caratteristiche tecniche pinza amperometrica HIOKI 3285	81
7.2	Caratteristiche tecniche trasduttore CV-D	84
7.3	Parametri onda quadra duty-cycle 0.5	85
7.4	Parametri onda quadra duty-cycle 0.2	86
7.5	Parametri passaggio sotto divisore	87
7.6	Parametri esponenziali test per trasduttore	89
8.1	Parametri del modello noti	99
8.2	Parametri di cabina - SSE Caio Mario	100
8.3	Parametri di linea Piazza campanella - Alimentazione da San Paolo	101
8.4	Parametri di linea Piazza Campanella - Alimentazione da Martinetto	101
8.5	Parametri di linea Via Nicola Fabrizi - Alimentazione da San Paolo	102
8.6	Parametri di linea Via Nicola Fabrizi - Alimentazione da Martinetto	102
8.7	Parametri del modello complessivo	105
8.8	Risultati simulazioni per linea lunga	105
8.9	Tipi di scatto del DIA-IGTv in funzione dei parametri di linea . . .	108
8.10	Parametri dei circuiti	109
9.1	Tarature definitive	113
9.2	Scatti reali registrati - Zona Sabotino	114

Bibliografia

- [1] E. Pons, *La sicurezza elettrica delle persone nei sistemi di alimentazione tranviaria torinese* Torino, Politecnico di Torino, Dottorato di Ricerca, 2008.
- [2] F. Scolamiero, *Ottimizzazione dei sistemi di protezione della rete tranviaria torinese* Torino, Politecnico di Torino, Tesi di Laurea Magistrale, 2016.
- [3] L. Bramardi, *Studio sperimentale delle correnti ordinarie e di guasto nella rete tranviaria torinese per l'ottimizzazione delle protezioni* Torino, Politecnico di Torino, Tesi di Laurea Magistrale, 2017.
- [4] M. Ulysse Leonorman, *Real-time modeling of power grids with hardware-in-the-loop implementation* Torino, Politecnico di Torino, Tesi di Laurea Magistrale, 2017.
- [5] M. Reis, *Optimization of DC Feeder Rate of Rise Overcurrent Protection Settings Using Delta I Cumulative Distribution* Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2004 IEEE
- [6] C.L. Pires, S.I. Nabeta, J.R. Cardoso, *Second-order model for remote and close-up short-circuit faults currents on DC traction supply* IET Power Electronics, 2008, Vol. 1, No. 3, pp. 348-355.
- [7] A. Mariscotti, P. Pozzobon, "Synthesis of line impedance expressions for railway traction systems" IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, Vol. 52, No. 2, pp. 420-430.
- [8] EMC Traction, *Manuale operativo: Sistema di protezione diagnostica DIA-IGTv*.
- [9] HIOKI Corporation, *MR8880-20 Memory Hicorder - Instruction Manual*.
- [10] MR8880-20 Memory Hicorder Datasheet, www.hioki.com, 2018.
- [11] Agilent Technologies, *Agilent 33220A 20 MHz Waveform Generator - User's guide*.
- [12] Agilent Technologies, *Agilent 81150A IntuiLink Waveform Editor*.
- [13] Agilent 33220A 20 MHz Waveform Generator Datasheet, www.keysight.com, 2018.
- [14] OPAL-RT Technologies, *OP5600 V2 User Manual - Real-Time Simulator*.