

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio sperimentale delle correnti
ordinarie e di guasto nella rete
tranviaria torinese per
l'ottimizzazione delle protezioni**



Relatori

prof. Enrico Pons

prof. Pietro Colella

prof. Riccardo Tommasini

ing. Roberto Rizzoli

Candidato

Leonardo Bramardi

Luglio 2017

Ringraziamenti

Grazie al professore Enrico Pons e ai suoi collaboratori: i professori Pietro Colella e Riccardo Tommasini per avermi aiutato con grandissima professionalità ed esperienza. Un ringraziamento anche all'ingegnere Roberto Rizzoli e all'InfraTO e GTT che sono sempre stati molto disponibili. Infine voglio ringraziare Annaclara che mi è sempre stata vicina durante questi anni vissuti all'università e la mia famiglia che mi ha sostenuto, non solo economicamente, permettendomi di studiare ad alto livello.

Indice

1	Introduzione	1
2	Funzionamento del relè DIA-IGTv	5
2.1	Simulatore del relè	5
2.2	Conclusioni	21
3	Analisi dei dati in nostro possesso	23
3.1	FASE 1:scelta della migliore interpolazione dei dati	26
3.2	FASE 2: analisi dei dati e costruzione delle cumulate	32
3.3	Analisi della zona Duca	56
3.4	Analisi della tratta Sassi-Superga	56
3.5	Conclusioni	62
4	Prove sperimentali in laboratorio sul relè	63
4.1	Montaggio del banco di prova	65
4.2	Scelta della resistenza di shunt	69
4.3	Misura della resistenza interna del relè	73
4.4	Misura delle tensioni in ingresso allo shunt e del relè	75
4.5	Confronto delle correnti misurate dal relè e sullo shunt	82
4.5.1	Caratterizzazione dell'errore introdotto dalla catena di misura	82
4.5.2	Confronto tra il segnale reale e quello misurato dal relè	103

4.6	Conclusioni	114
5	Analisi del passaggio sotto al divisore di zona	117
5.1	Misure a bordo della motrice 5000	118
5.1.1	Analisi delle misure della motrice 5000	120
5.1.2	Cumulate della motrice 5000	126
5.1.3	Confronto tra la motrice 5000 e la motrice 6000	133
5.2	Misure a bordo della motrice 2800	140
5.2.1	Analisi delle misure della motrice 2800	142
5.2.2	Cumulate della motrice 2800	142
5.2.3	Confronto tra le tre motrici	148
5.3	Conclusioni	154
6	Analisi delle misure giornaliere	157
6.1	Descrizione delle misure	157
6.2	Analisi delle misure	159
6.3	Analisi delle pendenze	169
6.4	Altri fenomeni osservati nelle misure	170
6.5	Conclusioni	175
7	Analisi del transitorio del corto circuito	177
7.1	Analisi delle misure	179
7.2	Simulazione del transitorio di corto circuito	187
7.3	Conclusioni	207
8	Conclusioni	209
8.1	Taratura del relè	209
8.2	Sviluppi futuri	224
	Bibliografia	225

Elenco delle tabelle	227
Elenco delle figure	231

Capitolo 1

Introduzione

La tesi, svolta in collaborazione con InfraTO e GTT, si pone come obiettivo l'ottimizzazione dei sistemi di protezione della rete tranviaria di Torino. Studi svolti in precedenza, hanno evidenziato i seguenti problemi:

- 1 Mancata richiusura del dispositivo prova linea (DPL).
- 2 Aperture non corrette del relè DIA-IGTv che causano l'assenza di alimentazione e di conseguenza l'interruzione del servizio.

Lo studio presentato, si concentrerà su un componente del sistema di protezione ossia il relè DIA-IGTv. Questo dispositivo, installato nelle SSE di alimentazione, ad oggi stà funzionando in "bianco" ossia rileva i guasti ma non è in grado di comandare l'apertura dell'interruttore. Le tarature odierne, che si basano sui concetti descritti sul manuale del dispositivo [8], non consentono di distinguere una condizione di guasto da una di normale funzionamento e causano degli scatti intempestivi del dispositivo di protezione specie quando una motrice transita da una zona all'altra della rete di alimentazione.

Al fine di ottenere delle tarature corrette, dopo una prima fase di studio accurato del funzionamento del relè, sono state svolte delle prove sperimentali di laboratorio

in cui si è approfondito il suo comportamento e dei componenti della sua catena di misura. Il dispositivo, in cabina, è infatti preceduto da un trasmettitore e un ricevitore che influenzano la misura del segnale. Questa analisi ha permesso di capire al meglio come il vengano misurate non solo delle forme d'onda "standard" fornite dal generatore di funzioni ma anche delle forme d'onda misurate nella realtà.

Successivamente sono state analizzate delle prove svolte negli anni passati. I dati a nostra disposizione sono stati divisi in: misure degli spunti delle motrici, misure di corto circuito e di scatti del relè. Queste hanno permesso da una parte di distinguere il comportamento della rete nelle due condizioni e dall'altra di approfondire meglio i valori assunti dai parametri caratteristici per la taratura del DIA-IGTv.

Tra i dati analizzati, sono presenti delle misure riguardanti una condizione critica del normale funzionamento ossia il passaggio sotto al divisore di zona. La rete tranviaria torinese è divisa in più zone di alimentazione che vengono collegate proprio attraverso questo componente. Le motrici quando transitano sotto di esso, causano degli assorbimenti critici che confondono il relè. Le prove in nostro possesso riguardano una vettura di tipo 6000 ossia quella di ultima generazione e si sono svolte in SSE. Nella rete tranviaria circolano altri due tipi di motrici, la 5000 di fabbricazione più recente e dotata di convertitori e la 2800 che invece è la più anziana. Per approfondire meglio il comportamento di queste vetture quando avviene un passaggio sotto al divisore di zona, sono state organizzate delle misure che si sono svolte a bordo motrice. Queste hanno permesso di capire quale sia la vettura che causa maggiori problemi e di approfondire i valori assunti dai parametri misurati dal relè, durante il passaggio del pantografo sotto al divisore .

Un secondo tipo di dati che si sono analizzati, riguarda misure che hanno una durata giornaliera. Le rilevazioni più vecchie erano state svolte con un tempo di

campionamento troppo lungo che non consentiva di rilevare dei fenomeni critici del funzionamento. Per questo motivo sono state organizzate delle prove presso la SSE duca d'Aosta in cui questi tempi sono stati diminuiti.

Parallelamente è stato studiato il comportamento della condizione di guasto della rete. Per prima cosa si è dovuto capire quale fosse il suo modello. Esso è costituito da un bipolo di Thevenin dove l'impedenza serie è composta da resistenza e induttanza di trasformatore, linea e carico. Per ricavare il valore dell'impedenza del trasformatore si sono utilizzati i suoi dati di targa. La macchina adottata dalla GTT è a doppio avvolgimento trifase in quanto va ad alimentare un convertitore dodecafase; si è affrontato il problema del circuito equivalente del trasformatore esafase. Attraverso una misurazione è stato possibile ricavare i valori dell'impedenza di carico mentre i valori dell'impedenza di linea sono stati ricavati dalla letteratura scientifica [4]. A questo punto, si è realizzata una simulazione per capire come il valore della corrente a regime e della pendenza iniziale, variano in funzione del punto di guasto.

Lo studio ha permesso non solo di ottenere un metodo di taratura alternativo basato sui fenomeni caratteristici della rete torinese, rispetto a quello proposto sul manuale [8], ma anche di capire al meglio come si evolve il guasto sulla rete in confronto a quello che è un normale fenomeno dell'assorbimento ossia il passaggio sotto al divisore.

Capitolo 2

Funzionamento del relè DIA-IGTv

2.1 Simulatore del relè

Il seguente capitolo intende analizzare a fondo il funzionamento del modulo G del relè DIA-IGTv mediante l'ausilio di una simulazione costruita in ambiente MATLAB. L'obiettivo è quello di verificare il flow-chart di funzionamento del dispositivo mostrato in figura 2.1, utilizzando una forma d'onda appositamente costruita.

Di seguito verranno riportati i dati relativi alla forma d'onda e la stessa. Il diagramma di flusso per semplicità è stata suddiviso in tanti piccoli cicli che si testeranno uno alla volta. Inizialmente si pensava che il relè svolgesse un campionamento ogni 2 ms; per questo la forma d'onda di test è stata costruita utilizzando questo intervallo temporale. Analizzando dei dati derivanti dalla realtà si è notato che il campionamento del dispositivo viene svolto ogni 1 ms. Questo non va a modificare il funzionamento del simulatore. In ogni caso, per l'analisi di dati reali è necessaria un'interpolazione a 1 ms.

Le tarature che vengono utilizzate nel simulatore sono quelle in tabella 2.1. Inizialmente si vanno a testare i primi tre sottocicli con riferimento alla figura 2.2. I dati

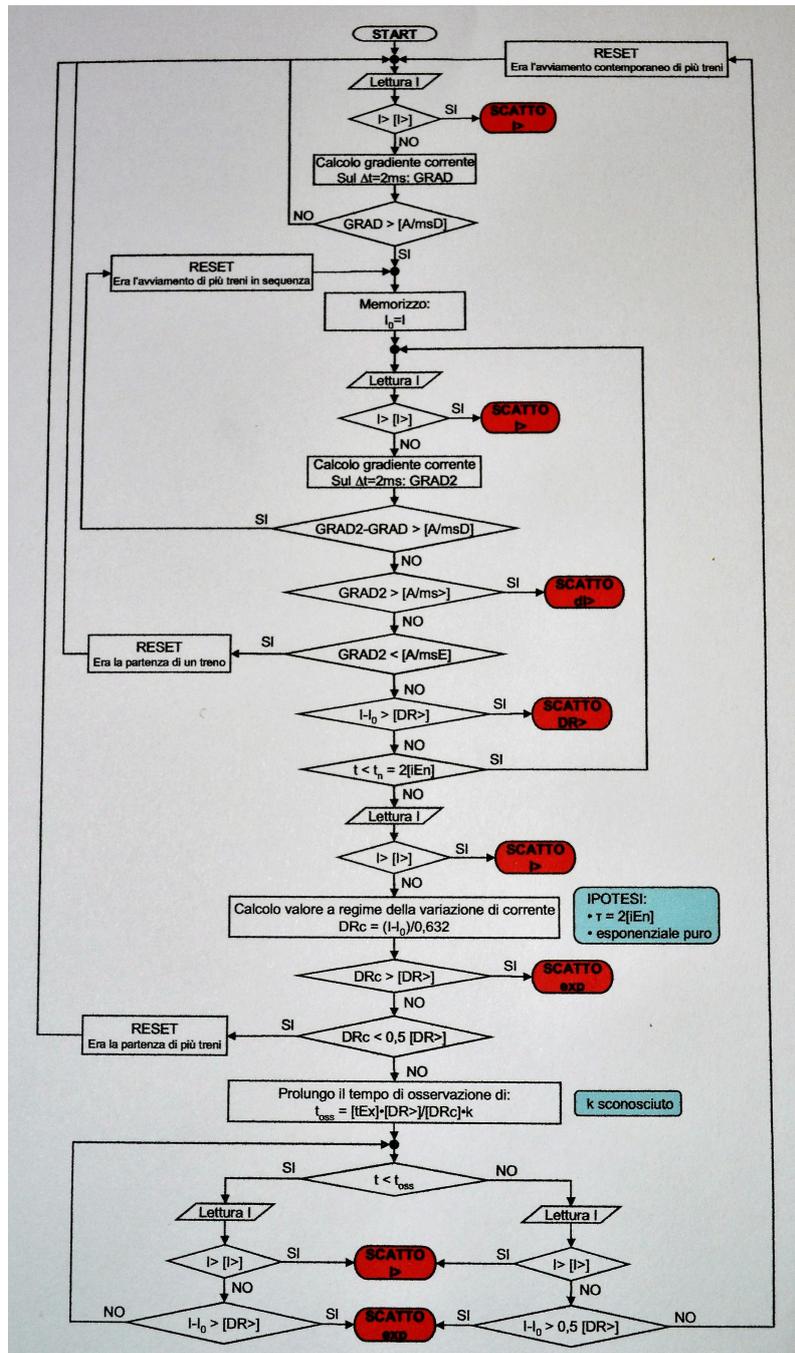


Figura 2.1. Diagramma di flusso

che permettono di testarli sono quelli contenuti in tabella 2.2

Se in questa tabella uno dei dati viene sostituito con un valore di corrente pari

I>	6000 A
A/msD	500 A/ms
A/msE	15 A/ms
A/ms>	500 A/ms
DR	1500 A
iEn	8
Toss	20 s
k	1

Tabella 2.1. Tarature del relè

Tempo[ms]	Corrente[A]	Cosa capita
0	0	Nulla
2	50	Ricalcola GRAD
4	151	Entro nel ciclo memorizzo Io e To
6	354	RESET:+treni memorizzo Io e To
8	558	RESET:+treni memorizzo Io e To
10	763	RESET:+treni memorizzo Io e To
12	969	RESET:+treni memorizzo Io e To
14	999	RESET: 1 treno

Tabella 2.2. Dati per il test dei primi tre cicli

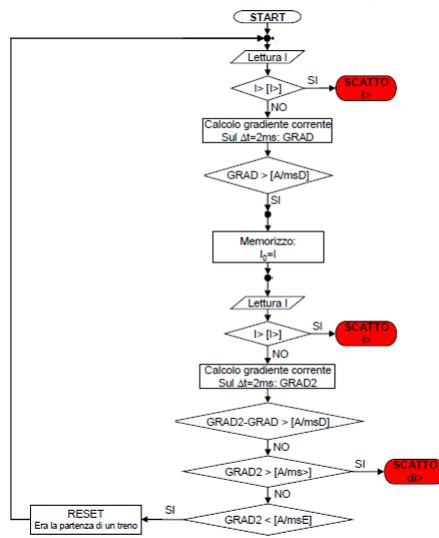
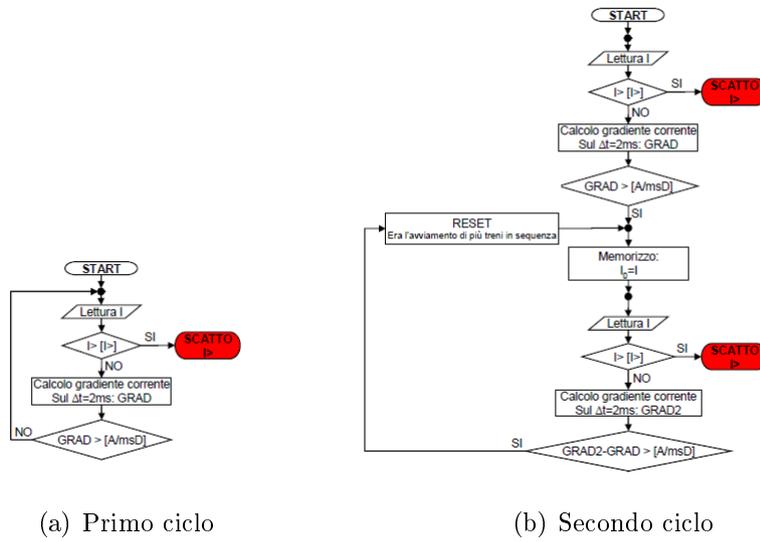


Figura 2.2. Primi tre sottocicli

a 6000 A si ha lo scatto per $I >$, come si nota, si testa il primo ciclo andando a calcolare per due volte il GRAD, quando $\text{GRAD}(50,5 \text{ A/ms})$ supera o è uguale alla soglia di $\text{A/msD}(50 \text{ A/ms})$ si entra nel ciclo. Una volta che lo si è iniziato, si testa il secondo ciclo ossia si verifica che la differenza di gradienti è sempre maggiore di A/msD . Anche in questo caso se si inserisce un valore più alto di 6000 A si ha uno scatto per $I >$. Quando si raggiunge il valore di 999 A si testa il terzo ciclo, essendo la differenza di gradienti minore ad A/msD si confronta il valore di $\text{GRAD2}(15 \text{ A/ms})$ prima con $\text{A/ms} > (500 \text{ A/ms})$, essendo minore di questo valore non scatta. Successivamente GRAD2 è confrontato con $\text{A/msE}(15 \text{ A/ms})$ ed essendo uguale viene fatto un RESET a causa di un treno. Se viene modificata la soglia di $\text{A/ms} >$ portandola a 15 A/ms si nota che il relè scatta per $dI >$ (quando la corrente è 999 A). La forma d'onda corrispondente al test di questi sottocicli è quella mostrata in figura 2.3

Successivamente si testa il quarto sottociclo (mostrato in figura 2.4) in cui si controlla che una volta entrati nel ciclo per cui GRAD è maggiore della soglia A/msD e la differenza dei GRAD è a sua maggiore della stessa soglia, si fanno 3 RESET dovuti ad un avviamento contemporaneo di più treni verificando così che ogni volta che vi è il RESET viene memorizzata la nuova I_0 . Arrivati a 754 A si controlla che la differenza dei GRAD sia sempre inferiore ad A/msD e che il GRAD2 sia sempre inferiore alla soglia $\text{A/ms} > = 500 \text{ A/ms}$ per un tempo pari a 16 ms ($2 * iEn$). Ovviamente quando inizia il ciclo in cui GRAD è maggiore di A/msD , se si ha una corrente maggiore di 6000 A il relè scatta per $I >$ così come se il GRAD2 diventa maggiore di $\text{A/ms} >$ scatta per $dI >$ (la cosa si può verificare andando a cambiare il valore di $\text{A/ms} >$; mettendo 17 A/ms scatta per una valore di corrente pari a 788 A). Altra verifica che si svolge è quella della DR (anche in questo caso si deve cambiando il valore della soglia $\text{DR} >$ e mettendo 36 A scatterà per 790 A a causa di $\text{DR} >$, questo ovviamente se il valore di $\text{A/ms} >$ è pari a 500 A/ms o comunque maggiore di 18 altrimenti scatta per $dI >$). I dati che consentono di testarlo sono elencati in tabella

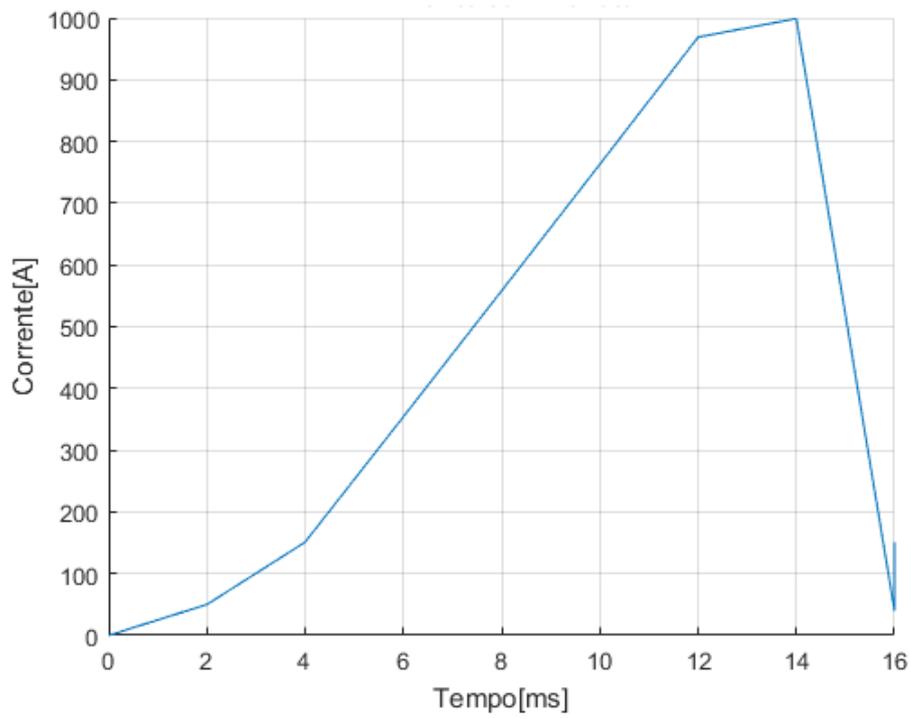


Figura 2.3. Forma d'onda test dei primi tre cicli

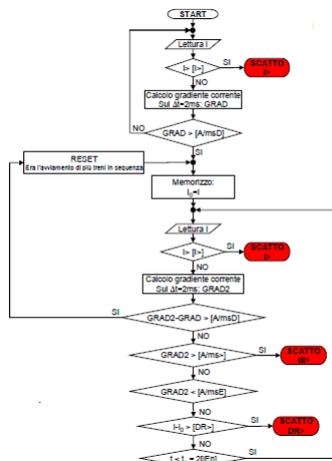


Figura 2.4. Quarto ciclo

Tempo[ms]	Corrente[A]	Cosa capita
16	50	Ricalcola GRAD
18	151	Entro nel ciclo memorizzo I ₀ e T ₀
20	352	RESET: +treni memorizzo I ₀ e T ₀
22	553	RESET: +treni memorizzo I ₀ e T ₀
24	754	RESET: +treni memorizzo I ₀ e T ₀
26	786	Controllo tempo fino a 16 ms
28	788	Controllo tempo fino a 16 ms
30	790	Controllo tempo fino a 16 ms
32	792	Controllo tempo fino a 16 ms
34	794	Controllo tempo fino a 16 ms
36	796	Controllo tempo fino a 16 ms
38	798	Controllo tempo fino a 16 ms
40	800	Fine del controllo del tempo

Tabella 2.3. Dati per il test del quarto ciclo

2.3 mentre in figura 2.5 si nota la forma d'onda risultante.

A questo punto si deve testare il quinto sottociclo (mostrato in figura 2.6) in cui usciti dal ciclo principale andiamo a controllare il DRc (che è una stima della corrente

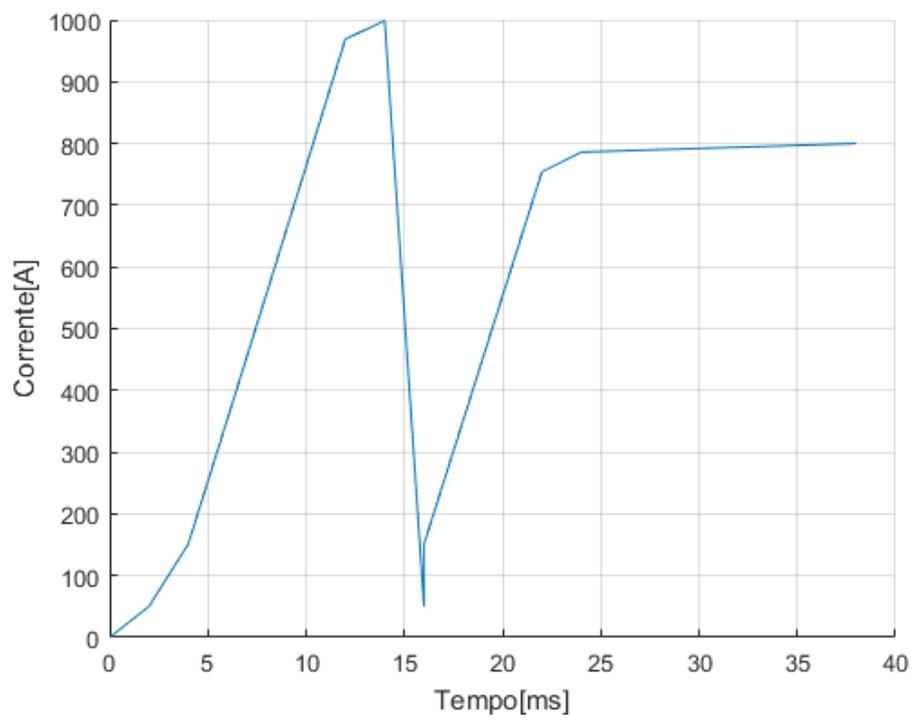


Figura 2.5. Forma d'onda del quarto ciclo

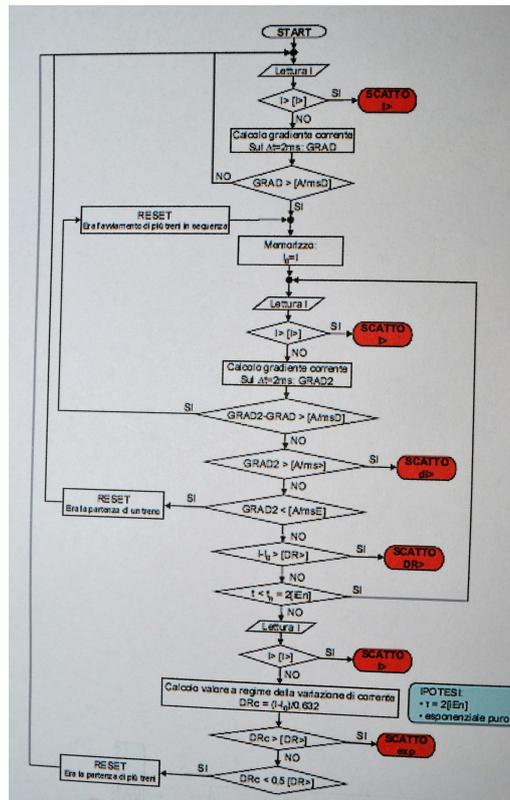


Figura 2.6. Quinto ciclo

Tempo[ms]	Corrente[A]	Cosa capita
42	1228	RESET:avviamento di un treno

Tabella 2.4. Dato per testare il quinto ciclo

che si può avere a regime) confrontandolo con $0,5 \cdot DR$. La cosa si può fare andando ad inserire come dato quello contenuto in tabella 2.4.

Successivamente si va a studiare il sesto sottociclo (mostrato in figura 2.7). I dati che vengono utilizzati sono contenuti in tabella 2.5.

Come si nota, viene rifatto il quinto ciclo solo che si è cambiato il valore di corrente per cui si esce dal controllo del tempo per questo si prolungherà il tempo di osservazione fino a T_{oss} . Ovviamente si controlla anche la soglia di DRc . Se si

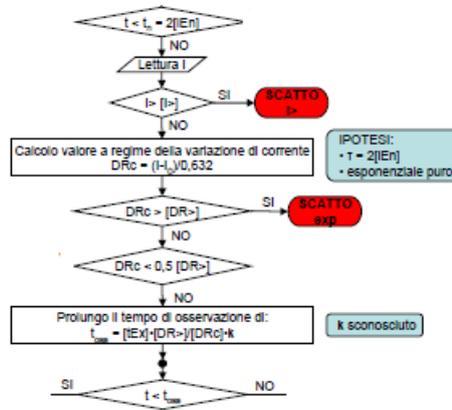


Figura 2.7. Sesto ciclo

Tempo[ms]	Corrente[A]	Cosa capita
44	50	Ricalcolo GRAD
46	151	Entro nel ciclo memorizzo I _o e T _o
48	352	RESET: +treni memorizzo I _o e T _o
50	553	RESET: +treni memorizzo I _o e T _o
52	754	RESET: +treni memorizzo I _o e T _o
54	786	Controllo tempo fino a 16 ms
56	788	Controllo tempo fino a 16 ms
58	790	Controllo tempo fino a 16 ms
60	792	Controllo tempo fino a 16 ms
62	794	Controllo tempo fino a 16 ms
64	796	Controllo tempo fino a 16 ms
66	798	Controllo tempo fino a 16 ms
68	800	Fine del controllo del tempo
70	1228.632	Calcolo T _{oss} =39 e controllo se sono maggiore di T _{oss}

Tabella 2.5. Dati per il test del sesto ciclo

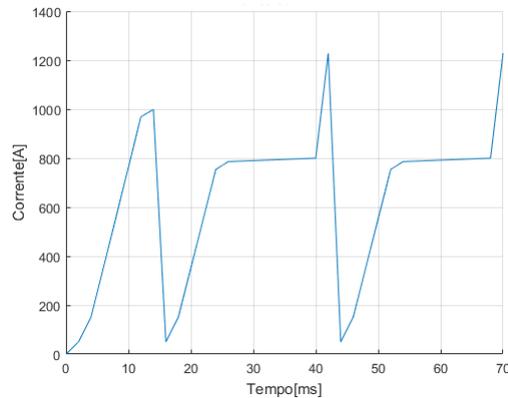


Figura 2.8. Forma d'onda test del sesto ciclo

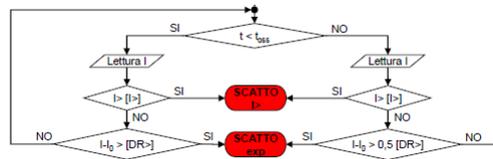


Figura 2.9. Settimo ciclo

cambiasse il valore di 1228,632 A con una corrente di 1702 A si otterrebbe uno scatto per EXP e ovviamente se si rimettesse 1228 A si avrebbe un RESET. Facendo la differenza di tempo da quando si entra nel ciclo con GRAD maggiore di A/msD (52 ms) e la corrente attuale(70 ms) il relè si accorge che il tempo è inferiore a Toss (39 ms) quindi può andare a controllare ulteriormente le correnti fino ad un tempo pari a 91 ms. La forma d'onda risultante è quella di figura 2.8. Come si evince dalla figura, è presente il riavviamento dovuto al fatto che si è verificato il quinto ciclo, in cui avveniva un RESET.

A questo punto non rimane che verificare il settimo e ultimo ciclo (descritto in figura 2.9 in cui si controlla la differenza I-I₀ fino a che non si raggiunge il tempo di osservazione. La figura 2.7 mostra la forma d'onda che ottenuta.

Risulta ovvio che se al posto di una qualsiasi corrente della tabella 2.6 si sostituisce 6000 A si otterrà uno scatto per I>. Se si è all'interno del tempo Toss e

Tempo[ms]	Corrente[A]	Cosa capita
72	2253	Controllo fino a Toss
74	2252	Controllo fino a Toss
76	2251	Controllo fino a Toss
78	2249	Controllo fino a Toss
80	2246	Controllo fino a Toss
82	2244	Controllo fino a Toss
84	2243	Controllo fino a Toss
86	2242	Controllo fino a Toss
88	2241	Controllo fino a Toss
90	2240	Controllo fino a Toss
92	2239	T-To e' maggiore di Toss
94	1503	Controllo solo una corrente FINE DEI CONTROLLI
96	50	Ricalcolo GRAD
98	51	Ricalcolo GRAD

Tabella 2.6. Dati per il test del settimo ciclo

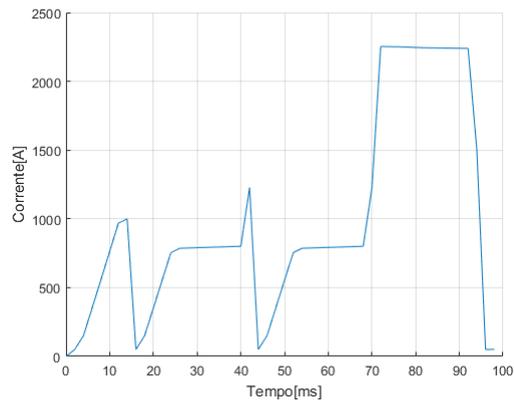


Figura 2.10. Forma d'onda test del settimo ciclo

si sostituisce a 2240 A una corrente di 2254 A si avrà scatto per EXP così come quando si va a sostituire a 1503 A il valore 1504 A in quanto si è oltre le soglie DR e $0.5 \cdot DR$.

In ultimo si vuole analizzare il ciclo della figura 2.11. Ci si pone nella condizione in cui si è entrati nel ciclo con GRAD superiore alla soglia A/msD e la differenza di gradienti è inferiore a sua volta a questa soglia. Supponendo che GRAD2 sia inferiore a $A/ms>$ e non si ha anche uno scatto per $DR>$, il relè inizierà a controllare il tempo. Se dentro il tempo(16 ms) si ha che la differenza di GRAD sia maggiore o uguale della soglia A/msD allora il relè non controllerà più il tempo ma memorizzerà la nuova corrente e ricontrollerà le varie soglie.

Come si nota dalla tabella 2.7 una volta entrati nel ciclo principale, se non vi è alcuno scatto dovuto alle soglie $A/ms>$ e $DR>$, si controlla il tempo. Giunti ad una corrente pari a 955 A si ottiene una differenza di GRAD pari a 50 A/ms questo fa resettare a causa di più treni. Successivamente si controlla di nuovo questa differenza qualora diventi minore di A/msD viene controllato il GRAD2 e la differenza di corrente, se non scatto ma sono superiore ad A/msE allora si controlla il tempo cosa che si fa da una corrente pari a 1357 A fino ad una corrente pari a 1558 A. Qui si hanno di nuovo dei RESET. A questo punto la forma d'onda inizia a crescere in modo tale da non fare avvenire ulteriori RESET e controllare fino a 16 ms(e senza che ci siano scatti di $dI>$ o $DR>$) arrivato a fine ciclo il relè controlla nuovamente DRc ; essendo maggiore di 750 A andrà a controllare ulteriormente la differenza di corrente. Se al posto della corrente pari a 1391 A si sostituisce una corrente pari a 1387 A si avrà un RESET dovuto all'avviamento di un singolo treno. La forma d'onda risultante è quella di figura 2.12.

Una volta testata la forma d'onda di prova, è possibile complicarla a proprio piacimento. Per esempio, derivata dalla prima forma si è utilizzata l'onda di figura 2.13.

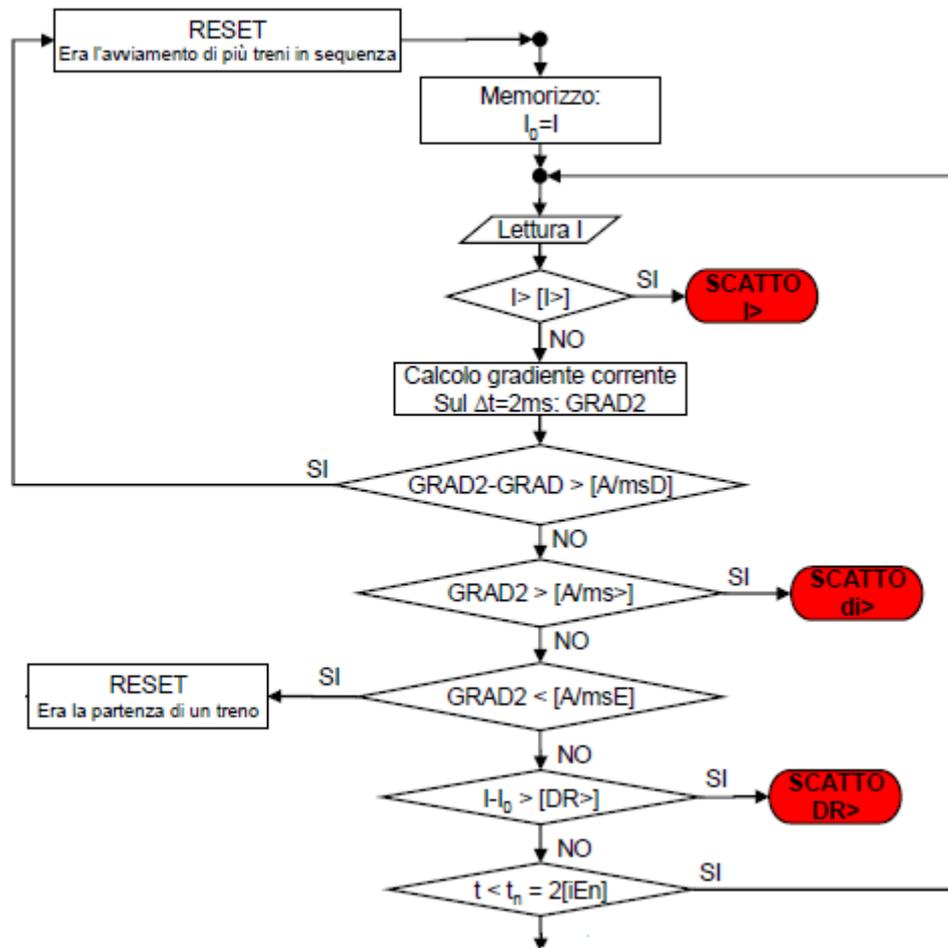


Figura 2.11. Ciclo particolare

Tempo[ms]	Corrente[A]	Cosa capita
100	50	Ricalcolo GRAD
102	151	Entro nel ciclo GRAD maggiore di AmsD memorizzo Io e To
104	352	RESET:+ treni memorizzo Io e To
106	553	RESET:+ treni memorizzo Io e To
108	754	Memorizzo Io e To
110	786	Controllo fino a 16 ms
112	788	Controllo fino a 16 ms
114	790	Controllo fino a 16 ms
116	792	Controllo fino a 16 ms
118	955	Memorizzo Io
120	1156	RESET:+ treni memorizzo Io e To
122	1357	RESET:+ treni memorizzo Io e To
124	1389	Controllo fino a 16 ms
126	1391	controllo fino a 16 ms
128	1393	controllo fino a 16 ms
130	1558	RESET:+treni memorizzo Io e To
132	1759	RESET:+treni memorizzo Io e To
134	1791	controllo fino a 16 ms
136	1793	controllo fino a 16 ms
138	1795	controllo fino a 16 ms
140	1797	controllo fino a 16 ms
142	1799	controllo fino a 16 ms
144	1801	controllo fino a 16 ms
146	1803	controllo fino a 16 ms
148	1805	controllo fino a 16 ms
150	2234,896	controllo DRC maggiore di 750

Tabella 2.7. Dati per il test ciclo più interno

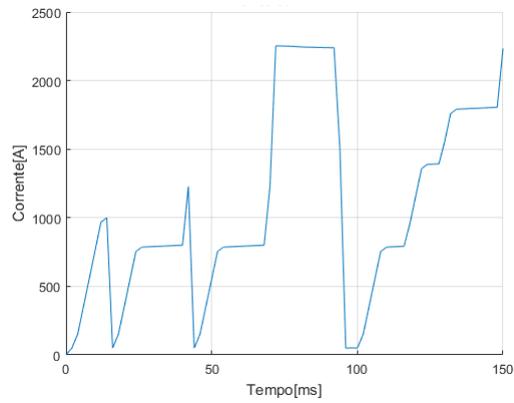


Figura 2.12. Forma d'onda del ciclo particolare

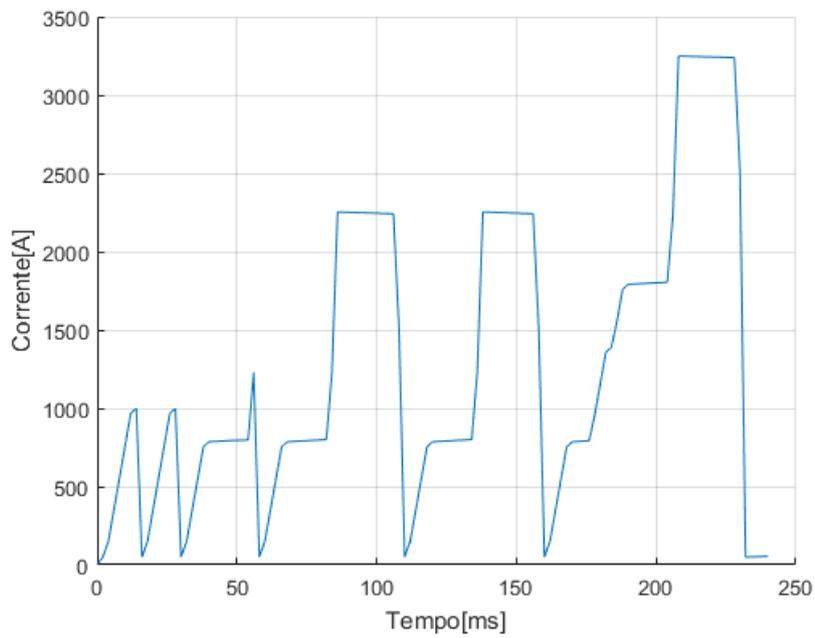


Figura 2.13. Forma d'onda complessa

In questa prova, per due volte si sono eseguiti i primi tre test. A questo punto viene svolto il quarto test evitando che ci sia un RESET dovuto alla soglia A/msE e arrivando al termine dei 16 ms. Qui avviene un RESET dovuto al DRc e quindi si esegue il quinto test. Si ripete il quarto test senza che ci sia un RESET dovuto al DRc e quindi si procede con la verifica del sesto e settimo ciclo. Si ripete questa sequenza per un'altra volta e a questo punto si va a fare un test del ciclo più interno (ossia del ciclo denominato particolare) si esegue il quarto test e poi una volta arrivati in fondo ai 16 ms si procede con la verifica del sesto e settimo ciclo.

Osservazioni finali:

Nell'andare a testare il settimo ciclo, quando si svolge il confronto con $Toss$ che viene calcolato, per non dover costruire una forma d'onda con troppi punti, si è considerato che tEx fosse in ms e non in secondi (come viene indicato nelle tarature ad inizio capitolo). Le tarature ad inizio sezione sono quelle che vengono utilizzate nella realtà e quindi anche quando andremo a testare le forme d'onda reali.

2.2 Conclusioni

Realizzando il simulatore del relè si può concludere che i parametri utili per la taratura sono:

- a) A/ms , se settato correttamente può distinguere una situazione di guasto da una di normale funzionamento.
- b) DR , anch'esso è utile per distinguere la condizione di guasto da una di normale funzionamento.
- c) iEn , è un numero di campionamenti e da esso dipende il tempo di osservazione a "breve termine".

- d) **tEx**, è un tempo di osservazione a "lungo termine" dal quale dipende la rilevazione del guasto.
- e) **A/msD**, è una soglia per entrare nel ciclo di controllo.
- f) **A/msE**, è un parametro che consente di uscire dal ciclo, per settarlo al meglio, lo si deve correlare con **iEn** e **tEx**.

Capitolo 3

Analisi dei dati in nostro possesso

Al fine di ottenere una migliore taratura dei parametri caratteristici del relè, si propone un'analisi statistica dei dati a nostra disposizione. L'obiettivo principale è distinguere una tipica situazione di guasto dal normale assorbimento di un tram. Le informazioni disponibili sono state organizzate come segue:

1. Assorbimento in condizioni normali delle vetture:

si analizzano i dati provenienti da misure svolte nell'agosto 2008 nelle quali si erano rilevati gli spunti delle tre diverse motrici circolanti sulla rete tranviaria: 2800, 5000 e 6000. Tra le prove sono anche presenti delle rilevazioni di un'assorbimento contemporaneo di due motrici una 2800 più una 6000.

2. Prove di corto circuito:

si analizzano le prove di corto circuito di 4 Sotto-Stazioni-Elettriche (SSE in breve): Exilles, S.Paolo, Sassi e Martinetto.

3. Scatti dell'interruttore:

si analizzano gli scatti dell'interruttore dividendoli dapprima in tre categorie: corretti, intempestivi e non classificabili. Successivamente si raggruppano formando un unico insieme.

4. Passaggio sotto al divisore di zona:

una prima analisi si svolge confrontando le misure con gli scatti del 2009. Successivamente si analizzano le sole misure di passaggio sotto al divisore. Si ricorda che questi dati verranno raggruppati insieme al normale assorbimento delle vetture.

L'analisi viene organizzata in due fasi successive:

1. FASE 1: scelta della migliore interpolazione per i dati.

Analizzando le misure svolte con un registratore HIOKY MR8880-20, si nota che, eseguendo un'interpolazione a 2 ms (in ambiente MATLAB e necessaria per ottenere un segnale più simile possibile a quello campionato dal relè) del segnale derivato dallo strumento (campionato con un tempo impostato su di esso) ; è presente una specie di disturbo sulla forma d'onda ottenuta. Per questo motivo si cerca di trovare la miglior interpolazione possibile per i dati disponibili. La scelta ricade su quella che approssima meglio la curva misurata dallo HIOKY, da essa dipenderà il calcolo del gradiente nella fase successiva.

2. FASE 2: analisi dei dati e costruzione delle cumulate.

Questa fase è diversa a seconda che si analizzino dei dati provenienti dal normale assorbimento o derivanti dalle altre tre categorie. L'obiettivo finale è sempre lo stesso ossia ricavare il gradiente massimo (GRADMAX) e la massima differenza di corrente (DR). Se si studia un normale assorbimento si nota che è composto da più rampe successive che devono essere analizzate singolarmente, di ogni rampa si propone di ricavare i due dati citati prima. La cosa risulta più semplice qualora si studino le tre rimanenti categorie in cui si deve analizzare un'unica rampa (anche in un passaggio sotto al divisore di zona si nota che la corrente assorbita crea un'onda simile al corto circuito e poi ritorna ai valori di normale assorbimento). I due valori citati si possono ricavare

usando un semplice programma MATLAB le cui caratteristiche verranno descritte successivamente. Per quanto riguarda le cumulate, si costruiranno sia la cumulata diretta sia sua complementare. La prima è utile quando si leggono i dati derivanti da una situazione di guasto mentre la seconda permette di studiare meglio una condizione di normale assorbimento. In taluni casi si possono confrontare delle cumulate dirette con quelle inverse.

Si propone infine di analizzare una forma d'onda derivante dalla misura di un'assorbimento giornaliero.

Le tarature proposte sono:

1. Soglia di riconoscimento(A/msD):

si dovrebbe prendere il corto circuito peggiore ossia quello lontano dalla SSE. Per questo si analizzano nel dettaglio le pendenze registrate nelle prove di corto circuito e si prende tra di esse il valore "minimo del massimo dei gradienti". Così facendo ci si aspetta che il relè diventi immediatamente operativo. Per farlo scattare a causa del corto lontano ci si può sulla differenza di corrente.

2. Soglia di riconoscimento corto circuito(A/ms>):

si propone di far scattare il relè per superamento della soglia A/ms> quando si ha un guasto. Il dispositivo tende a confondere le pendenze di un corto circuito con quelle di un passaggio sotto al divisore le quali sono molto alte. Si propone una taratura basata sul peggiore passaggio sotto al divisore, si deve quindi riconoscere il " massimo dei gradienti massimi" di questo fenomeno. Così facendo ci si aspettano degli scatti per un corto circuito(almeno quello vicino) o un guasto ma non quando una motrice transita sotto al divisore.

3. Soglia di differenza di corrente I-Io:

in questo caso, il relè non deve scattare quando una motrice passa sotto ad un divisore ma quando si verifica un corto circuito lontano. Si propone una

taratura basata sul peggiore passaggio sotto al divisore di zona ossia il "massimo delle massime differenze" di corrente del fenomeno. Ci si aspetta che il corto lontano abbia una differenza di corrente più alta, tale da far scattare il dispositivo mentre il passaggio sotto al divisore non dovrebbe causare confusione.

Questi tre parametri dovrebbero permettere una distinzione tra le condizioni di guasto e quelle di normale assorbimento. I valori ricavati, se necessario, dovranno essere corretti mediante coefficienti di sicurezza che tengono conto di altri fenomeni che avvengono sulla linea di alimentazione.

3.1 FASE 1: scelta della migliore interpolazione dei dati

In questa prima fase si studia quale sia l'interpolazione migliore per i dati disponibili. Per ottenerla, si è organizzato uno script matlab in cui si vanno a rappresentare contemporaneamente due interpolazioni una con valori interpolanti più alti e l'altra con valori più bassi, modificando il loro valore, si è ottenuta quella migliore. I dati derivanti dagli spunti delle motrici sono stati rilevati con un tempo di campionamento che rendeva obbligatoria l'interpolazione in quanto su di essi era presente un disturbo troppo elevato. Inizialmente si era pensato di interpolare tutti i dati a 2 ms. Con questo tipo di campionamento il segnale risultava troppo "sporco" e soprattutto di difficile analisi nella fase successiva. Per primi, si riportano i grafici da cui è possibile ricavare i tempi di interpolazione delle motrici. Come si legge dalla figura 3.1 l'interpolazione scelta per la vettura 2800 è pari a 20 ms. Per tutte le altre motrici si adottano tempi interpolanti più alti rispettivamente di: 40 ms per la vettura 5000(figura 3.2), 80 ms per la vettura 6000(figura 3.3) ed infine di 32 ms per un'avviamento contemporaneo di una vettura 2800 con una 6000(figura 3.3). Nei

grafici appena descritti si nota che la misura da HIOKY (linea blu) è sovrapposta a quella dell'interpolazione a 2 ms (linea rossa), con questo tempo interpolante non si elimina il disturbo, cosa che avviene scegliendo le interpolazioni appena citate (linea verde dei grafici).

Di seguito si analizza il secondo tipo di forma d'onda. Si può affermare che gli andamenti degli assorbimenti sono comunque piuttosto simili ad eccezione di alcune curve in cui le vetture sono abilitate a fare il recupero dell'energia e questo comporta un'assorbimento negativo di corrente. Il corto circuito o lo scatto hanno un'andamento esponenziale simile a quello del passaggio sotto al divisore di zona sebbene i primi siano tipici di una condizione di guasto mentre il secondo è un fenomeno tipico nel normale assorbimento. Questi provocano degli scatti intempestivi. Anche in questo caso si riportano le forme d'onda in cui si confrontano i dati derivanti dall'HIOKY (linea blu) con un'interpolazione a tempo più basso (linea rossa) con un intervallo temporale più alto (linea verde) ad eccezione della figura 3.6 in cui in blu si ha il campionamento svolto dal DIA-IGTv e in rosso l'interpolazione a 2 ms. Per il corto circuito (figura 3.5) si adotta un tempo interpolante di 2 ms, se lo si aumentasse si perderebbero informazioni importanti (con 20 ms non si rileva al meglio il valore più alto di corrente e quindi non viene calcolato il giusto DR). Analizzando le informazioni derivanti dagli scatti (figura 3.6) si nota che i dati originali sono forniti ogni 1 ms, il relè sembrerebbe adottare questo tipo di campionamento e per questo motivo lo si mantiene. Per quanto riguarda il passaggio sotto al divisore, sono state svolte diverse prove e per ognuna di esse si deve usare un'interpolazione diversa. A titolo di esempio si riporta l'interpolazione della misura con passaggio sotto al divisore come da regolamento (3.7). Nella figura l'interpolazione viene svolta a 6 ms; in tutti gli altri casi si possono adottare dei tempi interpolanti che vanno da 2 ms fino a un massimo di 20 ms. In figura 3.7 si nota come la scelta di un'interpolazione a 20 ms sarebbe poco felice in quanto verrebbe fornita una stima poco veritiera del

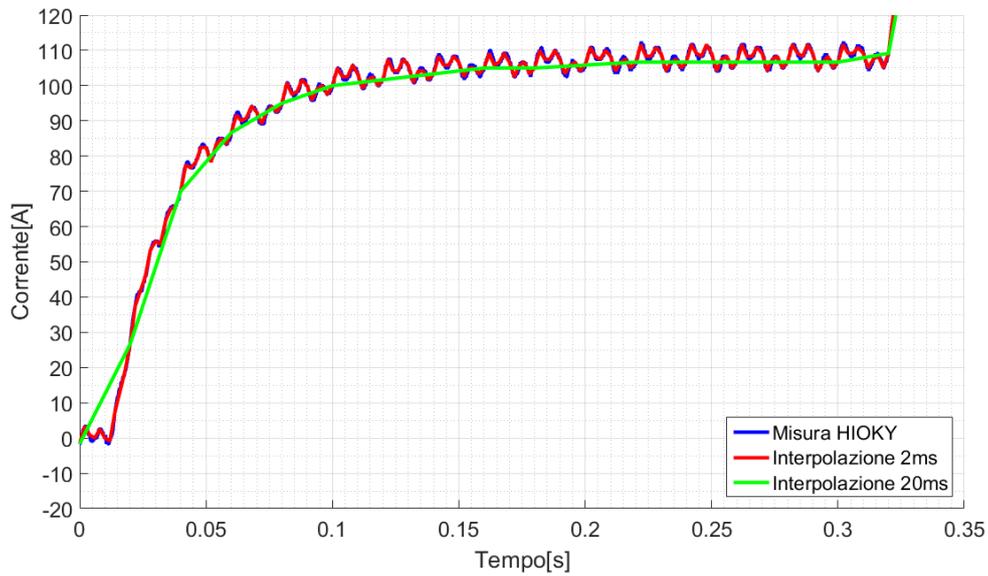


Figura 3.1. Interpolazione vettura 2800

Tipo di dati	Tempo interpolazione
Assorbimento 2800	20 ms
Assorbimento 5000	40 ms
Assorbimento 6000	80 ms
Assorbimento 2800+6000	32 ms
Corto Circuito	2 ms
Scatti	1 ms
Passaggio sotto divisore	Da 2 ms a 20 ms

Tabella 3.1. Riassunto dei tempi di interpolazione

gradiente iniziale. La tabella 3.1 riassume i tempi interpolanti adottati per i dati disponibili.

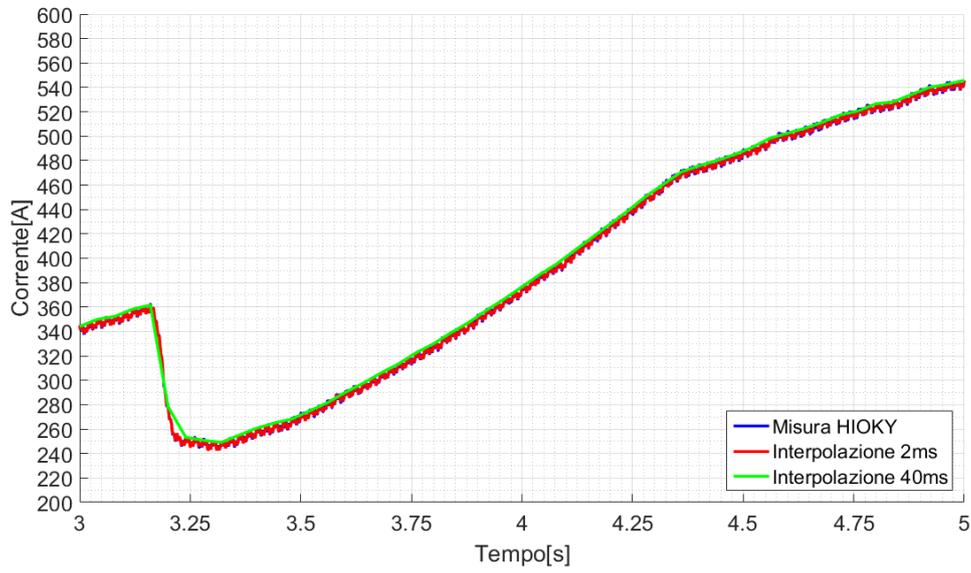


Figura 3.2. Interpolazione vettura 5000



Figura 3.3. Interpolazione vettura 6000

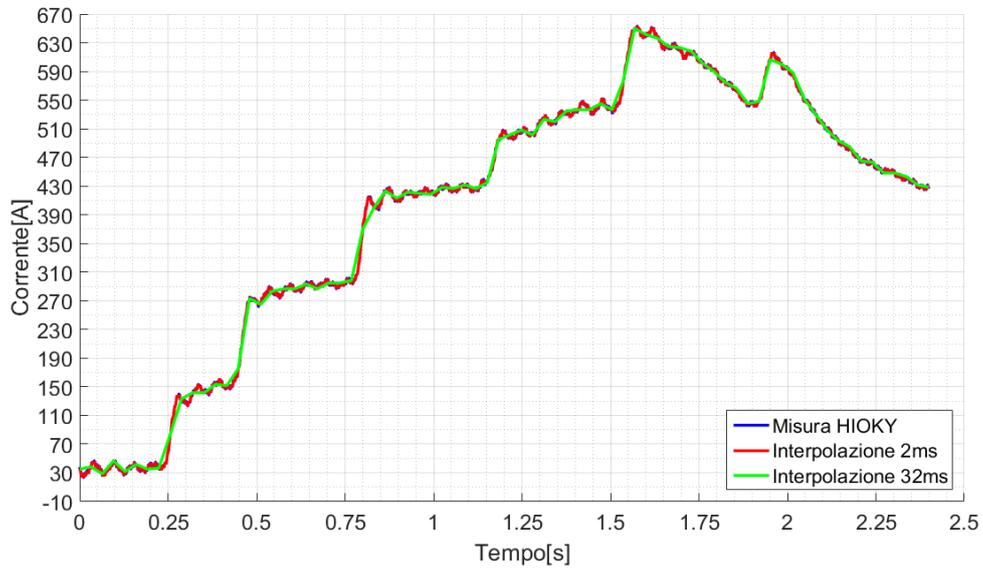


Figura 3.4. Interpolazione vettura 6000+2800

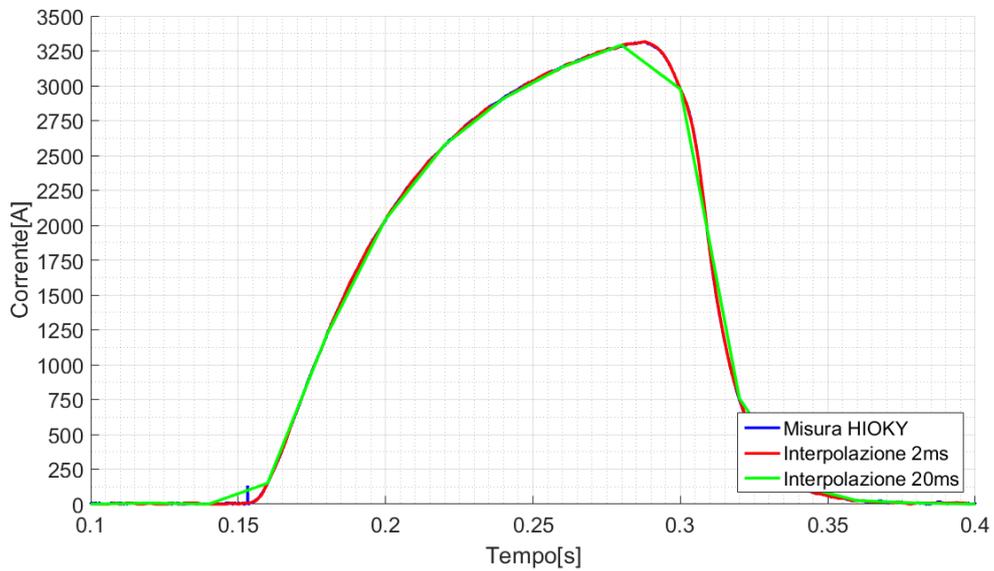


Figura 3.5. Interpolazione del corto circuito

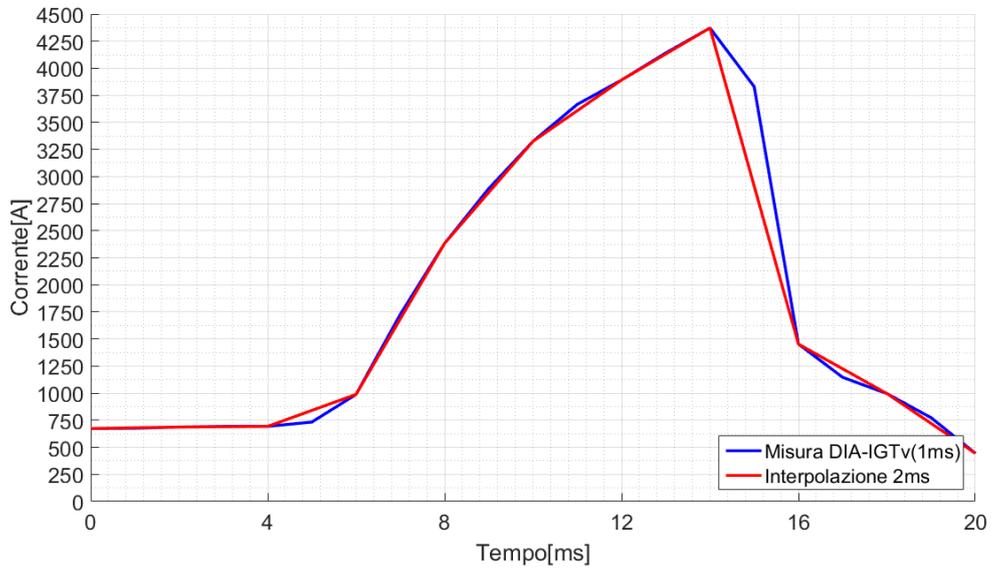


Figura 3.6. Interpolazione degli scatti

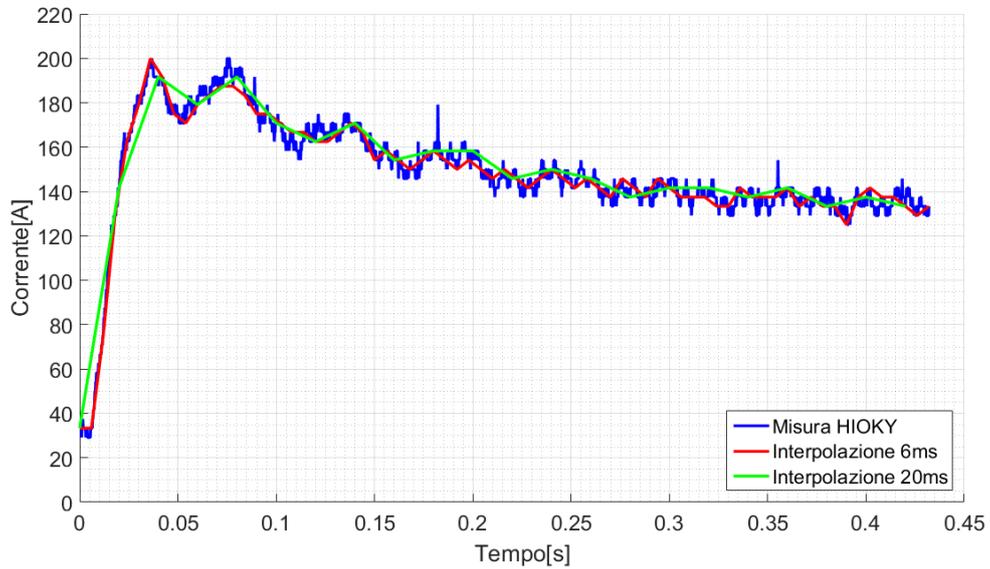


Figura 3.7. Interpolazione del passaggio sotto al divisore

3.2 FASE 2: analisi dei dati e costruzione delle cumulate

In questa seconda parte si analizzano nel dettaglio i dati a nostra disposizione. L'analisi consiste nel ricavare le cumulate dirette ed inverse delle massime differenze di corrente (in breve DR, come il relativo parametro di taratura) e dei massimi gradienti (in breve GRADMAX, che permette di tarare l'A/ms \gt), registrati nelle misure interpolate. Per come si presentano gli andamenti della corrente assorbita i dati forniti possono essere divisi in due gruppi analizzati con un diverso script MATLAB. Il primo è costituito dall'assorbimento in condizioni normali delle vetture mentre il secondo è formato dai rimanenti ossia corto circuiti, passaggi sotto al divisore e scatti. Si ricorda che le curve cumulate forniscono la probabilità che i parametri di interesse assumano determinati valori.

A Analisi del primo gruppo

Studiando l'assorbimento delle tre motrici, si nota che è formato da una successione di rampe esponenziali. Per questo si organizza uno script MATLAB in cui si cerca di ricavare il massimo gradiente e la massima differenza di corrente di ogni rampa. Il ciclo in cui si calcolano questi parametri e li si memorizza, inizia quando il gradiente calcolato assume un determinato valore (che si è chiamato con il termine GRADRIC) e termina, memorizzando i dati, quando il gradiente scende al di sotto di una soglia (chiamata GRADUSC). Di fatto si cerca di ricreare un ciclo simile a quello utilizzato dal relè ma semplificato. Una volta analizzate le forme d'onda e memorizzati i parametri della singole rampe, vengono costruite le cumulate e le loro inverse. Sono entrambe utili, in particolare si può pensare di confrontare la cumulata "inversa" di uno degli assorbimenti con la cumulata di una situazione di guasto per ottenere un'ottimizzazione della taratura. Di seguito si elencano le caratteristiche tipiche

delle curve.

La figura 3.8 si riferisce alle cumulate delle differenze di corrente per una motrice 2800 si nota che si ottengono valori che vanno da un valore minimo di 8 A fino ad un massimo di 250 A. Se si vuole restringere il campo di analisi e considerare i valori massimi e minimi che hanno una probabilità di accadere tra il 10% e il 90% si ottiene un minimo di 10 A e un massimo di 110 A. Questa analisi si svolgerà anche per gli altri dati, si leggeranno i valori massimi e minimi su tutta la scala di probabilità [0-1] e per una probabilità più bassa [0,1-0,9]. Per quanto riguarda i gradienti della vettura 2800, come si nota in figura 3.9, assumono valori che vanno da 0,25 A/ms fino a 4,375 A/ms se si considera la scala [0-1] mentre se si restringe il campo di osservazione ad una scala [0,1-0,9] si ottiene una variazione da 0,5 A/ms fino a 3,25 A/ms. Si osserva che le vetture 2800 nel normale assorbimento non dovrebbero dare dei problemi dato che la soglia di riconoscimento minima è 5 A/ms, teoricamente il relè non entra nemmeno nel ciclo.

Le vetture 5000 si comportano in modo diverso, come si evince dalla figura 3.10 si notano delle differenze di corrente molto più ripide del caso precedente, sulla scala [0-1] vanno da un minimo di 5 A ad un massimo di 580 A mentre per la scala [0,1-0,9] si ottiene un minimo di 8 A e un massimo di 260 A. Il comportamento del gradiente è diverso, dalla figura 3.11 si nota che questo parametro assume valori più bassi per questa tipologia di motrice. Sulla scala [0-1] va da un minimo di 0,125 A/ms ad un massimo di 2,5 A/ms. Restringendo il campo di osservazione ad una scala [0,1-0,9] varia da 0,13 A/ms fino a 1,15 A/ms.

Per la motrice 6000, la differenza di corrente come si nota in figura 3.12 va da

un minimo di 5 A ad un massimo 650 A se la probabilità è [0-1]. Restringendo il campo di osservazione a [0,1-0,9] si ottiene una variazione da 5 A a 210 A. Anche in questo caso si nota che i massimi gradienti sono piuttosto bassi (figura 3.13). Questo sembrerebbe non essere un problema per il relè. Si va da 0,04 A/ms a 1,95 A/ms per la scala di probabilità [0-1] mentre per la scala [0,1-0,9] vanno da 0,05 A/ms a 1,475 A/ms.

Il comportamento di queste ultime vetture è simile. Entrambe sono di più recente fabbricazione, il loro avviamento non è a reostato come nel caso della 2800 ma con chopper(5000) e con convertitore(6000). Questo potrebbe essere la causa di un sensibile calo dei gradienti.

Infine si analizzano i comportamenti di un'avviamento contemporaneo. L'andamento è simile a quello di una vettura 2800 come già avveniva per l'interpolazione (figura 3.4). Le massime differenze di corrente si concentrano tra i 20 A e 300 A (figura 3.14) ma non superano questo intervallo. Questa analisi non risulta essere molto significativa perchè le misure disponibili non erano molte. Anche nel grafico dei gradienti massimi (figura 3.15), si nota un comportamento simile alla motrice 2800 che sembra prevalere sulla vettura 6000. I valori dei massimi gradienti si concentrano tra 0,5 A/ms e 3,4 A/ms e non superano i 3,5 A/ms.

B Analisi del secondo gruppo

Nel secondo gruppo vengono comprese tutte le altre prove ossia quelle del corto circuito, degli scatti e dei passaggi sotto al divisore. Questa scelta è dettata dal fatto che le forme d'onda sono molto simili tra di loro. Lo script MATLAB in questo caso analizza un'unica rampa "esponenziale" dalla quale si ricava il valore del gradiente massimo e della massima differenza di corrente. Per gli scatti e il passaggio sotto al divisore si analizzano anche i valori dei gradienti

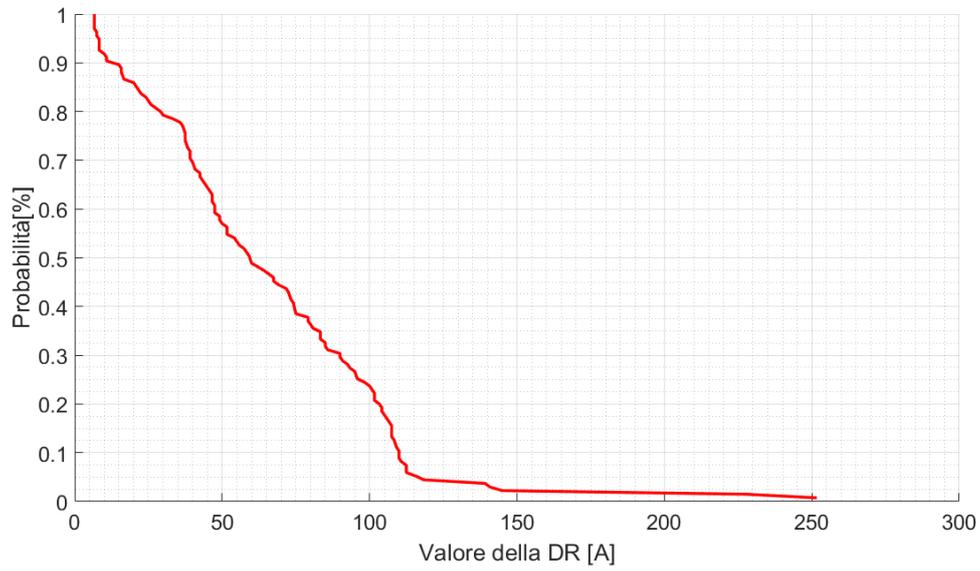


Figura 3.8. Cumulata della differenza di corrente, vettura 2800

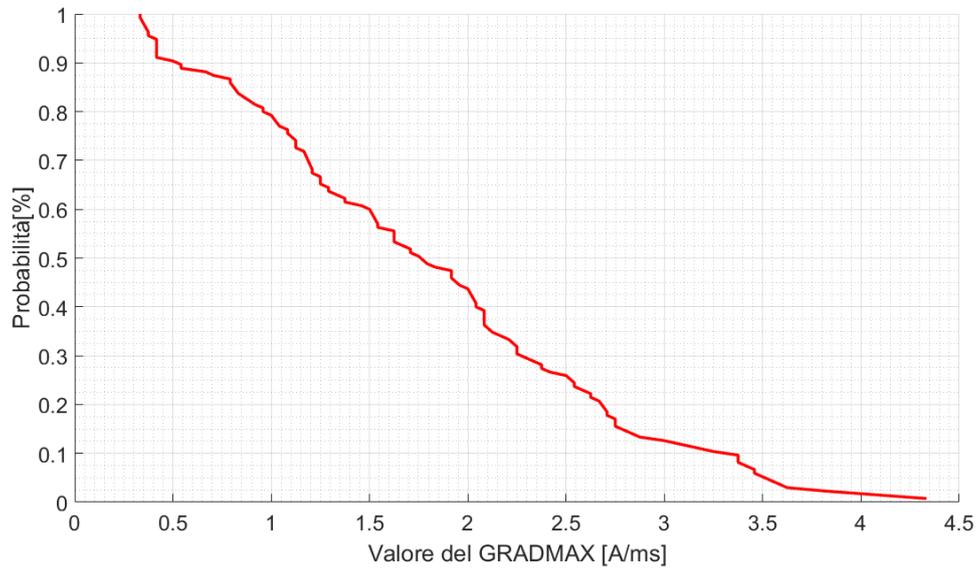


Figura 3.9. Cumulata del gradiente massimo, vettura 2800

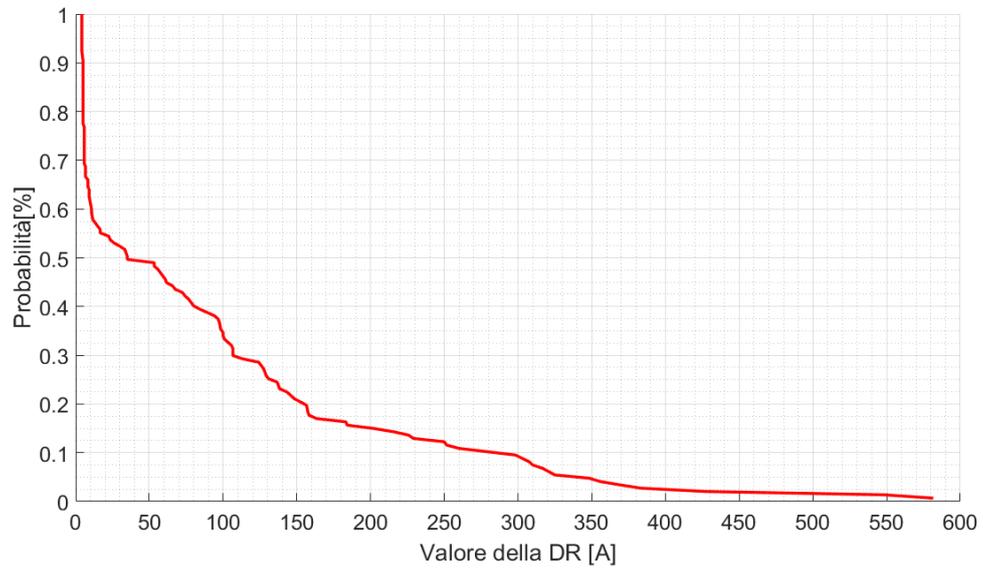


Figura 3.10. Cumulata della differenza di corrente, vettura 5000

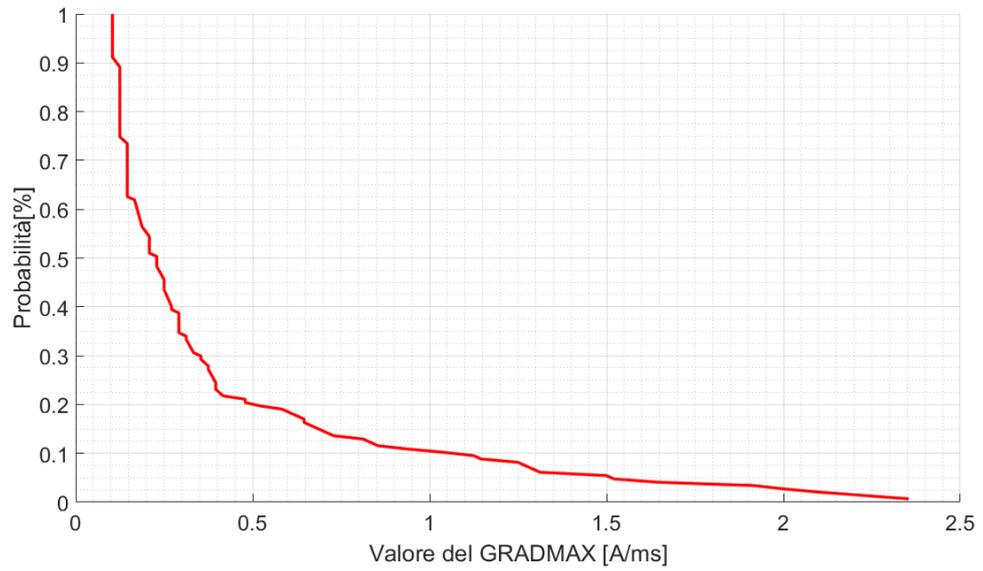


Figura 3.11. Cumulata del gradiente massimo, vettura 5000

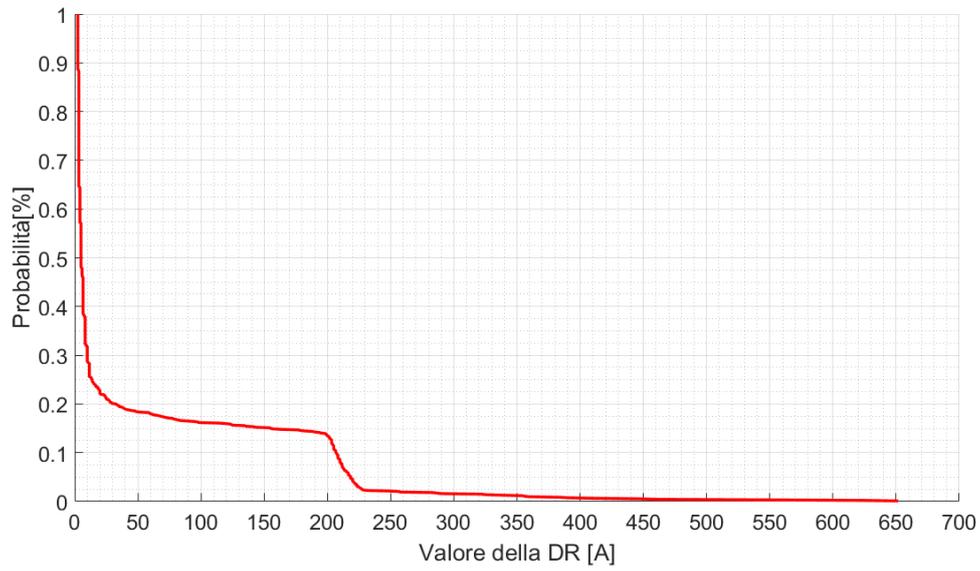


Figura 3.12. Cumulata della differenza di corrente, vettura 6000

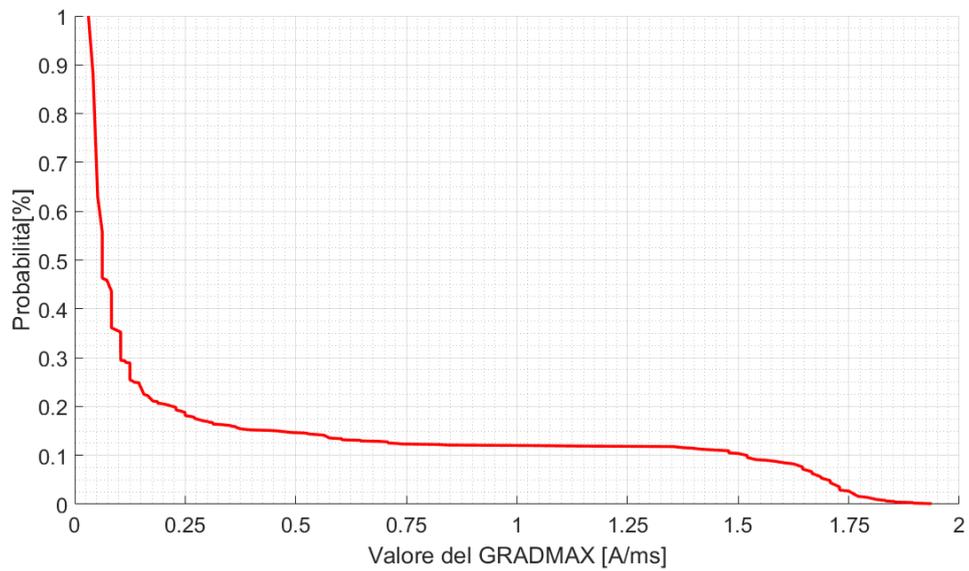


Figura 3.13. Cumulata del gradiente massimo, vettura 6000

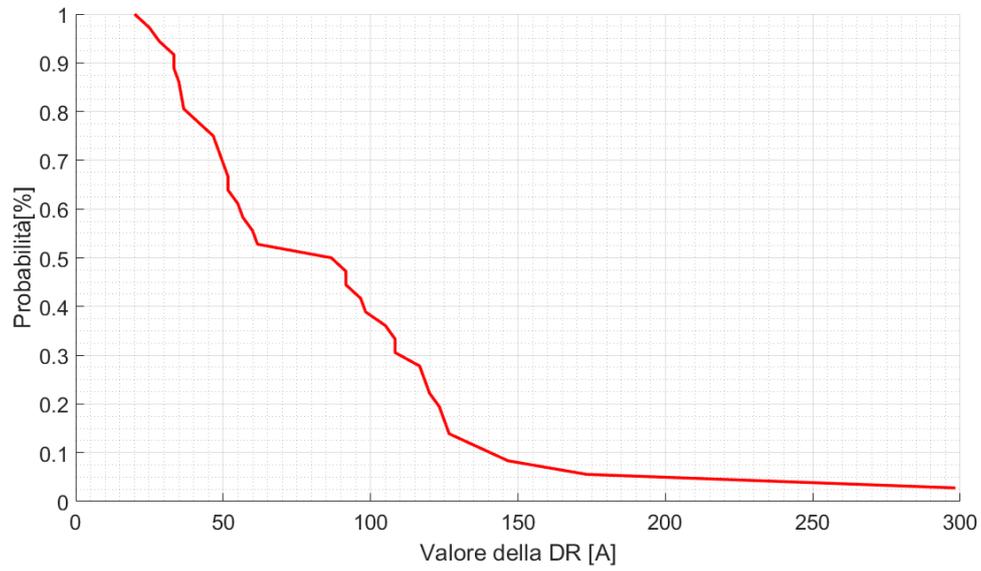


Figura 3.14. Cumulata della differenza di corrente, vetture 2800+6000

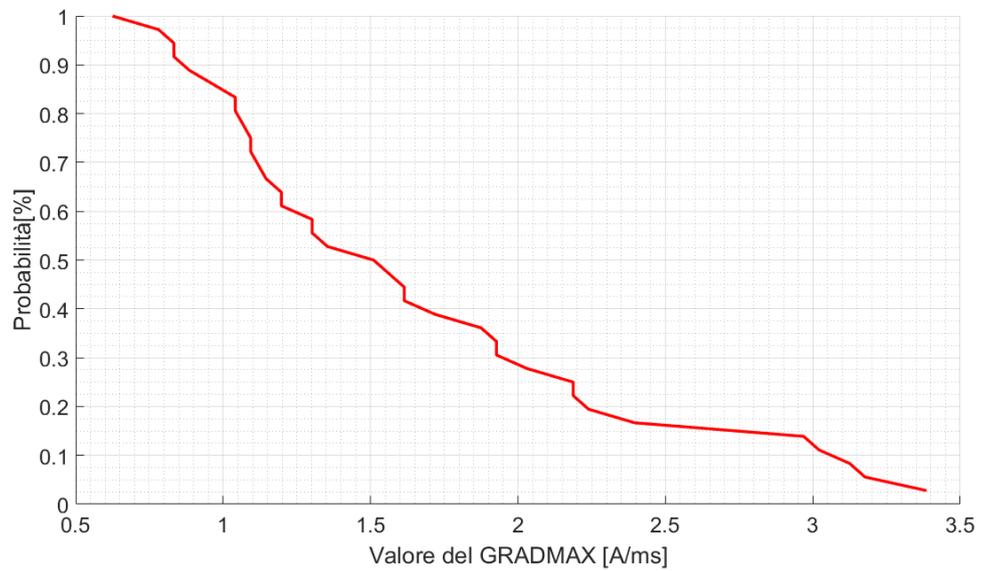


Figura 3.15. Cumulata del gradiente massimo, vetture 2800+6000

minimi. Per i dati del corto circuito i grafici ottenuti sono di tipo "globale" e comprendono le misure di tutte le quattro SSE . Per gli scatti si uniscono quelli corretti con quelli intempestivi e quelli non classificabili. Infine per il passaggio sotto al divisore si mettono insieme le misure del registratore HIO-KY con i dati che arrivano dal relè che come bene sappiamo sono un pò diverse.

Inizialmente si analizzano le prove di corto circuito. Per questi dati, come si osserva nella figura 3.16, la massima differenza di corrente è compresa da valori che vanno da 500 A fino a 14250 A qualora si consideri tutta la scala delle probabilità [0-1] altrimenti si ottengono valori più bassi ossia tra 600 A e 3650 A se si analizza una scala di probabilità tra [0,1-0,9]. Si nota che non vengono superati i 15000 A. Valori così elevati si sono verificati in due soli casi e sono fisicamente compatibili con le caratteristiche di rete. Dividendo la tensione di alimentazione per la resistenza della linea si possono ottenere valori anche più elevati. Se si analizzano le pendenze si ottengono i risultati di figura 3.17 ossia valori che vanno da 23 A/ms fino 800 A/ms se la scala considerata è [0-1] altrimenti si ottengono valori tra i 25 A/ms e 100 A/ms se la scala di probabilità scende tra [0,1-0,9]. Essendo i valori di gradiente massimo non troppo elevati, si deduce che può trattarsi di un corto circuito verificatosi lontano dalla SSE ma non se ne ha la certezza possiamo. Per studiare meglio il tipo di corto circuito bisogna essere a conoscenza dei parametri della linea elettrica e anche dell'andamento delle correnti quando il guasto si verifica a diverse distanze dalla SSE.

In seguito si analizzano i dati derivanti da degli scatti. Si nota che le massime differenza di corrente si concentrano in un range di valori che va da un

minimo di poco inferiore ai 250 A fino ad un massimo di 9400 A ma non superano i 9500 A (figura 3.18) mentre per le pendenze si osserva che i valori raggiunti sono superiori a quelli ottenuti dalle prove di corto circuito. Il loro range si staglia tra i 75 A/ms fino a 1225 A/ms ma non sono superati i 1250 A/ms (figura 3.19). Analizzando gli scatti è possibile concentrarsi solamente su quelli che sono avvenuti "correttamente" in questo caso si studia la cumulata diretta (figura 3.20) dove si nota che studiando una scala delle probabilità [0-1] si hanno valori di DR che vanno da un valore di 2300 A fino a 9500 A. Se si restringe il campo di osservazione a [0,1-0,9] si ottiene un minimo di 2400 A e un massimo di 9200 A. Le variazioni delle pendenze che si osservano in figura 3.21 vanno da 250 A/ms fino a 1280 A/ms se le probabilità sono [0-1] mentre nel caso di probabilità [0,1-0,9] si ottiene un valore pari a 260 A/ms come minimo e come massimo 1160 A/ms.

L'ultimo gruppo da analizzare è quello dei passaggi sotto al divisore. Se li si studiano in termini di DR si ottengono i risultati di figura 3.22 in cui la massima differenza di corrente con scala [0-1] va da 100 A a 2300 A mentre su scala [0,1-0,9] va da 175 A fino a 1250 A. A livello delle pendenze si ottengono i risultati di figura 3.23 in cui si evidenzia che i massimi gradienti dovuti a questo fenomeno hanno un'ordine di grandezza confrontabile con quelli degli scatti. Si nota che con scala di probabilità [0-1] il massimo gradiente va da un minimo di 8 A/ms fino a 210 A/ms mentre restringendo la scala di probabilità a [0,1-0,9] si riduce tra 8 A/ms e 165 A/ms.

A questo punto si possono unire i dati derivanti dalle varie prove in due gruppi principali ossia quello del normale funzionamento (comprendente gli assorbimenti delle motrici e il passaggio sotto al divisore di zona) e quello dei guasti (in

cui si inseriscono le prove di corto circuito e gli scatti corretti).

Il normale funzionamento è caratterizzato da dei valore di DR che vanno da 2,5 A fino a 2283 A se si considera una scala delle probabilità [0-1] mentre si ottiene una variazione da 3,3 A fino a 208 A se la si restringe a [0,1-0,9] (figura 3.24). Studiando le pendenze si ottengono i risultati di figura 3.25 in cui considerando una scala delle probabilità [0-1] si ottengono dei valori che vanno da 0,0312 A/ms fino a 207 A/ms se invece la si restringe a [0,1-0,9] si ottiene un intervallo che va da 0,04166 A/ms fino a 1,72 A/ms.

Per il gruppo del guasto, si ricavano le cumulate "dirette". In termini di DR, la figura 3.26 dimostra che se si considera una scala delle probabilità [0-1] si ha una variazione da 423 A fino a 1425 A se la si restringe a [0,1-0,9] si va da un minimo di 578,4 A ad un massimo di 5433 A. Studiando la figura 3.27, si ottengono le variazioni di gradiente, se si considera una scala delle probabilità [0-1] la variazione va da 20 A/ms fino a 1257 A/ms se invece la si restringe a [0,1-0,9] si va da 23 A/ms a 796,9 A/ms.

In tabella 3.2 si riassumono i dati letti dai grafici precedenti, divisi in ogni sotto- categoria. Questa tabella è illustrata nei grafici che vengono spiegati in seguito. In figura 3.28 dove viene descritta la relazione dei massimi DR dividendo nel normale funzionamento le vetture dal passaggio sotto il divisore e dividendo nei guasti le prove di corto circuito dagli scatti avvenuti correttamente. Per quanto riguarda le scale, un quadretto equivale a 500 A (un quadretto è circa 5 mm). Le pendenze vengono rappresentate nella figura 3.29 in questa figura un quadretto equivale a 0,5 A/ms fino a 4,5 A/ms (un quadretto è circa 5 mm, in seguito tra 4,5 A/ms e 200 A/mssi cambia la scala e

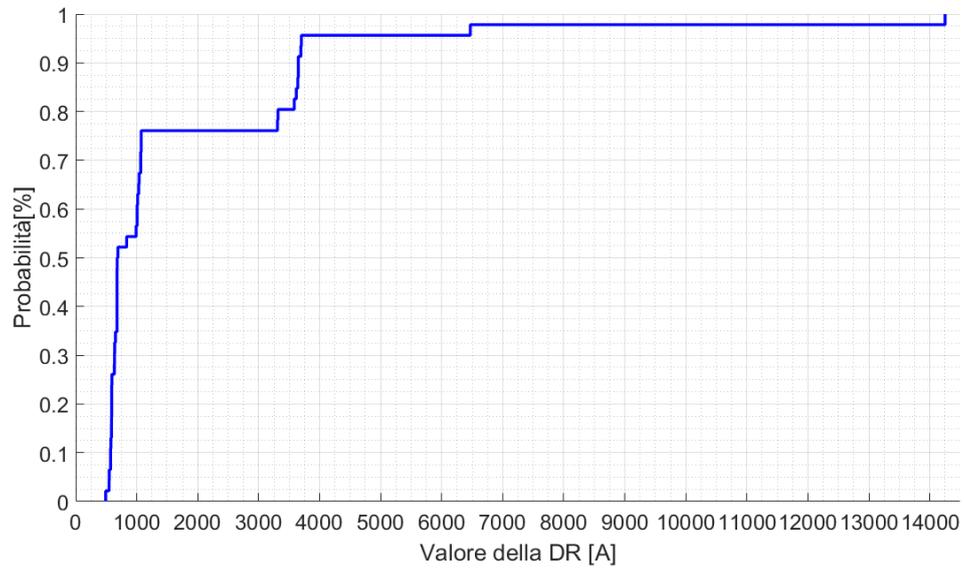


Figura 3.16. Cumulata della differenza di corrente, prove di corto circuito

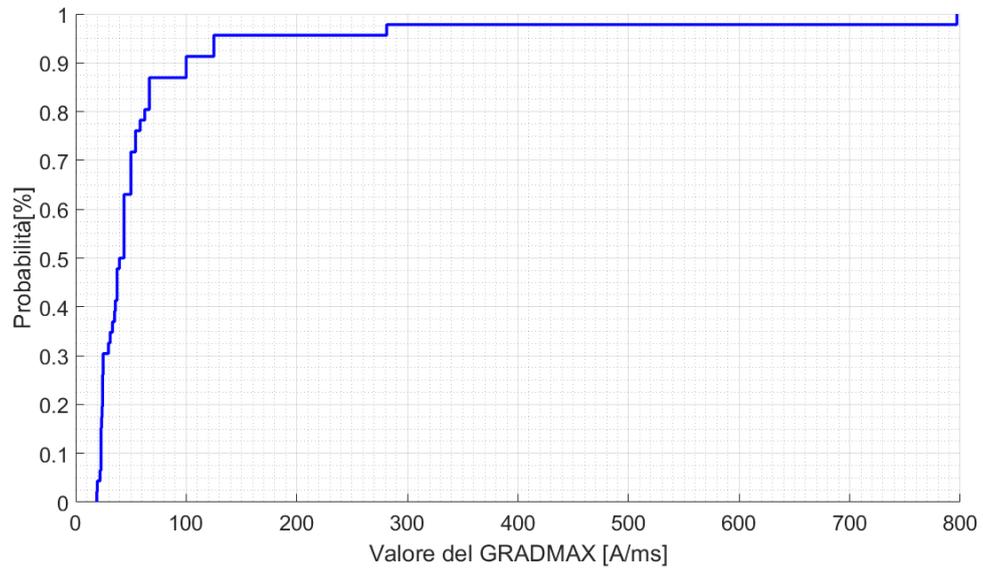


Figura 3.17. Cumulata del gradiente massimo, prove di corto circuito

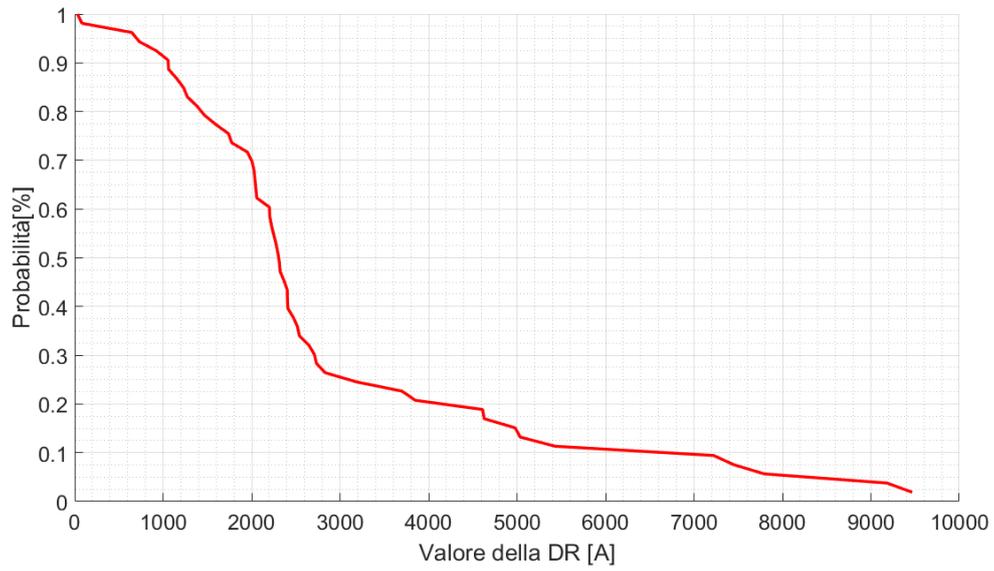


Figura 3.18. Cumulata della differenza di corrente, scatti

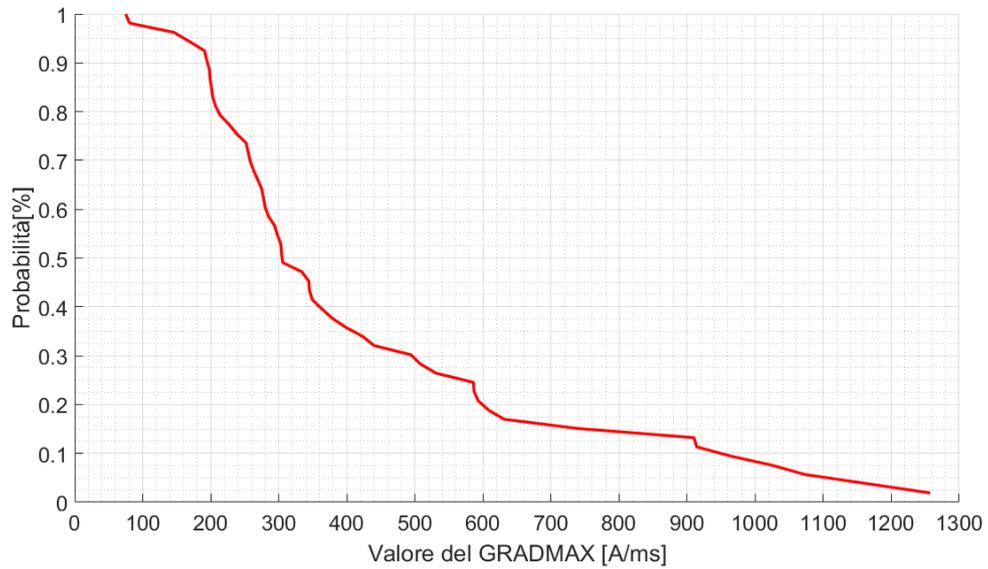


Figura 3.19. Cumulata del gradiente massimo, scatti

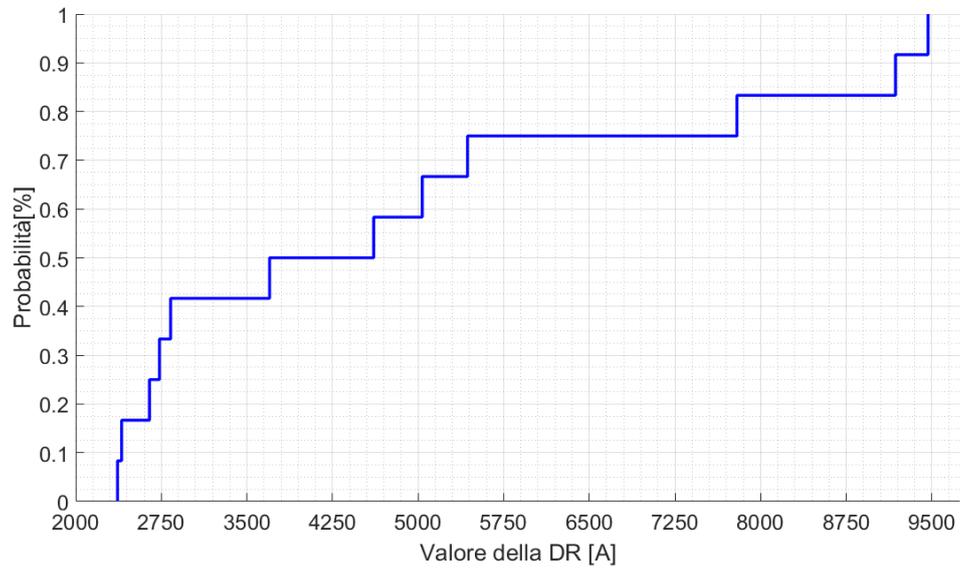


Figura 3.20. Cumulata della differenza di corrente, scatti corretti

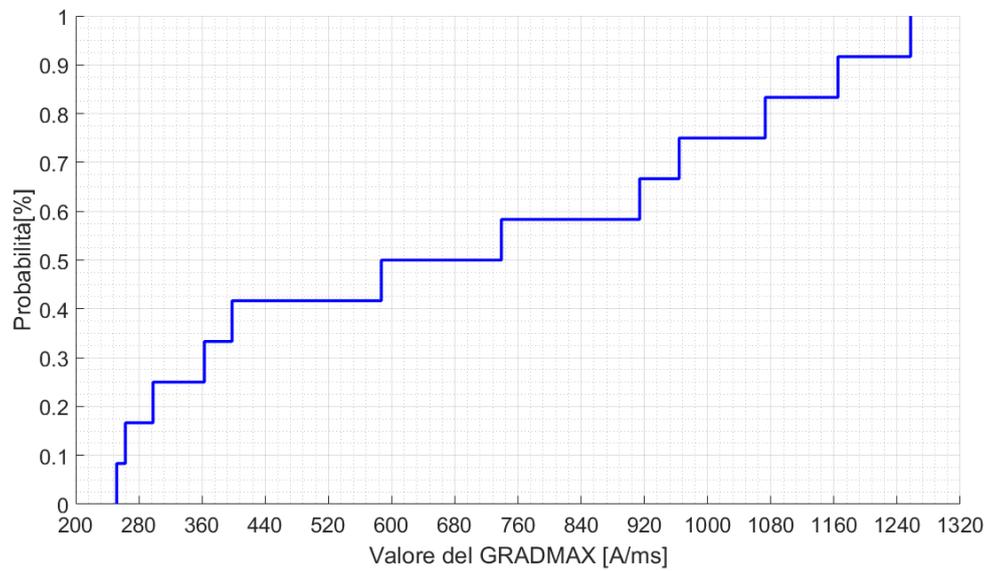


Figura 3.21. Cumulata del gradiente massimo, scatti corretti

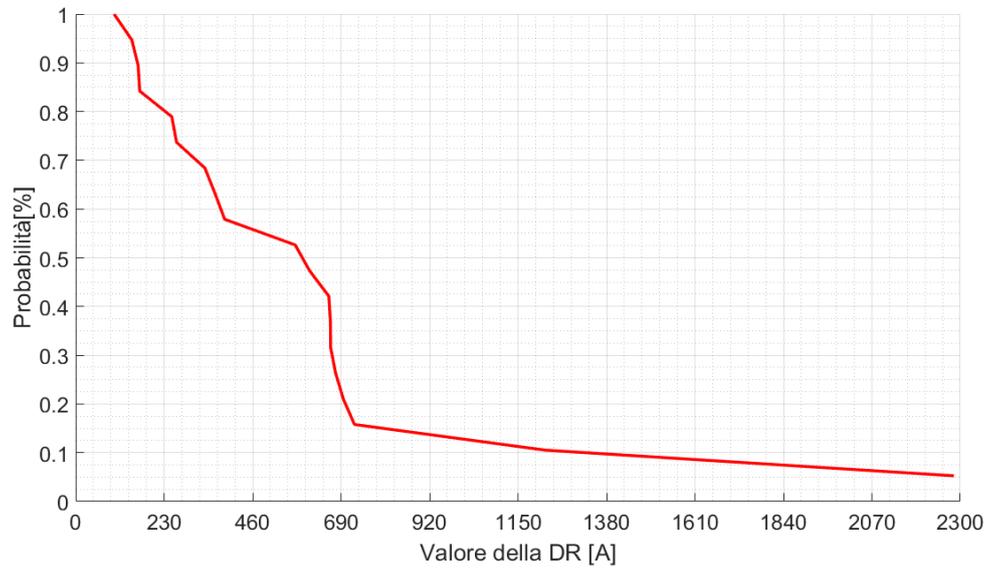


Figura 3.22. Cumulata della differenza di corrente, passaggio sotto al divisore

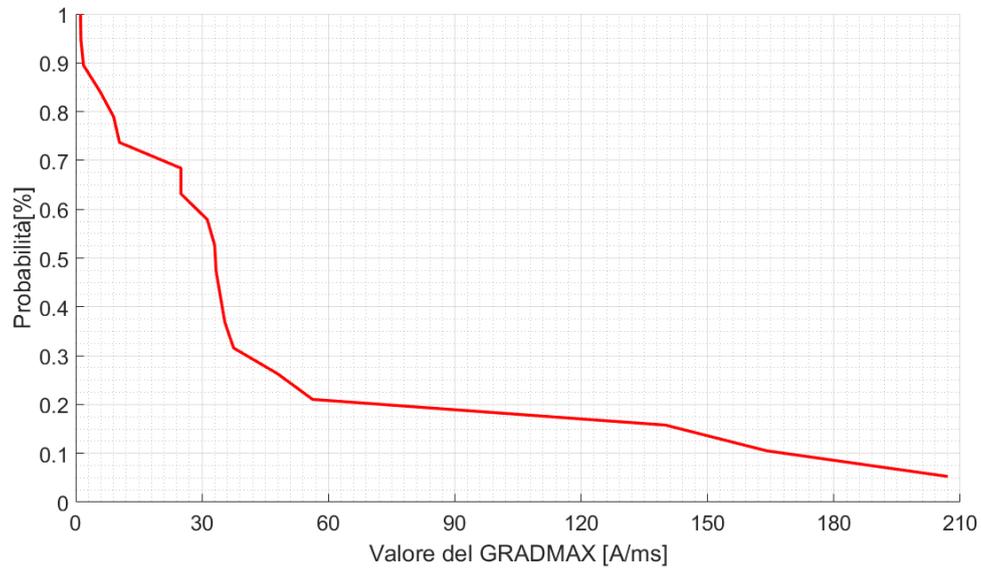


Figura 3.23. Cumulata del gradiente massimo, passaggio sotto al divisore

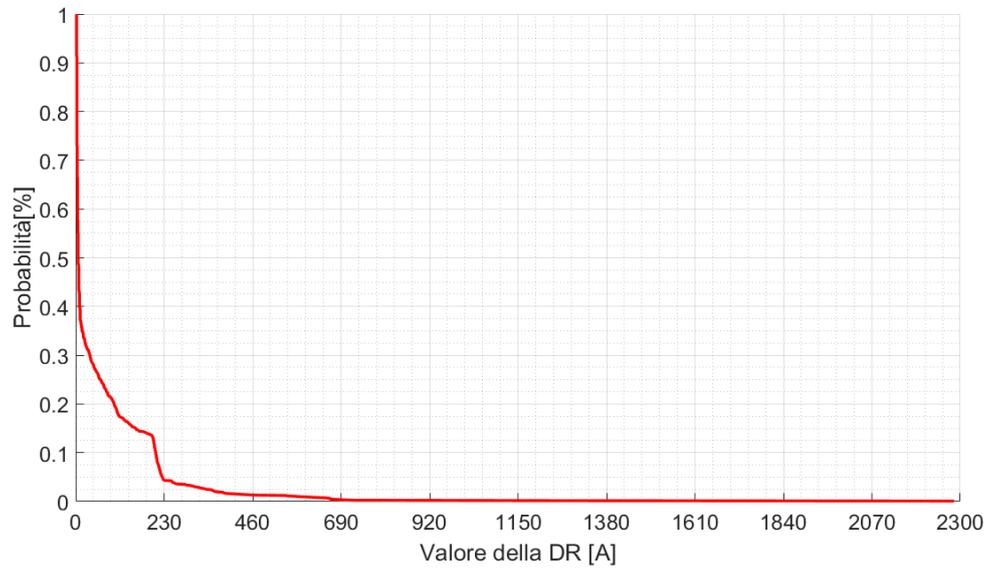


Figura 3.24. Cumulata della differenza di corrente, normale funzionamento

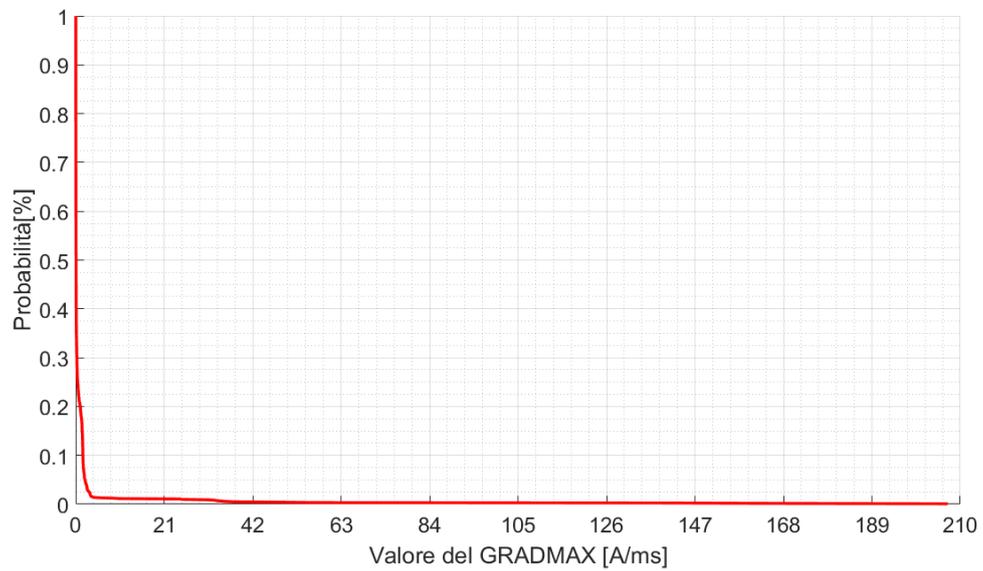


Figura 3.25. Cumulata del gradiente massimo, normale funzionamento

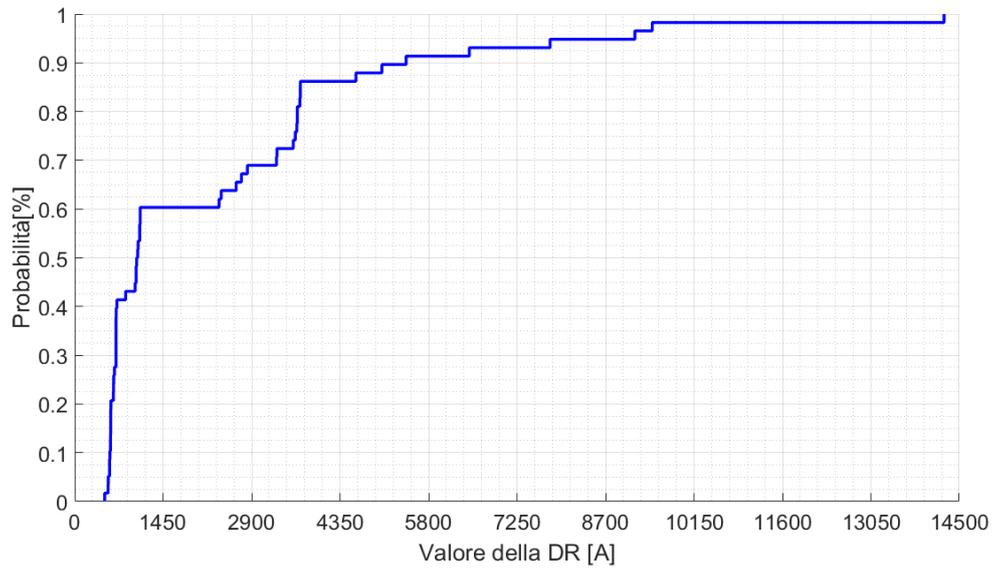


Figura 3.26. Cumulata della differenza di corrente, guasti

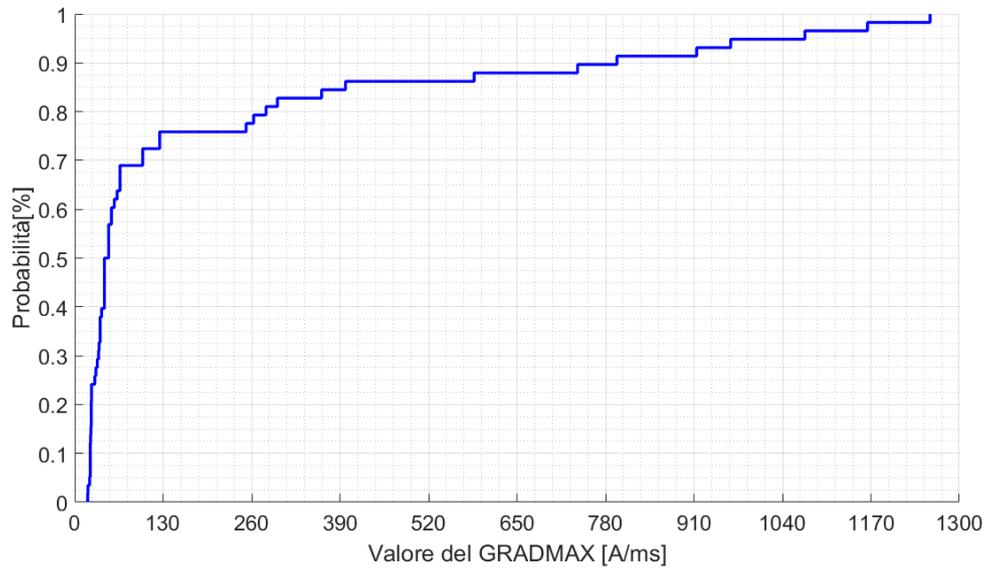


Figura 3.27. Cumulata del gradiente massimo, guasti

Dati letti	MIN-MAX con p[0-1]	MIN-MAX con p[0,1-0,9]
MAX DR 2800	Da 8 A a 250 A	Da 10 A a 110 A
GRADMAX 2800	Da 0,25 A/ms a 4,375 A/ms	Da 0,5 A/ms a 3,25 A/ms
MAX DR 5000	Da 5 A a 580 A	Da 8 A a 260 A
GRADMAX 5000	Da 0,125 A/ms a 2,5 A/ms	Da 0,13 A/ms a 1,15 A/ms
MAX DR 6000	Da 5 A a 650 A	Da 5 A a 210 A
GRADMAX 6000	Da 0,04 A/ms a 1,95 A/ms	Da 0,05 A/ms a 1,475 A/ms
MAX DR corto circuito	Da 500 A a 14250 A	Da 600 A a 3650 A
GRADMAX corto circuito	Da 23 A/ms a 800 A/ms	Da 25 A/ms a 100 A/ms
MAX DR scatti corretti	Da 2300 A a 9500 A	Da 2400 A a 9200 A
GRADMAX scatti corretti	Da 250 A/ms a 1280 A/ms	Da 260 A/ms a 1160 A/ms
MAX DR divisore	Da 100 A a 2300 A	Da 175 A a 1250 A
GRADMAX divisore	Da 8 A/ms a 210 A/ms	Da 8 A/ms a 165A /ms

Tabella 3.2. Riassunto dei valori letti da grafici, dati separati

0,5 mm equivalgono a 19,55 A e da 200 A in poi un quadretto vale 200 A/ms.

Nelle figure 3.28 e 3.29, la probabilità che si realizzino i valori è [0-1]

Si può pensare di cambiare il tipo di lettura dei grafici e leggere i valori che si verificano con una probabilità tra il 10 % e il 90 %. Si ottengono risultati di figura 3.30 nel caso dei DR i cui un quadretto equivale a 200 A fino a 3800 A e poi assume come valori 1000 A(1 quadretto equivale a circa 5 mm). Per le pendenze invece si ottengono i risultati di figura 3.31 in cui si segue la scala della figura 3.29. Un quadretto equivale a 0,5 A/ms fino a 4,5 A/ms e poi assume come valori 100 A/ms a partire da 100 A/ms(1 quadretto equivale a circa 5 mm).

La tabella 3.3 riassume la variazione dei parametri suddivisi nei due gruppi: normale funzionamento e guasto. Si propone di rappresentare i dati derivanti questa tabella per avere una visualizzazione più semplice dei valori derivati dalle cumulate. In figura 3.32 viene visualizzato il rapporto tra i DR dei

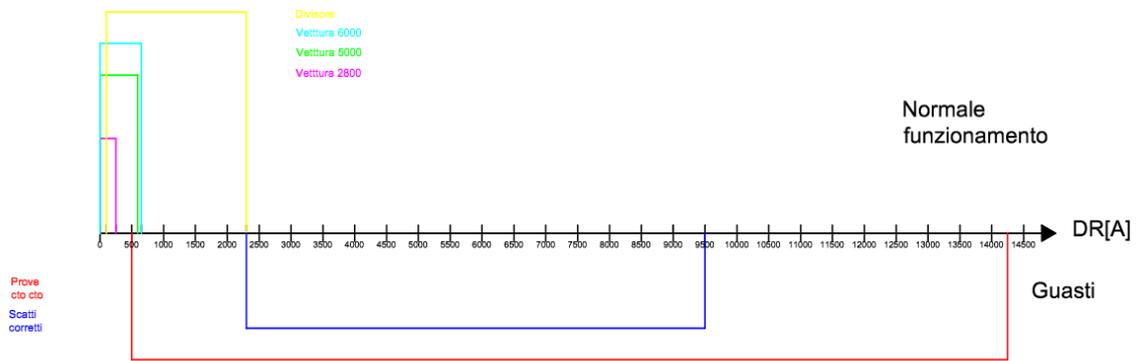


Figura 3.28. Rappresentazione delle massime DR con $p[0-1]$

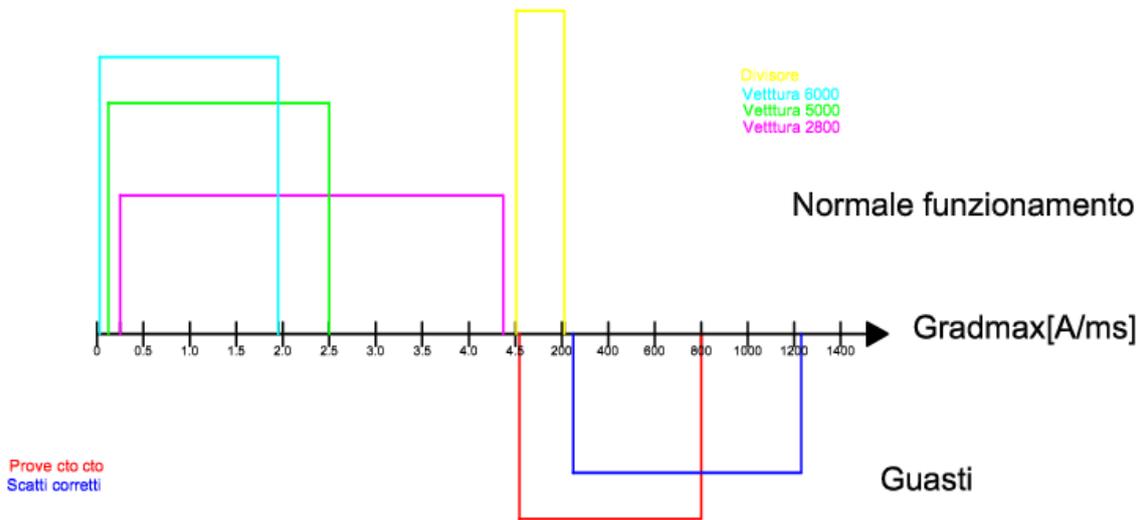


Figura 3.29. Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0-1]$

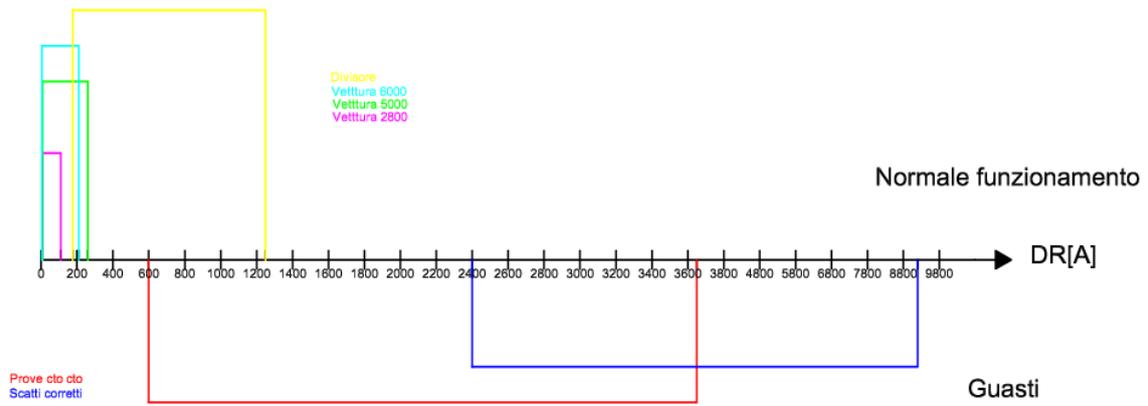


Figura 3.30. Rappresentazione delle massime DR con $p[0,1-0,9]$

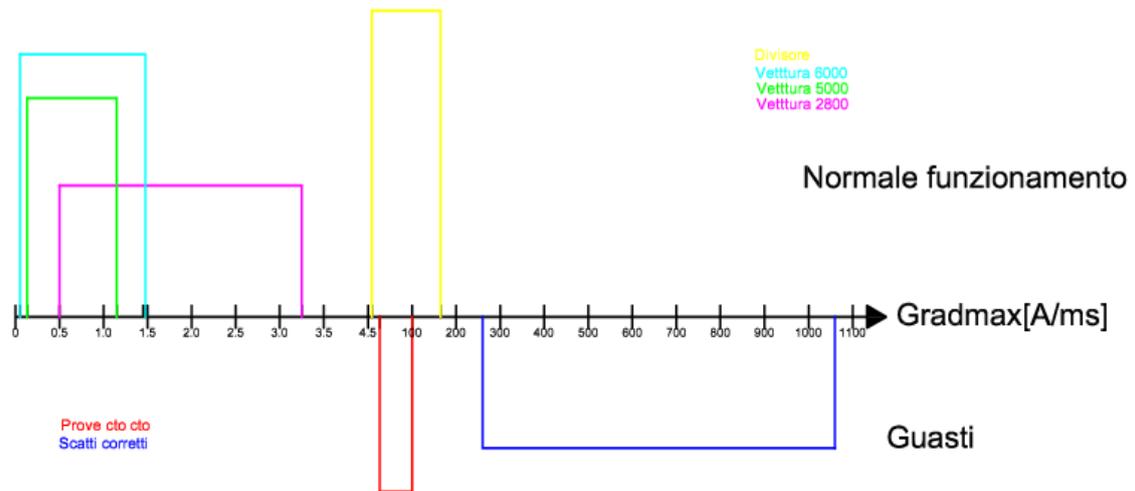


Figura 3.31. Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0,1-0,9]$

Dati letti	MIN-MAX con p[0-1]	MIN-MAX con p[0,1-0,9]
MAX DR normale funzionamento	Da 2,5 A a 2283 A	Da 3,33 A a 208,3 A
GRADMAX normale funzionamento	Da 0,03125 A/ms a 207 A/ms	Da 0,04166 A/ms a 1,72 A/ms
MAX DR guasto	Da 423 A a 14250 A	Da 578,4 A a 5433 A
GRADMAX guasto	Da 20 A/ms a 1257 A/ms	Da 23 A/ms a 796,9 A/ms

Tabella 3.3. Riassunto dei valori letti da grafici, separati in normale funzionamento e guasto

due gruppi considerando una probabilità pari a [0-1], per esigenze di visualizzazione è rappresentata la parte significativa dei due fenomeni. Per quanto riguarda le scale, un quadretto equivale a 500 A (1 quadretto è circa 5 mm). La pendenza viene analizzata in figura 3.33 in cui un quadretto equivale a 200 A/ms (1 quadretto è circa 5 mm) mentre la probabilità che si verifichino è [0-1]. Successivamente si vanno a rappresentare studiando un range di probabilità [0,1-0,9] in figura 3.34, viene rappresentata la relazione tra i DR e un quadretto equivale a 200 A (1 quadretto equivale a circa 5mm), anche in questo caso viene rappresentata la parte più significativa del fenomeno. In figura 3.35 si rappresenta la relazione tra le pendenze e un quadretto equivale a 0,5 A/ms fino a 2,5 A/ms e poi assume come valori 200 A/ms a partire da 200 A/ms (1 quadretto equivale a circa 5 mm). Nel caso delle pendenze, non è stato necessario spezzare le scale ma i fenomeni si possono ben confrontare rappresentando tutti i dati. Si nota che nel caso dei DR, se la probabilità analizzata è pari a [0-1] il fenomeno di guasto e di normale assorbimento si sovrappongono mentre se si riduce la probabilità non creano problemi.

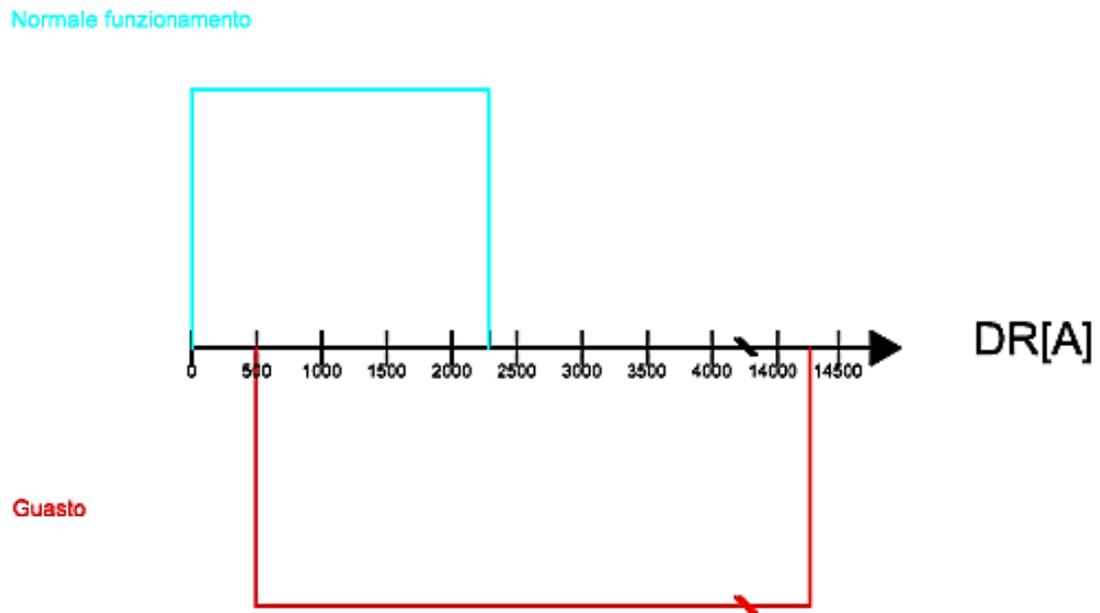


Figura 3.32. Rappresentazione delle massime DR con $p[0-1]$, normale funzionamento e guasto

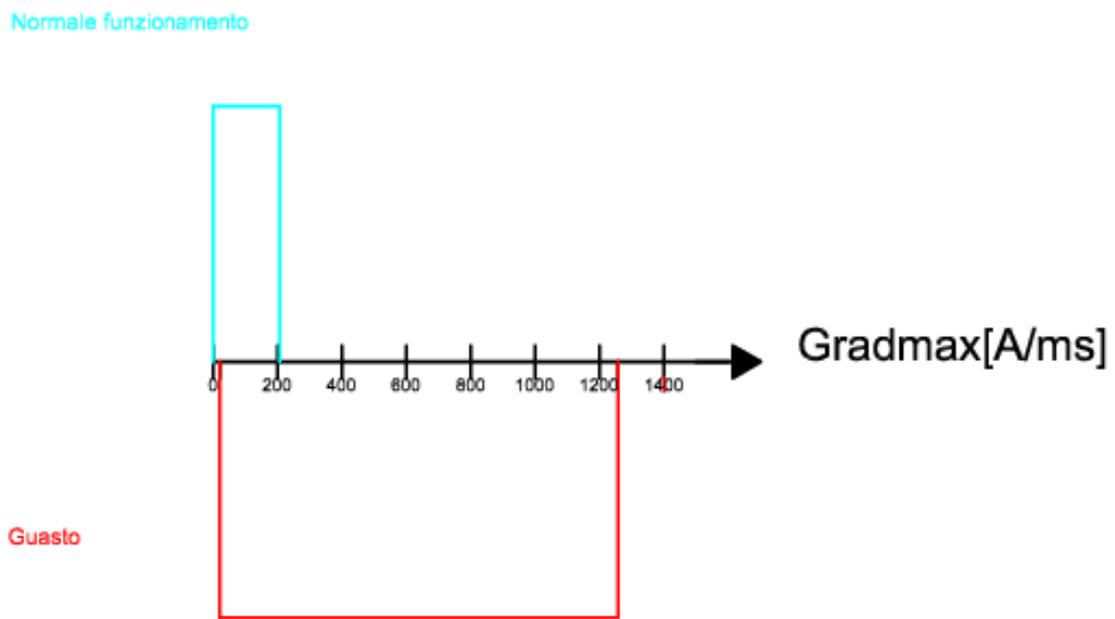


Figura 3.33. Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0-1]$, normale funzionamento e guasto

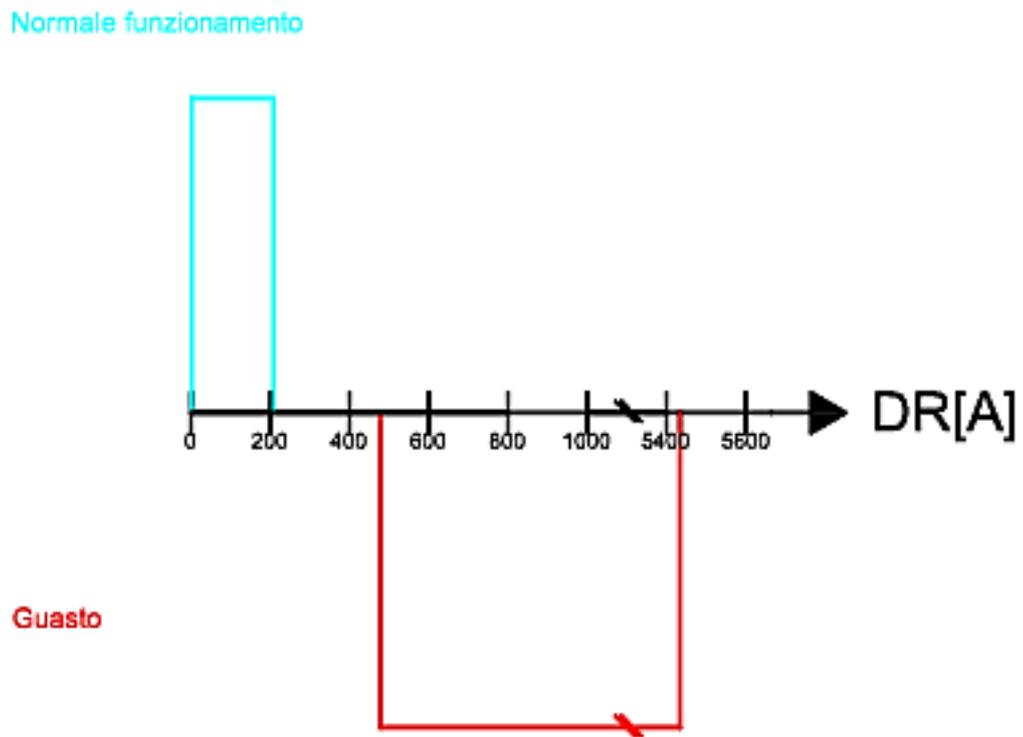


Figura 3.34. Rappresentazione delle massime DR con $p[0,1-0,9]$, normale funzionamento e guasto

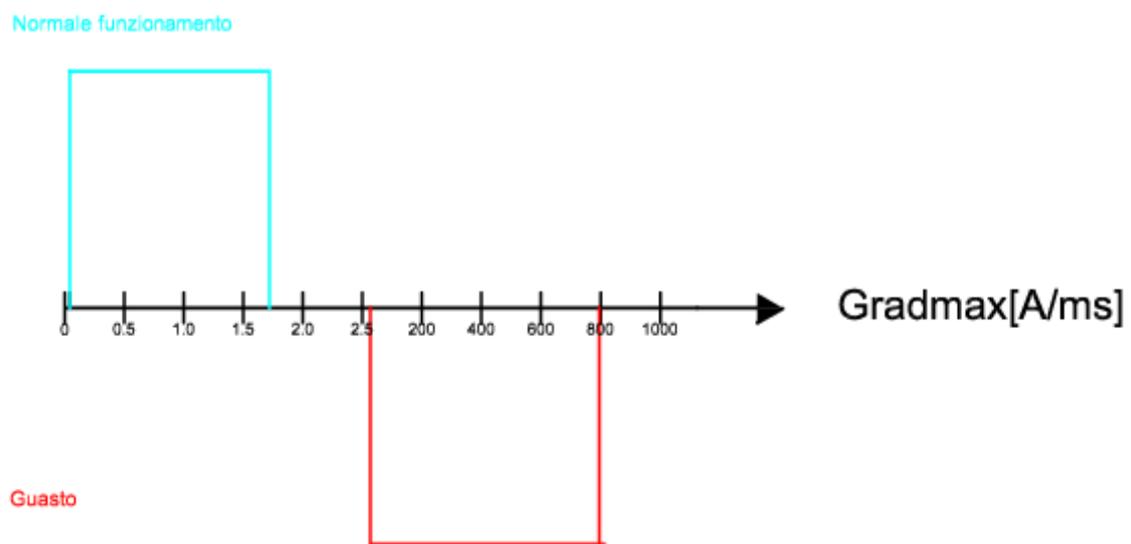


Figura 3.35. Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0,1-0,9]$, normale funzionamento e guasto

3.3 Analisi della zona Duca

Per avere un'idea di come siano le forme d'onda e i valori tipici di DR e GRAD-MAX in una zona durante la giornata, si propone di analizzare i dati che sono stati memorizzati in due giorni di misure nella zona "Duca degli abruzzesi".

Il procedimento adottato è sempre lo stesso, in prima battuta si ricava un'interpolazione ottimale e successivamente si ricavano le cumulate inverse dei DR e GRAD-MAX. I dati derivano da una misura che è stata svolta per una giornata come si nota nella figura 3.36 il campionamento viene svolto a 50 ms. Nella figura è presente solamente una parte della giornata. Si è svolta un'interpolazione a 80 ms e si sono ottenuti i risultati di figura 3.37 in termini di DR, dove si notano valori vicini a 1800 A. La cosa era prevista in quanto durante una giornata possono esserci dei passaggi sotto al divisore di zona. I DR sono molto alti perchè il conducente potrebbe non aver fatto un passaggio come da regolamento. Per quanto riguarda le pendenze si ottengono i risultati di figura 3.38 dove il gradiente massimo non è superiore a 11 A/ms. Questi valori sono piuttosto elevati se confrontati con i valori ottenuti precedentemente nell'analisi degli assorbimenti di singole motrici. Questo potrebbe essere ricondotto ad un passaggio sotto al divisore di zona.

3.4 Analisi della tratta Sassi-Superga

Questa tratta è molto particolare in quanto alimenta un carico a cremagliera. Analizzando le correnti assorbite, si possono notare delle forme d'onda che si ripetono in modo eguale periodicamente, all'interno di una giornata, questo permette di paragonare questa linea ad una tratta ferroviaria.

Si hanno a disposizione dei dati derivanti da 4 ore e 45 minuti di misura. La registrazione era stata svolta con campionamento a 20 ms. La figura 3.39 in cui la

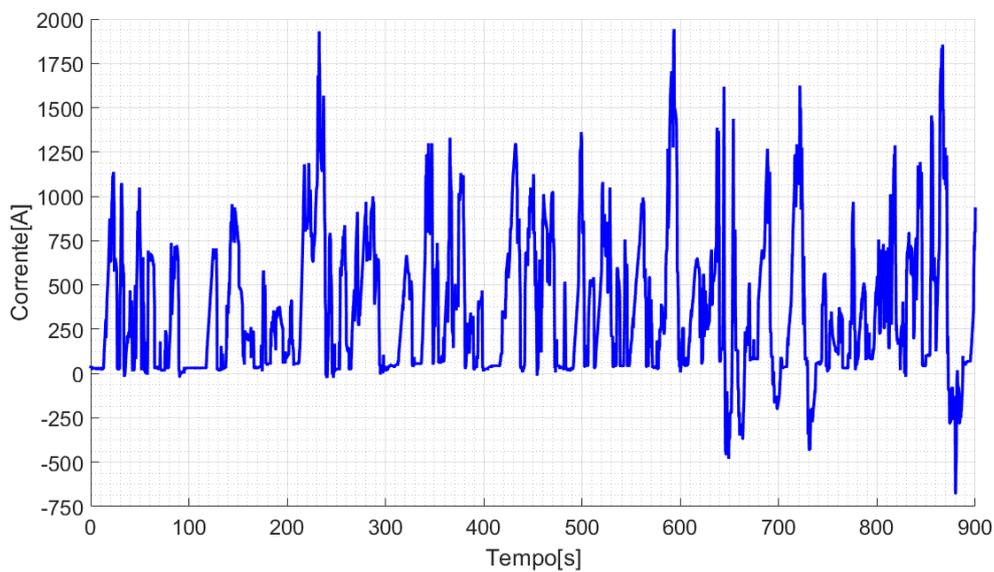


Figura 3.36. Assorbimento giornaliero zona Duca

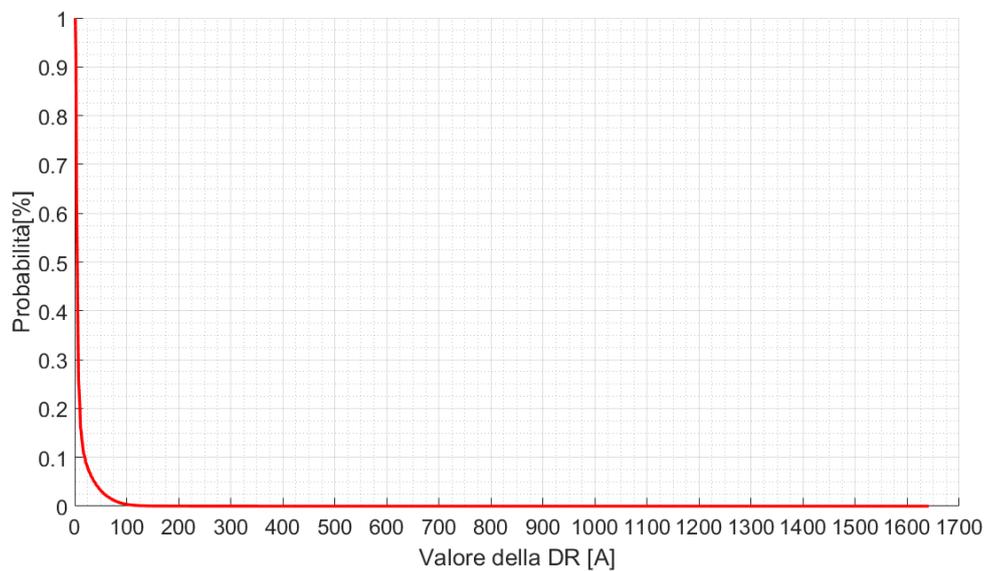


Figura 3.37. Massimi DR in zona Duca degli abruzzesi

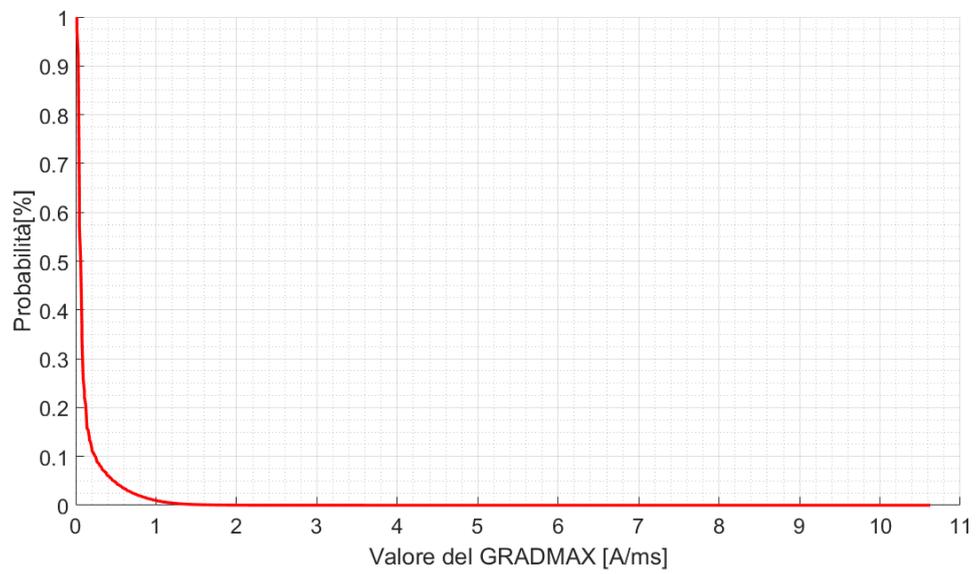


Figura 3.38. Massimi gradienti in zona Duca degli abruzzesi

linea blu è la misura del registratore, la linea rossa rappresenta l'interpolazione a 2 ms mentre la linea verde quella a 80 ms, dimostra che il tempo interpolante di 80 ms è quello migliore. Interpolando a 2 ms (10 volte di meno che il tempo di campionamento pari a 20 ms), il programma aggiunge dei dati in più tra due valori successivi. A questo punto si propone un'analisi della forma d'onda simile a quella svolta quando si studiavano le singole motrici.

Osservando meglio il profilo si nota che la forma di figura 3.39 si ripete per più volte durante la giornata.

Per velocizzare il calcolo dei parametri caratteristici, la forma d'onda viene divisa in più pezzi ognuno dei quali va da un minimo di 6 minuti fino ad un massimo di 115 minuti.

Anche in questo caso si nota che la forma d'onda è formata da più rampe esponenziali che si ripetono. Si caratterizza ogni esponenziale con il suo gradiente iniziale e quello finale (stesso procedimento adottato per le singole motrici) ed per ogni rampa si è memorizzato il massimo DR e il massimo gradiente. Si ottengono i risultati di figura 3.40 per i DR e di figura 3.41 per le pendenze. Se si legge il grafico 3.40 rispetto alla probabilità [0-1] si ottengono come valori di minimo DR 24,17 A e di massimo DR 220,8 se si considera [0,1-0,9] si ottiene un minimo di 30 A e un massimo di 176,9 A. Per quanto riguarda la figura 3.41 se si considero la scala di probabilità [0-1] si ottiene che il massimo gradiente va da 0,3021 A/ms fino a 2,646 A/ms mentre se la scala considerata è [0,1-0,9] si ottiene 0,375 A/ms come valore minimo e come massimo 2,146 A/ms.

Quello che si può notare è che i valori ottenuti sono comunque molto simili al normale assorbimento che abbiamo con singole motrici.

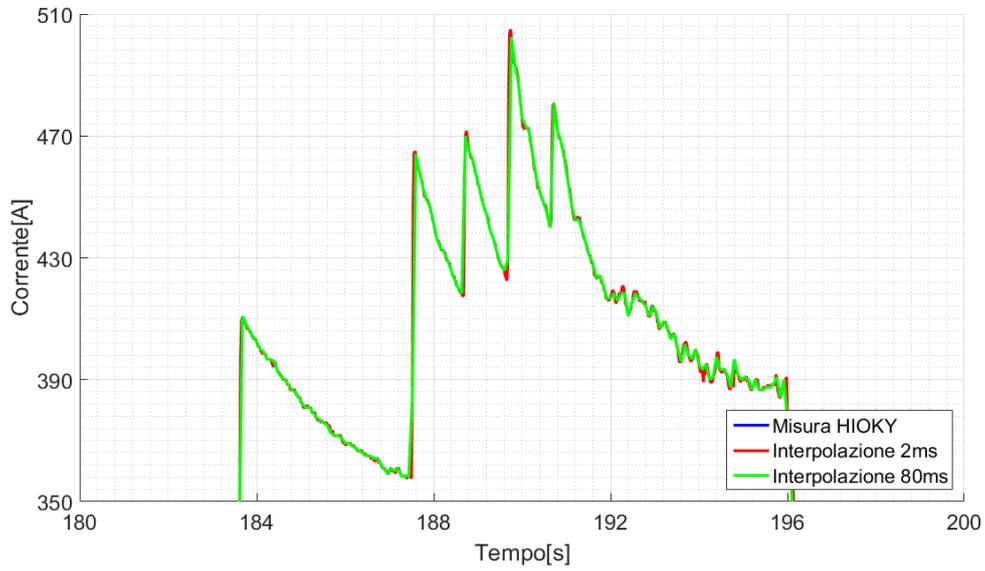


Figura 3.39. Interpolazione assorbimento giornaliero Sassi-Superga

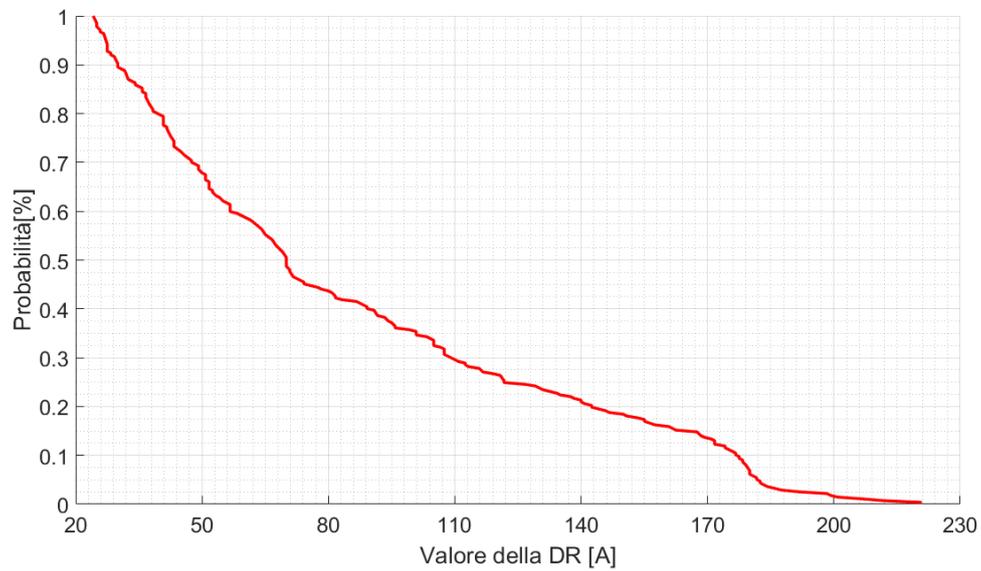


Figura 3.40. Massime differenze di corrente per 4 ore 45 minuti

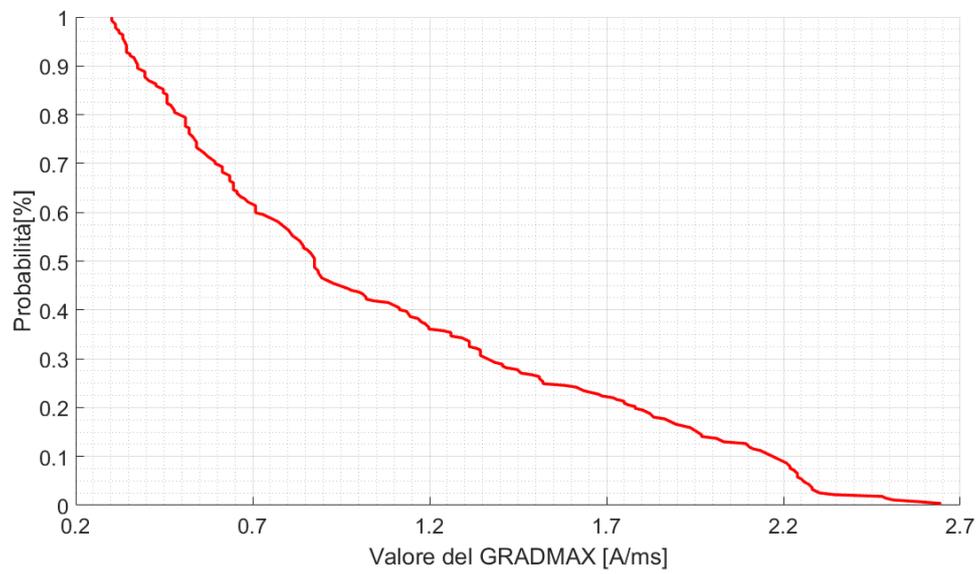


Figura 3.41. Massimi gradienti per 4 ore 45 minuti

3.5 Conclusioni

La seguente analisi ha permesso di capire che al fine della distinzione tra una corrente di guasto e una di normale funzionamento si devono settare al meglio i parametri **Ams**> e **DR**>. In entrambi i casi per capire il valore esatto da settare si deve approfondire quali siano i valori delle pendenze e delle differenze di corrente assunti in condizioni critiche.

Per quanto riguarda le misure giornaliere, siccome le pendenze rilevate con i dati che si hanno a disposizione sono molto basse, si propone di aumentare i dati a nostra disposizione realizzando delle misure con tempo di campionamento più basso.

Capitolo 4

Prove sperimentali in laboratorio sul relè

Delle prove svolte in passato a riguardo del passaggio sotto al divisore di zona, evidenziavano un problema sulla pendenza di corrente misurata dal relè. Questo fenomeno è mostrato in figura 4.1 dove si nota che il dispositivo misura una pendenza più elevata di quella rilevata sullo shunt. Questa misura potrebbe anche essere una delle possibili cause degli scatti intempestivi del relè.

Con le seguenti prove sperimentali si vuole indagare su come esegua la misura il relè e di capire da che cosa dipenda il suo errore nella misurazione delle pendenze. Le possibili cause potrebbero essere due, la prima è un fattore esterno mentre la seconda è un errore di misura interno allo strumento o alla sua catena di misura. Risulta ovvio che se fosse un errore ripetuto e sempre identico, sulle tarature che si proporranno, si potrà prendere un margine di sicurezza che eviti lo scatto intempestivo del dispositivo di protezione.

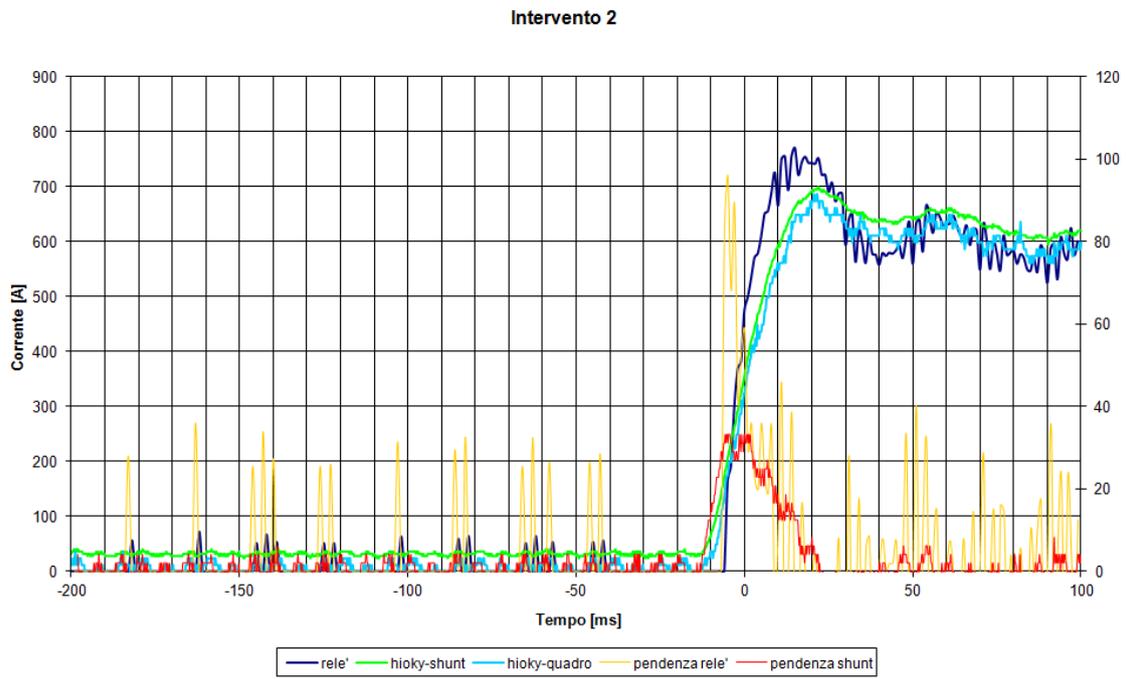


Figura 4.1. Confronto pendenza sullo shunt e sul relè, misure vecchie

4.1 Montaggio del banco di prova

Il primo obiettivo è quello di montare un banco sperimentale che permetta di avere delle condizioni quanto più simili a quelle delle prove svolte in precedenza. Lo schema delle misure svolte in SSE è quello in figura 4.2, si nota che prima del DIA-IGTv è presente una catena di misura composta da: shunt, trasmettitore e ricevitore.

Una prima osservazione riguarda il metodo di simulazione del segnale in ingresso al relè. Nelle vecchie misure si analizzavano dei dati derivanti dal campo e quindi dei valori di corrente molto elevati. In laboratorio non si è in grado di generare valori di corrente così grandi in quanto si utilizza un generatore di funzioni in grado di generare pochi volt. Si sfruttano le caratteristiche degli strumenti a valle dello shunt, simulato con il più basso valore di resistenza che può vedere il generatore di funzioni ossia $1\ \Omega$; si riesce ad emulare al meglio il nostro carico.

Viene allestito il banco di lavoro di figura 4.3 costituito dai seguenti componenti:

- 1 Generatore di funzioni Agilent 3320A.
- 2 Trasmettitore di segnale: preleva il segnale in corrente da uno shunt IP/60 mV. Questo significa che quando nello shunt circola una corrente pari a quella nominale (ossia 4000 A) sui suoi morsetti si misurano 60 mV.
- 3 Ricevitore: preleva il segnale in tensione mediante fibra ottica (per limitare i disturbi). Esso è trasformato in due segnali di corrente i quali stanno in un rapporto di 1:10 significa che è quello vero e proprio mentre l'altro è diminuito di 10 volte. Questo perchè il relè ha due ingressi: uno viene usato fino a correnti pari a $1,5 \cdot I_p$ (nel nostro caso 6000 A) l'altro per correnti maggiori di questo valore. Si utilizzerà sempre quello con rapporto 1 che è contraddistinto da un'uscita $I_s/20$ mA.

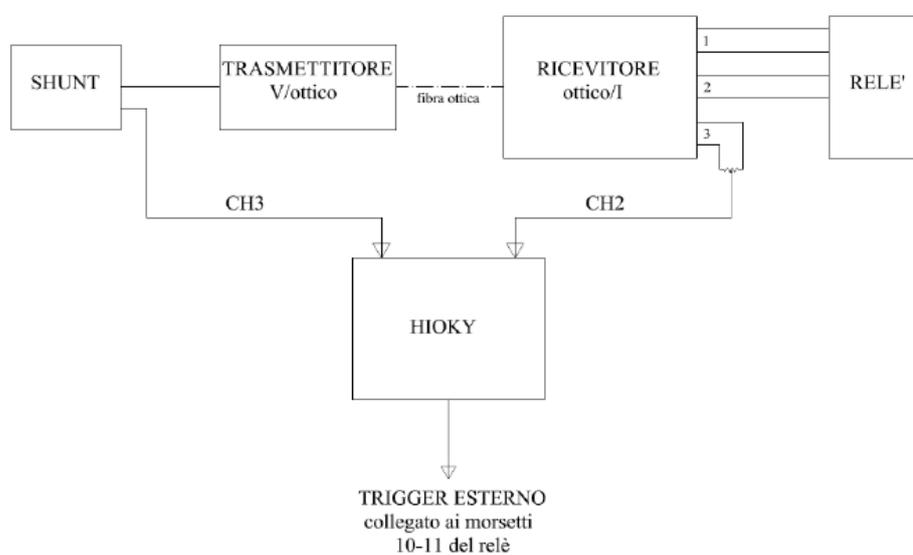


Figura 4.2. Schema di misura delle vecchie misure in SSE

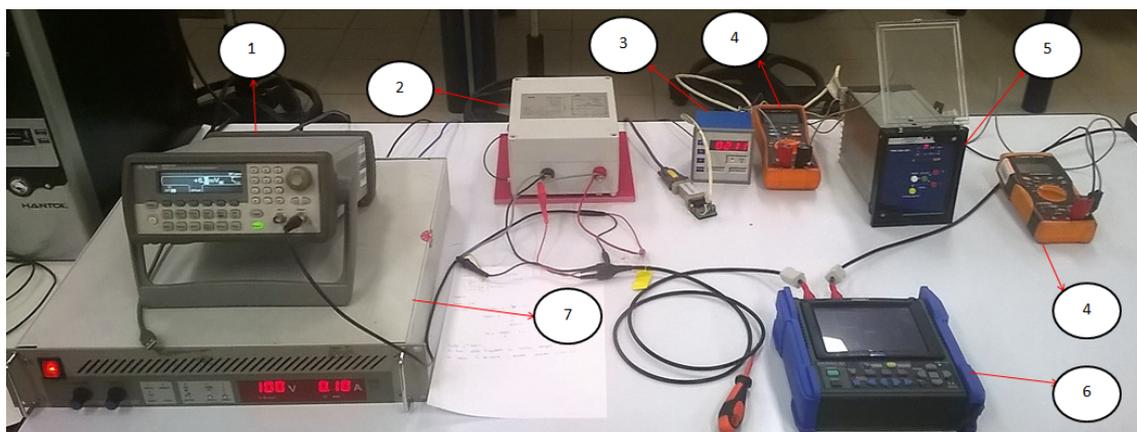


Figura 4.3. Banco di lavoro

Ialimentazione	0,1 A
Valimentazione	100 V

Tabella 4.1. Alimentazione del banco

NOTA: il significato dei due rapporti che si hanno a livello di shunt e di ricevitore si studieranno successivamente.

4 Multimetri: ne vengono utilizzati due, di diversi modelli. Uno è l'AGILENT U1241B mentre l'altro è l'AGILENT U1273A. A seconda delle esigenze possono andare a misurare una tensione o una corrente.

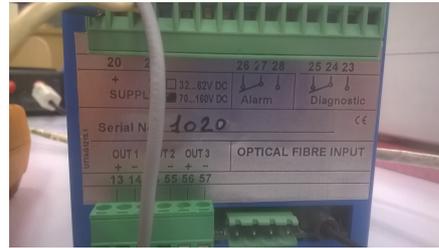
5 Relè DIA-IGTv.

6 Registratore HIOKY memory recorder MR8880-20.

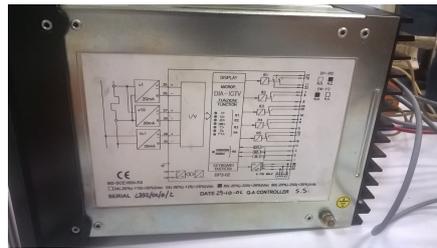
7 Generatore di tensione e corrente continua: questo viene scelto in accordo con i valori di tensioni e correnti di alimentazione (figura 4.4) utilizzabili da trasmettitore-ricevitore-relè. I valori utilizzati sono elencati in tabella 4.1.



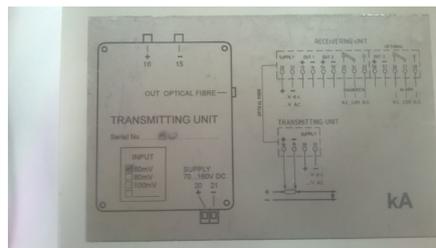
(a) Alimentatore



(b) Ricevitore



(c) Relè



(d) Trasmettitore

Figura 4.4. Caratteristiche componenti alimentati

Si propone l'analisi di quattro problemi:

- 1 Scelta della resistenza di shunt.
- 2 Caratterizzazione della resistenza interna del relè.
- 3 Misura delle tensioni in ingresso allo shunt e del relè.
- 4 Confronto delle correnti misurate sullo shunt e sul relè.

Rmax	10,1 kΩ	Vmax	9,950 V
Rmin	1 Ω	Vmax	196,1 mV

Tabella 4.2. Caratteristiche del generatore di segnale

4.2 Scelta della resistenza di shunt

Come detto, non si è in grado di generare delle correnti dell'ordine di grandezza di quelle assorbite dai tram. Il primo problema è quello di scegliere in modo adeguato la resistenza in ingresso al trasmettitore.

Tutto deve essere in accordo con le caratteristiche del generatore di segnale ricordando che viene generato un semplice segnale in continua. Per scegliere la resistenza di shunt si cercano il valore di resistenza minima e massima che il generatore può leggere in uscita quando genera un segnale in DC (tabella 4.2).

Si nota che fornendo in ingresso al trasmettitore un segnale in DC non si ottengono valori di corrente pari a 4000 A tuttavia le caratteristiche del circuito a monte, ossia di ricevitore e trasmettitore, con determinati coefficienti correttivi (che si vedranno in seguito), permettono di ottenere le correnti volute.

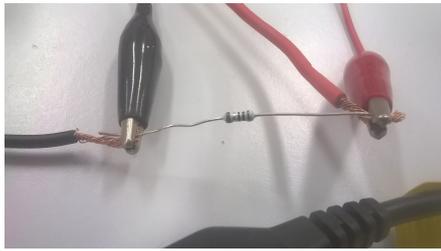
Come prima analisi si prendono due resistenze diverse e si determina come varia la corrente letta dal ricevitore variando la tensione fornita al trasmettitore.

Si deve scegliere una resistenza in ingresso al trasmettitore tale per cui venga rispettata la relazione della resistenza di shunt (formula 4.1).

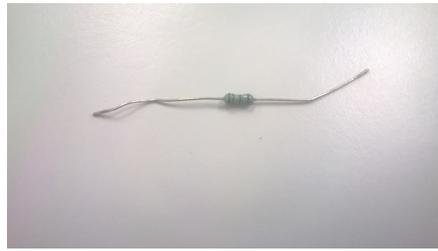
$$R_s \rightarrow IP/60mV \quad (4.1)$$

Questa relazione si interpreta come segue:

"quando nella R_s (resistenza di shunt) transita una corrente pari a quella nominale (4000 A) allora la tensione su di esso è pari a 60 mV". Si testano due resistenze di valore diverso (figura 4.5). Il collegamento utilizzato durante questa fase viene mostrato in figura 4.6.



(a) 1Ω



(b) 154Ω

Figura 4.5. Resistenze di shunt testate

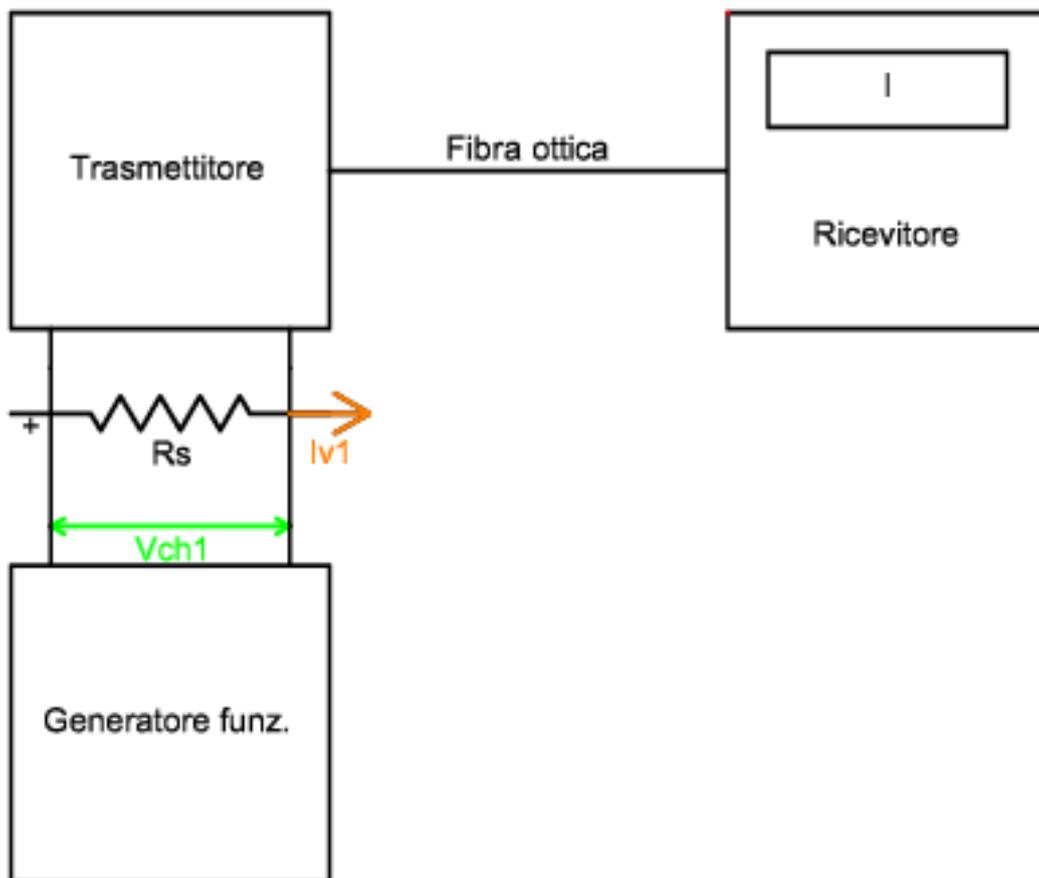


Figura 4.6. Schema di misura per il test delle resistenze

Vgen[mV]	I[A]
116,4	0
118,3	156
118,4	167
118,5	179
118,6	189
118,7	190
118,8	200
118,9	211
119	223
130	1163
140	2013
150	2876
160	3740

Tabella 4.3. Resistenza da 154 Ω

Utilizzando la resistenza da 154 Ω sul display del ricevitore si legge la corrente di tabella 4.3. La tensione che viene riportata accanto a questa corrente è quella impostata sul generatore di funzioni. Come si nota, la resistenza va ad introdurre un'offset a livello degli 0 V. In questo caso, per eliminarlo si devono fornire 116,4 mV.

Si nota anche che la scala sfruttata è:

$$\Delta V = 160 - 116,4 = 43,6mV$$

La risoluzione non è elevatissima perchè variando di 0,1 mV la corrente che viene letta dal ricevitore varia anche di 10 A.

Se si cambia la resistenza e se ne utilizza una da 1 Ω si ottengono i risultati di tabella 4.4. Anche in questo caso si appuntano i valori della corrente letta sul display del ricevitore e la tensione impostata sul generatore di funzioni.

Si nota che l'offset prodotto è di soli 3 mV a livello dello 0 V. Per quanto riguarda

Vgen[mV]	I[A]
3	0
5,1	0
5,2	158
5,3	164
5,4	172
5,5	178
5,6	184
5,7	191
5,8	197
5,9	205
6,0	211
6,1	218
6,2	224
10	478
50	3155
60	3824
62	3960
64	4094

Tabella 4.4. Resistenza da 1 Ω

la scala che si sfrutta è maggiore del caso precedente:

$$\Delta V = 64 - 3 = 61mV$$

La risoluzione è molto più grande perchè variando di 0,1 mV si ottiene una variazione più piccola di circa 6 A. Inoltre a differenza della resistenza da 154 Ω si nota che è rispettata la relazione IP/60 mV infatti a 60 mV viene misurata una corrente quasi pari a 4000 A a differenza della resistenza precedente in cui si otteneva la IP a 160 mV.

Parallelamente alla scelta dello shunt si è svolta una prova di come misurano due diversi canali del registratore. L'errore sulle misure svolte in SSE può essere portato da una diversa rilevazione di due canali dell'HIOKY. Come punti di misura (figura 4.7) si sono scelti l'ingresso del trasmettitore e lo shunt in quanto su questi due elementi dovrebbe esserci la stessa tensione.

Per verificare che i due canali misurassero la stessa tensione si è svolta una registrazione di 50 ms; la prova è stata svolta fornendo per pochi secondi dei valori costanti di tensione a partire da 3 mV fino a 50 mV. I risultati ottenuti sono mostrati in figura 4.8. Si nota che le misure dei due canali sono sovrapposte, segno che l'HIOKY non introduce un errore nella misura.

Una seconda cosa che si nota è che le misure sono tutte diminuite di 3 mV che è proprio il valore dell'offsett introdotto dallo shunt. Questa si ripete sia sullo shunt sia sul trasmettitore.

4.3 Misura della resistenza interna del relè

Al fine di verificare che la resistenza interna nominale del relè sia simile a quella reale, si propone la sua misura. Mediante metodo volt-amperometrico, si misura la

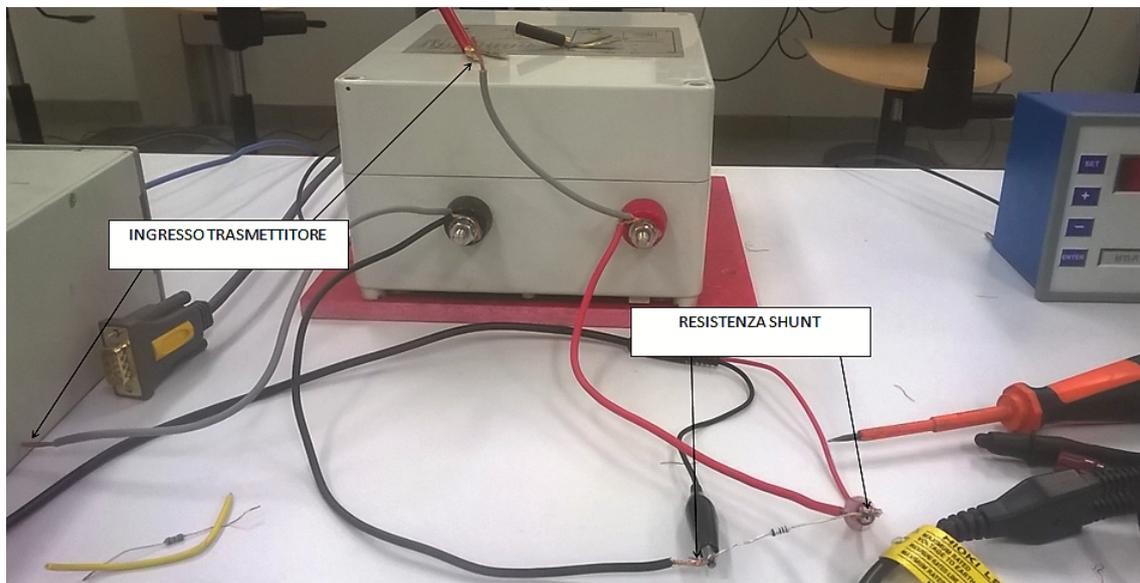


Figura 4.7. Collegamento trasmettitore-shunt

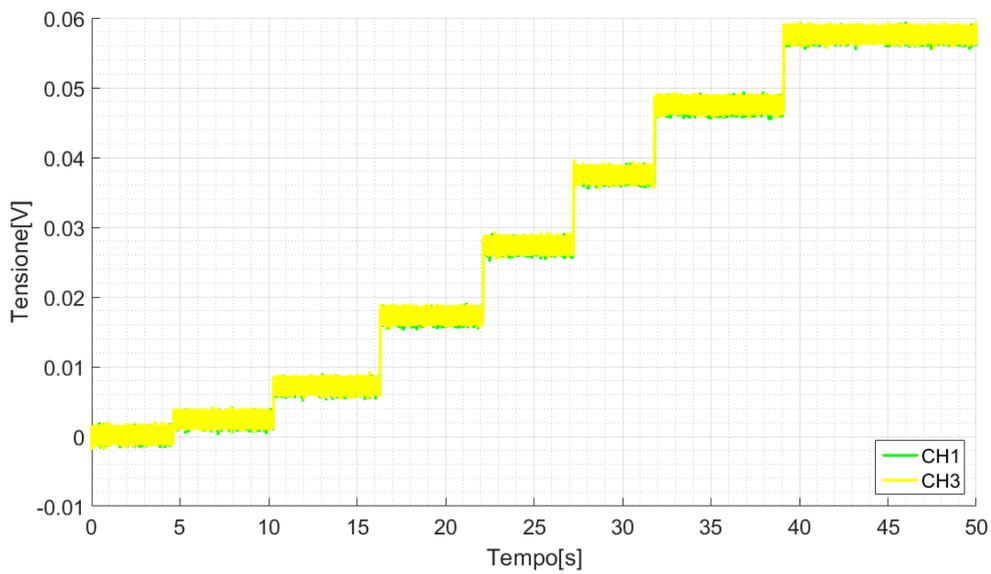


Figura 4.8. Registrazione confronto canali

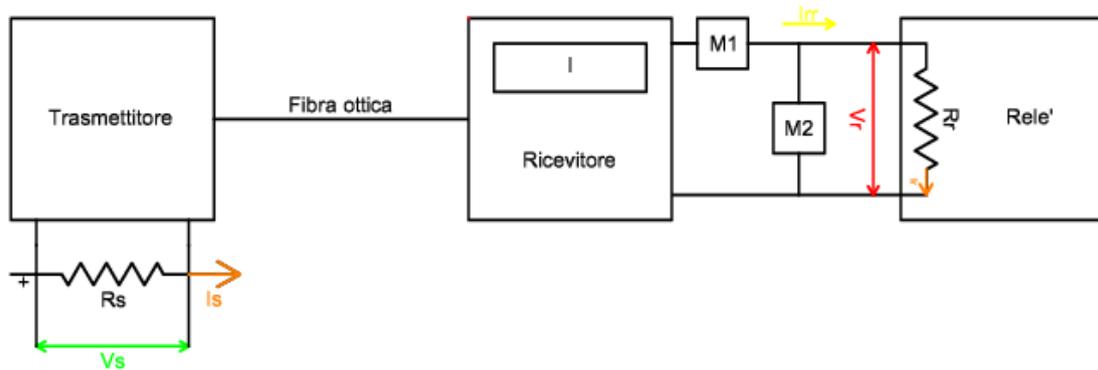


Figura 4.9. Schema collegamento per la misura della resistenza interna del relè

corrente tra ricevitore e relè (I_{rr}) e la tensione su di esso (V_r). Lo schema adottato è mostrato in figura 4.9. I risultati ottenuti sono mostrati in tabella 4.5. Si ottiene una resistenza media di $162,7126 \Omega$ che si approssima a 163Ω . La resistenza interna del relè che si ottiene dalle misure è dunque diversa da quella letta sui data-sheet (150Ω).

4.4 Misura delle tensioni in ingresso allo shunt e del relè

A questo punto si vuole verificare che i segnali misurati sullo shunt siano gli stessi che vengono rilevati dal relè. Si cerca di riproporre la situazione che si ha in cabina presentata in figura 4.10 dove si nota che prima del DIA-IGTv è presente una catena in cui si preleva il segnale sullo shunt e lo si porta ad un trasmettitore collegato ad un ricevitore mediante fibra ottica. Utilizzando due multimetri si vuole:

- 1 Verificare che la corrente sullo shunt (I_s) sia uguale o simile alla corrente letta sul display (I).

Vgen[mV]	Vr[V]	Ir[A]	Rr[Ω]
5,2	0,1123	0,0006889	163,0206
5,3	0,1178	0,0007231	162,9097
5,4	0,1230	0,0007563	162,6339
5,5	0,1284	0,0007901	162,5111
5,6	0,1349	0,0008232	163,8727
5,7	0,1395	0,0008570	162,7771
5,8	0,1449	0,0008903	162,7541
5,9	0,1501	0,0009242	162,4107
6,0	0,1556	0,0009566	162,6594
6,1	0,1613	0,0009913	162,7156
6,2	0,1665	0,0010300	161,6505
10	0,3734	0,0023000	162,3478
15	0,6457	0,0039700	162,6448
20	0,9179	0,0056400	162,7482
25	1,1890	0,0073100	162,6539
30	1,4590	0,0089750	162,6539
35	1,7340	0,0106600	162,5627
40	2,0070	0,0123300	162,6642
45	2,2790	0,0140100	162,7737
50	2,5510	0,0156500	163,0032
55	2,8562	0,0173500	164,6225
60	3,096	0,0190300	162,6905

Tabella 4.5. Misura della resistenza interna del relè

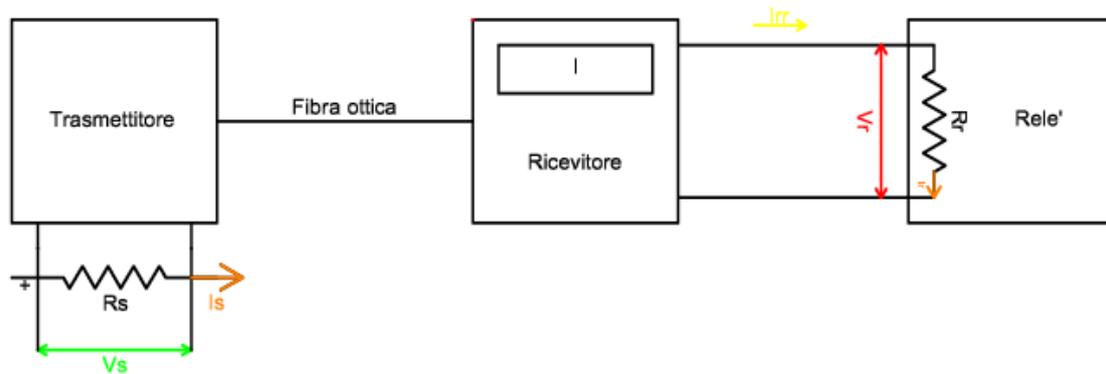


Figura 4.10. Schema di misura in cabina

2 Verificare che la corrente che si ha sullo shunt (\$I_s\$) sia uguale o simile alla corrente che abbiamo sul relè (\$I_r\$).

Lo schema adottato è mostrato in figura 4.11. Prima di elencare i risultati è bene fare due parole a riguardo delle misure che si hanno sullo shunt e in uscita dal ricevitore.

Per quanto riguarda la corrente sulla resistenza di shunt (\$I_s\$), si adotta uno shunt IP/60 mV che serve a trasformare il segnale in tensione in un segnale in corrente pertanto si introducono dei coefficienti correttivi:

$$60mV : IP = V_s : I_s \quad (4.2)$$

Siccome \$IP=4000\$ A e \$V_{ch1}\$=misurata; si ottiene \$I_{v1}\$ come:

$$I_s = V_s \cdot (IP/60mV) \rightarrow I_s = V_r \cdot 66667$$

Lo shunt non è l'unico componente che va ad introdurre un coefficiente correttivo sulla misura. Se si leggono i dati di targa del ricevitore (figura 4.12), si nota che questo componente è dotato di due output:

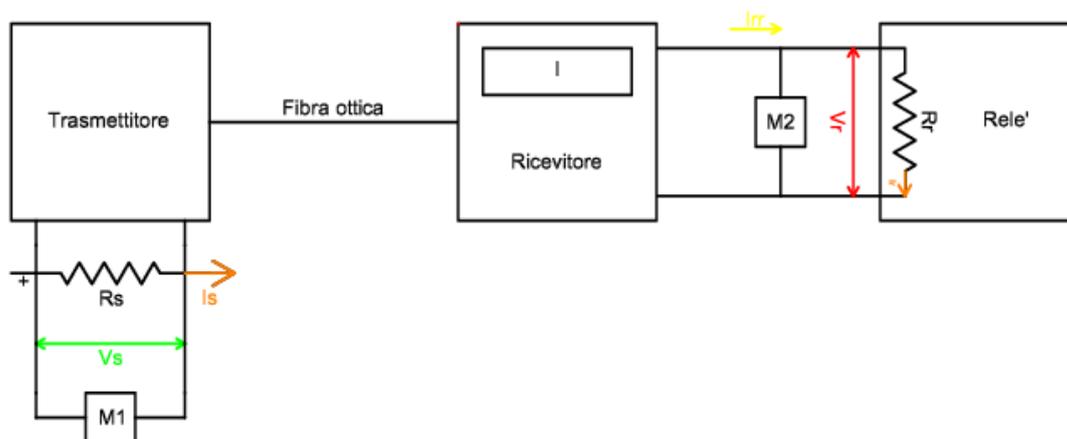


Figura 4.11. Schema di misura per la verifica delle tensioni su shunt e relè

1 OUT 1: fornisce su di una scala 0-20 mA il segnale di corrente amplificato di 10 volte.

2 OUT 2: fornisce su di una scala 0-20 mA il segnale di corrente non amplificato.

Queste due uscite sono collegate ai due ingressi del relè. In particolare l'OUT1 è sfruttato quando il segnale di corrente supera $1.5 \cdot IP$ (6000 A). Siccome il relè è settato per scattare con una $I >$ pari a 4000 A si utilizzerà solamente OUT1.

Preliminarmente si calcola la I_{rr} come:

$$I_{rr} = V_r / R_r \quad (4.3)$$

Dove V_r =misurata R_r =misurata.

Successivamente si ricava la corrente I_r che legge il relè perchè la I_{rr} è riferita alla scala del ricevitore (20 mA) mentre la I_r è riferita alla scala reale (4000 A). Si ottiene quindi un fattore correttivo:

$$I_{rr} : 20mA = I_r : IP \quad (4.4)$$

Siccome $IP=4000$ A e I_{rr} =ricavata prima; si ottiene I_r come:

$$I_r = I_{rr} \cdot (IP/20mA) \rightarrow I_r = 200000 \cdot I_{rr}$$

In tabella 4.6 si elencano i risultati ottenuti. Le grandezze I_s e I_{rr} sono già comprensive dei fattori correttivi. V_s e V_r sono lette sui multimetri. I è la corrente che si legge sul display del ricevitore. Come si nota, la corrente aspettata sullo shunt (I_s) si avvicina ad un valore uguale alla corrente che viene letta sul display (I) tanto più ci si avvicina al fondo scala (60 mV).

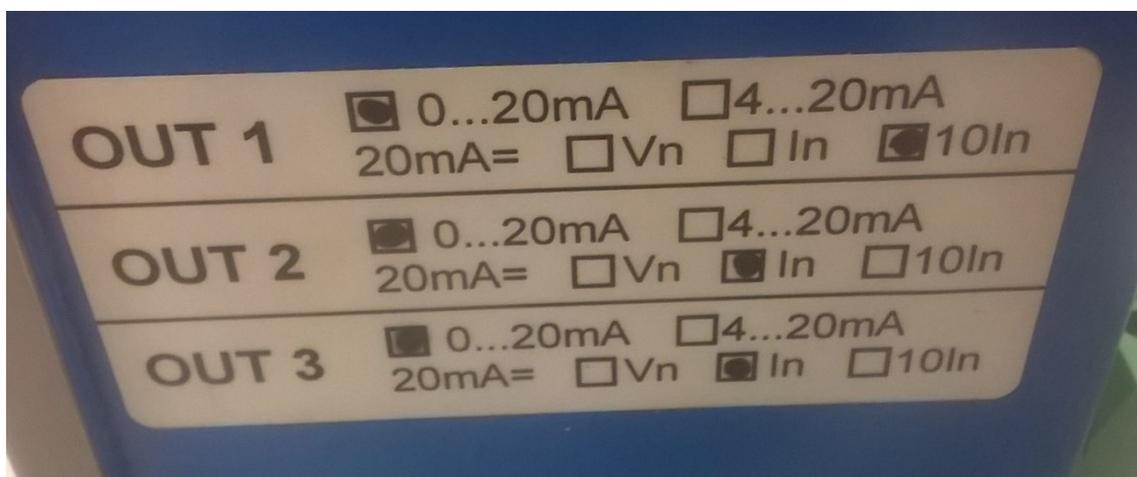


Figura 4.12. Dati di targa del ricevitore

Vgen[mV]	Vs[mV]	Is[A]	I[A]	Vr[mV]	Irr[A]	Ir[A]
3	0	0	0	0	0	0
5,2	2,1	140	158	0,1129	0,000694	138,772
5,3	2,3	153,333	164	0,1185	0,000728	145,655
5,4	2,4	160	172	0,1238	0,000761	152,170
5,5	2,5	166,667	178	0,1294	0,000795	159,053
5,6	2,6	173,333	185	0,1359	0,000835	167,043
5,7	2,7	180	191	0,1403	0,000862	172,451
5,8	2,8	186,667	198	0,1456	0,000895	178,966
5,9	2,9	193,333	205	0,1512	0,000929	185,849
6,0	3,0	200,0	211	0,1565	0,000962	192,364
6,1	3,1	206,667	218	0,1620	0,000996	199,124
6,2	3,2	213,333	224	0,1675	0,001029	205,884
10	7	466,667	478	0,3743	0,0023	460,075
15	12	800,0	813	0,6467	0,003974	794,898
20	17,1	1140,0	1147	0,9190	0,005658	1129,599
25	22	1466,667	1481	1,1912	0,007321	1464,176
30	27,2	1813,333	1816	1,4691	0,009029	1805,760
35	32,2	2146,667	2150	1,7423	0,010708	2141,567
40	37,2	2480,0	2485	2,0081	0,012341	2468,278
45	42,3	2820	2819	2,2808	0,014017	2803,471
50	47,3	3153,333	3154	2,5531	0,015691	3138,171
55	52,3	3486,667	3490	2,8257	0,017366	3473,241
60	57,2	3820	3824	3,098	0,01904	3807,941

Tabella 4.6. Confronto tra la misura sullo shunt e sul relè

4.5 Confronto delle correnti misurate dal relè e sullo shunt

Si vogliono confrontare l'andamento temporale delle correnti misurate sullo shunt e dal relè. Ci si aspetta che i due andamenti siano identici o quantomeno simili.

L'analisi viene divisa in due parti:

- 1 Caratterizzazione dell'errore introdotto dalla catena di misura.
- 2 Confronto tra segnale reale e segnale misurato dal relè.

4.5.1 Caratterizzazione dell'errore introdotto dalla catena di misura

Obiettivo: si tratta di andare a quantificare gli errori introdotti dalla catena di misura in due condizioni:

- 1 A REGIME: come si nota dalla figura 4.13, la catena di misura sembrerebbe introdurre delle oscillazioni in uscita dal ricevitore (linea rossa) e sulla misura del relè (linea blu).
- 2 SUL GRADIENTE INIZIALE: anche in questo caso (figura 4.14), la catena sembrerebbe introdurre delle oscillazioni di cui si vuole valutare la frequenza e il valore medio.

A tale fine vengono misurate le seguenti grandezze (figura 4.15):

- a) **I_s** : corrente sullo shunt
- b) **I_{rr}** : corrente tra relè e shunt.
- c) **I_r** : corrente misurata dal relè.

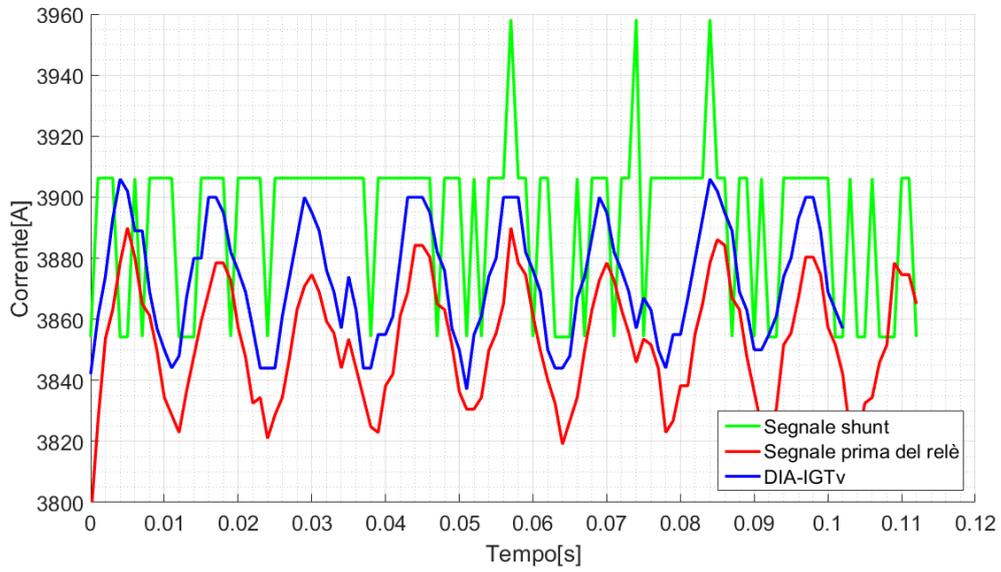


Figura 4.13. Andamento delle correnti a regime

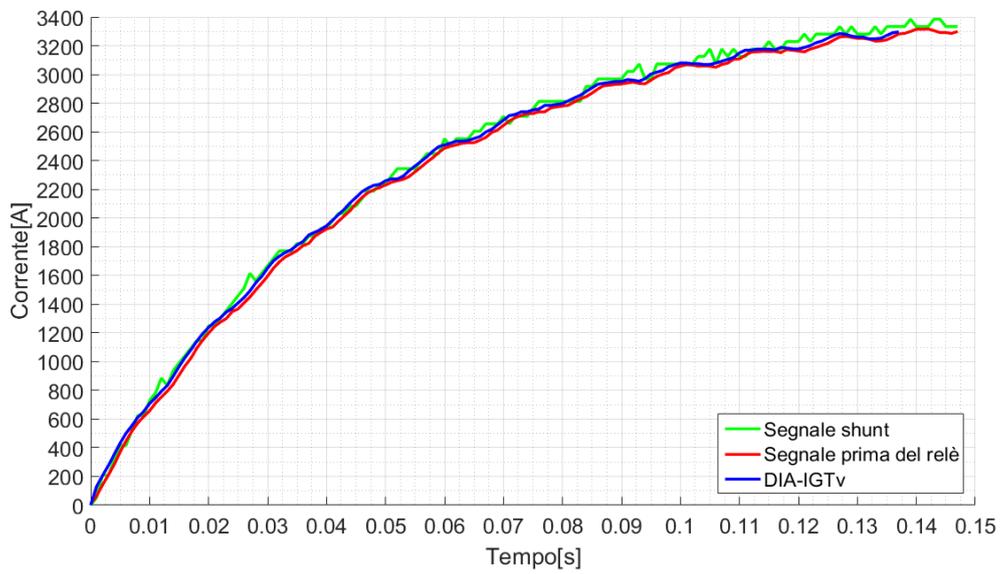


Figura 4.14. Andamento delle correnti con esponenziale in ingresso alla catena di misura

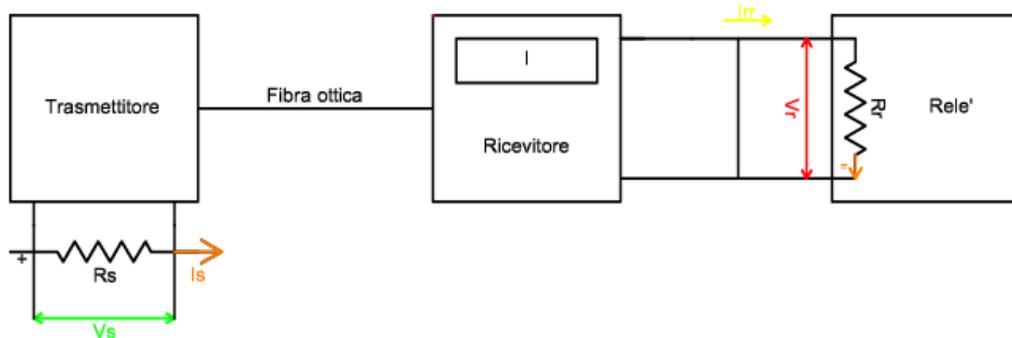


Figura 4.15. Schema di misura per la caratterizzazione dell'errore di misura

Si ricorda che si misurano delle tensioni, utilizzando i fattori correttivi precedentemente ricavati, si ottengono le correnti volute. Per ottenere la misura dal relè è necessario farlo scattare.

Scelta dell'alimentazione e del tipo di filtraggio

1. Alimentazione da batteria:

Il disturbo potrebbe essere introdotto dal generatore di funzioni. Per questo motivo si è pensato di utilizzare un'alimentazione con batteria da 12 V. L'obiettivo è quello di ottenere una rampa con diverse pendenze. In serie alla resistenza da 1 Ω si devono inserire (figura 4.16):

1. Rserie pari a 199 Ω che serve per ottenere 60mV come fondo scala sulla resistenza da 1 Ω .
2. Lserie di valore incognito che serve per ottenere diverse pendenze.

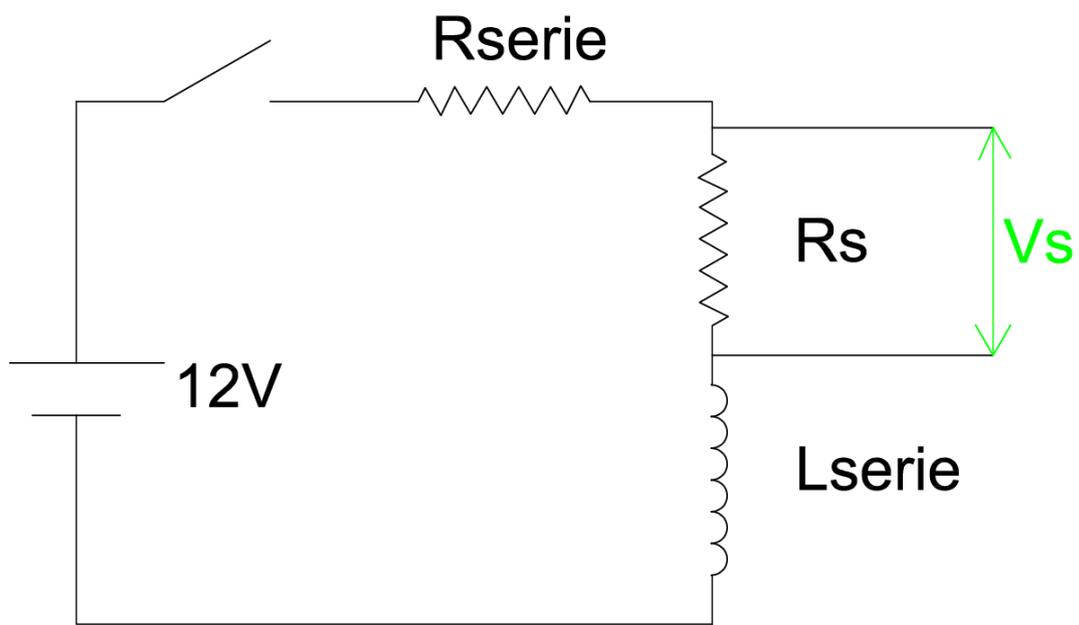


Figura 4.16. Alimentazione da batteria

Per la scelta delle induttanze si adotta uno script MATLAB in cui si va a risolvere il transitorio di chiusura di un circuito R-L: ponendo $R=R_{serie}+R_s$ e $L=L_{serie}$ (in riferimento alla figura 4.16) si ottiene:

$$i(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}(t)}) \rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{E}{L}e^{-\frac{R}{L}(t)} \quad (4.5)$$

Ci interessa il valore iniziale della derivata. Sostituendo nella relazione 4.5 il tempo $t=0$ si ottiene il valore dell'induttanza:

$$L = \frac{E}{\frac{di}{dt}} \quad (4.6)$$

Lo script MATLAB calcola i valori delle induttanze per avere diverse pendenze; si ottengono i risultati di figura 4.17. Si nota che i valori di induttanza ricavati sono piuttosto elevati, per questo motivo si è tralasciata l'ipotesi di svolgere le prove con questo tipo di alimentazione.

2. Alimentazione da generatore di funzioni con filtri "esterni":

Un secondo modo per eliminare il disturbo può essere quello di utilizzare dei filtri "esterni" allo strumento di registrazione. A tal fine si sono provate tre soluzioni.

- SOLUZIONE A: si misura la corrente solo sulla resistenza di shunt.
- SOLUZIONE B: si mette in serie a R_s un'induttanza qualsiasi e poi si misura la corrente sulla resistenza di shunt.
- SOLUZIONE C: come la soluzione precedente ma si misura la corrente sulla serie tra resistenza di shunt e induttanza.

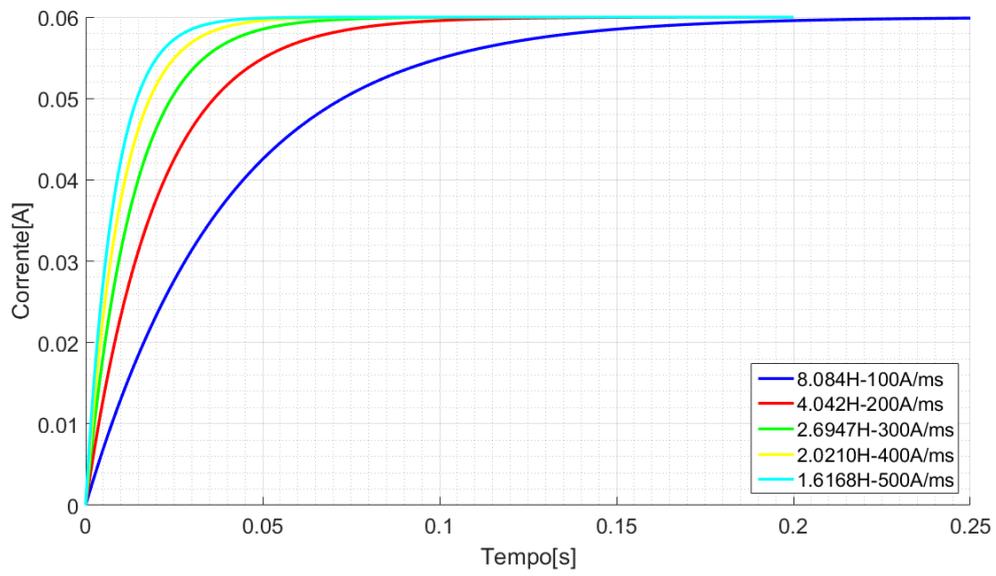


Figura 4.17. Valori di induttanza per diversi gradienti

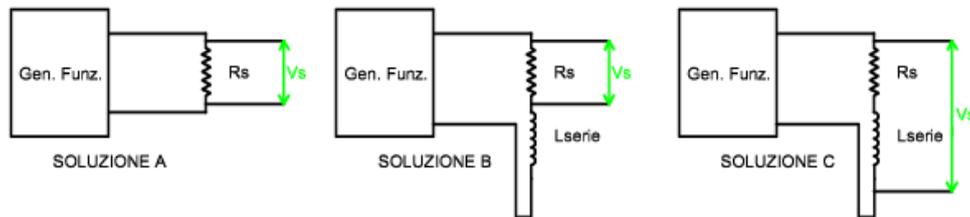


Figura 4.18. Rappresentazione delle tre soluzioni

Soluzione	Valor medio[A]	σ	ϵ [%]
A	4031,54	61,9224	4,39917
B	4015,33	58,026	4,02547
C	4044,33	133,193	25,3065

Tabella 4.7. Valutazione degli errori a regime con i tre tipi di filtro esterno all'HIOKY

In figura 4.18 viene indicata la misura della tensione sullo shunt ma come al solito, mediante i fattori correttivi, sullo HIOKY si legge direttamente la corrente sulla quale si valuta l'errore.

Si caratterizzano le tre soluzioni in termini di errore e a regime. Fornendo un valore costante di tensione si possono determinare la deviazione standard e l'errore rispetto al valor medio (tabella 4.7). Per ottenere un filtraggio si può utilizzare un'induttanza di valore qualsiasi, ci si è serviti di un'induttore da 5,1 mH.

Come si può osservare la differenza tra la soluzione A e la soluzione B è minima si conclude che si può utilizzare la prima soluzione.

3. Alimentazione da generatore di funzioni con filtri interni:

L'ultima soluzione può essere quella di utilizzare i filtri interni all'HIOKY. In

Tipo filtro	Valor medio[A]	σ	ϵ [%]
No filtro	4042,35	62,0157	5,94
5Hz	4026,97	27,0172	2,176
5kHz	4055,35	28,858	1,46
50kHz	4037,78	31,8467	1,967

Tabella 4.8. Valutazione degli errori a regime con filtri interni all'HIOKY

questo caso si procede come nelle prove precedenti. I filtri disponibili sono 6: 5 Hz, 50 Hz, 500 Hz, 5 kHz, 50 kHz, 500 kHz (si tratta di filtri L.P.F.). L'obiettivo è quello di modificare il meno possibile il segnale fornito al relè. Per questo, si è pensato di fare un confronto con il segnale non filtrato e poi con i filtri a 5Hz, 5 kHz e 50 kHz. A regime, ossia fornendo un segnale costante, è stata svolta la stessa analisi delle prove precedenti e si ottengono i risultati di tabella 4.8. Viene anche svolta una prova fornendo un segnale esponenziale e valutando la forma d'onda ottenuta con i diversi filtri (figura 4.19). Si nota che il filtro a 5 Hz non va bene perchè modifica troppo la forma d'onda. Con un filtro a 50 kHz si ottiene una forma d'onda pulita ma si perde in termini di errore rispetto al valor medio e di deviazione standard. Per questo motivo si utilizza il filtro a 5 kHz che risulta aver il miglior compromesso tra forma d'onda e parametri di errore.

CONCLUSIONI:

1. L'alimentazione da batteria viene scartata, non si possono ottenere i valori di gradiente iniziale voluti, questo perchè si forniscono delle correnti troppo basse (60 mA).
2. I filtri esterni all'HIOKY non servono molto, si sceglie di prelevare il segnale direttamente sulla resistenza di shunt.
3. Si decide di utilizzare il filtro a 5 kHz che risulta avere un buon compromesso tra forma d'onda e parametri di errore.

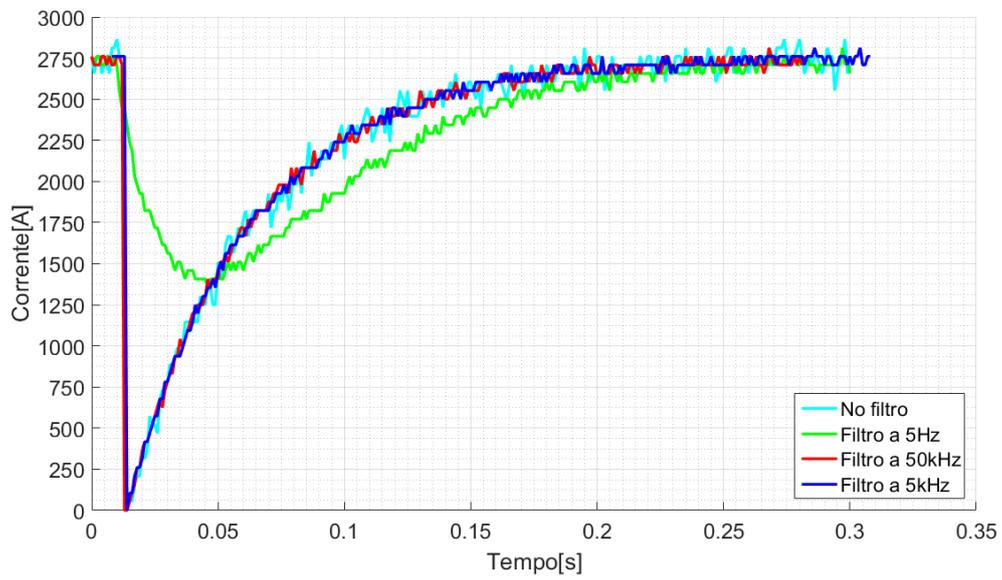


Figura 4.19. Prova con forma d'onda esponenziale con filtri interni HIOKY

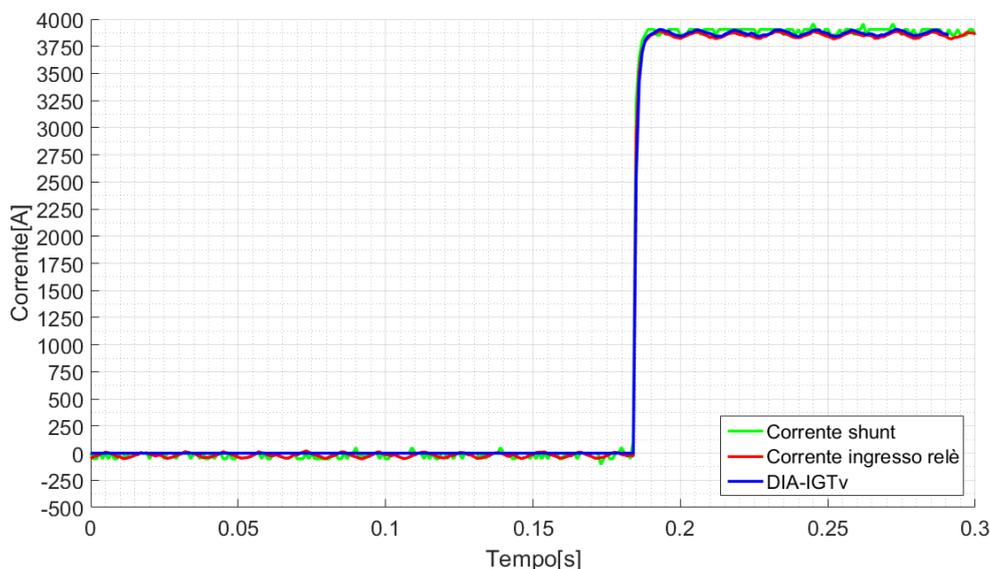


Figura 4.20. Forma del segnale fornito per valutare l'errore a regime

Valutazione degli errori a regime e sul gradiente

1. **Errore a regime:** la prova viene svolta andando a fornire un gradino di corrente al relè come quello rappresentato con la linea verde in figura 4.20. Viene analizzata unicamente la parte alta del gradino. Si svolgono 5 misure. Ogni volta si cambiano i parametri del gradino. Per ogni prova viene anche appuntato il motivo dello scatto. In tabella 4.9, dove V_{gi} e V_{gf} sono le tensioni iniziali e finali impostate sul generatore di funzioni, I_i e I_f sono le correnti iniziali e finali lette sul display del ricevitore, DR_{pc} e DR_c sono le differenze di corrente lette sul MsCom e calcolate; vengono mostrate le caratteristiche delle prove. L'analisi degli errori viene svolta andando a studiare il valore a regime ossia nel punto più alto. Si analizzano due parametri (errore a regime rispetto al valore aspettato e le FFT). A titolo di esempio si riportano i grafici analizzati in una prova (figura 4.21 e figura 4.22).

Dei tre segnali in figura 4.21 si calcola il valore medio e poi si va a valutare

Vgi[mV]	Ii[A]	Vgf[mV]	If[A]	Scatto_r	Scatto_pc	DR_pc[A]	DR_c[A]
3	0	61	3984	DR>	DR>	3880	3984
5,5	178	65	4151	I>,DR>	tI>	4023	3973
5,7	191	67	4286	I>,DR>	tI>	4093	4095
6	211	68	4351	I>,DR>	tI>	4093	4140
6,2	224	71	4553	I>	tI>	3743	4329

Tabella 4.9. Caratteristiche delle prove

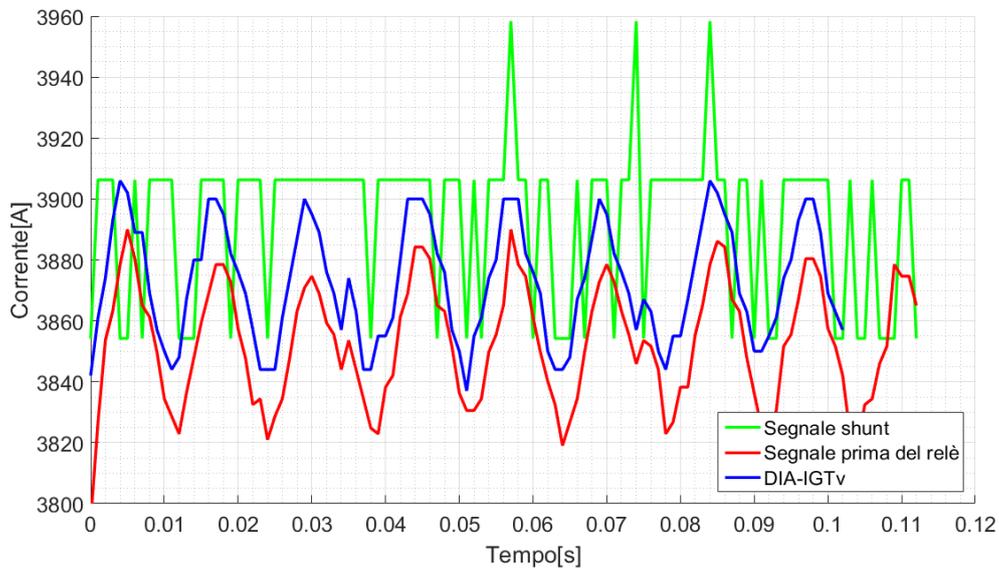


Figura 4.21. Zoom sulla parte alta del gradino su cui si valuta l'errore a regime

l'errore della misura dopo il ricevitore e del relè proprio rispetto al valore medio del segnale fornito (linea verde):

$$E_{rr} = \frac{I_{rrM} - I_{sM}}{I_{sM}} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Dove I_{rrM} stà per valore medio della corrente tra il ricevitore e il relè, si riferisce al valore medio della linea rossa di figura 4.21, I_{sM} stà per valore medio della corrente sullo shunt e si riferisce alla linea verde della figura 4.21. E_{rr} è l'errore dopo il ricevitore.

$$E_r = \frac{I_{rM} - I_{sM}}{I_{sM}} \cdot 100 \quad (4.8)$$

Dove I_{rM} stà per valore medio della corrente misurata dal relè e si riferisce alla linea blu della figura 4.21 mentre I_{sM} ha lo stesso significato di prima. E_r è l'errore commesso dal relè

In tabella 4.10 dove I_s indica la corrente media sullo shunt, I_{rr} quella media in uscita dal ricevitore mentre I_r quella media misurata dal relè, E_{rr} è l'errore a regime del segnale in uscita dal ricevitore mentre E_r è quello commesso dal relè; vengono elencati i risultati relativi alle cinque prove mentre in tabella 4.11 si riassumono risultati dell'analisi degli errori a regime.

Successivamente viene svolta l'analisi delle FFT. In figura 4.22 si confrontano le FFT del segnale fornito (linea verde) con quella dopo il ricevitore (linea rossa) con quella della misura del relè (linea blu). Si svolgono cinque prove e si appuntano i valori della frequenza e del modulo dell'errore per i tre segnali. I valori ottenuti, vengono elencati in tabella 4.12 mentre in tabella 4.13 si riassumono le caratteristiche più importanti delle FFT sullo shunt, dopo il ricevitore (ingresso relè) e sulla misura del relè.

Gradino	Is[A]	Irr[A]	Ir[A]	Err[%]	Er[%]
1	3892,9	3852,72	3872,54	-1,032	-0,523
2	4163,77	4115,43	4136,84	-1,161	-0,647
3	4265,75	4250,82	4269,57	-0,350	0,089
4	4339,79	4317,62	4336,74	-0,511	-0,070
5	4545,94	4516,91	4536,32	-0,639	-0,211

Tabella 4.10. Errori a regime

	Err regime[%]		
	Min	Max	Medio
Ingresso relè	-1,161	-0,350	-0,739
Misura relè	-0,647	-0,070	-0,272

Tabella 4.11. Riassunti errori a regime

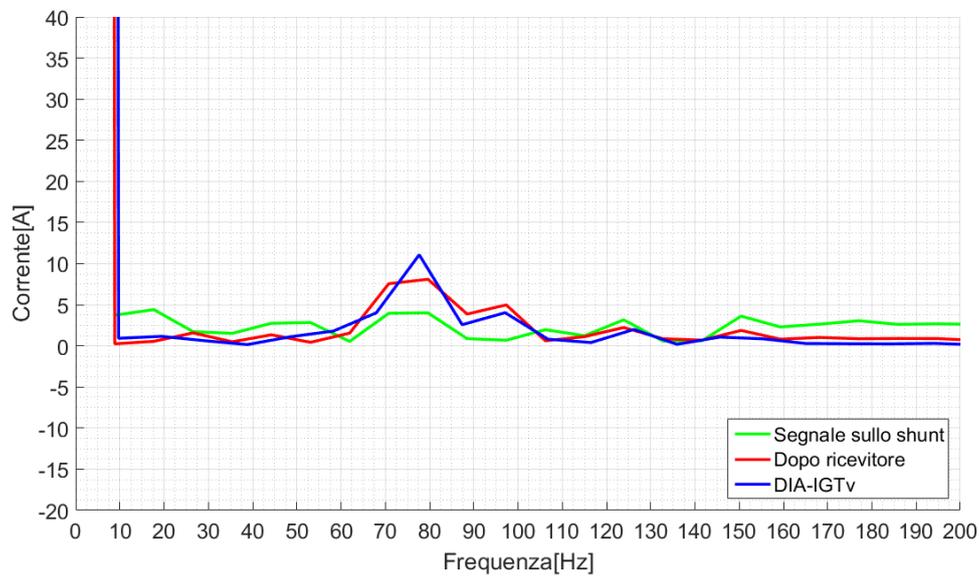


Figura 4.22. FFT del segnale in figura 4.21

Gradino	fft shunt		fft ricevitore		fft DIA	
	f[Hz]	I[A]	f[Hz]	I[A]	f[Hz]	I[A]
1	79,65	4,013	79,65	8,093	77,67	11,07
2	74,77	0,7566	74,77	12,37	71,43	10,25
3	78,43	3,331	78,43	9,916	75,95	12,44
4	78,43	3,721	78,73	9,993	75,27	12,89
5	77,67	1,486	77,67	10,640	73,68	12,19

Tabella 4.12. Valutazione delle FFT

	Frequenza[Hz]			I[A]		
	Min	Max	Medio	Min	Max	Media
Shunt	74,77	79,65	77,79	0,757	4,013	2,662
Ingresso relè	74,77	79,65	77,79	8,093	12,37	10,2024
Misura relè	71,43	77,67	74,8	10,25	12,89	11,77

Tabella 4.13. Caratteristiche delle fft

Esponenziale	Vgi[mV]	Vgf[mV]	Scattopc	Scattor
1	3	61	EXP	EXP
2	3	62	EXP	EXP
3	3	63	DR>	DR>
4	3	64	EXP	EXP
5	3	65	EXP	EXP

Tabella 4.14. Caratteristiche prove con esponenziale

CONCLUSIONI:

1. A regime il relè commette un errore del -0,272% rispetto al valore atteso.
2. L'analisi delle FFT evidenzia come, sulla misura del relè, sia presente un disturbo ad una frequenza pari a 74,8 Hz che ha un valore di circa 12 A. Questo va a discostarsi da quanto ci si aspettava perlomeno a livello della frequenza. Siccome il sistema era alimentato a 50 Hz si pensava di ottenere un disturbo intorno a questo valore.
3. La catena di misura commette un'errore pari a -0,739 % rispetto al valore aspettato.
4. A livello di FFT si nota che il disturbo in uscita dal ricevitore ha frequenza simile a quella del relè ossia 77,79 Hz con modulo pari a 10A.

2. **Analisi dell'errore sulla dI_o/dt :** anche in questo caso vengono svolte cinque prove diverse. Variando le tensioni di inizio e fine esponenziale, si è in grado di cambiare la pendenza iniziale. Dalla figura 4.23 si nota che per l'analisi dell'errore sulla dI_o/dt è necessario eseguire un fitting ossia un'approssimazione della curva. In tabella 4.14 si elencano le caratteristiche delle prove annotando anche il motivo dello scatto sul MsCom e sul relè.

Il fitting viene svolto per il segnale misurato sullo shunt (linea verde nelle figure), dopo il ricevitore (o prima del relè, rossa nelle figure) e dal relè (blu nelle

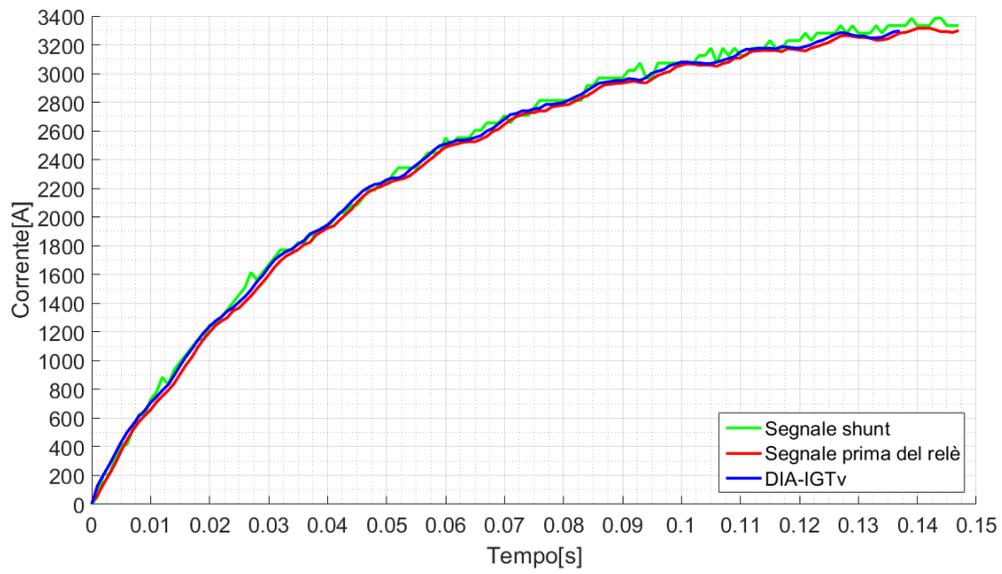


Figura 4.23. Forma del segnale fornito per valutare l'errore su dI_o/dt

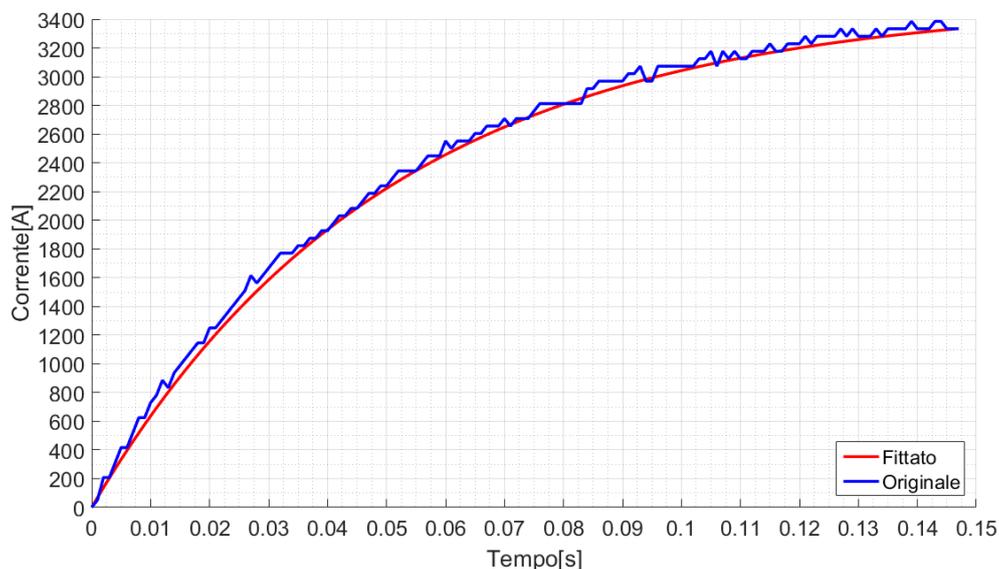


Figura 4.24. Fitting del segnale sullo shunt

figure). Con il fitting si è in grado di ricavare i parametri che servono per valutare l'errore percentuale sulla dI_o/dt (che sono a e b):

$$y(x) = a * (1 - e^{-x/b}) \rightarrow \frac{dy}{dx}(x = 0) = \frac{a}{b} \quad (4.9)$$

y indica la corrente. Approssimando la corrente reale alla forma d'onda y si ottiene l'esponenziale voluto. A titolo di esempio si riporta il confronto tra segnale originale e fittato per la corrente sullo shunt (figura 4.24). I tre segnali, dopo essere stati fittati (figura 4.25) vengono confrontati. In tabella 4.15, dove la sigla P.R. significa prima del relè ed N si riferisce al numero della prova, vengono elencati i risultati del fitting. I risultati più importanti delle prove per valutare l'errore su dI_o/dt si ricavano in tabella 4.16.

A questo punto si sono analizzate le FFT in modo da quantificare la frequenza alla quale viene introdotto l'errore e anche il suo modulo. Vengono valutate le

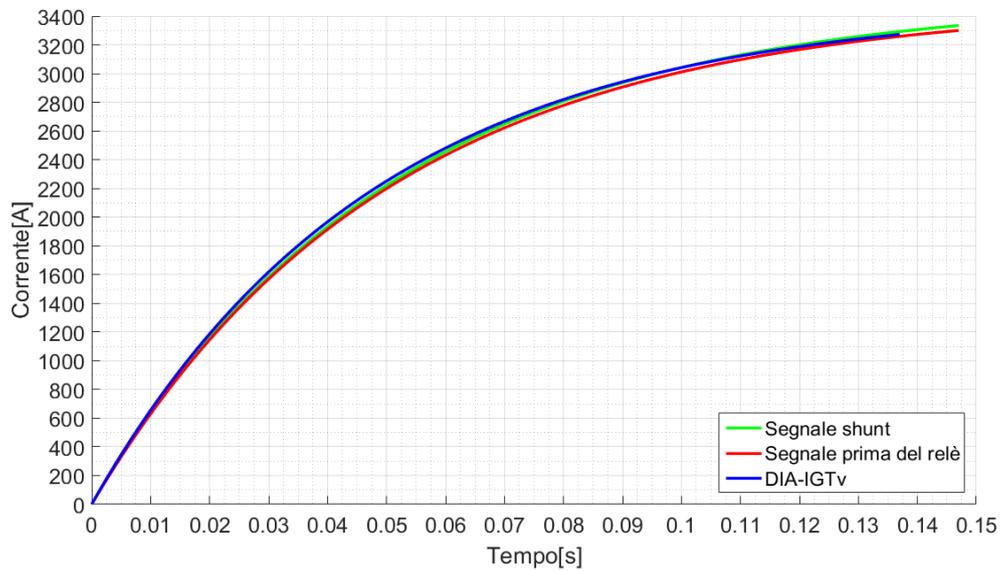


Figura 4.25. Segnali fittati

N	Shunt			P.R.			DIA			Errore[%]	
	a	b	dIo/dt	a	b	dIo/dt	a	b	dIo/dt	P.R.	DIA
1	3496	0,05	69599,84	3453	0,05	68743,78	3418	0,05	71746,37	-1,23	2,70
2	3523	0,05	73258,47	3487	0,05	71076,23	3470	0,05	73673,04	-2,98	0,57
3	3631	0,05	71886,76	3578	0,05	69992,18	3589	0,05	70830,87	-2,64	-1,47
4	3691	0,05	73599,20	3641	0,05	71743,84	3606	0,05	75756,30	-2,52	2,93
5	3671	0,05	75194,59	3690	0,05	74126,16	3680	0,05	76475,48	-1,42	1,70

Tabella 4.15. Risultati del fitting e errori percentuali sulla dIo/dt

	Errore[%]		
	Min	Max	Medio
Prima relè	-2,98	-1,23	-2,16
DIA	-1,47	2,98	1,29

Tabella 4.16. Tabella riassuntiva errori su dIo/dt

FFT di:

- a Segnale misurato dopo il ricevitore (prima del relè).
- b Segnale misurato dal relè.

Si calcola la FFT del seguente segnale:

$$\text{errore} = \text{segnale originale} - \text{segnale fittato} \quad (4.10)$$

A titolo di esempio (figura 4.26 e figura 4.27) si riportano il grafico e la FFT dei due segnali che si analizzano, di un'unica prova. Come si nota si ottengono delle oscillazioni simili a quelle che già si avevano nelle prove a regime. Facendo la differenza tra il segnale fittato e non fittato si ottiene un segnale simile a quello a regime, composto da un valore medio sovrapposto a del rumore di cui si andrà a quantificare la frequenza e l'ampiezza. Successivamente si esegue la FFT del segnale 4.10. In figura 4.27 si nota è caratterizzata da un picco con frequenza simile a quella già ottenuta nelle prove precedenti. Si svolgono cinque prove e si ottengono i risultati di tabella 4.17. Si nota che in alcune misure compaiono due frequenze caratteristiche a cui si hanno dei disturbi, la frequenza che dà il maggior contributo è proprio quella vicina ai 74 Hz. I risultati ottenuti vengono riassunti in tabella 4.18 per la frequenza f_1 e in tabella 4.19 per la frequenza f_2 .

CONCLUSIONI:

1. Mediamente sulla dI_0/dt il relè commette una sovrastima circa l'1,29 %.
2. Per quanto riguarda le FFT si nota che viene introdotto un'errore ad una frequenza di 72,4 Hz che è molto simile a quella che si aveva nelle prove a regime.

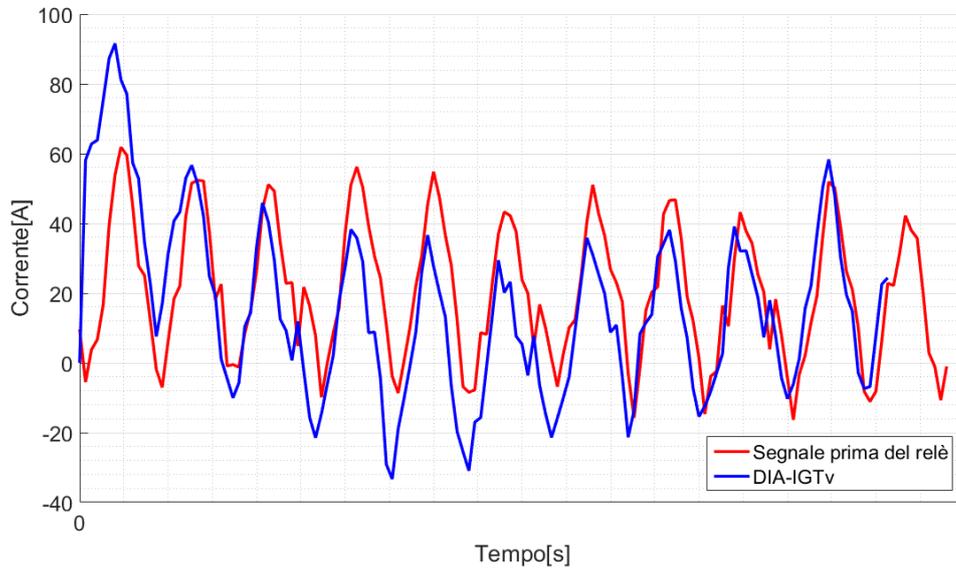


Figura 4.26. Segnale di cui si farà la FFT

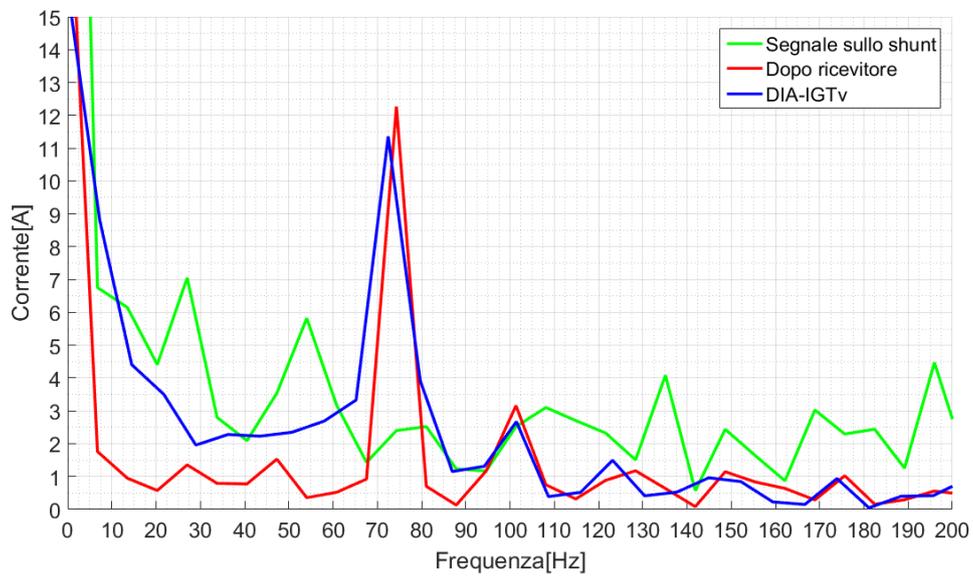


Figura 4.27. FFT del segnale in figura 4.26

N	fft				fft			
	f1[Hz]	I1[A]	f2[Hz]	I2[A]	f1[Hz]	I1[A]	f2[Hz]	I2[A]
1	-	-	74,32	11,72	7,25	9,19	72,46	93
2	6,76	3,88	74,32	12,20	7,25	11,18	72,46	11,46
3	4,93	4,69	73,89	11,83	5,16	3,21	72,16	8,05
4	6,76	3,45	74,32	12,27	7,25	9,98	72,46	11,39
5	-	-	74,32	12,91	7,25	8,85	72,46	10,29

Tabella 4.17. Analisi delle fft

	f1[Hz]			I1[A]		
	Min	Max	Media	Min	Max	Media
Prima relè	4,93	6,76	6,15	3,88	4,69	4,01
Misura relè	5,16	7,25	6,83	3,21	11,18	8,48

Tabella 4.18. Analisi fft per la prima frequenza

	f2[Hz]			I2[A]		
	Min	Max	Media	Min	Max	Media
Prima relè	73,89	74,34	74,32	11,72	12,91	12,19
Misura relè	72,16	72,46	72,4	8,05	93	26,84

Tabella 4.19. Analisi fft per la seconda frequenza

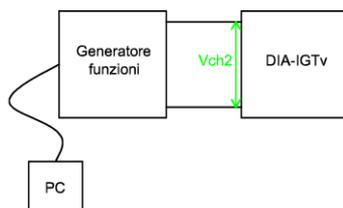


Figura 4.28. Schema delle prove senza catena di misura

4.5.2 Confronto tra il segnale reale e quello misurato dal relè

La catena di misura introduce due problemi:

- 1 Disturbo a regime e sulla pendenza iniziale, valutati nelle fasi precedenti.
- 2 Non permette di fornire dei segnali di tensione molto elevati. Questo comporta un segnale molto più "sporco" in ingresso al relè.

Per questi motivi, la si elimina (figura 4.28). Il generatore di funzioni permette di fornire un segnale che viene costruito sul PC. Per avere valori di tensione più elevati, in uscita da esso, occorre sfruttare al meglio la scala messa a disposizione sul Waveform Editor (software che consente di costruire i segnali da fornire, sul PC). Per questo è necessaria una riscalatura dai valori misurati alla scala $[-1,+1]$ dell'editor.

Si svolgono due tipologie di prove:

PROVA 1: si forniscono i segnali provenienti dalle misure svolte sulla motrice 5000, nel primo caso senza il RESET mentre nel secondo con il RESET. Per ogni caso, si esegue una prova fornendo il segnale pulito e una sommando a quest'ultimo il disturbo della catena. Al fine di valutare le pendenze misurate del relè le sue tarature sono state modificate in modo da farlo scattare ogni volta che gli si fornisce un segnale, quando sia o meno presente il disturbo,

PROVA 2: si forniscono come segnali due esponenziali con diversa pendenza. Si valutano le differenze tra le pendenze misurate dal relè con e senza il disturbo.

PROVA1: valutazione delle pendenze con il segnale reale

Come prima prova si valutano le pendenze dei segnali derivanti da una misura in cui non è avvenuto il reset. Inizialmente si fornisce il segnale misurato nelle prove del capitolo 5 e poi a questo si somma il disturbo (che sarà uguale anche nel caso con il RESET):

$$d(t) = 10,221 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 77,79 \cdot t) \quad (4.11)$$

La differenza tra i due segnali si nota in figura 4.29. A questo punto si possono valutare le pendenze del segnale fornito con e senza reset. In figura 4.30 dove si osserva che la derivata massima è pari a 1337 A/ms; si ha il segnale fornito senza il disturbo per tutto il fenomeno del passaggio sotto al divisore. Di seguito si riporteranno le figure con la parte più critica del fenomeno ossia l'ingresso in una nuova zona. In figura 4.31 si ha il segnale fornito con il disturbo e si nota che quest'ultimo si somma al segnale aumentando la pendenza da 1337 A/ms a 1470 A/ms.

Successivamente si valutano le pendenze misurate dal relè. In figura 4.32 si ha il segnale misurato dal DIA-IGTv senza il disturbo, il valore ottenuto, dato che il relè campiona a 1 ms e gli si fornisce il dato a 200 μ s è più basso del segnale rappresentato in figura 4.30 ed è pari a 386 A/ms. Nel caso in cui si sommi il disturbo (figura 4.33) la pendenza misurata dal relè è maggiore e pari a 422 A/ms.

Infine si possono valutare direttamente le pendenze rilevate dal relè confrontando la misura con e senza disturbo (figura 4.34). Questa figura deve essere letta facendo un valore assoluto di ciò che si ha sotto l'asse x. si nota che il disturbo fa cambiare la misura di 36 A/ms.

Le stesse valutazioni si fanno fornendo un segnale in cui è avvenuto il RESET. Il procedimento svolto è sempre identico. A titolo di esempio, si riportano i grafici della forma d'onda che si fornisce e della valutazione delle pendenze misurate rappresentando la parte di interesse ossia l'ingresso in una nuova zona. Come grafico

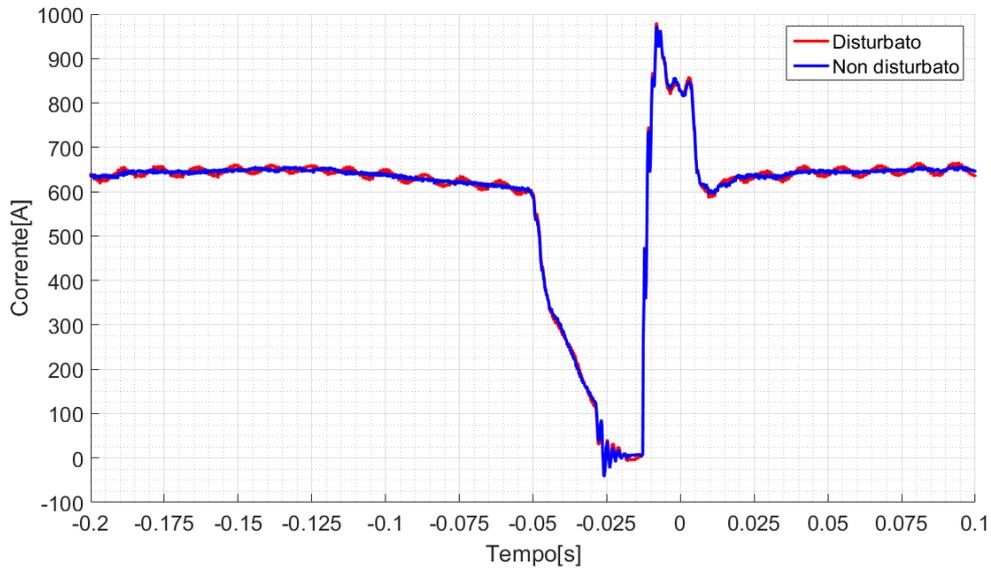


Figura 4.29. Prova con segnale senza RESET, differenze tra disturbato e non disturbato

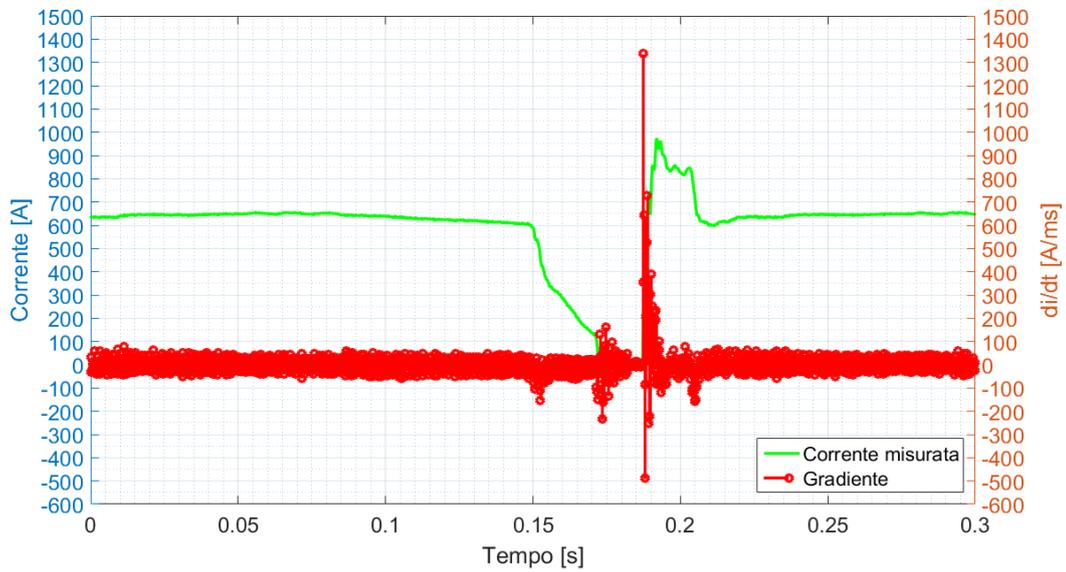


Figura 4.30. Pendenze del segnale fornito, senza disturbo



Figura 4.31. Pendence del segnale fornito, con disturbo

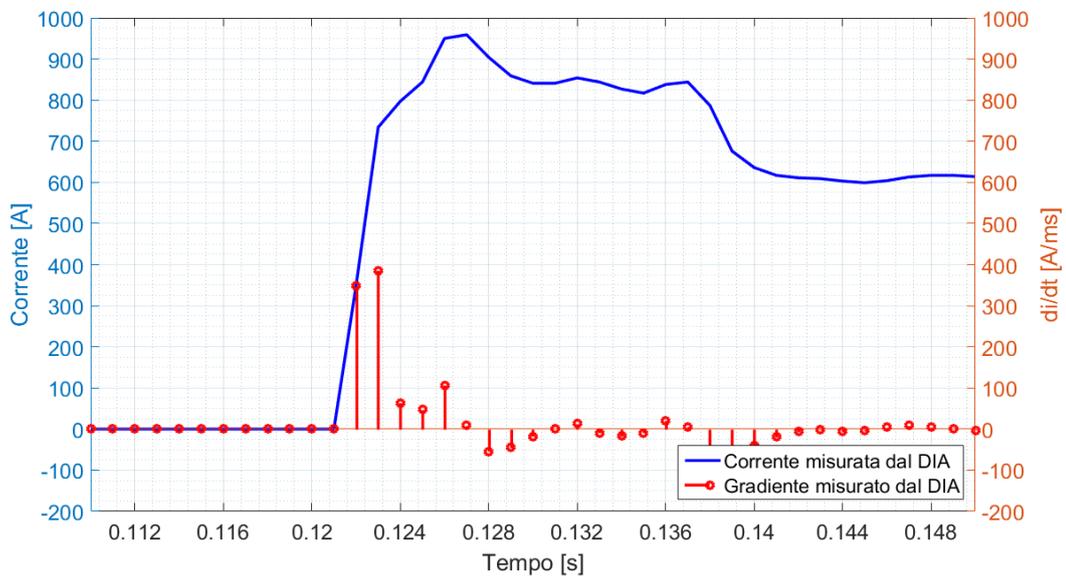


Figura 4.32. Pendence del segnale misurato, senza disturbo

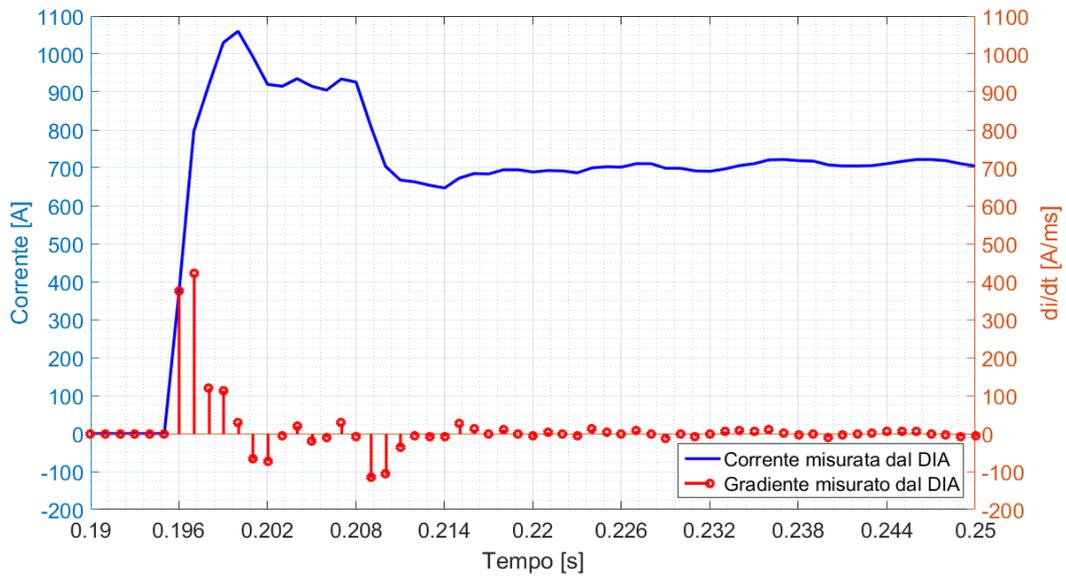


Figura 4.33. Pendenze del segnale misurato, con disturbo

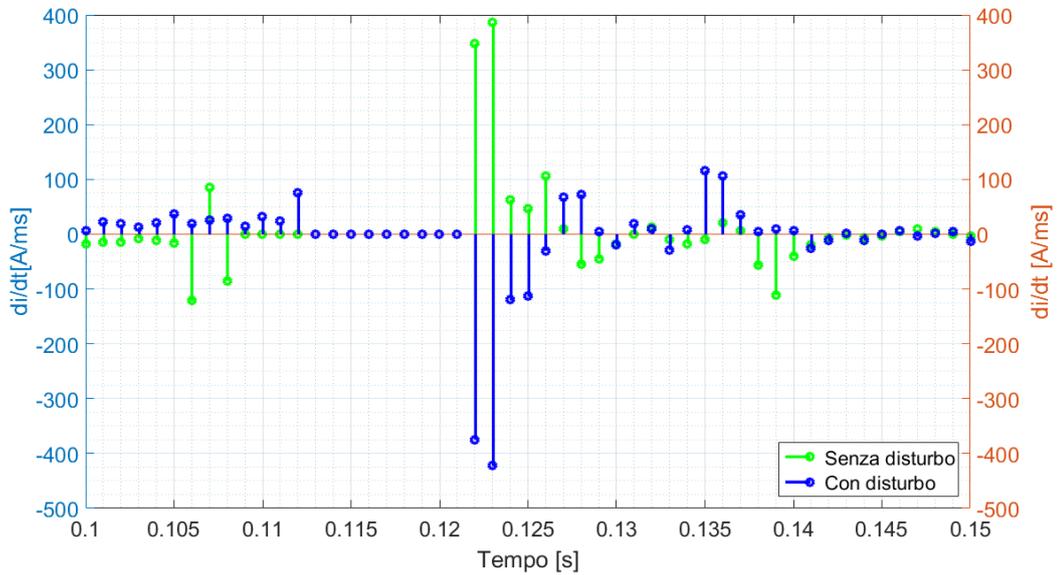


Figura 4.34. Valutazione delle pendenze misurate dal DIA con e senza disturbo

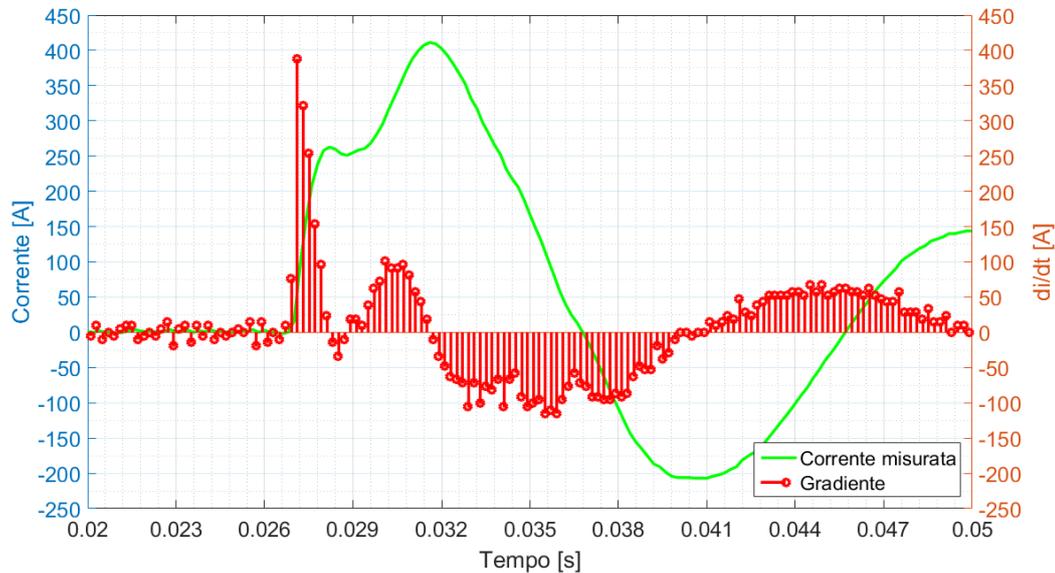


Figura 4.35. Segnale fornito con reset, senza disturbo

di confronto (figura 4.35), si prende quello senza il disturbo. Esso è presente perché abbiamo la catena di misura e perché si forniscono dei segnali molto piccoli. Nella realtà il disturbo non dovrebbe essere presente. Anche in questo caso si valutano le pendenze misurate dal relè con e senza disturbo (figura 4.36). Si nota che nel caso in cui non ci sia il disturbo il relè misura 171 A/ms nel caso contrario misura 167 A/ms. La differenza, in questo caso, non è così elevata.

PROVA2: valutazione delle pendenze con un'esponenziale

Il procedimento seguito è lo stesso illustrato precedentemente, vengono svolte due prove. Nella prima si ha un'esponenziale con pendenza pari a 330,7 A/ms mentre nella seconda prova pari a 115 A/ms. Il disturbo che si somma al segnale è un po' diverso dal precedente:

$$d(t) = 4,01 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 6,15 \cdot t) + 12,19 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 74,32 \cdot t) \quad (4.12)$$

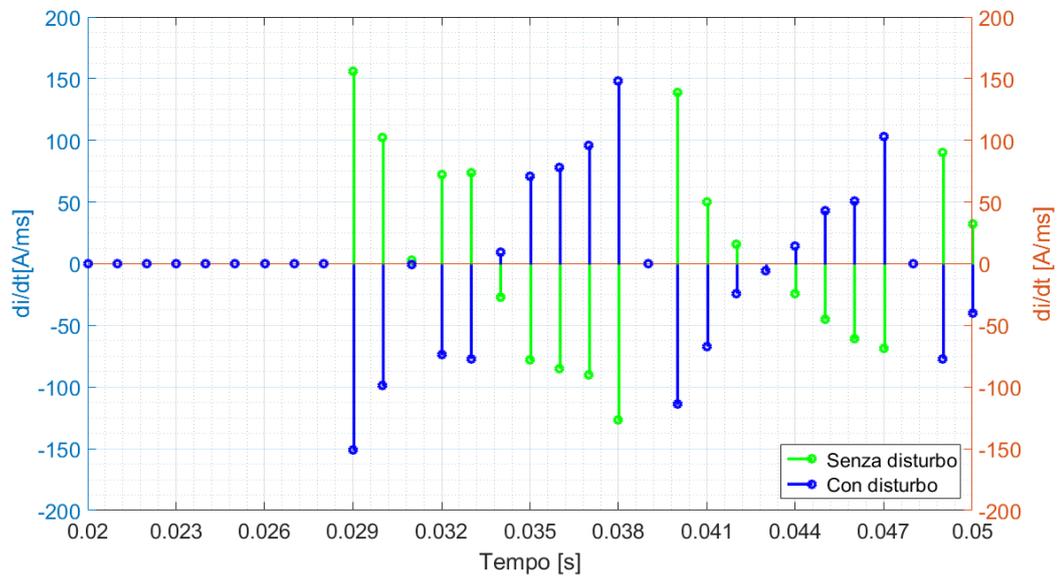


Figura 4.36. Valutazione delle pendenze misurate dal DIA nella prova con reset

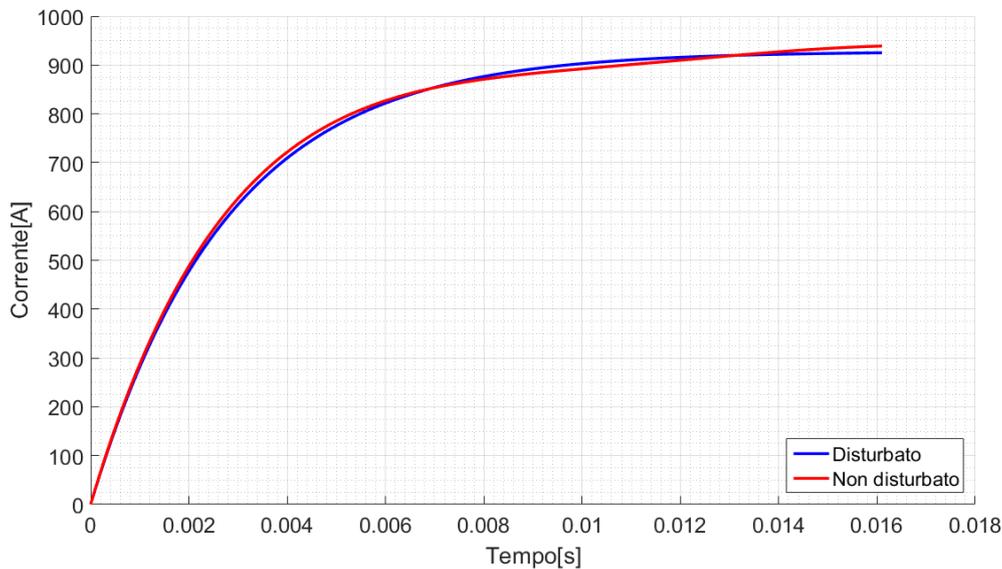


Figura 4.37. Esponenziale con pendenza 330,7 A/ms con e senza disturbo

In figura 4.37 si osservano le differenze tra il segnale con o senza disturbo. In figura 4.38 si leggono le pendenze del segnale fornito con il disturbo. Confrontando il segnale misurato dal relè con e senza disturbo (figura 4.39) si nota che senza il disturbo il DIA misura 225 A/ms che come al solito è di meno rispetto alla pendenza reale. Con il disturbo viene rilevata la pendenza di 161 A/ms. In questo caso il disturbo viene sottratto al segnale iniziale, contrariamente alla prova con forma d'onda reale senza il reset. Infine, viene svolta una seconda prova di cui si riporta unicamente la parte iniziale dell'esponenziale avente diversa pendenza (figura 4.40). Se si confrontano le pendenze misurate del relè si ottengono i risultati di figura 4.41 dove il disturbo viene sommato al segnale. Si passa da una derivata di 69 A/ms ad una pendenza di 90 A/ms.

I risultati di queste sono raccolti in tabella 4.20.

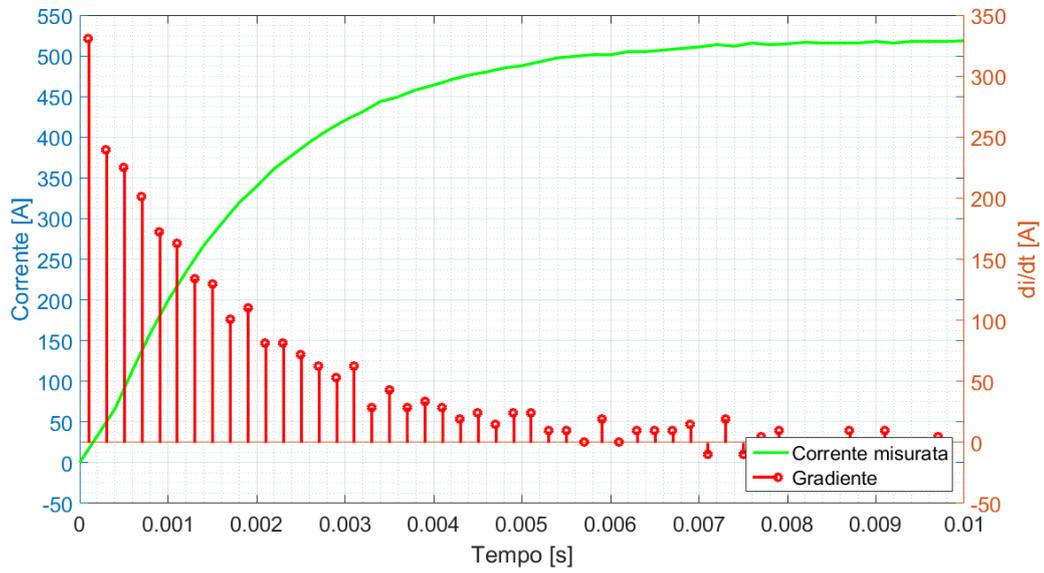


Figura 4.38. Esponenziale con pendenza 330,7 A/ms, fornito

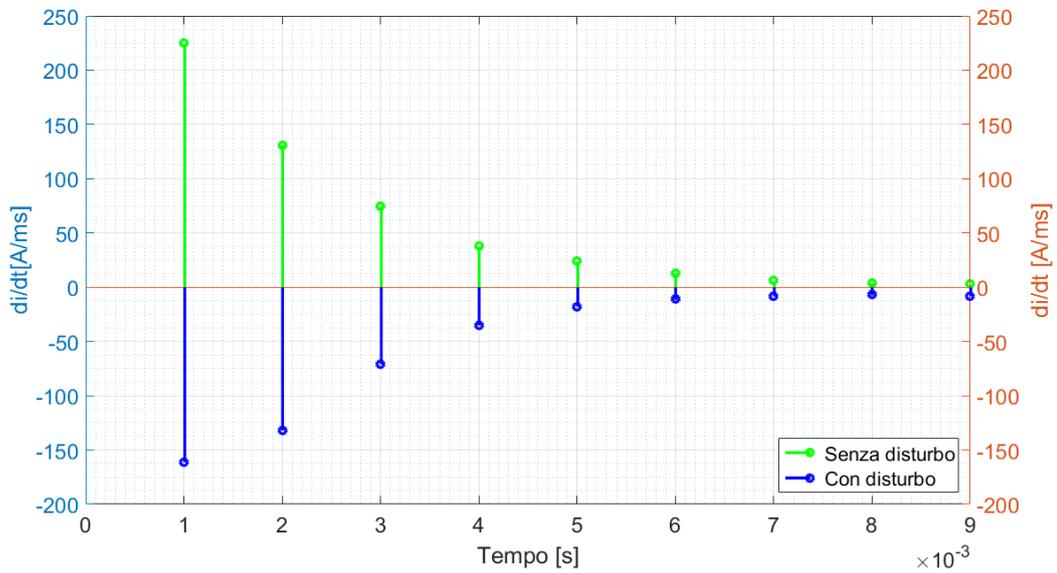


Figura 4.39. Valutazione delle pendenze misurate dal DIA

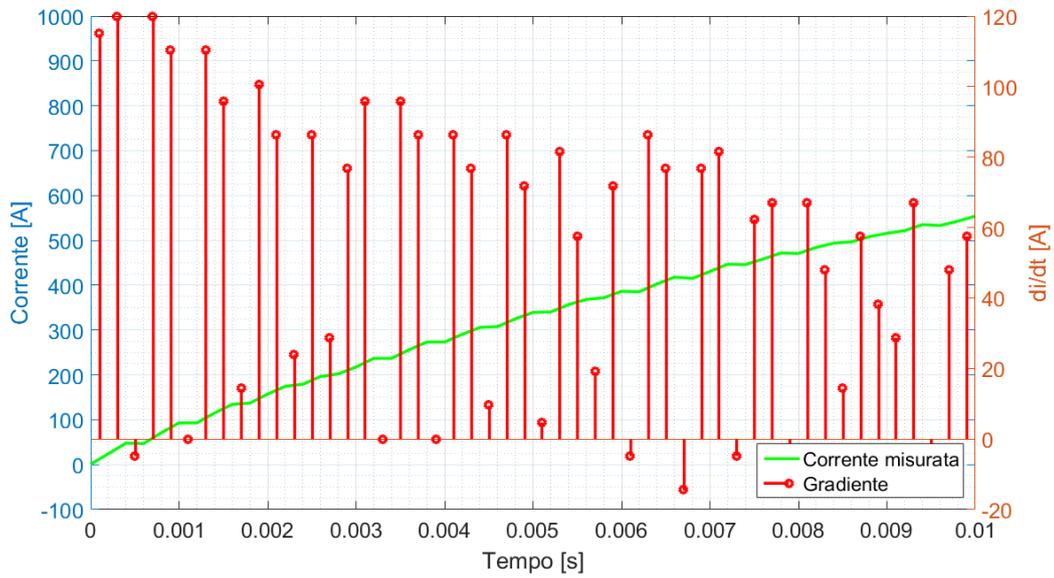


Figura 4.40. Esponenziale con pendenza 115 A/ms, fornito

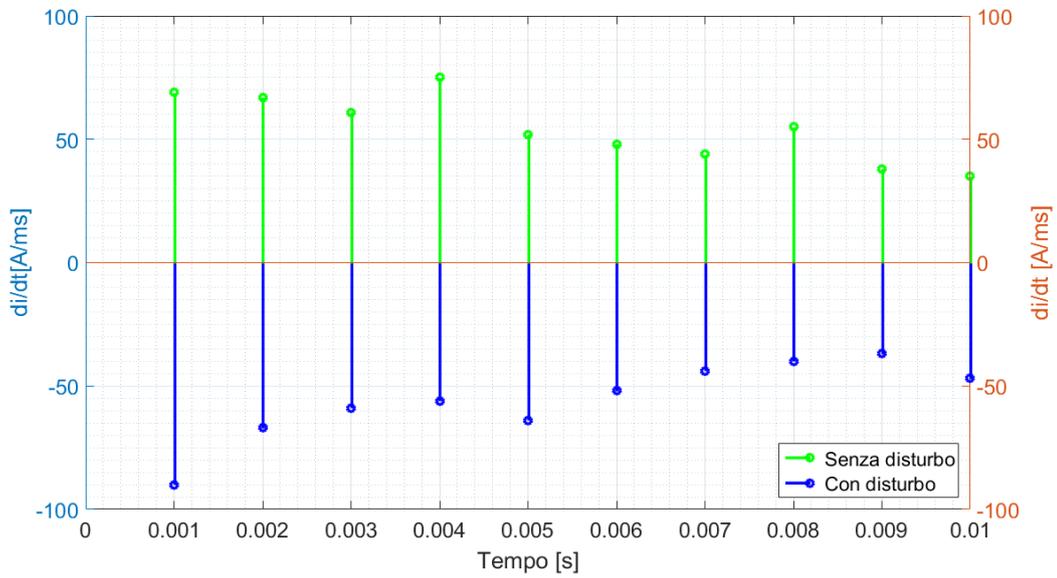


Figura 4.41. Valutazione delle pendenze misurate dal DIA

	Fornito[A/ms]		Misurato[A/ms]	
	Dist	No dist	Dist	No dist
No reset	1471	1337	422	386
Reset	330,7	393	167	171
Exp1	263.6	330,7	161	225
Exp2	110.2	115	90	69

Tabella 4.20. Tabella riassuntiva delle prove con forme d'onda reali e esponenziali

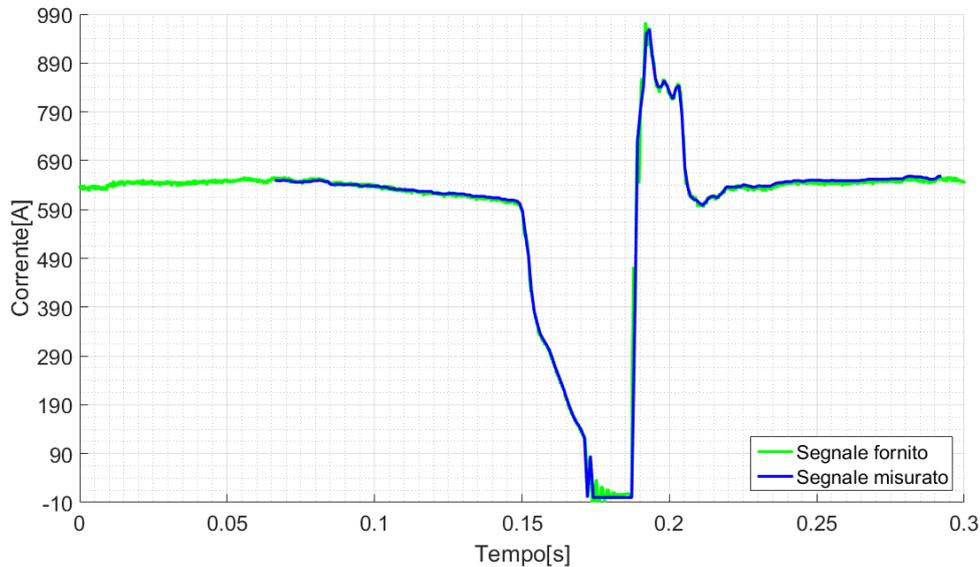


Figura 4.42. Misura della differenza di corrente

4.6 Conclusioni

Nelle prove di laboratorio si sono ottenuti dei risultati che permettono di scegliere al meglio i due parametri di interesse della taratura ossia A_{ms} e DR. In particolare, per la scelta del primo parametro primo si sono valutate le pendenze iniziali dI_0/dt . Si è anche approfondito lo studio del comportamento del relè e della catena di misura e si può affermare che:

1. Il DIA-IGTv misura il valore assoluto della corrente.
2. La catena di misura introduce un'errore che va ad influenzare la misura della pendenza iniziale. Nella prova senza il reset si nota un'aumento di 36 A/ms mentre nelle altre prove il disturbo va a sottrarsi al segnale iniziale.
3. Per quanto riguarda la misura della differenza di corrente, il relè non commette particolari errori come si nota in figura 4.42.

4. Il relè di solito misura una pendenza minore rispetto a quella reale. Per questo motivo quando si fanno delle tarature, bisogna partire dal segnale iniziale e interpolarlo(ossia farne un ri-campionamento) con un periodo pari a quello di misura del relè(1 ms).

Capitolo 5

Analisi del passaggio sotto al divisore di zona

Al fine di comprendere meglio il fenomeno del passaggio sotto al divisore di zona, sono state organizzate due campagne di misura.

La prima è stata svolta il 29 Marzo 2017 a bordo di una motrice 5003 mentre la seconda si è svolta il 24 Maggio 2017 a bordo di una vettura 2800.

Queste prove si aggiungono alle misure del passaggio sotto al divisore di zona per la motrice 6000 svolte in cabina Caio Mario il 18 Marzo 2009.

Al termine delle misure sono stati analizzati i risultati andando a:

- A Classificare le forme d'onda del fenomeno per i tre tipi di vettura:5000, 6000 e 2800.
- B Confrontare i parametri tipici del fenomeno ossia il massimo DR il massimo GRAD tra le tre tipologie di vettura.
- C Combinare i risultati delle cumulate per ottenere dei valori utili alla taratura del DIA-IGTv.

	Strumento collegato	Fondo scala
CH1	Pinza HIOKY 3285	200 A
CH2	Pinza HIOKY 3285	2000 A

Tabella 5.1. Settaggio pinze amperometriche

5.1 Misure a bordo della motrice 5000

Nella prima campagna di misure si sono rilevati gli assorbimenti durante il passaggio sotto al divisore di zona di una motrice 5003.

Per rilevare la corrente si sono utilizzate due pinze HIOKY 3285 che sono state installate sul tetto della motrice. Una rilevava la corrente dei circuiti ausiliari(CH1) mentre la seconda misurava la corrente derivante dagli ausiliari insieme alla potenza(CH2). Mediante un cavo BNC-BNC si raggiungeva il registratore HIOKY MR8880 installato all'interno della motrice. I collegamenti si possono vedere in figura 5.1. Questa misura si differenzia molto da quella svolta nel 2009. In quest'ultima gli strumenti erano installati in cabina. Le due pinze vengono settate come in tabella 5.1. Si scelgono 2000 A per la pinza sul CH1 perchè le prove svolte il 18 Marzo 2009 evidenziavano dei DR anche più elevati di 1500 A. La scelta 200 A come fondo scala per il CH1 è dettata dal fatto che al massimo gli ausiliari assorbono 150 A, durante la prova si nota che il loro assorbimento è molto basso, questo può essere dovuto all'alimentazione costante a 600 V fornita dalla linea aerea. Anche il registratore deve essere settato opportunamente, si scelgono i settaggi di tabella 5.2.

La prova veniva svolta andando a far partire la registrazione ogni volta che si era vicini ad un divisore di zona. La durata di ogni registrazione ottenuta è di 20 s. Durante le misure non sono state svolte unicamente delle rilevazioni del passaggio sotto al divisore di zona ma anche delle misure per:

- 1 Chiarire il modo con cui la vettura 5000 effettua il recupero di energia elettrica.

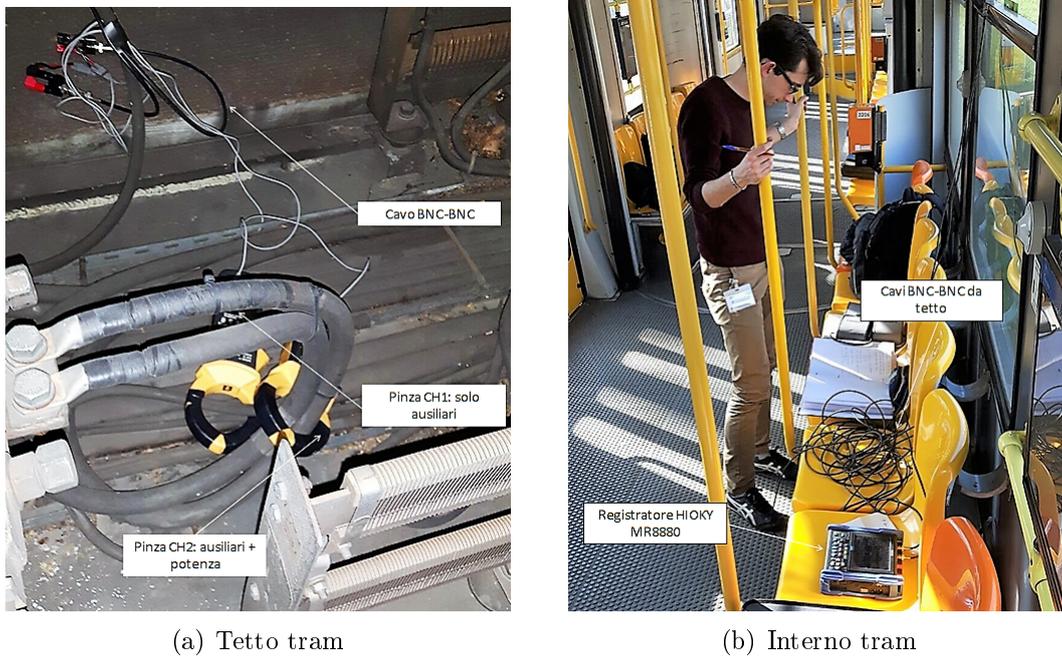


Figura 5.1. Collegamento degli strumenti

Registratore HIOKY MR8880	CH1	Ratio	200
		Time/DIV	2 0ms/DIV
		Range	50 mV
		T_campionamento	200 μ s
	CH2	Ratio	2000
		Time/DIV	20 ms/DIV
		Range	100 mV
		T_campionamento	200us

Tabella 5.2. Settaggio canali del registratore

- 2 Chiarire il motivo dello scoppio di scaricatori all'interno delle SSE avvenuti in giorni precedenti alle misure.
- 3 Osservare se fenomeni simili al passaggio sotto al divisore di zona si ripetono anche in diverse circostanze.

Si ricorda che nel seguente capitolo si analizza unicamente il fenomeno del passaggio sotto al divisore.

5.1.1 Analisi delle misure della motrice 5000

La prima cosa che si osserva è che il passaggio sotto al divisore della motrice 5000 è diviso in tre tempi caratteristici. Come si nota dalla figura 5.2 in cui la freccia gialla indica la direzione del tram, si hanno:

- A **Tempo d'arco T1:** tempo in cui la motrice abbandona la vecchia zona.
- B **Tempo morto T2:** tempo in cui la motrice si trova a metà del divisore.
- C **Tempo di oscillazione T1:** tempo in cui la motrice entra nella nuova zona, in esso hanno origine le pendenze che possono provocare degli scatti intempestivi.

Il problema delle oscillazioni in uscita dal divisore si verifica solamente se la zona di ingresso è alimentata. A riprova di questo fatto è stata svolta una misura in deposito al termine della giornata in cui si passava sotto ad un divisore mentre la zona di ingresso era disalimentata. Come si nota dalla figura 5.3 ,essendo la zona di ingresso priva di alimentazione, l'arco elettrico si spegne quando si entra nella nuova zona e quindi non si hanno delle oscillazioni.

Durante la misura si è notato che il passaggio sotto al divisore ha due andamenti caratteristici. Questo è direttamente correlato con la velocità della motrice. I due andamenti sono mostrati in figura 5.4 e 5.5. Nel primo caso si notano delle oscillazioni rispetto al valore di corrente nullo, questo potrebbe essere dovuto ad un

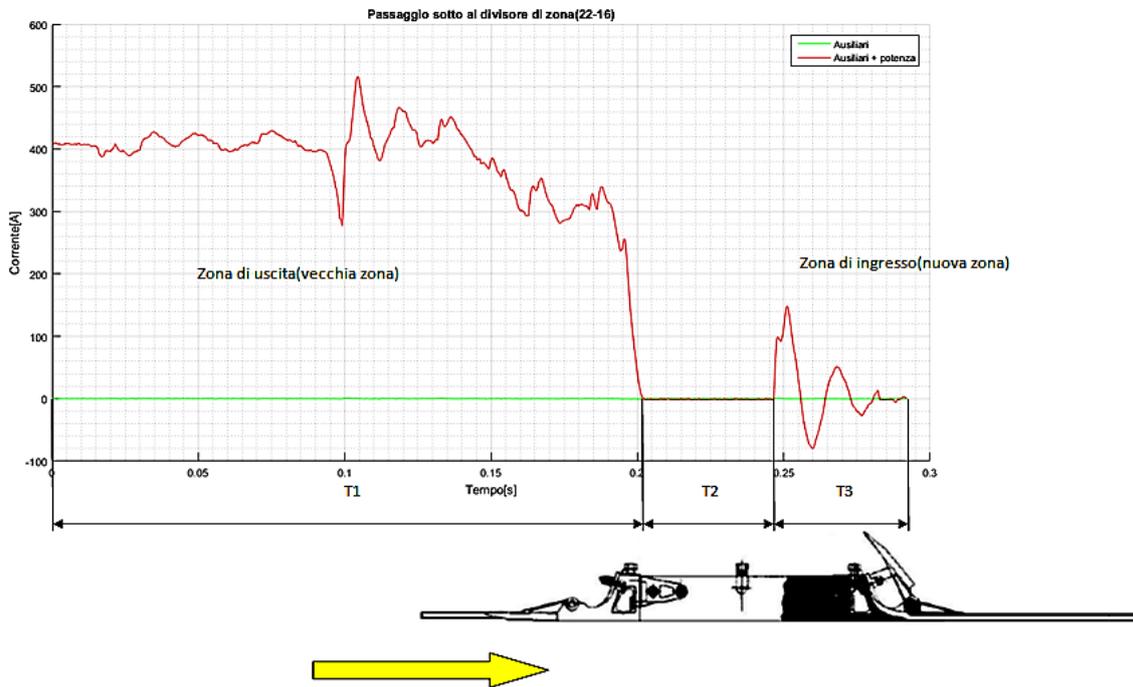


Figura 5.2. Il passaggio sotto al divisore

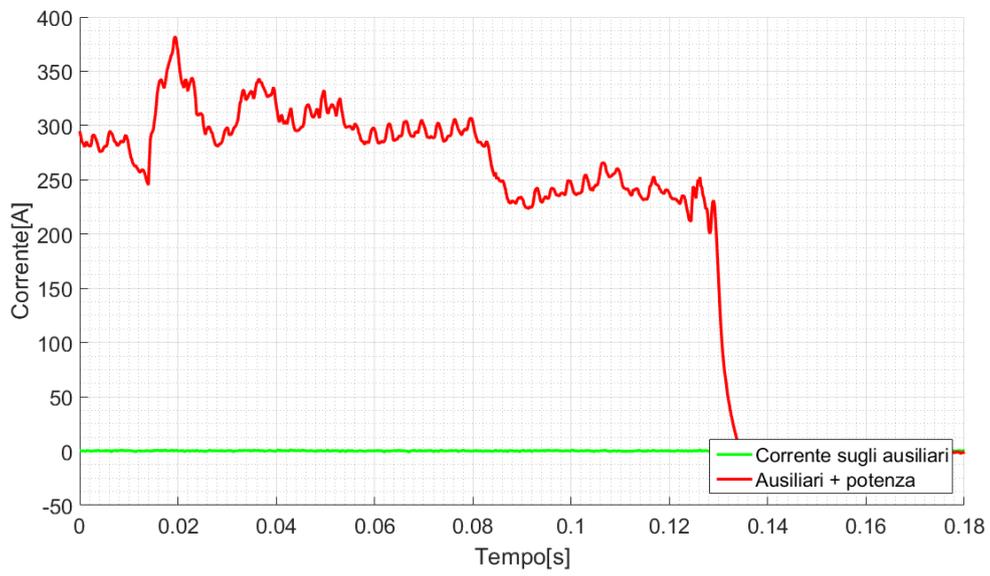


Figura 5.3. Passaggio verso una zona disalimentata

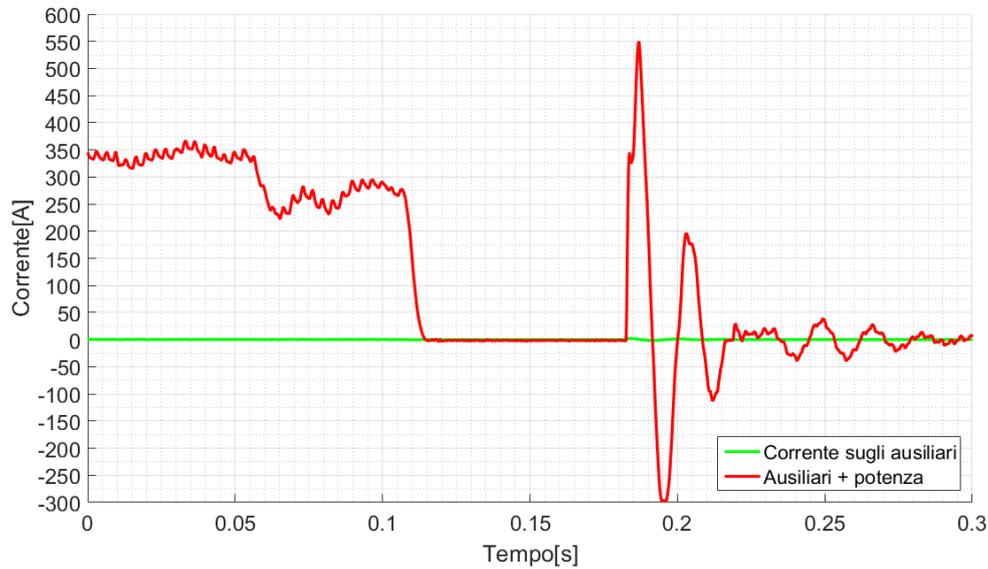


Figura 5.4. Passaggio sotto il divisore a bassa velocità

RESET dell'azionamento. Nel secondo caso si hanno delle oscillazioni che si assestano intorno ad un valore medio non nullo, questo profilo d'onda potrebbe essere causato da un NON RESET dell'azionamento.

Si cerca di trovare una correlazione tra la corrente che si ha prima dell'arco elettrico e il tempo dell'arco (T_1) sommato al tempo morto (T_2) che di fatto corrisponde al tempo impiegato a passare sotto al divisore come mostrato in figura 5.6. I risultati ottenuti si elencano in tabella 5.3 da cui si nota che più la corrente è elevata più è possibile ottenere un NON RESET dell'azionamento.

Questa tabella evidenzia anche che se si ha il RESET dell'azionamento, se si assorbono delle correnti elevate prima del divisore, il tempo T_1+T_2 è più lungo mentre con correnti più basse si ha un tempo più breve. La corrente assorbita non è proporzionale alla velocità della motrice.

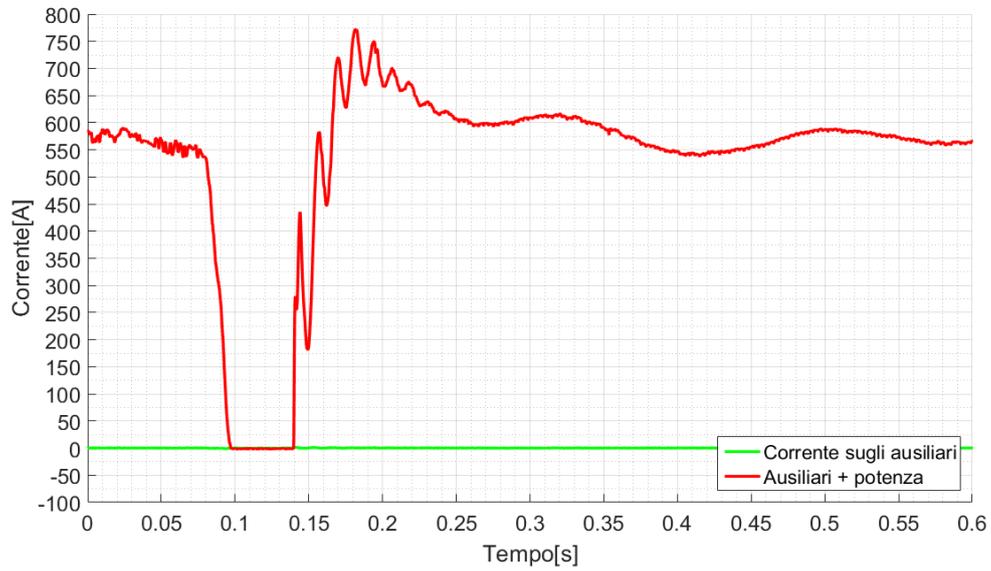


Figura 5.5. Passaggio sotto il divisore a velocità elevata



Figura 5.6. Correlazione corrente prima dell'arco-T1+T2

	Corrente prima arco[A]	T1+T2[ms]	Reset azionamento
DIV50032.MEM	410	191,8	SI
DIV50033.MEM	349,2	186,6	SI
DIV50034.MEM	398,4	82,2	SI
DIV50035.MEM	500	90,4	SI
DIV50036.MEM	230	727	SI
DIV50037.MEM	615	293,4	SI
DIV50041.MEM	490	66,8	SI
DIV50044.MEM	623,1	133,2	SI
DIV50045.MEM	468	222,6	SI
DIV50051.MEM	494,7	130,2	SI
DIV50052.MEM	470	79,2	SI
DIV50053.MEM	482,2	137	SI
DIV50056.MEM	495	176,6	SI
DIV50058.MEM	440,3	2461	SI
DIV50060.MEM	454,7	119,8	SI
DIV50063.MEM	141,3	94	SI
DIV50065.MEM	402	167,6	SI
DIV50066.MEM	512,5	132,4	SI
DIV50067.MEM	360	89,8	SI
DIV50068.MEM	367	162,6	SI
DIV50070.MEM	495	113,8	SI
DIV50071.MEM	456	88	SI
DIV50072.MEM	415	233,6	SI
DIV50073.MEM	60	792,6	SI
DIV50077.MEM	400	119	SI
DIV50039.MEM	580	141,8	NO
DIV50040.MEM	610	138,8	NO
DIV50042.MEM	598	282,8	NO
DIV50054.MEM	530	83,2	NO
DIV50057.MEM	575	157,6	NO
DIV50059.MEM	610	145,2	NO
DIV50061.MEM	600	186	NO
DIV50062.MEM	590	139,6	NO
DIV50069.MEM	580	127,8	NO
DIV50074.MEM	610	162,4	NO
DIV50076.MEM	575	152,6	NO

Tabella 5.3. Correlazione corrente prima dell'arco-tempo passaggio sotto al divisore

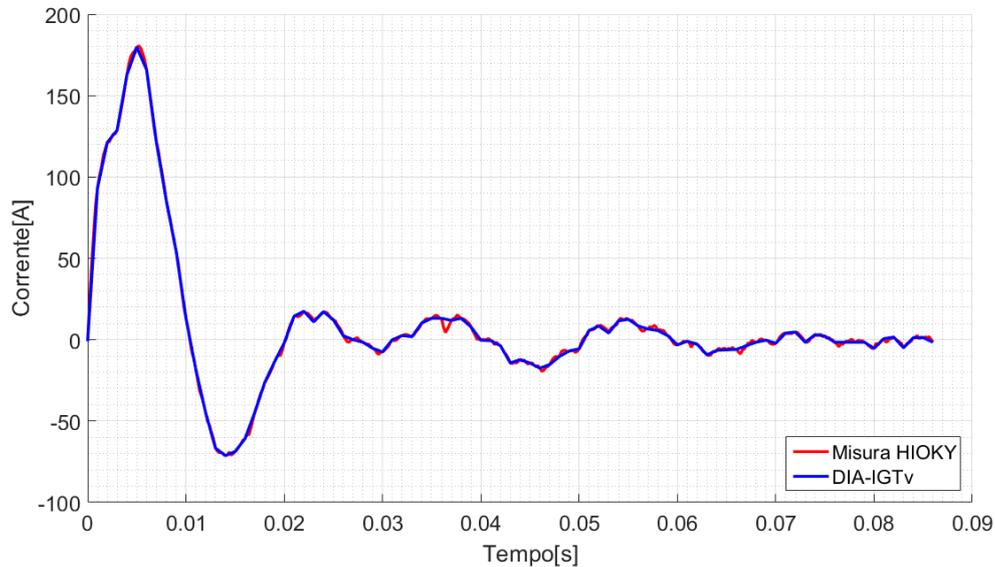


Figura 5.7. Segnale misurato vs segnale DIA-IGTv

5.1.2 Cumulate della motrice 5000

A questo punto si svolge un'analisi delle cumulate dei parametri caratteristici delle prove ricavando le:

- 1 Cumulate di GRADMAX e MAXDR senza reset.
- 2 Cumulate di GRADMAX e MAXDR con reset.
- 3 Cumulate di GRADMAX e MAXDR globali.

L'analisi si svolge confrontando il campionamento a $200 \mu\text{s}$ (che è quello delle misure) con il campionamento del DIA-IGTv ossia di 1 ms per evidenziare la differenza tra misura e campionamento del relè come si evince in figura 5.7 dove la linea blu indica il campionamento del DIA e quella rossa il segnale derivante dalle misure.

1 Cumulate senza reset

Confrontando l'andamento della DR teoricamente campionata dal relè con

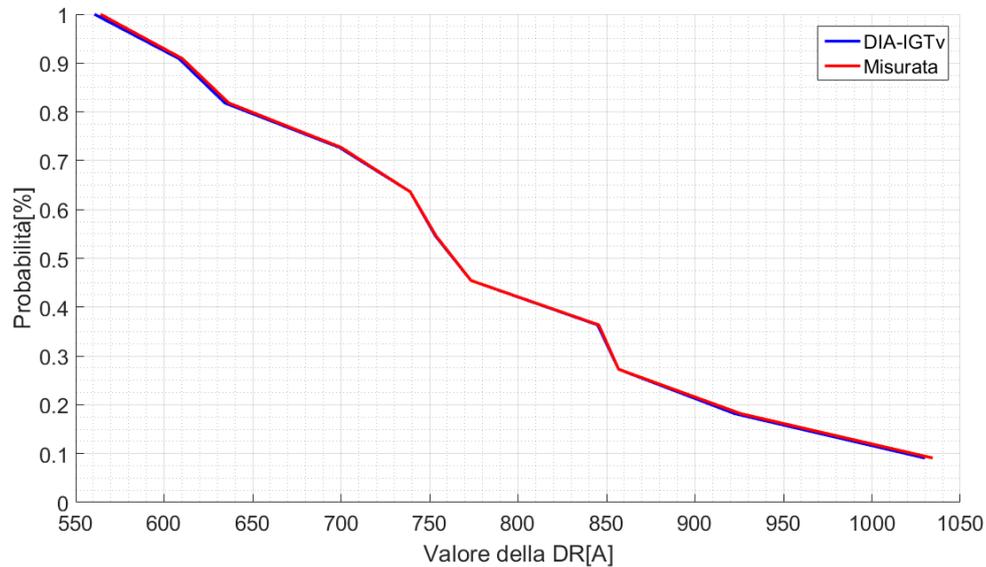


Figura 5.8. Cumulata MAXDR senza reset

quella misurata (figura 5.8) si nota il DIA rileva bene l'andamento di questo parametro che va da un minimo di 560,5 A a 1030 A quando nella realtà si aveva una variazione da 564,1 A a 1034 A. Viceversa sul gradiente si ha un errore che valuteremo successivamente. La variazione sul segnale reale va da 151,6 A/ms fino a 432,8 A/ms mentre il relè misura una variazione da 100,6 A/ms fino a 262,6 A/ms (figura 5.9)

2 Cumulate con il reset

Anche in questo caso si nota che la misura di DR è piuttosto precisa, il valore reale va da 149,1 A fino a 552 A mentre il relè misura poco di meno ossia da 149,1 A fino a 552 A (figura 5.10). Sul gradiente viene nuovamente commesso un valore negativo. Il relè misura una variazione da 54,6 A/ms fino a 298,8 A/ms mentre il segnale reale varia da 120,3 A/ms fino a 560,9 A/ms (figura 5.11).

A questo punto si confrontano i gradienti massimi e i DR massimi nel caso

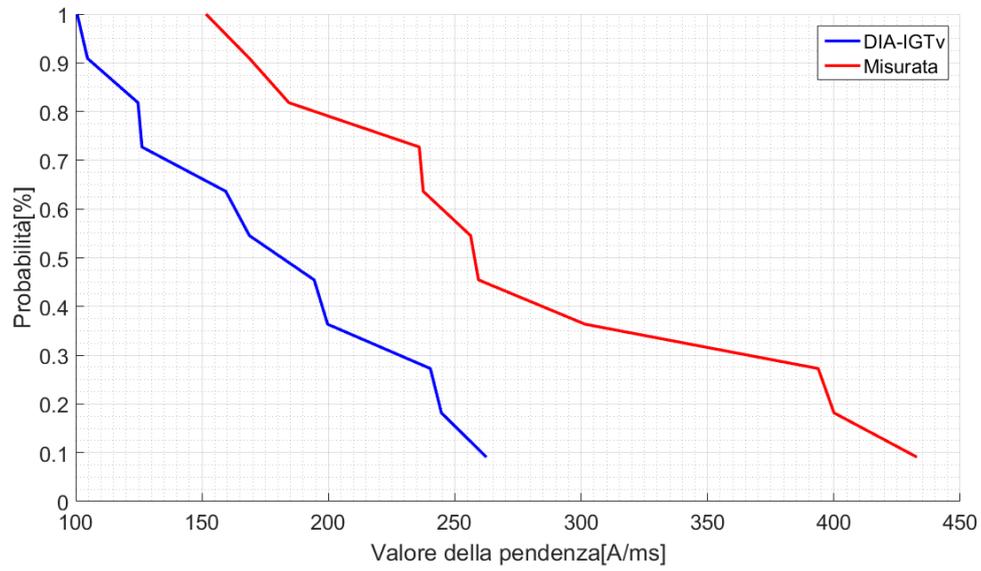


Figura 5.9. Cumulata GRADMAX senza reset

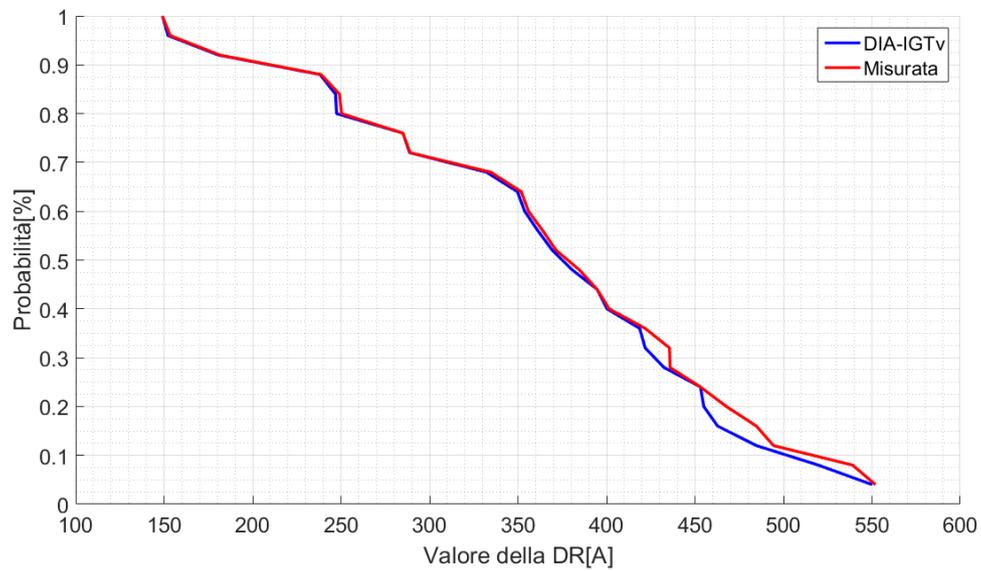


Figura 5.10. Cumulata MAXDR con reset

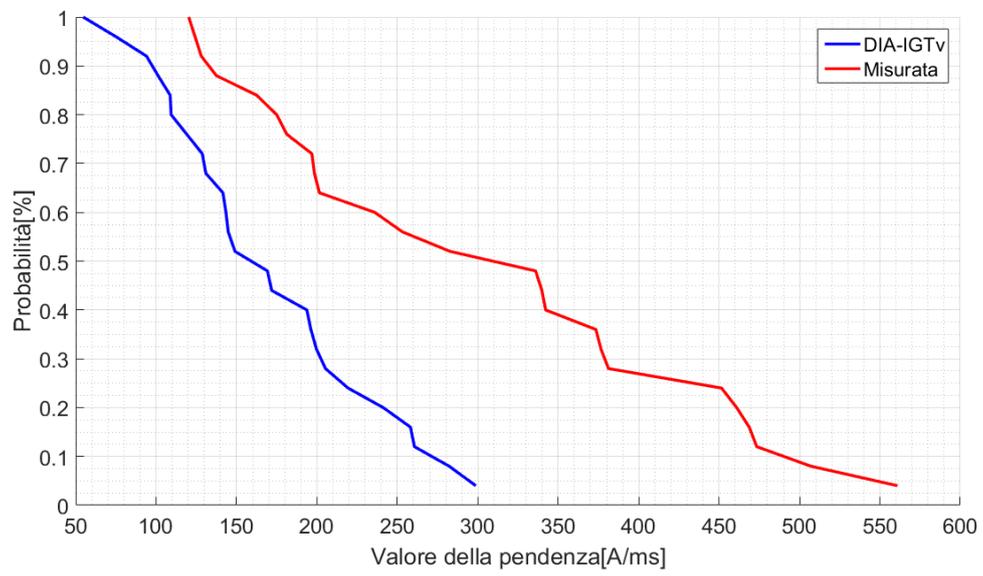


Figura 5.11. Cumulata GRADMAX con reset

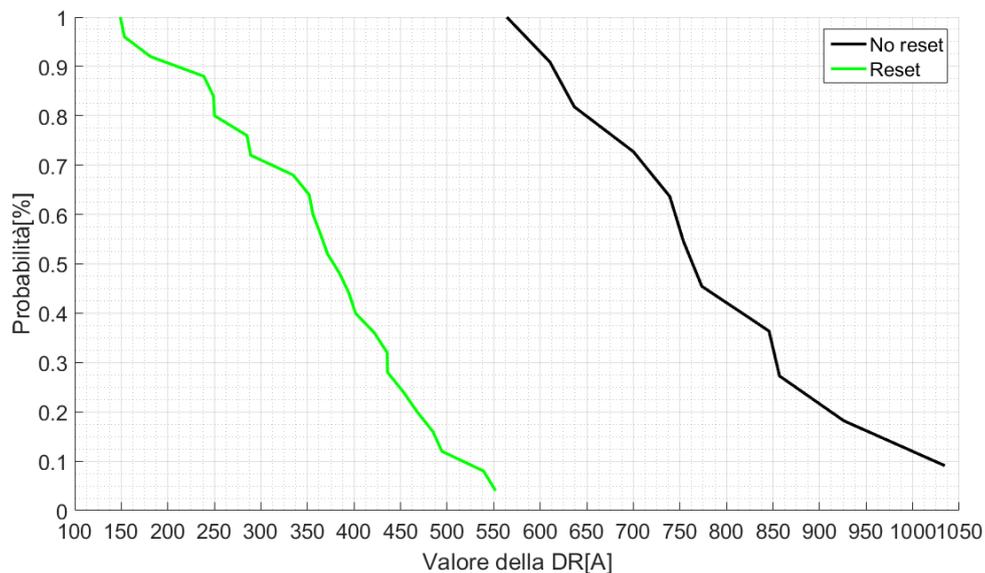


Figura 5.12. Cumulata MAXDR, reset vs no reset

in cui si abbia un reset e nel caso contrario. Si ottengono i risultati di figura 5.12 in cui si nota che quando l’azionamento non si resetta si raggiungono dei valori di DR più elevati e di figura 5.13 dove si evidenzia un comportamento critico nel caso di RESET.

3 Cumulate globali

Come nei casi precedenti, la misura di DR è affetta da un’errore molto basso, nella realtà si rileva da 148,1 A fino a 1034 A mentre il relè misura da 149,1 A fino a 1030 A (figura 5.14). Nel caso della misura delle pendenze, si commette nuovamente un errore in negativo. Nella realtà si hanno gradienti che vanno da 120,3 A/ms fino a 560,9 A/ms mentre il relè misura da 54,69 A/ms fino a 298,8 A/ms (figura 5.15).

In tabella 5.4 si riassumono i valori letti nei grafici precedenti mentre in tabella 5.5 si elencano le caratteristiche che si ricavano dalle prove evidenziando la

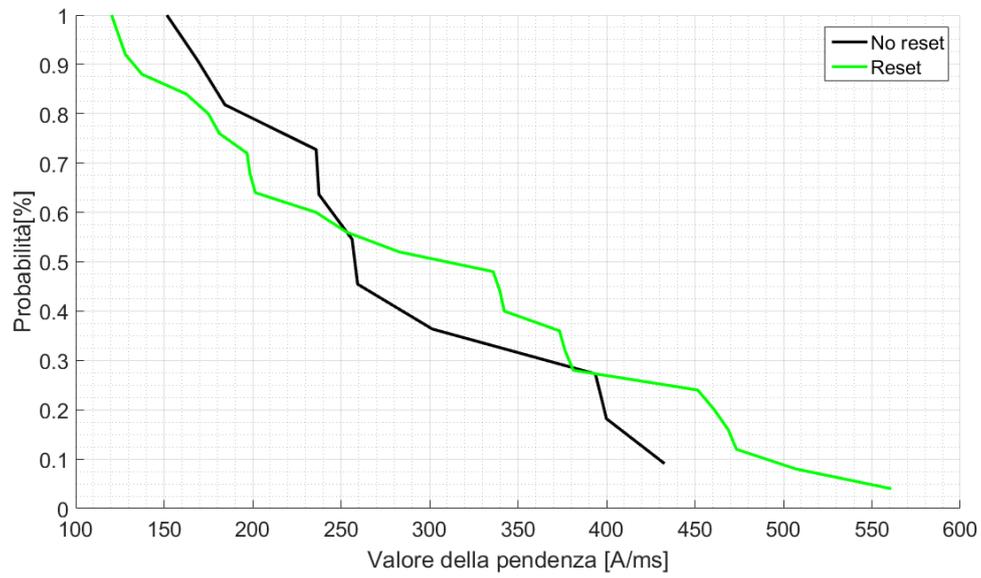


Figura 5.13. Cumulata GRADMAX, reset vs no reset

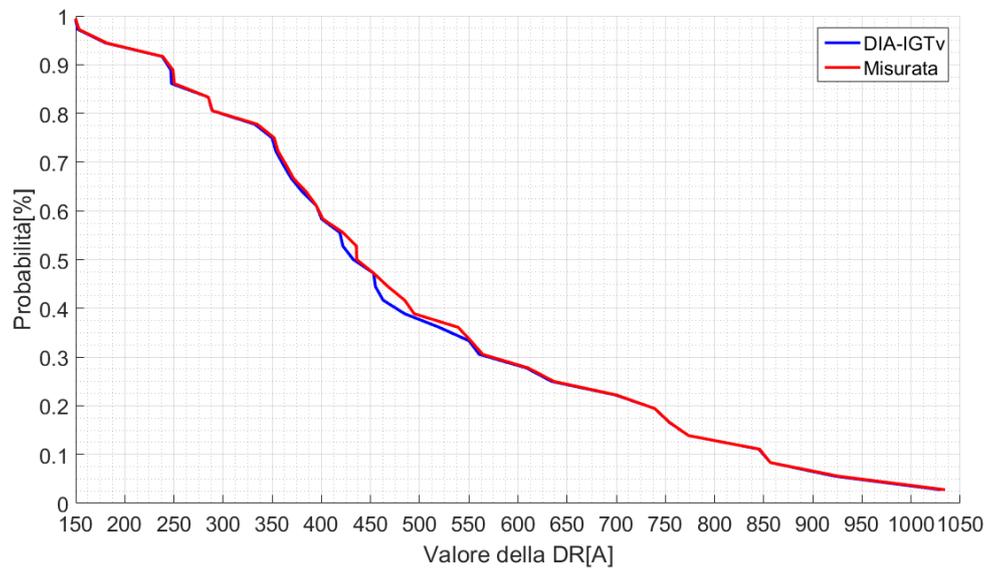


Figura 5.14. Cumulata MAXDR, reset + no reset

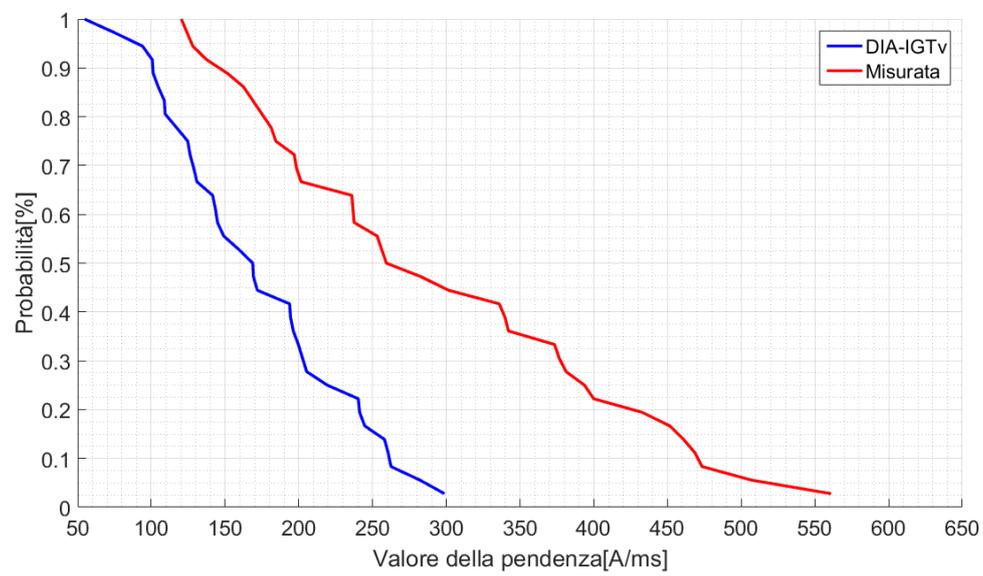


Figura 5.15. Cumulata GRADMAX, reset + no reset

	GRADMAX		DRMAX	
	Reale	Relè	Reale	Relè
No reset	151,6-432,8	100,6-262,5	564,1-1034	560,5-1030
Reset	120,3-560,9	54,69-298,8	149,1-552	149,1-550,2
Globali	120,3-560,9	54,69-298,8	149,1-1034	149,1-1030

Tabella 5.4. Estremi di variazione nelle cumulate

differenza tra il campionamento reale a $200 \mu\text{s}$ e quello che ipoteticamente farebbe il DIA-IGTv(1 ms).

A questo punto si può fare un'analisi degli errori percentuali commessi dal relè prendendo di riferimento la misura campionata a $2 \mu\text{s}$. In tabella 5.6 si osservano i risultati.

Si deve notare che il termine "errore" si riferisce alla differenza tra il campionamento reale e quello che ipoteticamente svolge il relè.

5.1.3 Confronto tra la motrice 5000 e la motrice 6000

Si vuole fare un confronto tra:

A Forma d'onda nel passaggio sotto al divisore tra vettura 5000 e 6000.

B Cumulate delle due vetture.

A. Forme d'onda nel passaggio sotto al divisore: le forme d'onda del fenomeno sono diverse a seconda della vettura analizzata. Come si nota dalla figura 5.16, la motrice 6000 tende ad avere una forma simile ad un'esponenziale mentre la risposta della vettura 5000 è affetta da un'oscillazione. Si nota anche che la 6000 tende ad assorbire una corrente non nulla quando si trova in mezzo al divisore mentre la 5000 non assorbe o comunque parte da una corrente negativa, questo comporta dei gradienti più elevati per questa motrice. Successivamente si analizzano gli estremi di variazione per il gradiente e per

File		Gradmax[A/ms]		MaxDR[A]	
		200us	1ms	200us	1ms
DIV50056.MEM	Sezione8	460,9375	260,625	355,9375	353,75
DIV50058.MEM	Sezione9	137,5	75	238,75	238,125
DIV50076.MEM	Sezione19	432,8125	240,3125	773,4375	773,435
DIV50065.MEM	Sezione46_1	376,5625	199,6875	394,6875	394,6875
DIV50066.MEM	Sezione46_2	335,9375	241,25	401,5625	400,3125
DIV50032.MEM	Sezionezona36	339,84375	144,84375	285	285
DIV50053.MEM	Zona1-14	120,3125	94,0625	181,5625	180,625
DIV50036.MEM	Zona3-4	253,125	193,75	453,125	453,125
DIV50041.MEM	Zona3-38	468,75	219,375	421,875	421,875
DIV50040.MEM	Zona4-3	301,5625	199,6875	739,0625	739,0625
DIV50037.MEM	Zona4-57	342,1875	196,25	467,8125	455
DIV50052.MEM	Zona7-1	235,9375	143,4375	364,0625	361,25
DIV50044.MEM	Zona7-49	128,125	109,375	351,875	349,6875
DIV50057.MEM	Zona8-9	237,5	126,25	753,75	753,4375
DIV50059.MEM	Zona9-40	168,75	104,6875	700	699,0625
DIV50074.MEM	Zona11-19	256,25	168,75	845,625	845
DIV50035.MEM	Zona12-3	201,5625	171,875	371,5625	369,375
DIV50034.MEM	Zona13-12	560,9375	298,75	494,375	462,8125
DIV50077.MEM	Zona13-36	473,4375	205,3125	484,6875	484,6875
DIV50054.MEM	Zona14-8	235,9375	159,375	564,0625	560,625
DIV50073.MEM	Zona16-11	162,5	101,25	153,4375	152,1875
DIV50072.MEM	Zona22-16	120,3125	54,6875	149,0625	149,0625
DIV50071.MEM	Zona25-22	373,4375	258,125	435,625	418,75
DIV50070.MEM	Zona28-25	451,5625	282,1875	539,0625	519,6875
DIV50061.MEM	Zona30-42	393,75	262,5	1034,375	1030
DIV50068.MEM	Zona31-35	282,8125	130,9375	435,9375	432,5
DIV50069.MEM	Zona35-28	259,375	194,375	925,9375	922,5
DIV50036.MEM	Zona36-13	507,03125	169,21875	552,03125	550,15625
DIV50042.MEM	Zona38-1	151,5625	100,625	636,5625	634,375
DIV50060.MEM	Zona40-30	181,25	128,75	250,3125	246,875
DIV50062.MEM	Zona42-45	184,375	124,6875	610,3125	608,4375
DIV50063.MEM	Zona45-46	381,25	141,5625	384,6875	380,625
DIV50067.MEM	Zona46-31	196,875	149,0625	249,0625	247,5
DIV50051.MEM	Zona49-7	175	109,375	289,0625	288,75
DIV50045.MEM	Zona49-10	198,4375	108,75	334,6875	332,1875
DIV50039.MEM	Zona57-4	400	244,6875	856,875	856,875

Tabella 5.5. Caratteristiche segnale originale vs DIA-IGTv

	Errore GRADMAX[%]			Errore MAXDR[%]		
	Medio	Min	Max	Medio	Min	Max
No reset	-35,71	-46,84	-25,60	-0,21	-0.61	0
Reset	-40,57	-66.63	-14,63	-1,05	-6.38	0
Globale	-39,09	-66,63	-14,63	-0,79	-6,38	0

Tabella 5.6. Tabella riassuntiva lettura cumulate

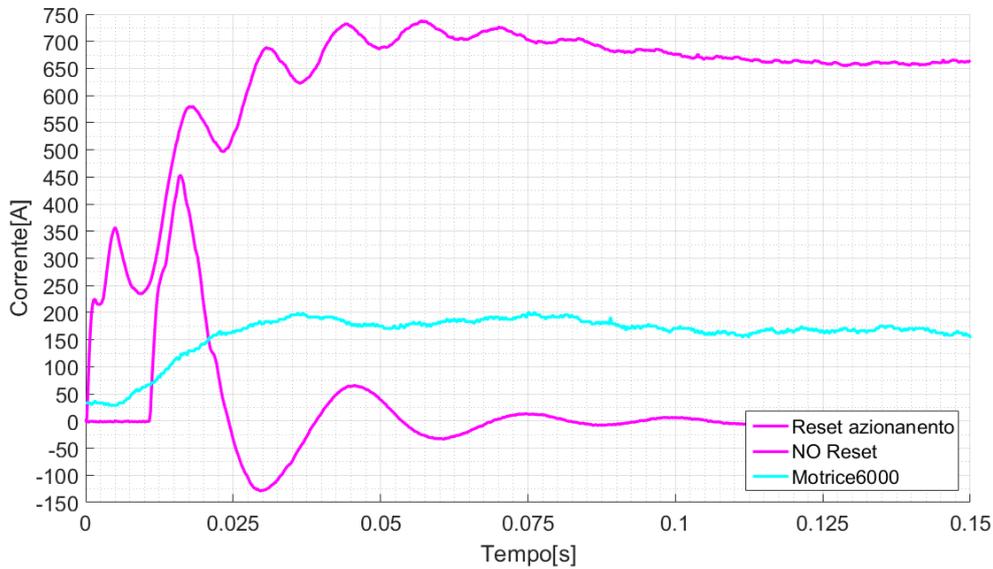


Figura 5.16. Forme d'onda per la motrice 5000 e 6000

il DR delle due motrici 5000 e 6000. Tendenzialmente l'andamento esponenziale per la vettura 6000 viene rispettato, inoltre la motrice è causa di DR più elevati (figura 5.17). Si osserva che il massimo DR per la motrice 5000 è portato da un non reset dell'azionamento come già osservato. Se si confrontano le pendenze (figura 5.18) si nota che i massimi e minimi per la motrice 5000 sono entrambi portati da un reset dell'azionamento. Il minimo gradiente della motrice 6000 è molto basso (in quanto è stata inserita una forma d'onda campionata a 20 ms, il gradiente in questo caso è 1,157 A/ms se si vuole sapere l'originale, sapendo che si campionava a 200 μ s si ricava facilmente che era di 115,7 A/ms che comunque non è indifferente). Si nota che l'andamento nel caso del gradiente minimo è simile a quello di una rampa. La motrice 6000 non sembra causa di problemi.

B. Cumulate delle due vetture: si confrontano le cumulate delle vetture per

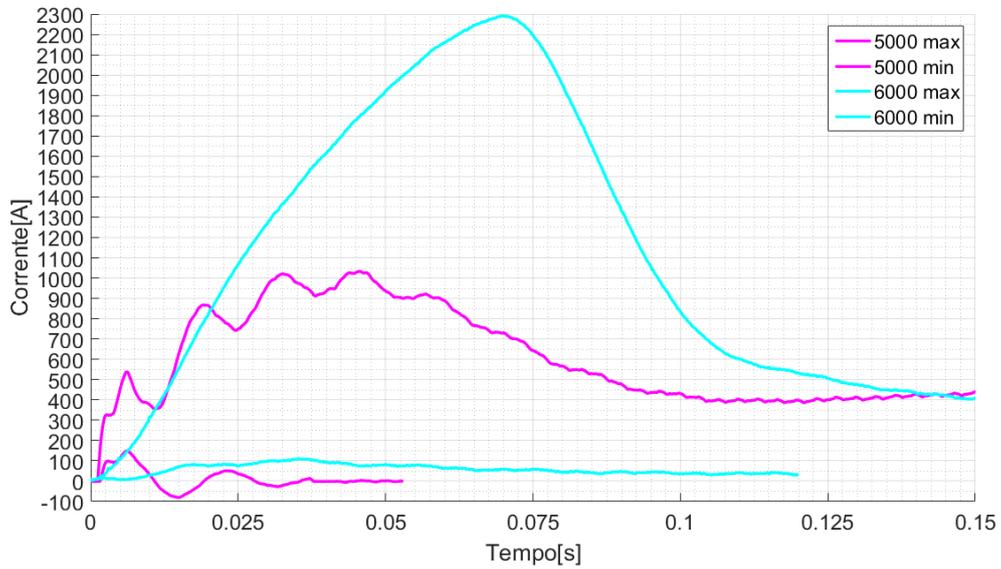


Figura 5.17. Forme d'onda DR_{\min} - DR_{\max} per motrice 5000 e 6000

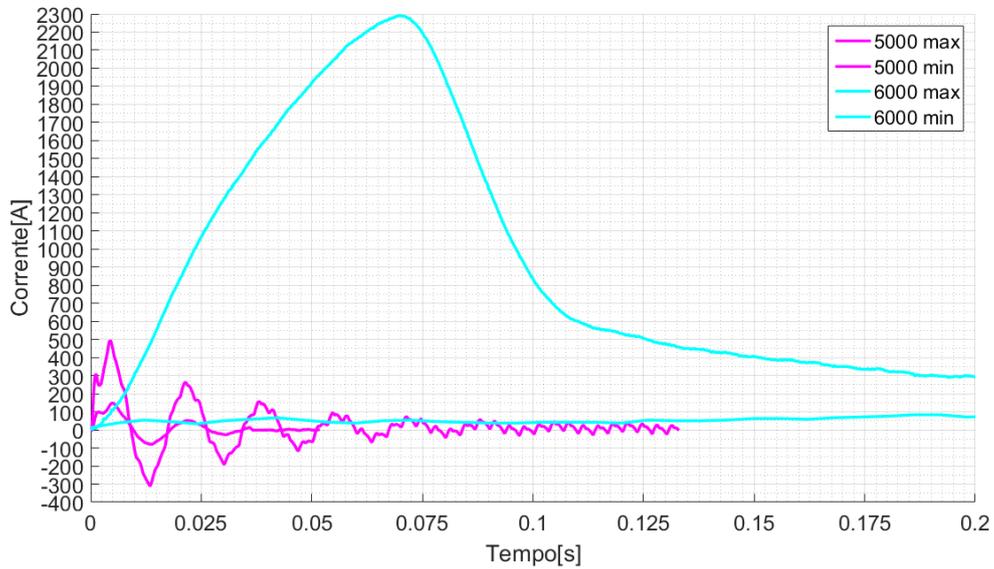


Figura 5.18. Forme d'onda $GRADMAX_{\min}$ - $GRADMAX_{\max}$ per motrice 5000 e 6000

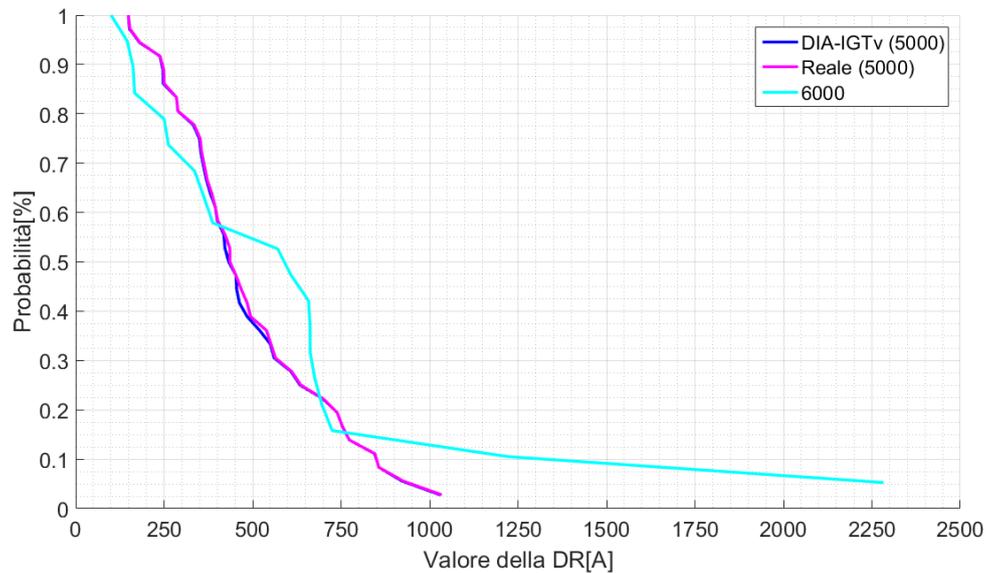


Figura 5.19. Cumulate delle massime DR, motrice 5000 e 6000

		MAXDR[A]	GRADMAX[A/ms]
Vettura 6000		99,99-2283	1,157-207
Vettura 5000	Reale	149,1-1034	120,3-560,9
	Relè	149,1-1030	54,69-298,8

Tabella 5.7. Estremi di variazione per la motrice 5000 e la motrice 6000

capire quale delle due porta maggiori problemi. In figura 5.19 si nota come la motrice 6000 (linea azzurra) sia causa di DR più elevati rispetto alla 5000 (linea viola per le misure e blu per il possibile campionamento). Mentre se si confrontano i gradienti sembra che la motrice 5000 sia causa di pendenze maggiori (figura 5.20). In tabella 5.7 si riassumono i dati letti dai grafici precedenti.

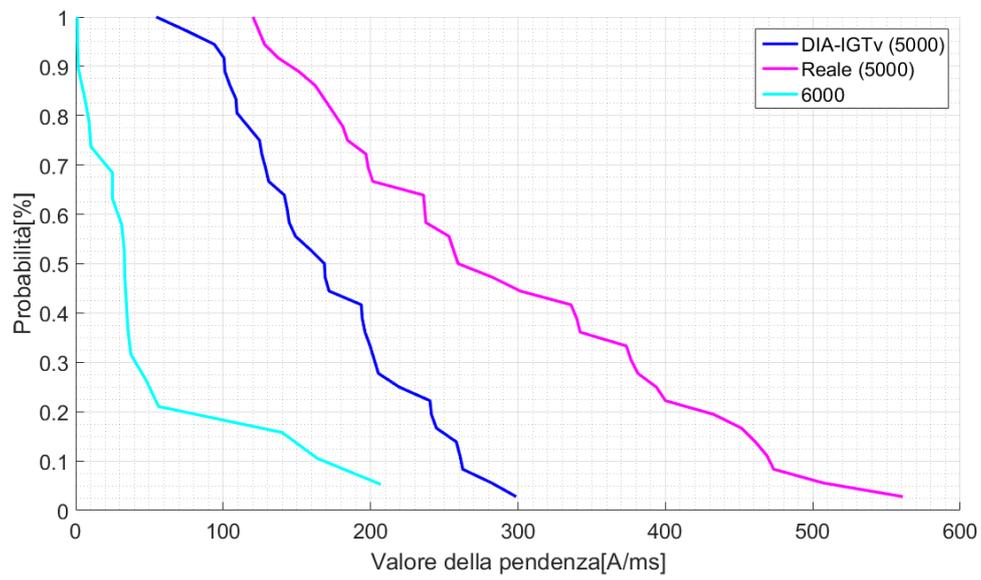


Figura 5.20. Cumulate dei massimi gradienti, motrice 5000 e 6000

	Strumento collegato	Fondo scala
CH1	Pinza HIOKY 3285	200 A
CH2	Pinza HIOKY 3285	2000 A

Tabella 5.8. Settaggio pinze amperometriche

Registratore HIOKY MR8880	CH1	Ratio	200
		Time/DIV	20 ms/DIV
		Range	50 mV
		T_campionamento	200 μ s
	CH2	Ratio	2000
		Time/DIV	20 ms/DIV
		Range	50 mV
		T_campionamento	200 μ s

Tabella 5.9. Settaggio canali del registratore

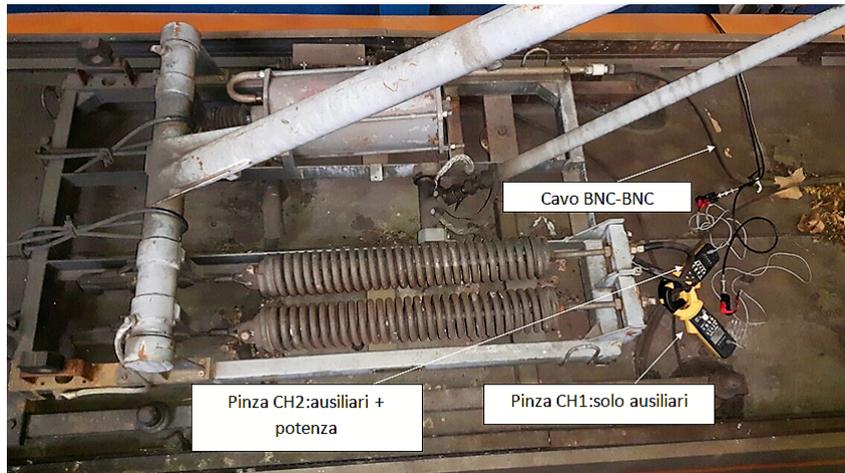
5.2 Misure a bordo della motrice 2800

La seconda campagna si è svolta a bordo di una motrice 2884. Questa vettura si distingue da quella utilizzata nelle precedenti rilevazioni in quanto si tratta della motrice più vecchia in servizio. Mentre nella 5003 sono presenti degli azionamenti elettrici, in questo caso non ci sono e l'avviamento avviene direttamente sul motore DC tramite delle resistenze.

Per rilevare la corrente si utilizzano due pinze HIOKY-3285 (figura 5.21), montate sul tetto del tram. Le pinze vengono collegate ad un registratore HIOKY MR8880 tramite un cavo BNC-BNC (figura 5.21). Le loro impostazioni sono quelle in tabella 5.8 mentre il registratore è settato come in tabella 5.9.

La prova si svolge nello stesso modo di quella precedente. Anche in questo caso il tempo di registrazione è pari a 20 s.

Durante la rilevazione non sono state svolte unicamente delle registrazioni per rilevare il passaggio sotto al divisore ma anche:



(a) Tetto tram



(b) Motrice2884

Figura 5.21. Collegamento strumenti e motrice

- 1 Misure del passaggio sotto ad un incrocio per osservare se il pantografo, oscillando, possa causare andamenti simili a quelli del passaggio sotto al divisore.
- 2 Misure di tensione, richieste dalla GTT, per valutare l'energia assorbita dalla vettura. Queste ultime, sono state svolte con uno strumento in dotazione all'azienda che permetteva di avere una misura di tensione attraverso un'inverter.

Si ricorda che hai fini della taratura, sarà importante un'analisi approfondita del passaggio sotto al divisore.

5.2.1 Analisi delle misure della motrice 2800

La prima cosa che si evidenzia è che la forma d'onda del passaggio sotto al divisore di una vettura 2800, è diversa da quella delle altre due vetture (figura 5.22). Anche in questo caso si riesce a capire bene come avvenga il passaggio sotto al divisore. Prima che la corrente diventi nulla, si ha il fenomeno di arco elettrico. Quando il pantografo si trova a metà del divisore si ha assorbimento nullo. Quando la motrice entra nella nuova zona si ottiene un picco di assorbimento. Nelle prove della motrice 5000 il divisore era attraversato in piena accelerazione, anche in questo caso è riproposta la stessa condizione (in modo da ricreare la situazione più critica). Questo comporta una fase di "stacco" del motore.

Si osserva che quasi tutti i passaggi hanno questo tipo di forma d'onda. A differenza della motrice 5000, non si ha quindi una distinzione tra reset e non reset dell'azionamento.

5.2.2 Cumulate della motrice 2800

Anche in questo caso si determinano le cumulate del gradiente massimo e della DR massima registrata in ogni misura. Si confrontano le cumulate rilevate con il

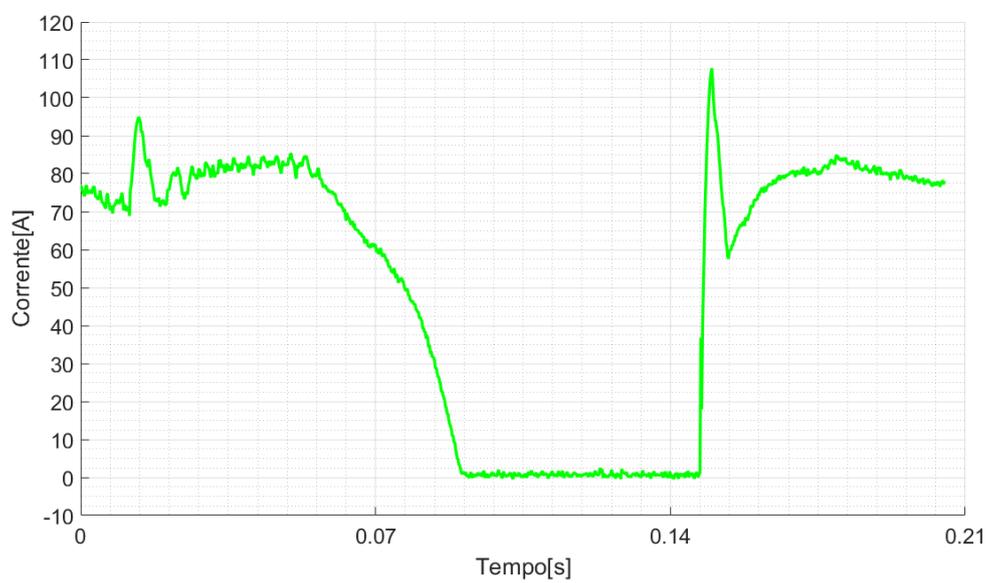


Figura 5.22. Passaggio sotto al divisore di una vettura 2800

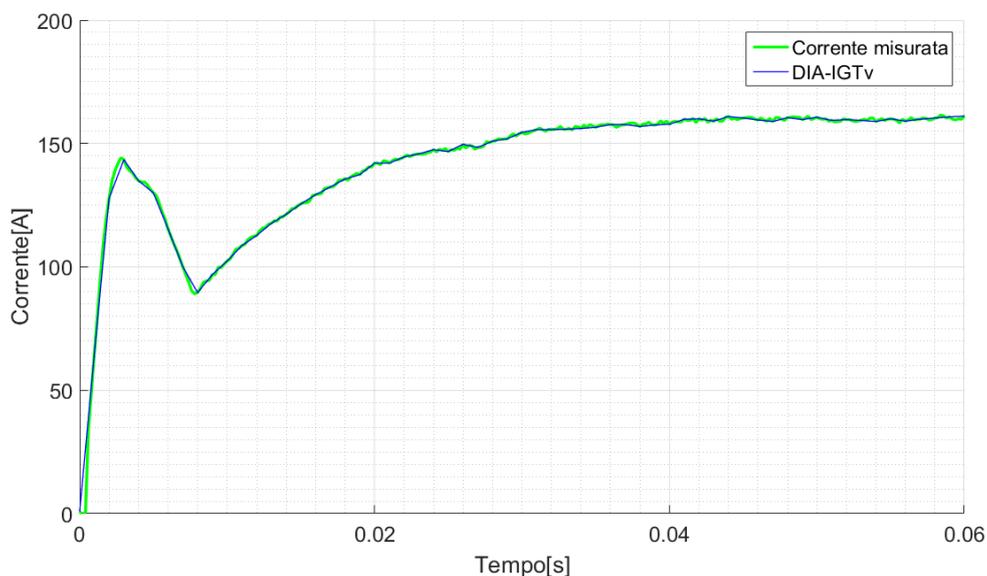


Figura 5.23. Forma d'onda misurata e ipoteticamente campionata dal relè

campionamento a $200 \mu\text{s}$ (linea verde) con quelle teoricamente misurate dal relè (linea blu), si esegue dunque un'interpolazione delle misure a 1 ms come in figura 5.23.

Come si nota, il relè misura una pendenza minore rispetto a quella reale. Al fine di valutare di quanto diminuisca il campionamento del DIA rispetto al segnale misurato si svolge il confronto tra le due misure. In figura 5.24 si confrontano le massime pendenze, si nota che il relè rileva un gradiente che va da $3,125 \text{ A/ms}$ fino a $126,3 \text{ A/ms}$ mentre quelle misurate sono più alte ($10,94 \text{ A/ms}$ - $251,6 \text{ A/ms}$). In figura 5.25 si hanno le differenze di corrente. Come già visto nelle misure precedenti, si nota che la differenza di corrente rilevata dal DIA è praticamente identica a quella misurata. La tabella 5.10 riassume quanto detto finora mentre in tabella 5.11 vengono elencate le differenze dei parametri caratteristici distinte tra segnale misurato e relè. Si può calcolare la differenza tra i parametri misurati sul campo ed eventualmente campionati dal relè e si ottengono i risultati di tabella 5.12.

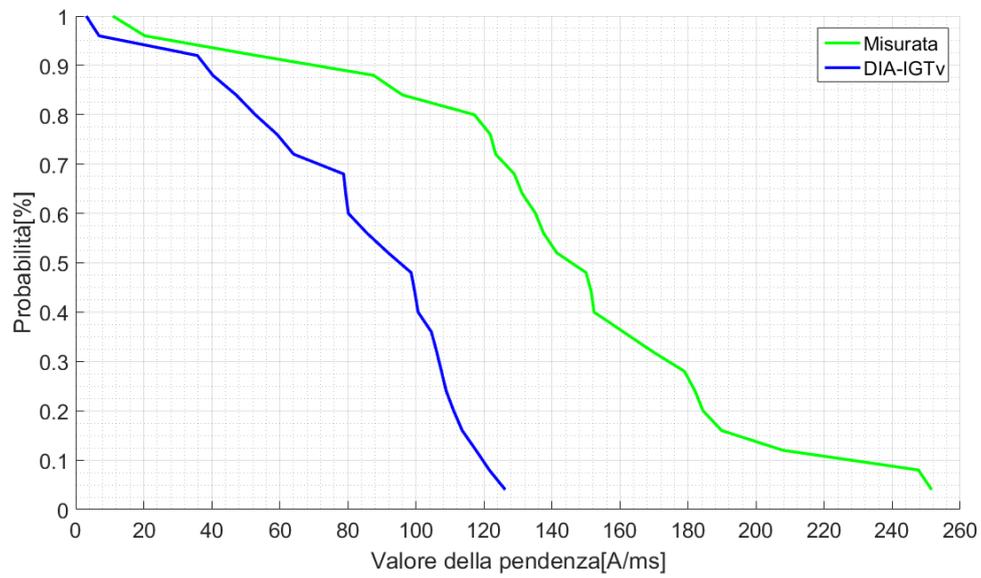


Figura 5.24. Cumulate delle massime pendenze, motrice 2800

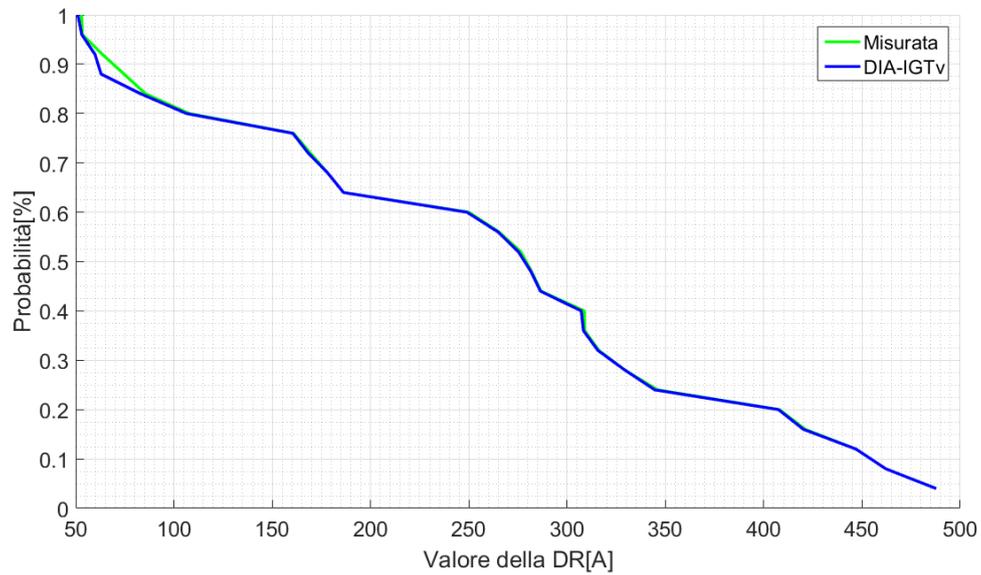


Figura 5.25. Cumulate delle massime DR, motrice 2800

GRADMAX[A/ms]		DRMAX[A]	
Reale	Relè	Reale	Relè
10,94-251,6	3,125-126,3	52,97-487,8	51,09-487,7

Tabella 5.10. Estremi di variazione dei parametri per la taratura, vettura 2800

File		Gradmax[A/ms]		DRmax[A]	
		200 μ s	1 ms	200 μ s	1 ms
2884_001.MEM	Prova1	131,25	85,63	250	249,06
2884_002.MEM	Prova2	151,56	117,66	487,81	487,66
2884_003.MEM	Prova3	121,88	108,91	421,09	420,16
2884_004.MEM	Prova4	20,31	6,88	63,59	62,97
2884_005.MEM	Prova5	207,81	79,38	169,38	168,28
2884_006.MEM	Prova6	53,13	40,31	52,97	51,09
2884_007.MEM	Prova7	160,94	91,88	462,03	462,03
2884_009.MEM	Prova9	247,66	104,53	265,31	264,84
2884_011.MEM	Prova11	123,44	99,69	345,94	344,53
2884_012.MEM	Prova12	184,38	121,56	286,72	286,41
2884_015.MEM	Prova15	182,03	107,5	446,88	446,88
2884_016.MEM	Prova16	87,5	52,81	186,25	186,25
2884_017.MEM	Prova17	137,5	80,16	178,13	178,13
2884_018.MEM	Prova18	117,19	59,22	85,63	83,13
2884_020.MEM	Prova20	96,09	35,78	63,59	59,84
2884_021.MEM	Prova21	152,34	113,59	407,97	407,5
2884_022.MEM	Prova22	189,84	126,25	276,41	275,16
2884_023.MEM	Prova23	135,16	100,63	281,88	281,56
2884_024.MEM	Prova24	251,56	98,59	308,91	307,19
2884_026.MEM	Prova26	178,91	47,19	107,81	106,41
2884_027.MEM	Prova27	10,94	3,13	53,44	53,13
2884_029.MEM	Prova29	141,41	106,09	316,09	315,63
2884_030.MEM	Prova30	150	111,09	308,75	308,28
2884_031.MEM	Prova31	128,91	78,75	329,38	329,38
2884_033.MEM	Prova33	169,53	64,06	160,78	160,47

Tabella 5.11. Caratteristiche del segnale originale vs DIA, motrice 2800

Errore GRADMAX[%]			Errore MAXDR[%]		
Medio	Min	Max	Medio	Min	Max
-42,03	-71,43	-10,64	-0,76	-5,90	0

Tabella 5.12. Tabella riassuntiva lettura cumulate, motrice 2800

Anche in questo caso il termine "errore" si riferisce alla differenza tra il campionamento reale e quello che ipoteticamente esegue il relè.

5.2.3 Confronto tra le tre motrici

A. Forme d'onda nel passaggio sotto al divisore: a questo punto si confrontano le forme d'onda dovute ad un passaggio sotto al divisore delle tre vetture presenti sulla rete tranviaria (figura 5.26). Si nota che la vettura 2800 ha una forma d'onda simile a quella della vettura 6000. Il suo comportamento si avvicina a quello di una motrice 5000 solo nel caso in cui avvenga un reset. Si confrontano le forme d'onda con gli estremi di variazione del DR e del massimo gradiente. Nel caso in cui si confrontino gli estremi di variazione della DR si ottiene la figura 5.27 in cui si può osservare meglio la somiglianza della forma d'onda della 2800 con la vettura 6000 e con la 5000 (nel caso in cui non avvenga un reset). Se si confrontano gli estremi di variazione delle pendenze si ottiene la figura 5.28.

B. Confronto delle cumulate: un primo confronto lo si esegue osservando la differenza tra le cumulate ottenute dalle misurazioni. Se si confrontano le pendenze si ottiene la figura 5.29 dove si nota come la vettura 5000 sia quella che provoca maggiori problemi. La figura è comprensiva dei valori di tutte le cumulate della 5000 sia con che senza reset. La 6000 è quella che ha il valore di GRADMAX minore. Se si confrontano le DR si ottiene la figura 5.30 dove si osserva che la vettura 6000 è quella che dà maggiori problemi. La 2800 invece è quella che causa meno danni. Si possono anche paragonare i valori che probabilmente il relè rileva. In questo caso si vanno ad analizzare i dati derivanti dalle misure svolte sulla motrice 5000 e sulla 2800. Se si confrontano le pendenze si ottengono i risultati di figura 5.31 dove si nota come la vettura 5000, ha pendenza notevolmente superiore alla vettura 2800, nel confrontare i

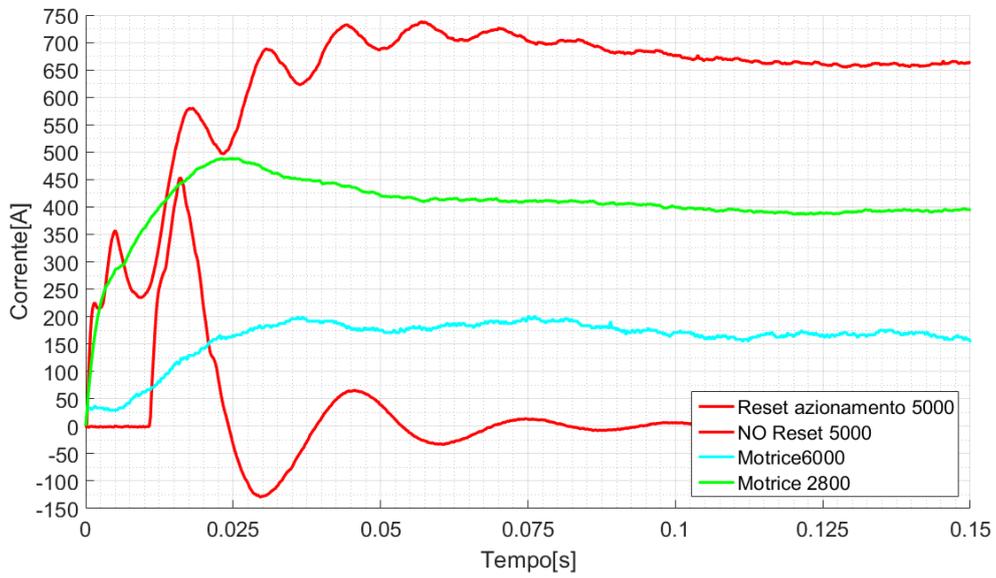


Figura 5.26. Forme d'onda dovute ad un passaggio sotto al divisore delle tre vetture

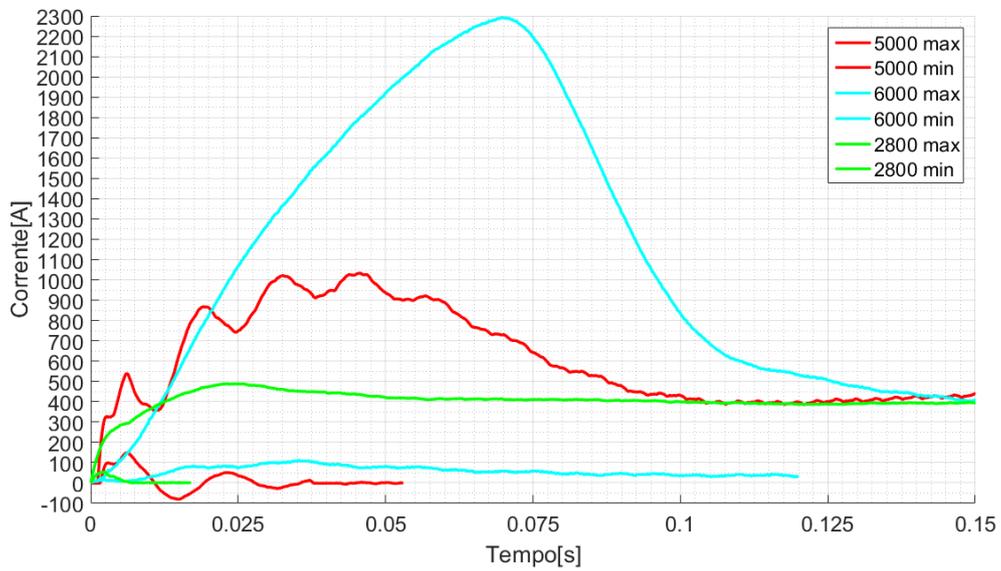


Figura 5.27. Forme d'onda DR_{\min} - DR_{\max} per le tre vetture

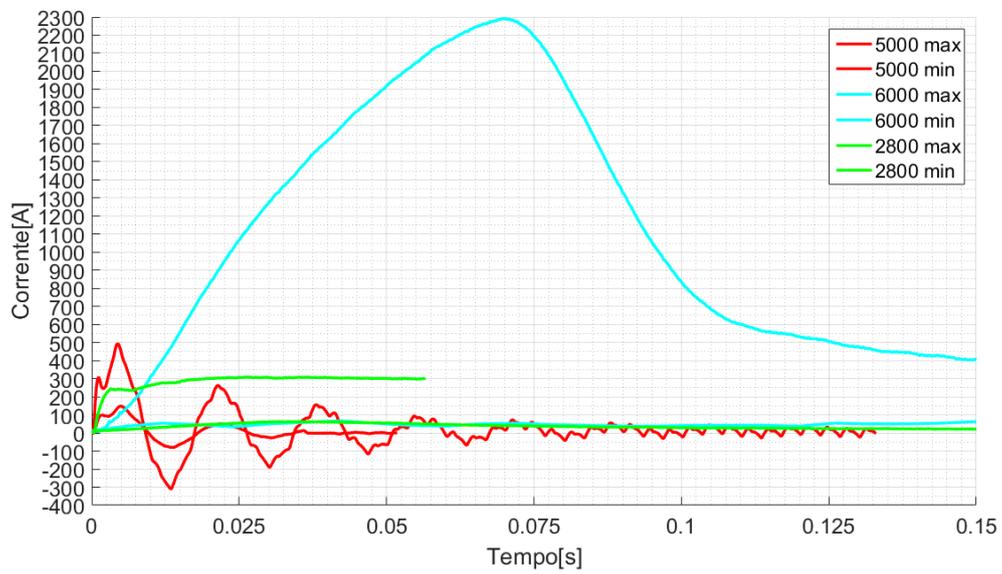


Figura 5.28. Forme d'onda $GRADMAX_{min}$ - $GRADMAX_{max}$ per le tre vetture

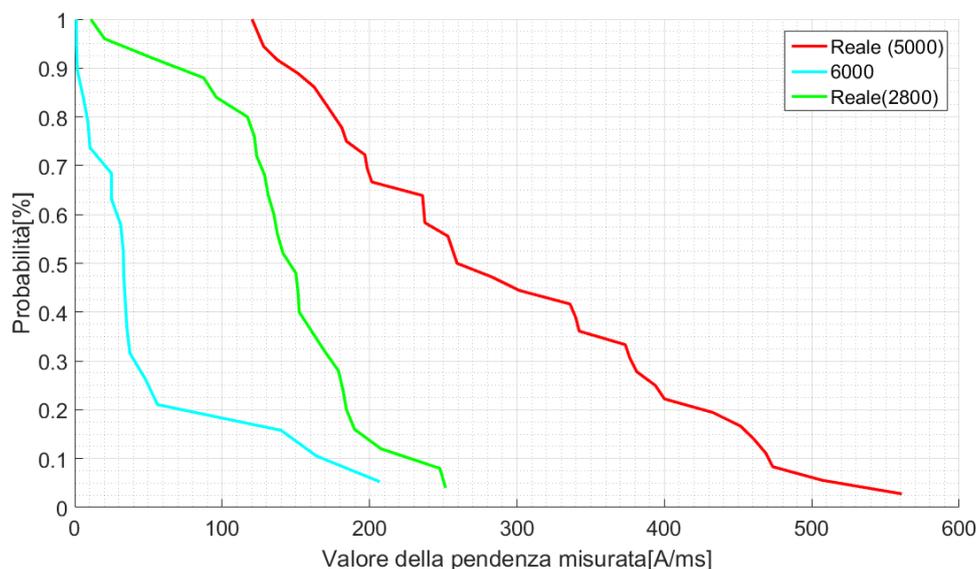


Figura 5.29. Pendenza misurata delle tre vetture

		MAXDR[A]	GRADMAX[A/ms]
Vettura 6000		99,99-2283	1,157-207
Vettura 5000	Reale	149,1-1034	120,3-560,9
	Relè	149,1-1030	54,69-298,8
Vettura 2800	Reale	52,97-487,8	10,94-251,6
	Relè	51,09-487,7	3,125-126,3

Tabella 5.13. Estremi di variazione per le tre motrici

DR si ottengono i risultati di figura 5.32 dove si osserva che viene rispettata l'affermazione precedente. In tabella 5.13 si ha un riassunto gli estremi di variazione dei parametri caratteristici. Da essa emerge come la differenza di corrente venga ben misurata, a differenza del GRAD, sul quale si dovranno prendere alcuni margini (di solito il relè riduce il valore della misura reale).

Infine si combinano i valori eventualmente misurati dal relè nelle prove sulle motrici 2800 e 5000, con i dati della vettura 6000, in modo da ottenere le

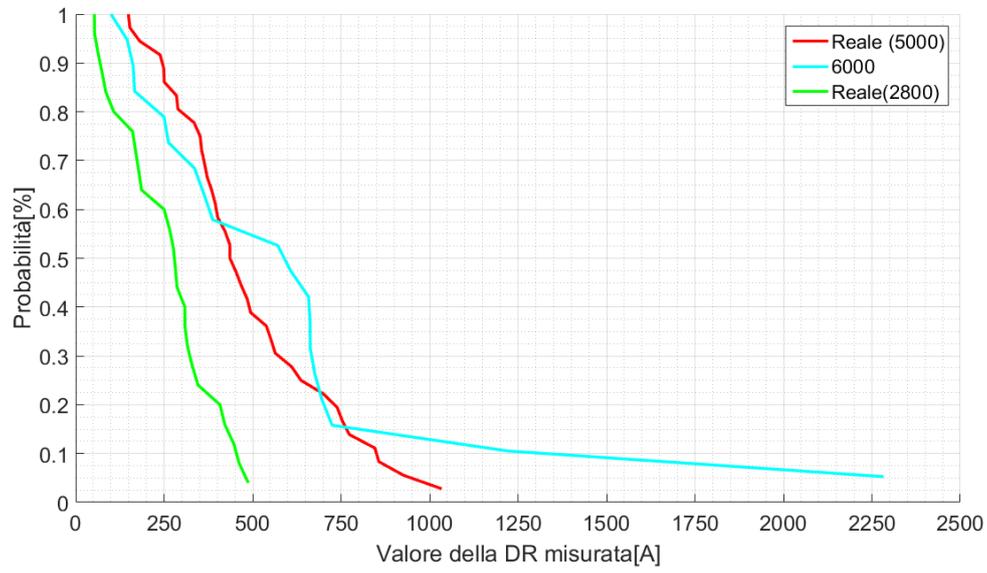


Figura 5.30. DR misurato delle tre vetture

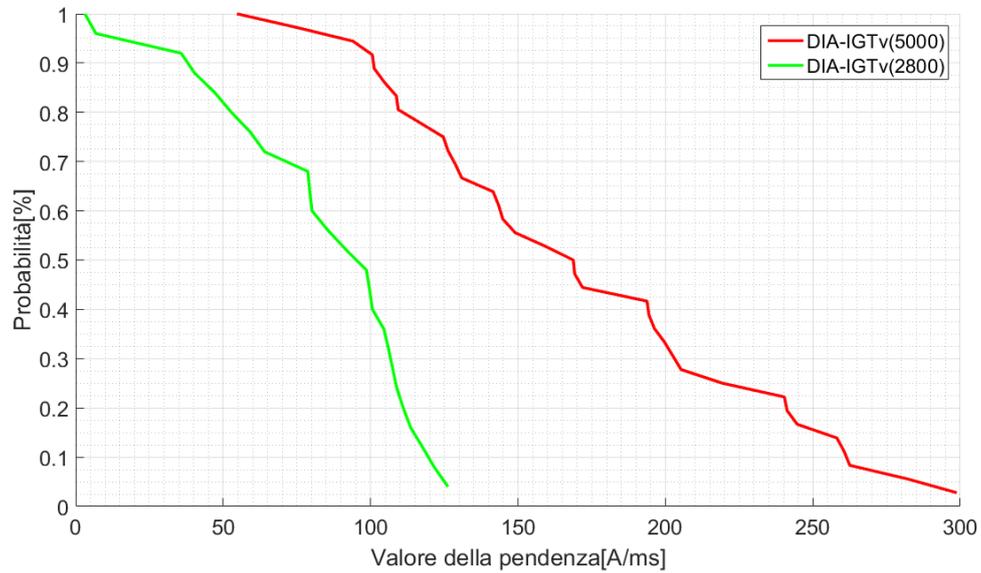


Figura 5.31. Pendenza massima misurata dal relè

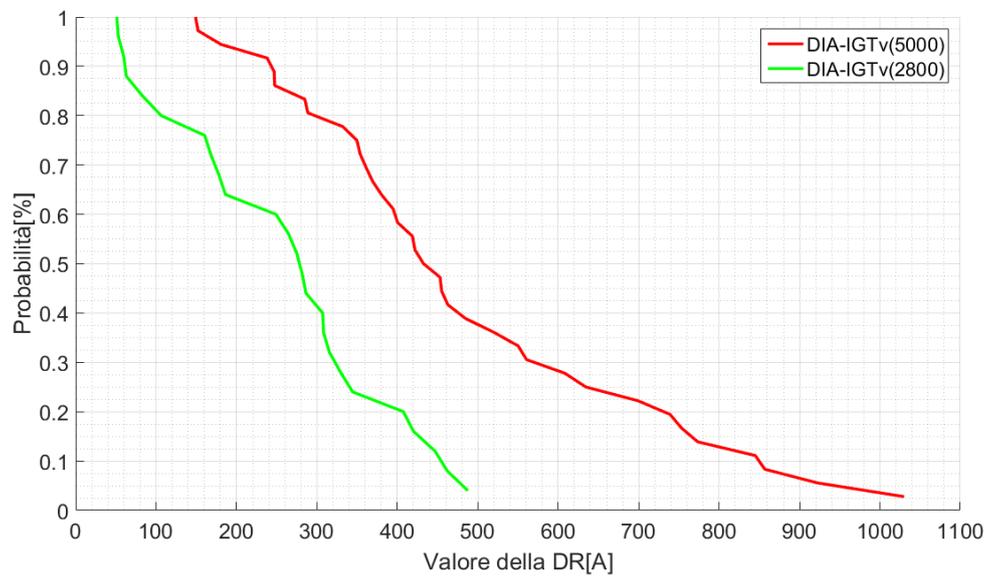


Figura 5.32. DR massima misurata dal relè

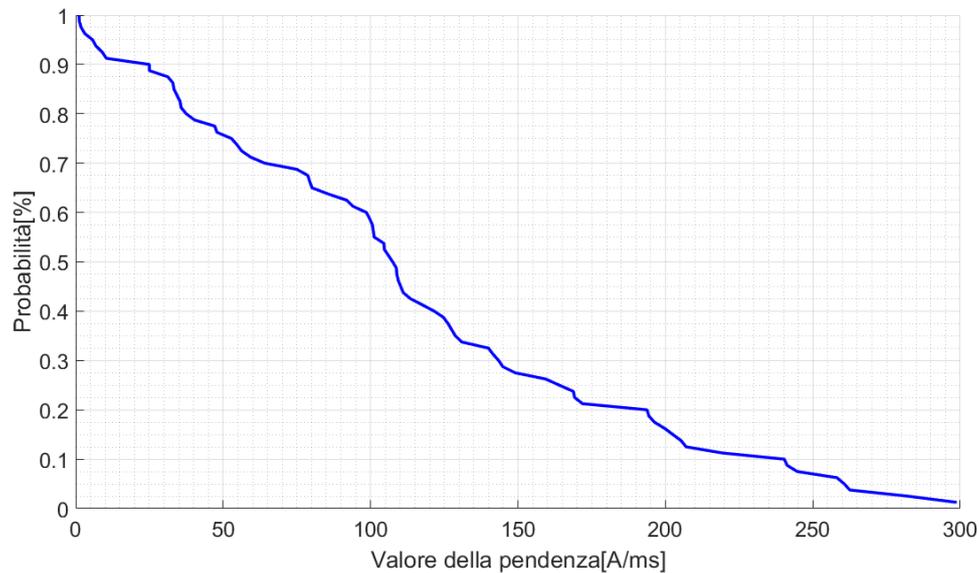


Figura 5.33. Cumulata della pendenza, per tutte le motrici

cumulate totali dei passaggi sotto al divisore e in termini di pendenze si ottengono i risultati di figura 5.33 mentre a livello dei DR si hanno i valori di figura 5.34.

5.3 Conclusioni

Si sono analizzati gli assorbimenti dovuti al passaggio sotto al divisore di zona dividendoli per tipologia di motrice.

Si nota che:

1. Le tre vetture presentano tre forme d'onda diverse. Si evidenzia che il fenomeno può dividersi in tre tempi caratteristici, differenti per la durata, presenti per tutte e tre le motrici.
2. Analizzando la massima differenza di corrente (DR) si nota che la vettura che causa maggiori problemi è la 6000. L'assorbimento può raggiungere anche i

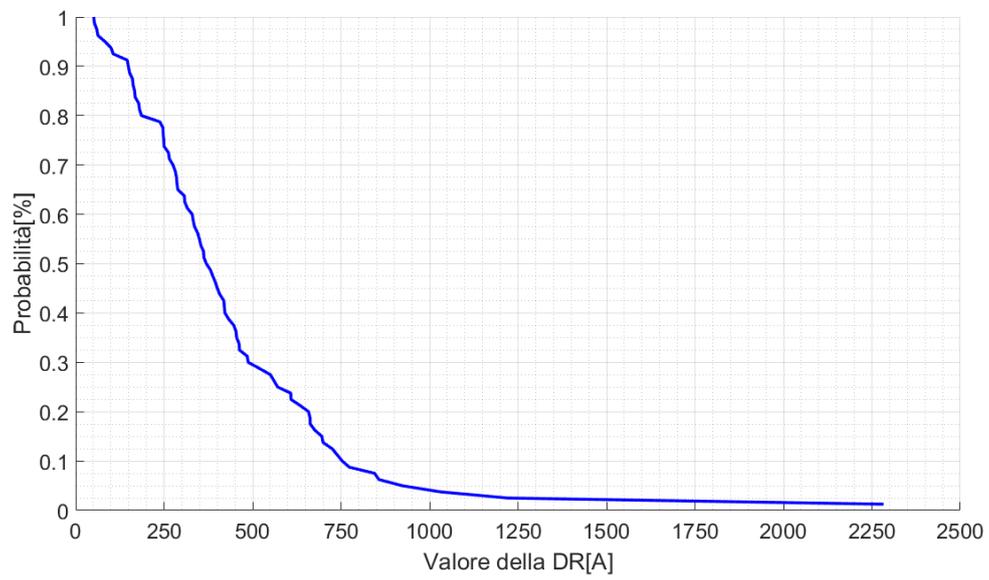


Figura 5.34. Cumulata totale della DR, per tutte le motrici

2300 A che si avvicinano, ma non superano, i valori di correnti di corto circuito a fondo linea. La vettura 5000 è causa di problemi quando non avviene un RESET dell'azionamento; in questo caso abbiamo assorbimenti superiori ai 1000 A. La 2800 è la vettura che provoca minori danni.

3. Se si studia la pendenza iniziale la motrice che causa maggiori problemi è la 5000, seguita dalla 2800 ed infine dalla 6000. In questo caso le pendenze sono superiori a quelle che si possono raggiungere nel corto circuito a fondo linea.
4. Si nota che per la taratura del relè non è necessario utilizzare le pendenze misurate derivanti da un campionamento a $200 \mu s$, ma si deve interpolare ad 1 ms. Le pendenze rilevate dal dispositivo di protezione sono dunque molto più basse.
5. Le pendenze misurate sono elevate ma hanno una durata inferiore a quella di un corto circuito.

Contrariamente a quanto si possa pensare le motrici che causano maggiori danni sono quelle di nuova concezione; il motivo sembrerebbe derivare dalla presenza a bordo vettura di convertitori per l'alimentazione dei motori.

Per quanto riguarda la taratura del relè si può pensare di utilizzare come parametro per la distinzione di un guasto a fondo linea rispetto al passaggio sotto al divisore, la soglia $DR >$. $L'A/ms >$ viene impostato con un valore pari a quello del peggior passaggio sotto al divisore di zona. In questo modo, nel tempo di verifica, il relè non dovrebbe scattare per $A/ms >$ nel caso di normale funzionamento mentre scatterà per $DR >$ in caso di guasto a fondo linea.

Capitolo 6

Analisi delle misure giornaliere

Nel seguente capitolo si analizzano le misure giornaliere svolte tra il 25 e il 27 Maggio 2017 presso la SSE Duca d'Aosta.

Nel capitolo 3 si è affrontato lo stesso problema ma il tempo di campionamento con cui erano stati rilevati i dati era troppo alto (50 ms); questo non permetteva di riconoscere eventuali passaggi sotto al divisore di zona.

In queste misure si è adottato un tempo di rilevazione più fitto ($200 \mu\text{s}$) ma è stata necessaria un'interpolazione dei dati come si osserverà successivamente.

6.1 Descrizione delle misure

Per misurare la corrente assorbita dalle motrici in cabina sono stati utilizzati:

A 2 registratori HIOKY MR-8080.

B 1 disaccoppiatore ottico: che permette di ottenere 6 V in uscita a partire dai 600 V prelevati dalla rete.

C 1 shunt $4000\text{A}=60\text{mV}$.

Gli strumenti sono stati montati come in figura 6.1.

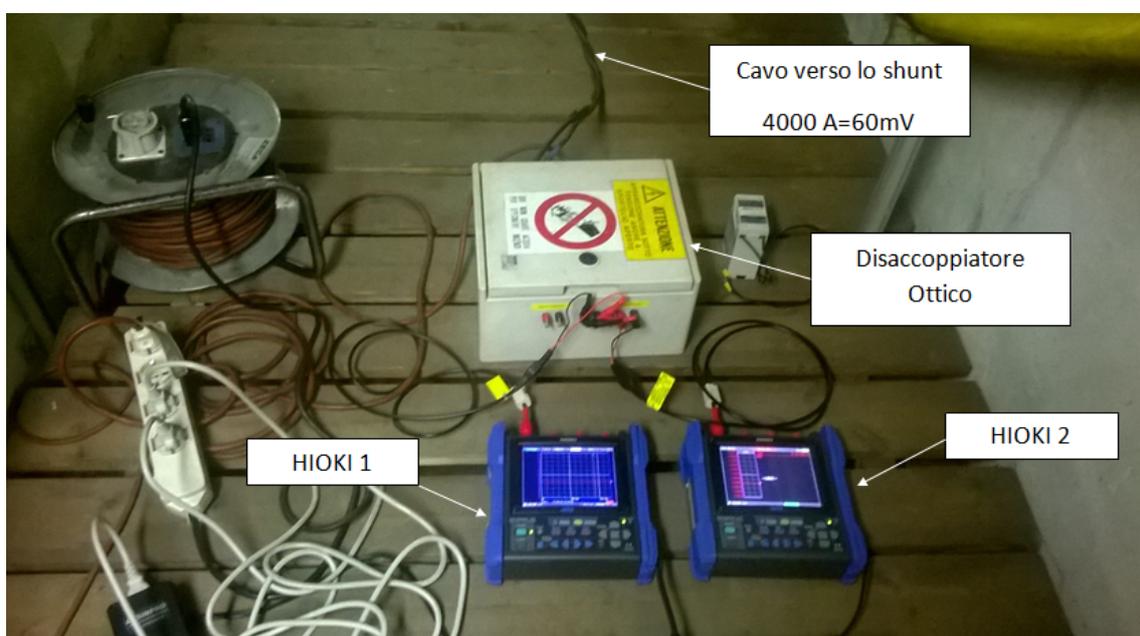


Figura 6.1. Montaggio degli strumenti in SSE

Ratio	$4000/6 = 667$
Range	1 V
Zoom	30 %
Time/div	20 ms/div
T_{camp}	200 μ s

Tabella 6.1. Settaggi HIOKI

Durante le prove è stato possibile osservare alcuni elementi presenti nelle SSE di alimentazione (in figura 6.2).

La zona che veniva monitorata era la numero 22. Essa si estende dal monumento Vittorio (incluso) fin dopo Carlo Alberto; viene anche considerato un tratto di corso Umberto (via Pastrengo) fino a via Matteotti e un tratto di via Sacchi fin a porta Nuova. Vengono registrati tutti i sensi di marcia di cui una planimetria si può osservare in figura 6.3.

Per quanto riguarda i settaggi degli strumenti si utilizzano dati in tabella 6.1.

Al fine di ottenere delle registrazioni con durate superiori alla giornata si è utilizzata la funzione RESERVATION. Essa permette di settare la data e l'ora precisa alla quale far iniziare e terminare la rilevazione.

6.2 Analisi delle misure

In tabella 6.2 si elencano i file analizzati oltre che l'ora e la data in cui la registrazione è iniziata o terminata mentre le misure che vengono analizzate sono elencate in tabella 6.3.

Si deve notare che dal file GIORN_13 a GIORN_21, siccome è mancata l'alimentazione, non si è analizzato nulla. Anche nel periodo di pausa del turno non si è svolta nessuna analisi.

Ogni singola registrazione ha una durata di 3 minuti e 20 secondi. La forma d'onda



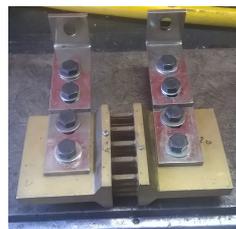
(a) Partenze linea e interruttori



(b) Partenze cavi positivi da 1000 mm²



(c) Ritorno cavi negativi da 500 mm²



(d) Shunt 4000
A=60 mV

Figura 6.2. Elementi presenti in cabina

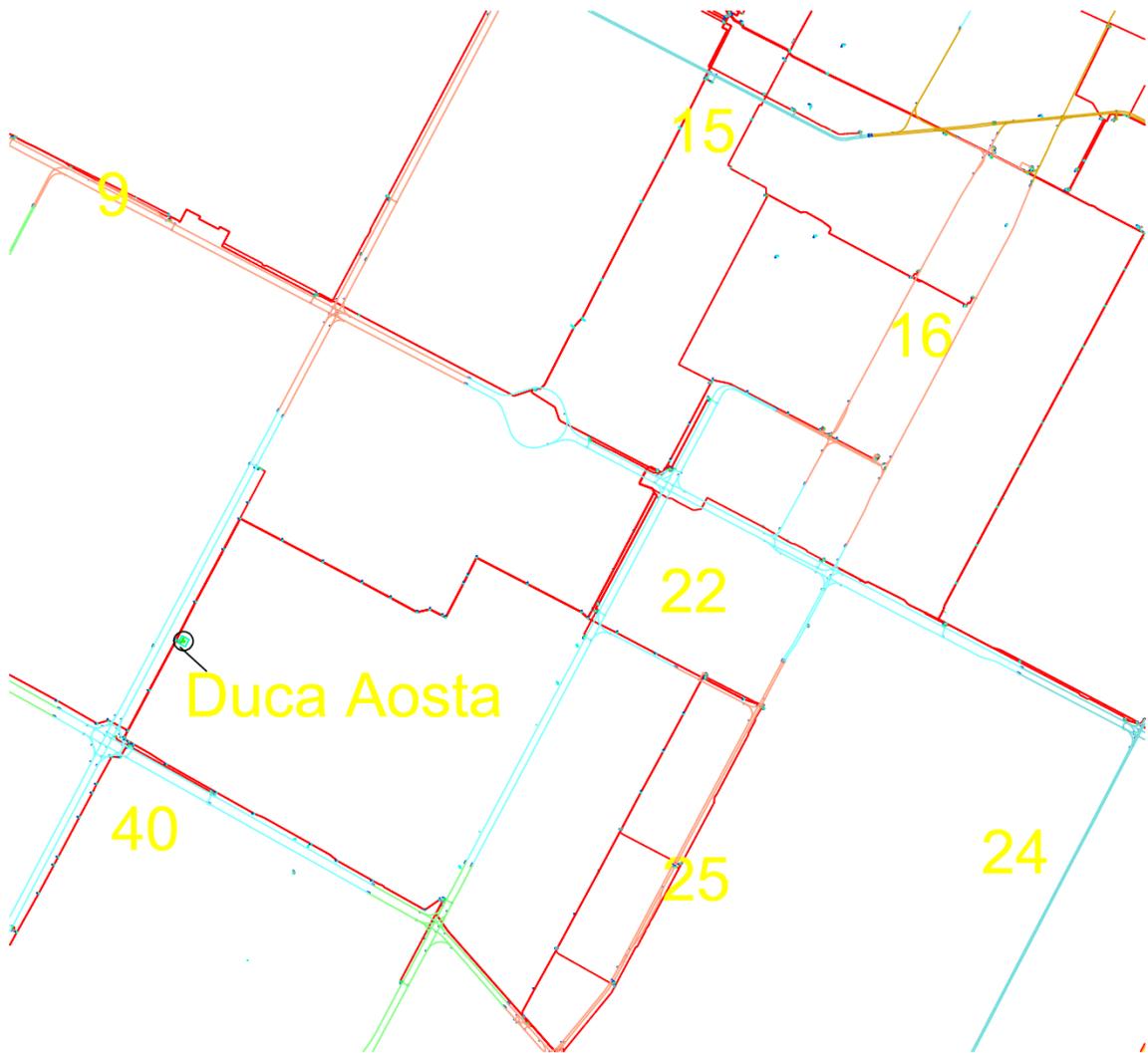


Figura 6.3. Planimetria zona 22

Ore	File	Cosa capita	Data	Strumento
15.13	GIORN_03	Inizio registrazione HIOKI 1	17-05-25	HIOKI 1
2.21	GIORN194	Fine del turno	17-05-26	HIOKI 1
4.14	GIORN232	Inizio del turno	17-05-26	HIOKI 1
17.10	GIORN457	Fine registrazione HIOKI 1	17-05-26	HIOKI 1
17.14	GIORN_01	Inizio registrazione 1 HIOKI 2	17-05-26	HIOKI 2
17.53	GIORN_13	Guasto:mancata alimentazione	17-05-26	HIOKI 2
18.26	GIORN_22	Ritorno alimentazione	17-05-26	HIOKI 2
1.56	GIORN153	Fine registrazione 1 HIOKI 2	17-05-27	HIOKI 2
5.00	GIORN_01	Inizio registrazione 2 HIOKI 2	17-05-27	HIOKY 2
11.45	GIORN118	Lo strumento spezza la numerazione	17-05-27	HIOKI 2
11.48	GIORN154	Lo strumento spezza la numerazione	17-05-27	HIOKI 2
22.59	GIORN349	Fine registrazione 2 HIOKY 2	17-05-27	HIOKI 2

Tabella 6.2. Diario di bordo delle misure

Da	GIORN_01	HIOKI 1
A	GIORN194	HIOKY 1
Da	GIORN232	HIOKY 1
A	GIORN457	HIOKI 1
Da	GIORN_01	HIOKI 2
A	GIORN153	HIOK1 2
Da	GIORN_01	HIOKI 2
A	GIORN349	HIOKI 2

Tabella 6.3. Misure analizzate

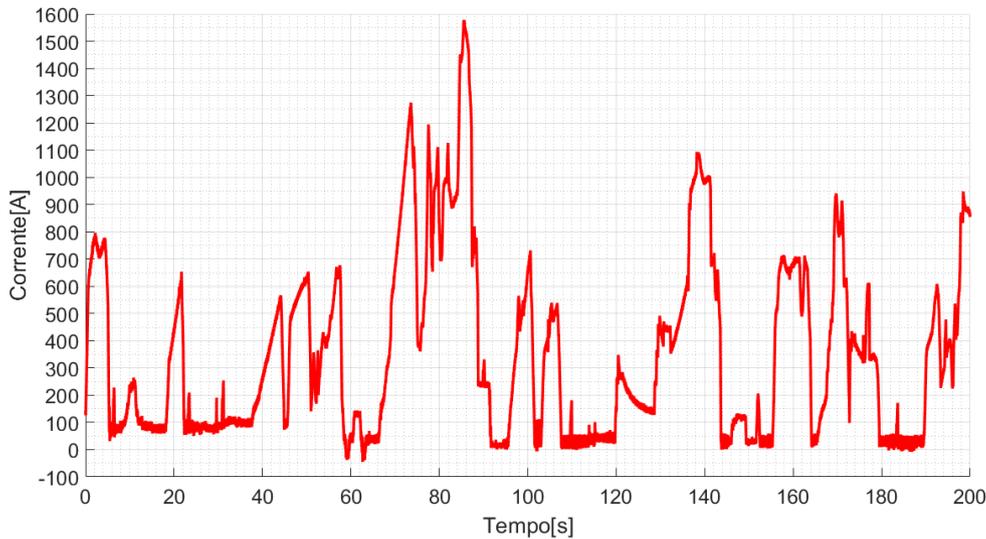


Figura 6.4. Forma d'onda di una registrazione

tipica di un'assorbimento si osserva in figura 6.4. Questa si riferisce ad una rilevazione fatta intorno alle 15.20 del 25-05-17. Si nota che si hanno assorbimenti elevati.

Primo problema analizzato è l'interpolazione ideale da usare per ottenere le cumulate.

Come si osserva dalla figura 6.5, si nota che interpolando a 2 ms (linea blu), non è possibile analizzare al meglio la curva (linea rossa) specie quando si rilevano i DR. Si sceglie di interpolare a 20 ms (linea verde). Con questo campionamento non è certo che vengano rilevati i passaggi sotto al divisore più veloci.

Anche in questo caso si adotta uno script MATLAB in cui si va a rilevare per ogni pezzo dell'onda la massima pendenza e il massimo DR. I risultati ottenuti sono mostrati in figura 6.6 dove si nota che il DR stà in un'intervallo che va da 25 A fino a 2400 A mentre in termini di pendenza si va da 1,251 A/ms fino a 62 A/ms (figura 6.7).

Per quanto riguarda l'HIOKI 2, si è scelto di diminuire il tempo di interpolazione

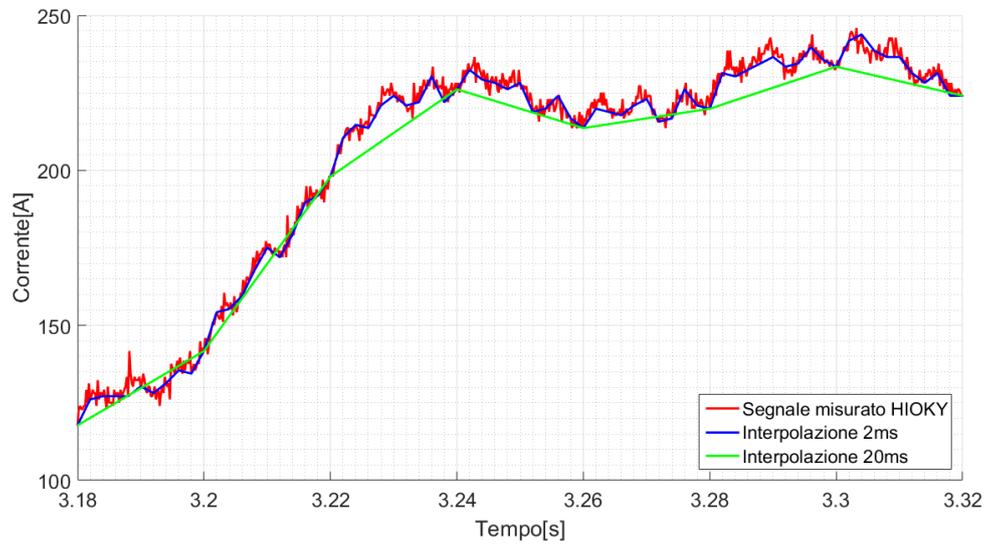


Figura 6.5. Interpolazione delle misure

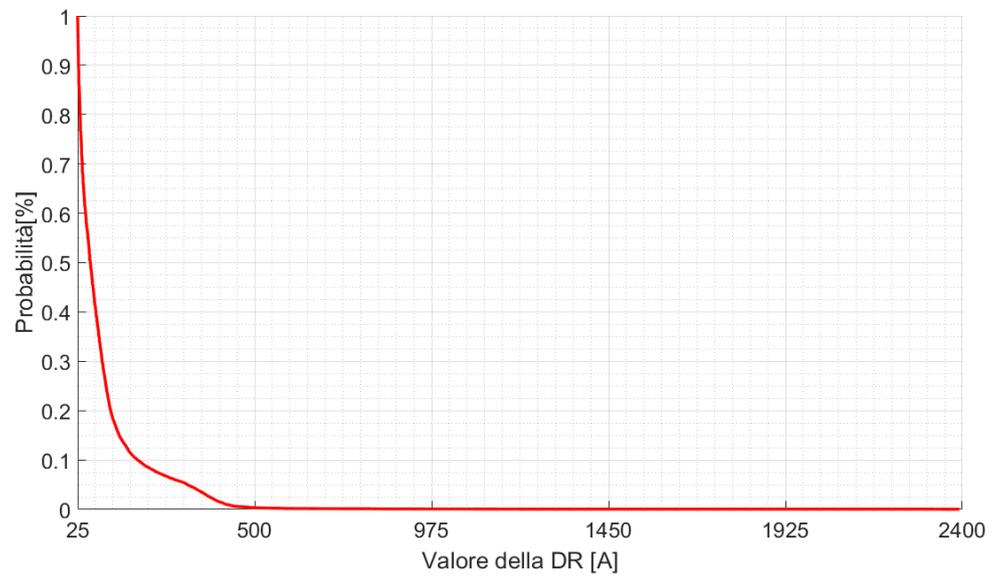


Figura 6.6. Cumulate della massima DR per tutta la registrazione HIOKI 1

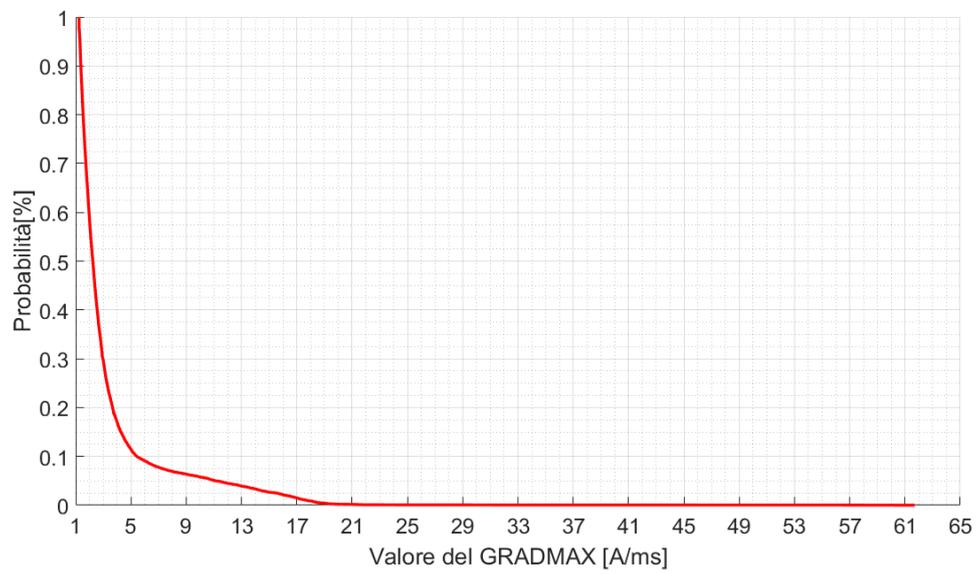


Figura 6.7. Cumulata della massima pendenza, per tutta la registrazione HIOKI 1

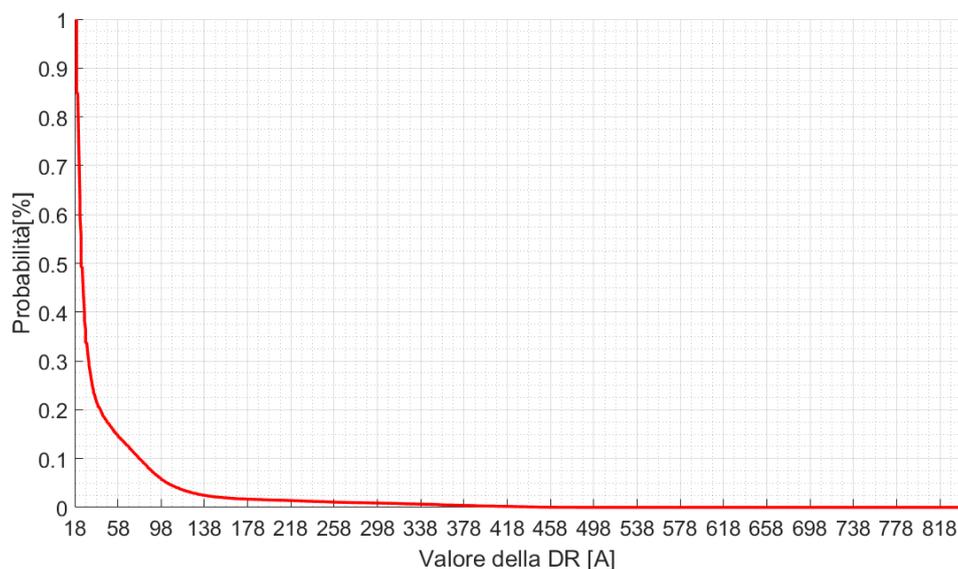


Figura 6.8. Cumulate della massima DR, registrazione 1 HIOKY 2

	Max DR[A]	GradMax[A/ms]
Registrazione HIOKI 1	25,01-2392	1,251-61,7
Registrazione 1 HIOKI 2	19,8-835,8	1,98-25,64
Registrazione 2 HIOKY 2	25,01-899,4	1,251-25,17

Tabella 6.4. Tabella riassuntiva dei parametri caratteristici

della prima registrazione a 10 ms mentre la seconda è stata svolta con 20 ms. Come si evince dalla figura 6.8 la massima DR rilevata va da 25,01 A a fino a circa 818 A mentre per quanto riguarda la massima pendenza si va da 1,98 A/ms fino a 25,64 A/ms come dimostra la figura 6.9. I dati derivanti dalla seconda misurazione sembrano non cambiare molto, nonostante il tempo di interpolazione sia diverso. Si rileva che il DR va da da 25,01 A fino a 899,4 A (figura 6.10) mentre la massima pendenza va da 1,25 A/ms fino a 25,17 A/ms (figura 6.11).

In tabella 6.4 si elencano gli estremi di variazione caratteristici di tutte le misure.

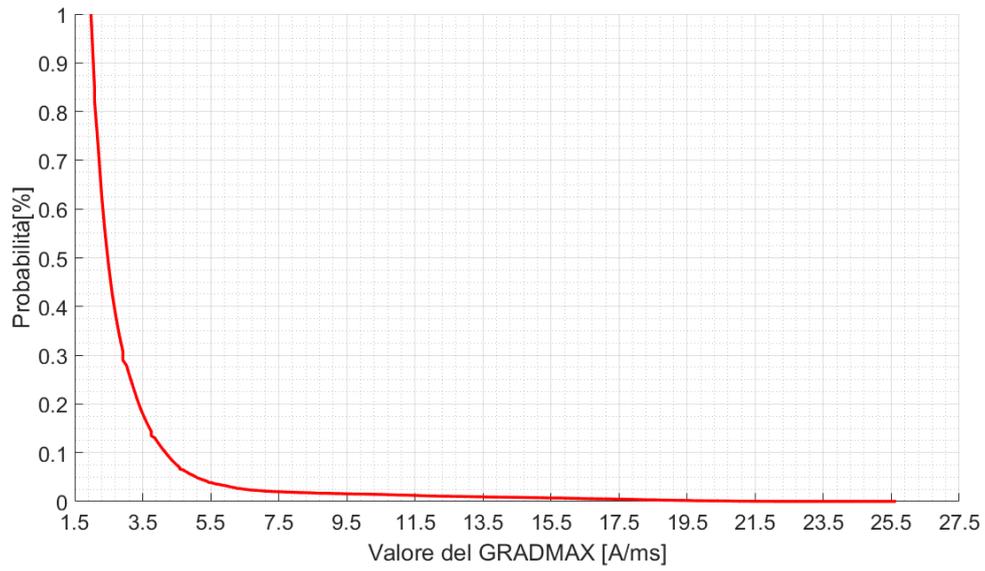


Figura 6.9. Cumulata della massima pendenza, registrazione 1 HIOKI 2

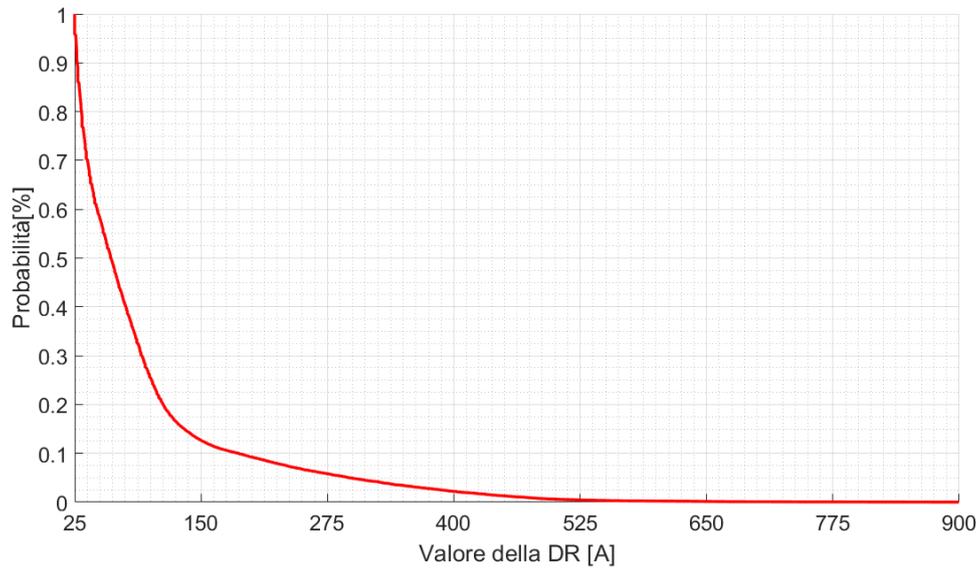


Figura 6.10. Cumulate della massima DR, registrazione 2 HIOKY 2

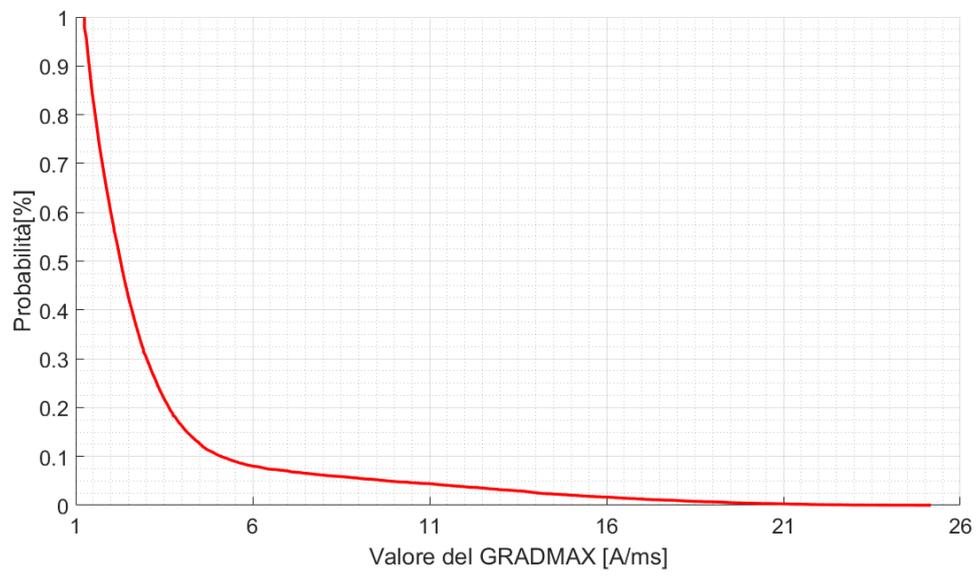


Figura 6.11. Cumulata della massima pendenza, registrazione 2 HIOKI 2

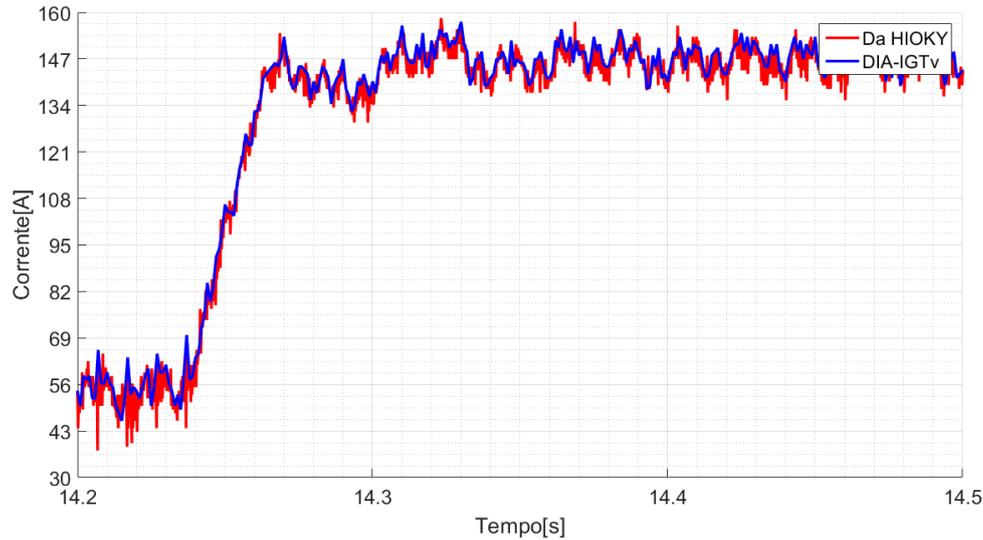


Figura 6.12. Interpolazione come da relè

Per quanto riguarda l'HIOKY 1, sono state inseriti in tabella i parametri misurati per tutta la giornata ad esclusione della pausa notturna.

6.3 Analisi delle pendenze

Le analisi appena svolte consentono di rilevare al meglio le differenze di corrente che si verificano durante gli spunti ed eventuali passaggi sotto al divisore. Interpolando il segnale a 20 ms si rischia di perdere le pendenze significative dei possibili transiti da una zona all'altra delle motrici. Per questo motivo si propone un'analisi delle pendenze che si verificano durante ogni registrazione per tutta la giornata. Si interpola il segnale come campiona il relè (linea blu) ad 1 ms come in figura 6.12.

A questo punto si realizzano le cumulate delle pendenze misurate durante tutta la giornata, riferite alla registrazione dell'HIOKY 1 e si ottengono i risultati della figura 6.13 dove si osservano delle pendenze molto elevate anche superiori agli 800

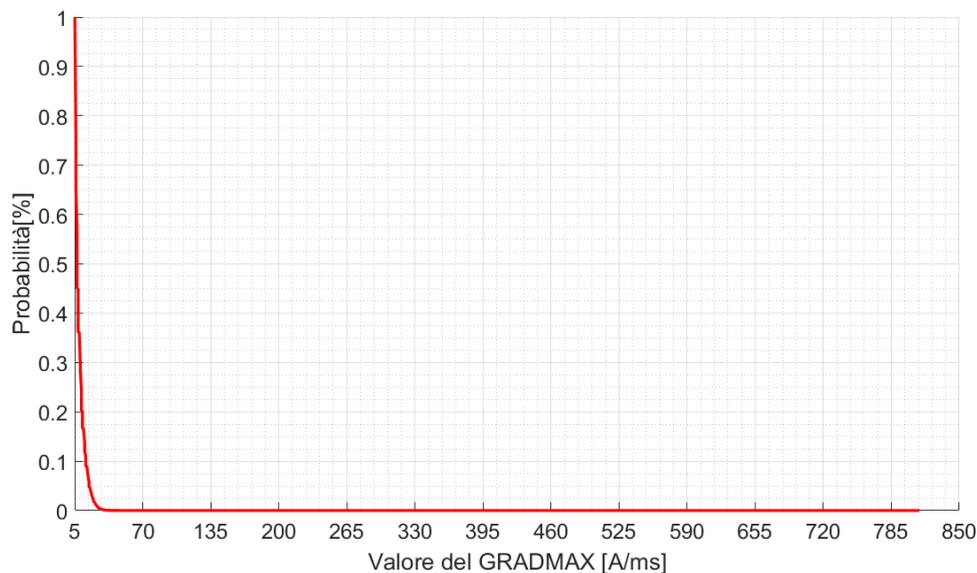


Figura 6.13. Cumulate con interpolazione 1ms

A/ms. Queste di sicuro farebbero scattare il relè ma si verificano molto raramente e sono dovute a dei fenomeni particolari.

6.4 Altri fenomeni osservati nelle misure

Il primo fenomeno osservato (in figura 6.14) è la presenza sporadica di oscillazioni probabilmente dovute ad un funzionamento scorretto del raddrizzatore. Se si effettua uno zoom (figura 6.15) si nota che le esse vanno da un minimo di -70,87 A fino ad un massimo di 419 A con una frequenza caratteristica di 14,286 Hz e si possono verificare non solo quando siamo intorno allo 0 ma anche durante dei periodi in cui si hanno delle accelerazioni.

Un secondo fenomeno indagato (figura 6.16) è quello della mancata alimentazione dell'interruttore.

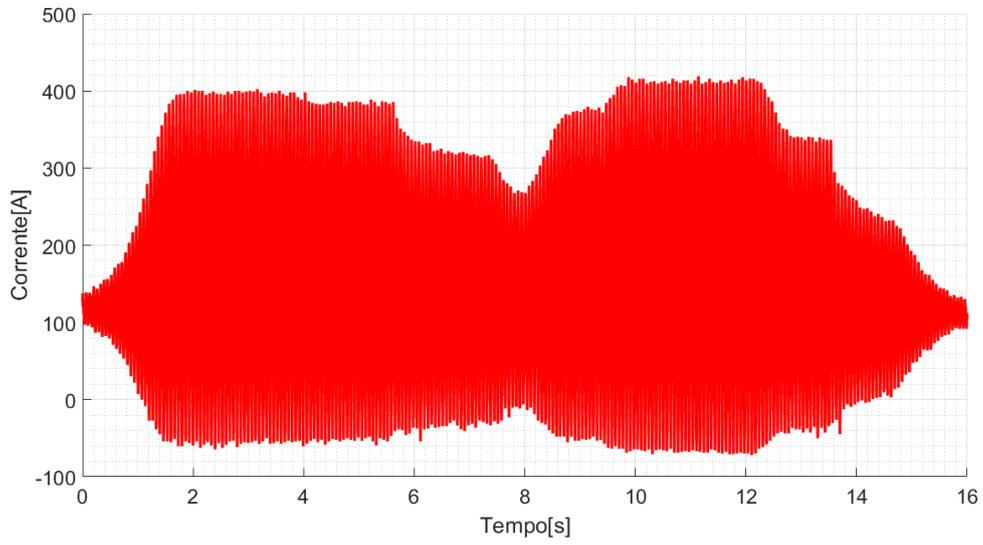


Figura 6.14. Oscillazioni

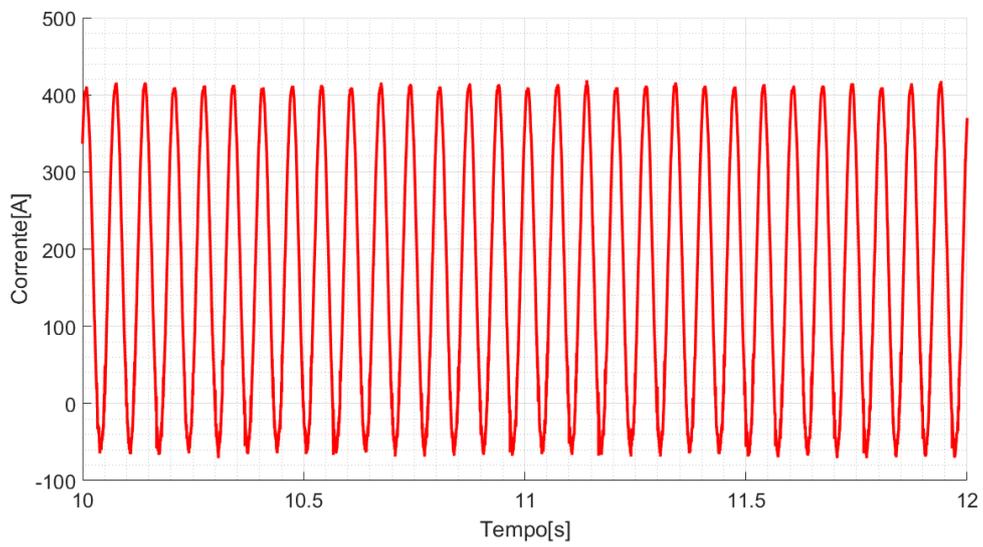


Figura 6.15. Zoom sulle oscillazioni

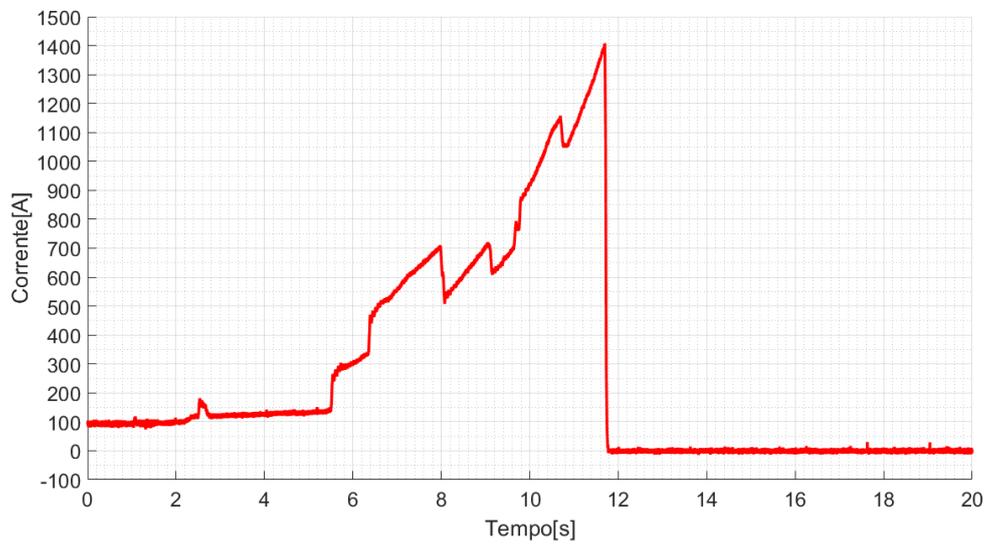


Figura 6.16. Mancata alimentazione dell'interruttore

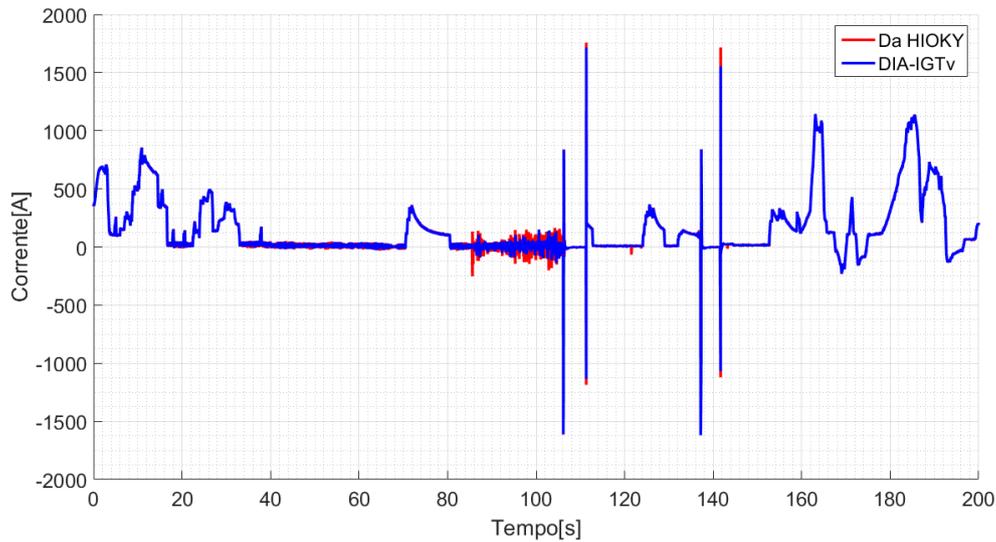


Figura 6.17. Misura con pendenze elevate

Inizialmente si pensava ad un'interruzione della corrente da parte dell'extra-rapido dovuta ad un guasto. Intorno alle 17.40 del 26-05-17, una motrice 5000 aveva fatto mancare l'alimentazione della zona 28(adiacente alla zona 22). Successivamente la zona era stata rialimentata e la motrice era passata nella zona 22 dove intorno alle 17.50 ha interrotto il servizio. La vettura è poi stata trainata. L'alimentazione è tornata intorno alle 18.23. La forma d'onda è del tutto diversa da quella di un guasto(che di solito è un'esponenziale) infatti come comunicato da InfraTO, l'alimentazione è mancata perchè si sono persi gli ausiliari a 110 V dell'interruttore. Questo è confermato dal fatto che l'interruzione avviene a circa 1400 A contro i 4000 A del potere di interruzione settato sugli interruttori.

In ultimo si sono indagati i fenomeni che causano delle pendenze molto elevate(figura 6.17)

Effettuando uno zoom (figura 6.18) si nota che l'assorbimento della motrice in questi casi risulta negativo. Il problema potrebbe essere portato da un avviamento durante la fase di recupero del motore. In ogni caso sono molto rare.

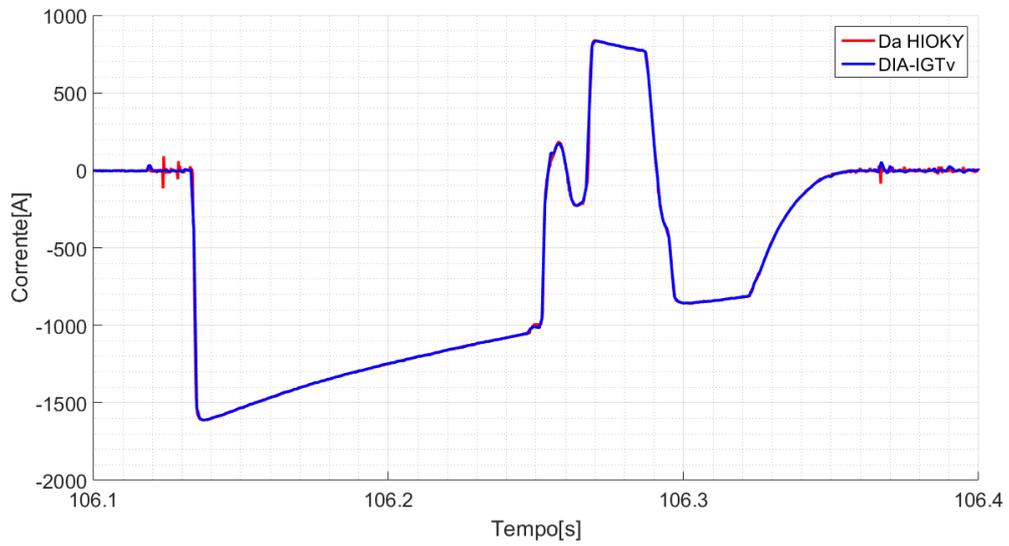


Figura 6.18. Zoom delle pendenze elevate

6.5 Conclusioni

Dalle misure giornaliere si osserva che:

1. Le differenze di corrente tra le giornate feriali e quelle festive sono diverse in quanto il traffico cambia notevolmente. Nel primo caso (dati dell'HIOKY 1) si ottengono assorbimenti intorno ai 2400 A mentre nel secondo si abbassano a 900 A.
2. Si possono registrare delle pendenze molto elevate causate da fenomeni completamente diversi dal passaggio sotto al divisore che possono essere ricondotte alle motrici 5000 e 6000 le uniche in grado di effettuare il recupero dell'energia. Si ipotizza che siano prodotte da un avviamento in una fase di recupero oppure ad un passaggio sotto al divisore sempre durante il recupero di energia. In ogni caso, non è detto che il relè, qualora si verificano, comandi degli scatti. Queste potrebbero unicamente far iniziare il ciclo di controllo. Infatti, se dopo una pendenza molto elevata, si misura una pendenza di valore più basso, possono verificarsi eventuali reset (se non vengono superate le soglie di scatto istantaneo $I > A/ms$ o cumulate $DR >$).

Capitolo 7

Analisi del transitorio del corto circuito

Nel seguente capitolo si propone l'analisi dettagliata del transitorio di corto circuito che può interessare una linea di alimentazione tranviaria.

Si analizzano i dati derivanti da misure svolte in passato:

1. Corto circuito in piazza Campanella del 25 Febbraio 2014.
2. Corto circuito in SSE Caio Mario del 5 Aprile 2006.
3. Corto circuito in via Nicola del 25 Febbraio 2014.
4. Corto circuito S.Paolo del 23 Ottobre 2008.

Successivamente si propone una "simulazione" del transitorio che si basa su due formule, tratte dalla letteratura scientifica([4]). L'obiettivo è quello di analizzare l'andamento della corrente a regime(I_o) e della pendenza iniziale(dI_o/dt) lungo la linea elettrica. Grazie a questo studio si dovrebbe essere in grado di prevedere i valori assunti da tali grandezze in una situazione critica ossia al fondo della linea di alimentazione. Si analizza questa condizione perchè in questo punto della linea

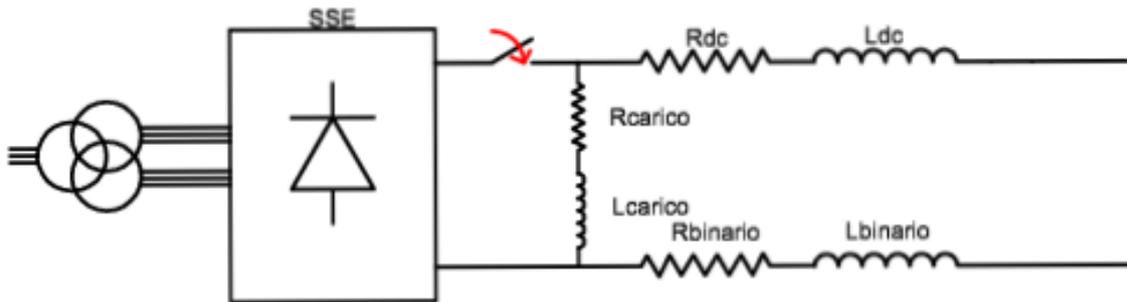


Figura 7.1. Corto circuito in SSE

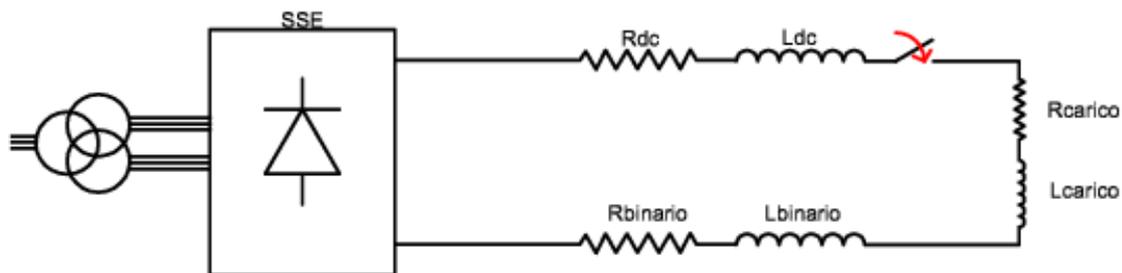


Figura 7.2. Corto circuito a fondo linea

spesso si ottengono delle pendenze iniziali molto basse. Questo provoca delle incertezze nel possibile scatto del relè. Si propone di distinguere il guasto a fondo linea andando ad impostare come parametro DR il valore della I_o più bassa che si può ottenere.

Si hanno a disposizione due tipi di prove di corto circuito in modo da avere due situazioni diverse. A Caio Mario è stata svolta una prova in SSE (figura 7.1) mentre nelle misure rimanenti è stata svolta una prova di corto circuito a fondo linea (figura 7.2).

File	N prova	Descrizione
AUTO2.MEM	Prova1	Con resistenza, alimentazione da S.paolo
AUTO6.MEM	Prova2	Con resistenza, alimentazione da S.Paolo
AUTO7.MEM	Prova3	Con resistenza, alimentazione da Martinetto
AUTO8.MEM	Prova4	Con resistenza alimentazione da Martinetto
AUTO9.MEM	Prova5	Corto franco(no resistenza), alimentazione da S.Paolo
AUTO10.MEM	Prova6	Corto franco(no resistenza), alimentazione da s.Paolo
AUTO11.MEM	Prova7	Corto franco(no resistenza), alimentazione da Martinetto
AUTO12.MEM	Prova8	Corto franco(no resistenza), alimentazione da Martinetto

Tabella 7.1. Caratteristiche delle prove in piazza campanella

Numero prova	Evento
Prova 5	DIA interviene per $tI >$
Prova 6	Apri l'extrarapido
Prova 7	DIA interviene per exp
Prova 8	DIA non inserito, interviene l'extrarapido

Tabella 7.2. Eventi particolari nelle prove di corto in piazza campanella

7.1 Analisi delle misure

1. Corto circuito in piazza Campanella:

Le caratteristiche delle prove svolte in questo punto della rete sono elencate in tabella 7.1. In alcune misure si è verificata l'apertura dell'extrarapido o l'intervento del DIA-IGTv come dimostra la tabella 7.2.

Per quanto riguarda il tempo di campionamento per tutte e 8 le prove si è utilizzato $10 \mu s$. Vengono analizzate tutte le misure, la prova1 è analizzata a livello di corrente a regime Io. Di seguito vengono elencate le forme d'onda caratteristiche di: corto circuito con alimentazione da S.Paolo(figura 7.3), corto circuito con alimentazione da Martinetto(figura 7.4), un intervento del relè DIA-IGTv(figura 7.5) e dell'intervento dell'extra-rapido (figura 7.6).

Come si nota, il segnale derivante dall'HIOKY è affetto da rumore; per questo, nell'analisi svolta per ricavare le cumulate, al fine di ottenere i parametri tipici

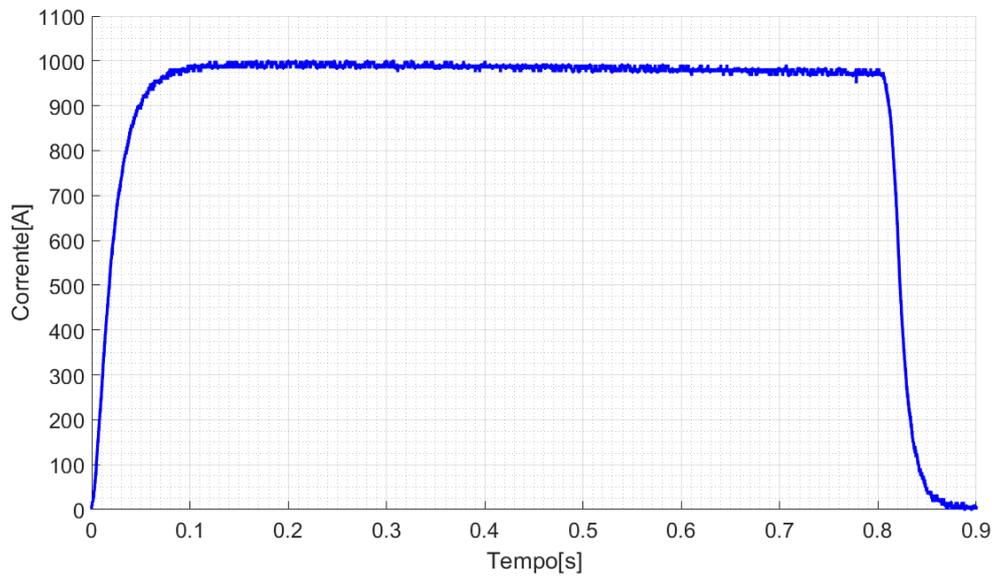


Figura 7.3. Corto con resistenza, alimentazione S.Paolo

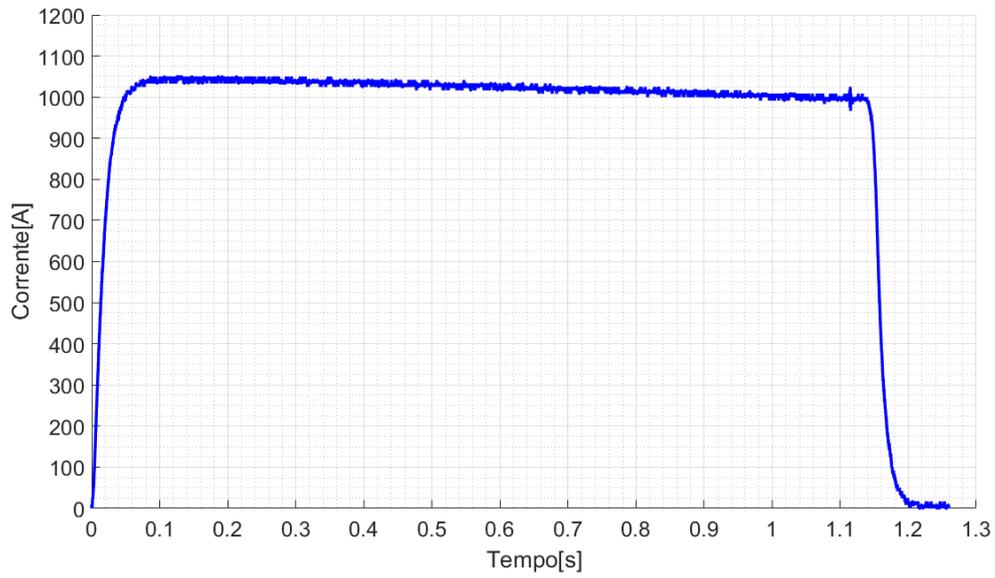


Figura 7.4. Corto con resistenza, alimentazione da Martinetto

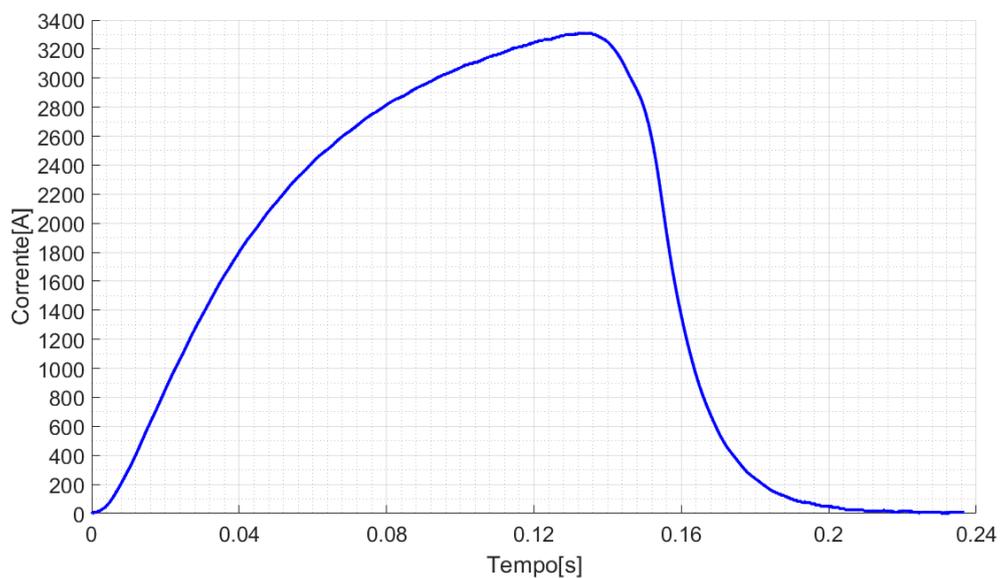


Figura 7.5. Intervento per $t_I >$ del DIA-IGTv

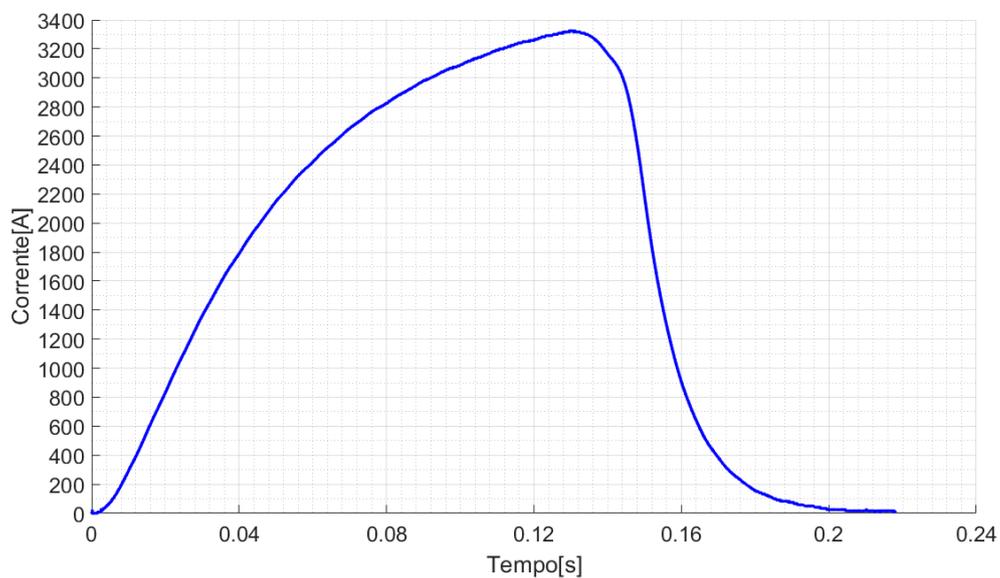


Figura 7.6. Intervento dell'extrarapido con DIA-IGTv inserito

Numero prova	DR[A]	dIo/dt[A/ms]	Io[A]
Prova1	-	-	988,997
Prova2	983,323	41,666	984,972
Prova3	1041,66	50	1022,89
Prova4	1016,66	50	1014,19
Prova5	3308	58,333	3308
Prova6	3325	58,333	3325
Prova7	3617	108,33	3617
Prova8	3700	100,003	3700

Tabella 7.3. dIo/dt e Io in piazza Campanella

delle curve ossia GRADMAX e DR, si è svolta un'interpolazione che approssima al meglio la curva.

La figura 7.6 dimostra come funziona l'extra-rapido. Questo interruttore svolge anche la funzione di limitatore. Si nota che la curva parte con una determinata pendenza che poi improvvisamente diminuisce. Questo fenomeno è proprio legato all'azione del dispositivo.

Per quanto riguarda l'analisi del gradiente iniziale dIo/dt e della corrente a regime Io si adotta come tempo di campionamento quello del DIA-IGTv ossia 1 ms. Si ottengono i parametri di tabella 7.3. Si deve osservare che nelle ultime quattro prove la Io non è una vera e propria corrente di regime, si tratta della corrente massima che viene raggiunta durante la prova. Della Prova1 si ricava solamente la Io in quanto la misura viene svolta solo sulla parte a regime (figura 7.7). Osservando i valori di questa corrente, si deduce che la resistenza di carico adottata era probabilmente da 0,5 Ω .

Per queste misure si sono riportate le forme d'onda tipiche del fenomeno. Per tutte le altre si riportano il modo in cui si sono svolte e i parametri di interesse.

2. Corto circuito in SSE Caio Mario:

Queste misure, si differenziano dalle altre perchè sono avvenute in SSE. Il tempo di campionamento è di 200 μ s. Come visto il corto avviene ad inizio

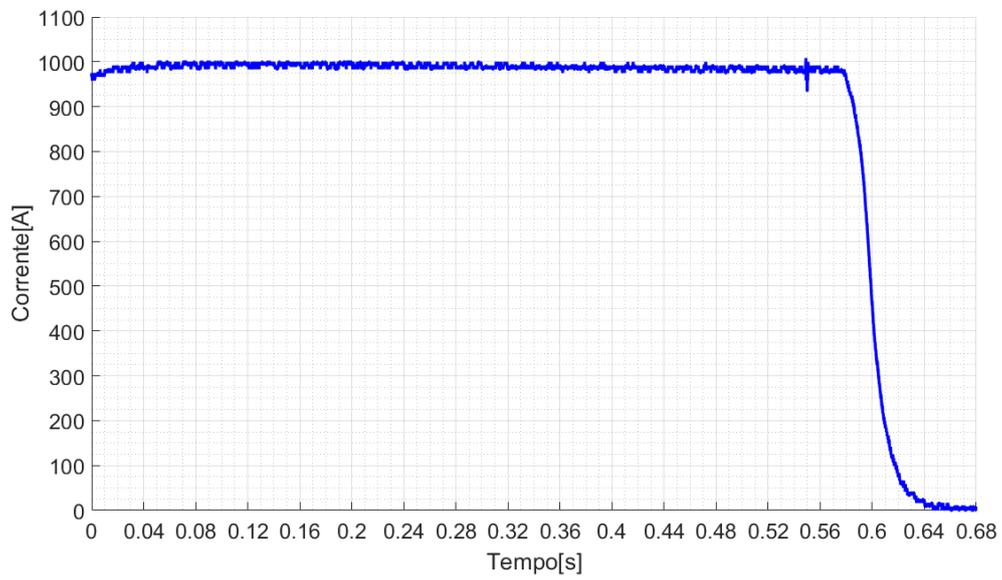


Figura 7.7. Forma onda Prova1 in piazza Campanella

File	N prova	Descrizione
NONAME.MEM	Prova1	2 Resistenze in serie, $R_{tot}=1 \Omega$
NONAME1.MEM	Prova2	2 Resistenze in serire, $R_{tot}=1 \Omega$
NONAME2.MEM	Prova3	Resistenza singola da $0,5 \Omega$
NONAME3.MEM	Prova4	Resistenza singola da $0,5 \Omega$
NONAME4.MEM	Prova5	Resistenza singola da $0,5 \Omega$
NONAME5.MEM	Prova6	2 Resistenze in parallelo, $R_{tot}=0,25 \Omega$
NONAME6.MEM	Prova6	2 Resistenza in parallelo, $R_{tot}=0,25 \Omega$

Tabella 7.4. Caratteristiche prove in SSE Caio Mario

Numero prova	DR[A]	dIo/dt[A/ms]	Io[A]
Prova1	700,05	25	691,188
Prova2	695,05	23,75	689,609
Prova3	1366,75	66,25	1297,83
Prova4	1353,75	61,25	1303,04
Prova5	1342,75	62,5	1286,14
Prova6	2591	103,125	2510,88
Prova7	2522	100	2466,2

Tabella 7.5. dIo/dt e Io a Caio mario

linea utilizzando una o più resistenze da $0,25 \Omega$. Le caratteristiche delle prove sono elencate in tabella 7.4. In tabella 7.5 si elencano i dati caratteristici delle prove. Per ottenere questi risultati si esegue un'interpolazione a 1 ms. Si nota che in tutti i casi la corrente Io è più bassa del DR questo perchè una volta raggiunto il massimo inizia a decrescere e non si stabilizza a un valore costante diversamente che nelle prove precedenti.

3. Corto circuito in via Nicola:

Si analizzano le misure svolte in via Nicola fronte civico 22; le modalità con cui sono si sono svolte sono le stesse di quelle adottate in piazza Campanella, si utilizza una resistenza e il corto non avviene in cabina. La descrizione delle misure si può leggere in tabella 7.6.

Per quanto riguarda i tempi di campionamento fino alla Prova5 si usano $200 \mu s$,

Nome file	Numero prova	Descrizione
AUTO2.MEM	Prova1	Prova con resistenza, alimentazione da Martinetto
AUTO6.MEM	Prova2	Prova con resistenza, alimentazione da Martinetto
AUTO7.MEM	Prova3	Prova con resistenza, alimentazione da Martinetto
AUTO8.MEM	Prova4	Prova con resistenza, alimentazione da s.Paolo
AUTO9.MEM	Prova5	Prova con resistenza, alimentazione da s.Paolo
AUTO10.MEM	Prova6	Prova con resistenza, alimentazione da s.Paolo
AUTO11.MEM	Prova7	Prova con resistenza ,alimentazione da Martinetto
AUTO12.MEM	Prova8	Prova senza resistenza, alimentazione da Martinetto
AUTO13.MEM	Prova9	Prova senza resistenza, alimentazione da Martinetto
AUTO14.MEM	Prova10	Prova senza resistenza, alimentazione da s.Paolo
AUTO15.MEM	Prova11	Prova senza resistenza, alimentazione da s.Paolo
AUTO16.MEM	Prova12	Prova senza resistenza, alimentazione da s.Paolo

Tabella 7.6. Caratteristiche prove in via Nicola fronte civico 22

Numero prova	DR[A]	dIo/dt[A/ms]	Io[A]
Prova1	1075	58,333	1068,96
Prova2	1075	50	1062,94
Prova3	1083	58,333	1064,1
Prova4	1017	41,667	1005,44
Prova5	1008	41,6663	1006,79
Prova6	1017	41,667	1006,25
Prova7	1075	50	1062,98
Prova8	3691,67	125	-
Prova9	3658	133	-
Prova10	3650	66,67	-
Prova11	3650	66,67	-
Prova12	3592	66,67	-

Tabella 7.7. Io e dIo/dt via Nicola

dalla Prova6 fino alla prova 12 si passa a $10 \mu\text{s}$. I parametri di interesse come al solito vengono calcolati interpolando a 1 ms , come se fosse il campionamento del DIA-IGTv. Si ottengono i risultati di tabella 7.7. Si nota che il valore di Io è più basso del DR perchè la forma d'onda una volta raggiunto il regime inizia a decrescere. Nelle ultime prove, quando viene eliminata la resistenza, non si calcola il valore di regime ma solo il DR. Come si nota dai valori assunti dalla corrente di regime, si deduce che la resistenza utilizzata nelle misure era di $0,5 \Omega$.

4. Corto circuito a s.Paolo:

In tabella 7.8 si elencano i dati derivanti dalle prove di corto circuito in s.Paolo. I tempi di campionamento sono pari a $2 \mu\text{s}$. I dati in tabella elencati si riferiscono ad un campionamento pari a 1 ms ; il più simile possibile a come misura il relè. Si nota che la DR ha valori più alti della Io. Il fenomeno è causato da una diminuzione della corrente a regime con l'aumento del tempo. Si riscontrano dei valori differenti nella Prova3 e nella Prova12. In quest'ultima non si annota la corrente Io perchè l'onda ha forma molto simile a quella di

File	N prova	DR[A]	dIo/dt[A/ms]	Io[A]
SPTP_Prova00.MEM	Prova1	684,35	43,75	670,167
SPTP_Prova01.MEM	Prova2	678,1	46,875	674,351
SP_Prova01.MEM	Prova3	6531,25	312,5	6414,19
SP_Prova02.MEM	Prova4	634,425	34,375	629,403
SP_Prova03.MEM	Prova5	637,475	31,25	639,154
SP_Prova04.MEM	Prova6	649,975	37,5	649,294
TP_Prova00.MEM	Prova7	687,45	50	674,84
TP_Prova01.MEM	Prova8	678,1	46,875	674,984
AUTO.MEM	Prova9	681,2	46,875	674,923
AUTO1.MEM	Prova10	681,3	46,875	674,279
NONAME.MEM	Prova11	675	50	-
SP_Prova00.MEM	Prova12	14280	812,5	

Tabella 7.8. Caratteristiche prove in zona s.Paolo

uno scatto e non di una prova di corto. Anche in questo caso si deduce che la resistenza di carico sia di $0,5 \Omega$.

7.2 Simulazione del transitorio di corto circuito

Nell'affrontare questo problema, si utilizzano due formule derivanti dall'articolo [4]:

$$I_o = \frac{2 \cdot U_{do}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{AC} + R_{DC})^2 + (\omega \cdot L_{AC})^2}} \quad (7.1)$$

L'equazione 7.1 consente di ottenere l'andamento della corrente a regime. Per ricavare l'andamento del gradiente iniziale si usa la formula 7.2:

$$\frac{dI_o}{dt} = \frac{U_{do}}{L_{AC} + L_{DC}} \quad (7.2)$$

Le formule 7.1 e 7.2 si devono adattare alle grandezze ricavate precedentemente dalle misure. Si deve aggiungere la resistenza di carico R_{carico} :

$$I_o = \frac{2 \cdot U_{do}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{AC} + R_{DC} + R_{carico})^2 + (\omega \cdot L_{AC})^2}} \quad (7.3)$$

Il termine R_{DC} stà ad indicare la resistenza del lato DC del convertitore, R_{AC} la resistenza del lato AC del convertitore, R_{carico} è invece la resistenza di carico. L_{AC} è l'induttanza lato AC. Si può affermare che nel nostro problema R_{AC} e L_{AC} rappresentano la resistenza e l'induttanza del trasformatore a **tre avvolgimenti**. R_{DC} e L_{DC} rappresentano la resistenza e l'induttanza di linea. Si deve far notare che non si studia una semplice linea rettilinea ma una linea facente parte di una rete magliata. U_{do} rappresenta la tensione a vuoto del lato DC, nel nostro caso pari a 635 V. La formula 7.2 cambia in questo modo:

$$\frac{dI_o}{dt} = \frac{U_{do}}{L_{AC} + L_{DC} + L_{carico}} \quad (7.4)$$

Dove U_{do} rappresenta la tensione a vuoto del lato DC, L_{DC} rappresenta l'induttanza del lato DC del convertitore, L_{AC} rappresenta l'induttanza lato AC del convertitore e L_{carico} l'induttanza di carico.

Leggendo le formule 7.3 e 7.4 si nota da subito che gli unici parametri conosciuti sono U_{do} , R_{carico} e L_{carico} . Altri parametri conosciuti sono dI_o/dt e I_o , deducibili dalle misure analizzate nella sezione precedente.

I parametri R_{AC} e L_{AC} sono ottenibili dai dati di prova del trasformatore. Questi sono stati forniti da InfraTO ma si devono manipolare per ottenere dei risultati corretti (analisi che verrà condotta successivamente).

Gli unici parametri non noti sono R_{DC} e L_{DC} . L'obiettivo, partendo da ciò che è noto ed invertendo le formule 7.3 e 7.4, è quello di ricavare le due grandezze incognite.

Una volta determinati R_{DC} e L_{DC} , si è in grado di determinare il punto dove è avvenuto guasto (non con la massima precisione perchè si ha una rete magliata).

Si possono poi utilizzare le formule 7.1 e 7.2 per determinare la variazione di I_o e dI_o/dt lungo la linea. Siccome si hanno tre prove di corto circuito a fondo linea, il valore resistivo e induttivo ottenuto da queste prove è quello che più di avvicina a quello reale di fondo linea. Dalle rilevazioni in SSE si ottiene il valore di R_{DC} e L_{DC} di inizio linea. Si è dunque deciso di svolgere una simulazione facendo variare questi

V1[V]	22000
V2[V]	470
t	46,809
Vsc12[%]	10,76
Vsc23[%]	10,65
Sn[kVA]	2200

Tabella 7.9. Dati di targa del trasformatore

parametri da quello ottenuto dalle prove in SSE fino ad un valore di poco superiore a quello ottenuto nelle misure a fondo linea.

1. Determinazione dei parametri del circuito equivalente del trasformatore a tre avvolgimenti:

Per valutare l'andamento della due grandezze di interesse, si devono fare delle considerazioni sul circuito monofase del trasformatore a tre avvolgimenti.

In tabella 7.9 si riportano i dati di targa del trasformatore. La letteratura [5], permette di ricavare il valore delle resistenze degli avvolgimenti dalle prove di corto circuito binario oppure dalle misure in DC degli avvolgimenti. Nel nostro caso si hanno a disposizione le misure di corto circuito tra: primario e secondario(cortocircuitato) con terziario aperto, primario e terziario con secondario aperto, secondario e terziario con primario aperto, primario e entrambi i secondari cortocircuitati. Si utilizzano i dati derivanti dalle misure delle resistenze in DC(figura 7.8).

Per quanto riguarda le induttanze degli avvolgimenti si utilizzano due formule derivanti dagli articoli [4] e [5]:

$$L_{AC} = 2 \cdot L_p'' + L_s \quad (7.5)$$

MISURA DELLA RESISTENZA DEGLI AVVOLGIMENTI								
ALTA TENSIONE				Temp. [°C]	BASSA TENSIONE			
Kv = 1		Shunt Ka =		24,9	Kv = 1		Shunt Ka =	
6A/0,15V=40,00		Kv/Ka = 0,025			15A/0,15V = 100		Kv/Ka = 0,010	
V1.1	Volt. [V]	Curr. [V]	R[Ohm]	V2	Volt. [V]	Curr. [V]	R[Ohm]	
1U-1V	5,0383	0,0742	1,696928	2U-2V	0,00478	0,0462	0,001033	
1V-1W	4,6847	0,0690	1,697730	2V-2W	0,00526	0,0513	0,001026	
1W-1U	4,5895	0,0682	1,682848	2W-2U	0,00546	0,0516	0,001060	
RI² [W]	8.463			RI² [W]	3.058			
				V3	Volt. [V]	Curr. [V]	R[Ohm]	
				3U-3V	0,00511	0,0526	0,000970	
				3V-3W	0,00507	0,0526	0,000963	
				3W-3U	0,00510	0,0507	0,001005	
				RI² [W]	2.882			

Collaudo ufficiale

Figura 7.8. Resistenze del trasformatore in DC

Nella formula 7.5, L_p'' rappresenta l'induttanza primaria riportata a secondario, L_s è l'induttanza degli avvolgimenti a secondario. Si ricavano le induttanze come segue:

$$X_p'' = \frac{(V_2)^2}{100 \cdot S_n} \cdot (2\dot{V}_{sc12} + V_{sc23}) \rightarrow L_p'' = \frac{X_p''}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (7.6)$$

$$X_s = \frac{(V_2)^2}{100 \cdot S_n} \cdot V_{sc23} \rightarrow L_s = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (7.7)$$

Le tensioni di corto circuito che compaiono nelle equazioni si esprimono in valori percentuali.

Le resistenze di corto circuito si ricavano con la formula che segue. I due parametri R_p'' e R_s si ottengono dai dati forniti dalle prove in DC (successivamente vedremo come manipolarli):

$$R_{AC} = 2 \cdot R_p'' + R_s \quad (7.8)$$

Dove R_p'' rappresenta la resistenza del primario riportata a secondario. R_s è la resistenza del secondario.

Le formule appena descritte, si riferiscono ad un circuito equivalente stella-stella-stella. Si nota che nelle equazioni 7.5 e 7.8 compare un termine 2 davanti alla resistenza e all'induttanza primaria riportata al secondario. Questo è dovuto alla presenza del doppio secondario; di fatto si sta studiando un circuito esafase. Nel nostro caso si ha a disposizione un primario a triangolo, un secondario a stella e un terziario a triangolo. Si deve procedere con una trasformazione triangolo-stella come si nota nella figura 7.9.

Si inizia manipolando i valori delle resistenze degli avvolgimenti a primario (tabella 7.10).

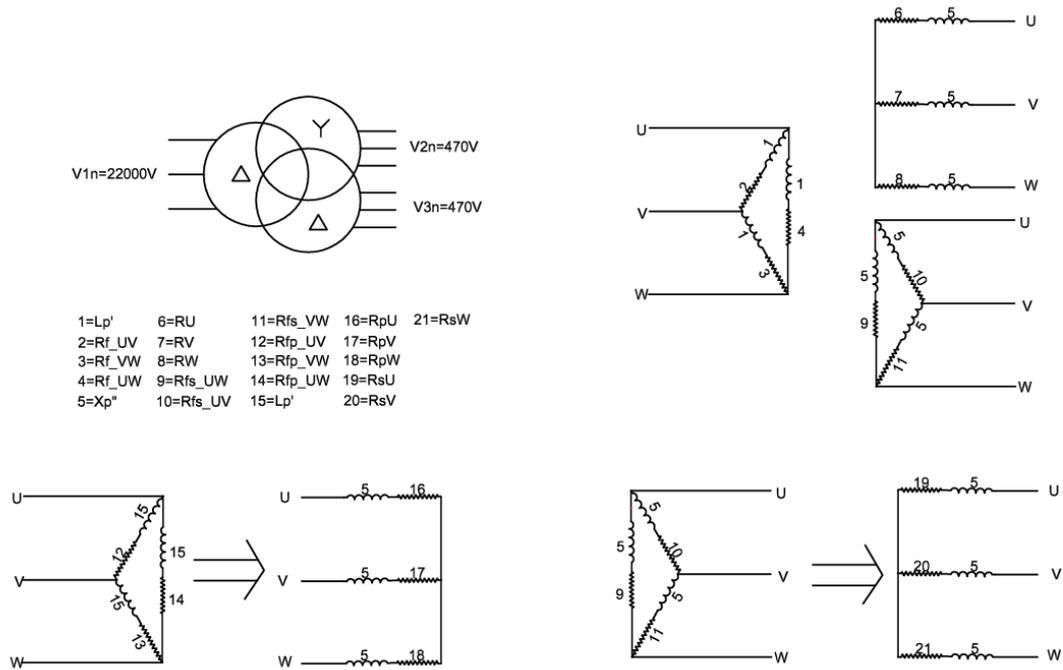


Figura 7.9. Determinazione del circuito equivalente del trasformatore

$R_p(\Delta)[\Omega]$		$R_{fp}(\Delta)[\Omega]$		$R_{fp}(Y)[\Omega]$	
1U-1V	1,696928	Rf_{UV}	2,545392	R_{pU}	0,84362438
1V-1W	1,69773	Rf_{VW}	2,546595	R_{pV}	0,85108484
1W-1U	1,682848	Rf_{WU}	2,524272	R_{pW}	0,84402309

Tabella 7.10. Resistenze avvolgimenti primario

$\mathbf{R}_s(\Delta)[\Omega]$		$\mathbf{R}f_s(\Delta)[\Omega]$		$\mathbf{R}f_s[\mathbf{Y}][\Omega]$	
3U-3V	0,00097	Rf_{UV}	0,001455	R_{sU}	0,00049771
3V-3W	0,000963	Rf_{VW}	0,0014445	R_{sV}	0,00047691
3W-3U	0,001005	Rf_{WV}	0,0015075	R_{sW}	0,0004942

Tabella 7.11. Resistenze degli avvolgimenti secondario a triangolo

Si dimostra che per gli avvolgimenti collegati a Δ , si può ricavare la resistenza di fase degli avvolgimenti come nella formula 7.9.

$$Rf_{UV} = \frac{3}{2} \cdot R_{1U-1V} \quad (7.9)$$

Per determinare le resistenze degli altri avvolgimenti si usano le formule:

$$Rf_{VW} = \frac{3}{2} \cdot R_{1V-1W}$$

$$Rf_{WU} = \frac{3}{2} \cdot R_{1W-1U}$$

Per calcolare la resistenza degli avvolgimenti a stella si utilizza la formula 7.10.

$$Rp_U = \frac{Rf_{UV} \cdot Rf_{WU}}{Rf_{UV} + Rf_{VW} + Rf_{WU}} \quad (7.10)$$

Per le altre fasi:

$$Rp_V = \frac{Rf_{WV} \cdot Rf_{UV}}{Rf_{UV} + Rf_{VW} + Rf_{WU}}$$

$$Rp_W = \frac{Rf_{WU} \cdot Rf_{VW}}{Rf_{UV} + Rf_{VW} + Rf_{WU}}$$

L'avvolgimento terziario si tratta nello stesso modo dell'avvolgimento primario. Si svolge una trasformazione da triangolo a stella come indicato in tabella 7.11. Per il secondario a stella, la trattazione è più semplice e si ottengono i dati di tabella 7.12.

$\mathbf{R_s}[\Omega]$		$\mathbf{Rf_s}[\Omega]$	
2U-2V	0,001033	$\mathbf{R_{sU}}$	0,0005165
2V-2W	0,001026	$\mathbf{R_{sV}}$	0,0005130
2W-2U	0,00106	$\mathbf{R_{sW}}$	0,00053

Tabella 7.12. Resistenza degli avvolgimenti,secondario a stella

Fase	R_p [Ω]	R_{eq} [Ω](Δ-Y)	R_{eq} [Ω](Δ-Δ)
U	0,00038503	0,00129	0,00127
V	0,00038844	0,00129	0,00125
W	0,0038522	0,00130	0,00126

Tabella 7.13. Resistenza equivalenti di ogni fase

X_p [Ω]	0,0109	L_p [H]	0,000034
X_s [Ω]	0,01069	L_s [H]	0,000035

Tabella 7.14. Induttanze delle fasi

Per questo avvolgimento le resistenze si ottengono con la formula 7.11:

$$R_{sU} = \frac{1}{2} \cdot R_{2U-2V} \quad (7.11)$$

Per le altre fasi:

$$R_{sV} = \frac{1}{2} \cdot R_{2U-2W}$$

$$R_{sW} = \frac{1}{2} \cdot R_{2W-2U}$$

A questo punto si possono riportano a secondario le resistenze del primario R_p (tabella 7.13). Utilizzando la formula 7.8 si ottiene la R_{AC} per ogni fase(indicata con R_{eq} in tabella). Facendo una media di tutte queste resistenze si ottiene il valore che verrà utilizzato nei calcoli successivi.

La resistenza del primario che viene riportata a secondario è quella dell'equivalente Y. Delle R_{eq} si fa una media e si ottiene R_{AC} .

Per quanto riguarda le induttanze, sotto l'ipotesi che quelle secondarie siano tutte uguali [5], si ottengono gli stessi valori per tutte e sei le fasi(tabella 7.14); si utilizza la formula 7.5. In tabella 7.15 si riassumono i dati del circuito equivalente.

$\mathbf{R}_{AC}[\Omega]$	0,001277
$\mathbf{L}_{AC}[\mathbf{H}]$	0,000104
$\mathbf{X}_{AC}[\Omega]$	0,032804
$\mathbf{Z}_{AC}[\Omega]$	0,032829

Tabella 7.15. Parametri circuito equivalente del TR a tre avvolgimenti

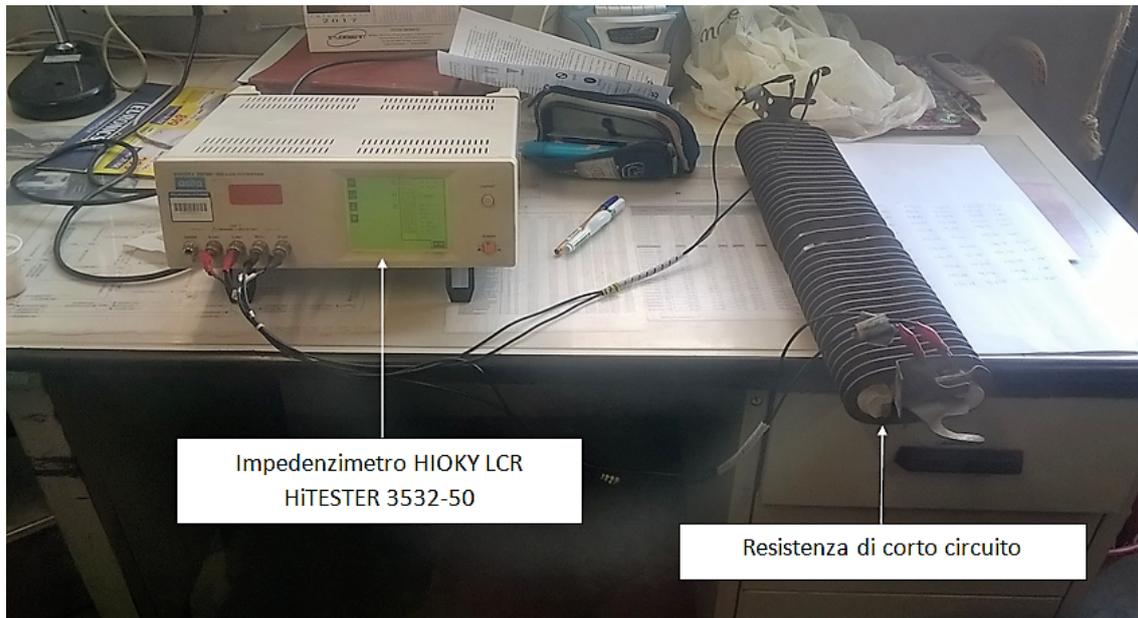


Figura 7.10. Banco di lavoro per la misura di R_{carico} e L_{carico}

2. Determinazione della resistenza di carico:

Nelle prove analizzate in precedenza, il valore della resistenza di carico era stato rilevato con un multimetro.

Nelle formule che si vogliono utilizzare compare anche il termine induttivo. Al fine di ottenere un valore di questo parametro si sono svolte delle misure della resistenza di carico il 30 Maggio 2017, presso la centrale Trapani. Grazie ad esse è stato possibile rilevare in modo più preciso il valore di R_{carico} .

Per effettuare la misura, si è utilizzato un'impedenzometro HIOKY LCR Hi-TESTER 3532-50 (figura 7.10). Lo strumento consente di rilevare il valore dell'impedenza ma anche i valori di induttanze e capacità serie/parallelo.

Prima di effettuare la misura è necessario tarare lo strumento, svolgendo le compensazioni di corto-circuito e di circuito aperto.

f[Hz]	R _s [mΩ]	L _s [μH]	Z[mΩ]	θ[°]	R[mΩ]	X[mΩ]	L[μH]
42	482,29	99,660	483,050	3,120	482,335	26,278	99,630
45	482,53	98,526	483,360	3,300	482,559	27,810	98,410
47	482,68	97,703	483,570	3,420	482,710	28,830	97,680
49	482,84	97,151	483,790	3,550	482,863	29,941	97,300
50	483,9	97,180	483,930	3,610	482,971	30,455	96,990
60	483,64	94,785	484,960	4,230	483,640	35,753	94,890
70	484,82	93,420	486,150	4,850	484,411	41,082	93,450
80	485,27	92,380	487,490	5,470	485,272	46,446	92,450
90	486,15	91,378	488,890	6,070	486,152	51,671	91,420
100	487,07	90,680	490,380	6,070	487,064	56,928	90,650

Tabella 7.16. Valori rilevati

Due parametri importanti da settare prima delle rilevazioni sono l'AVERAGE e la SPEED. Il primo, si riferisce a quanti campioni misura lo strumento per fare la media e si è impostato 8 misure. Il secondo, indica a che velocità vengono svolti i calcoli. Lo si imposta su slow in modo da avere la massima precisione.

Come si nota in tabella 7.16 sono state svolte 10 misurazioni di impedenza con frequenza variabile a partire da 42 Hz (che è il minimo consentito dalla strumento) ad arrivare a 100 Hz, non è necessario spingersi oltre. In questa tabella R_s e L_s, indicano la resistenza e l'induttanza serie misurate dallo strumento, i valori di R e L si ricavano dalla misura di Z e dell'angolo θ . Come si nota i valori di R ed L sono simili ad R_s e L_s. La misura viene svolta a in modalità CC ossia "a corrente impressa". Si setta lo strumento in modo che fornisca in uscita 90 mA che è il massimo valore che può generare, in modo da ottenere la massima precisione.

Dallo spettro delle frequenze (figura 7.11) emerge come la R_{carico} sia direttamente proporzionale alla frequenza mentre per L_{carico} è l'opposto. Durante la prova di corto circuito, la resistenza viene attraversata da corrente continua a frequenza teoricamente nulla. Per questo motivo le misure sono state svolte

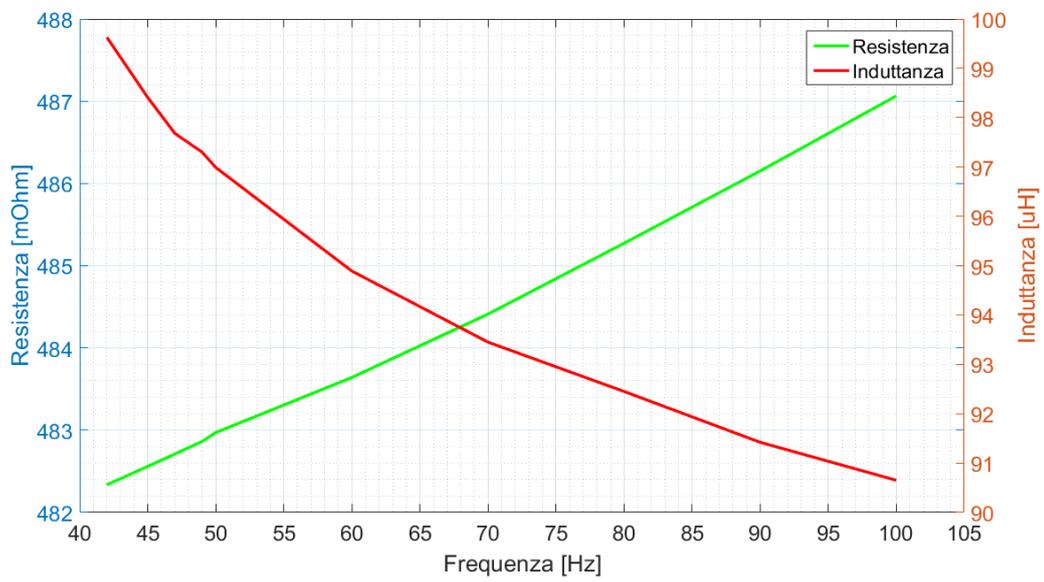


Figura 7.11. Spettro di frequenza per R_{carico} e L_{carico}

R_s [m Ω]	483,979
L_s [μ H]	95,286
R_{carico} [m Ω]	483,998
L_{carico} [μ H]	95,290

Tabella 7.17. Valori di R_{carico} e L_{carico}

	R_{carico} variabile		Senza carico			
	dI_o/dt [A/ms]	I_o [A]	R_{DC} [Ω]	L_{DC} [H]	dI_o/dt [A/ms]	I_o [A]
Prova1	25	691,188	0,0911	0,025106	25,19	7483,19
Prova2	23,75	689,609	0,0935	0,026442	23,92	7309,21
Prova3	66,25	1297,83	0,0787	0,009385	66,91	8478,48
Prova4	61,25	1303,4	0,0763	0,010168	61,81	8703,20
Prova5	62,5	1286,14	0,0839	0,009961	63,09	8034,41
Prova6	103,125	2510,88	0,0469	0,006006	103,93	12578,86
Prova7	100	2466,2	0,0522	0,006198	100,75	11682,55

Tabella 7.18. Analisi delle misure svolte in SSE Caio Mario

in un range di frequenza non troppo elevato. Per definire la R_{carico} e la L_{carico} che andremo ad utilizzare, si svolge una media delle 10 rilevazioni di R ed L e si ottengono risultati di tabella 7.17.

3. Simulazione del transitorio di corto circuito:

Una volta ricavati i valori R_{AC} e L_{AC} , si è in grado di andare a studiare l'andamento di dI_o/dt e di I_o lungo la linea. Il primo passo è quello di determinare i valori di R_{DC} e L_{DC} . Conoscendo questi dati, si può capire dove teoricamente è avvenuto il corto circuito. Si ricorda che la rete è magliata; di solito i valori di R_{DC} e L_{DC} che si ottengono dalle formule inverse di 7.3 e 7.4 sono leggermente più bassi di quelli che si otterrebbero con una linea rettilinea. Una volta ottenuti questi valori si usano le formule dirette 7.1 e 7.2 per studiare l'andamento del corto lungo la linea.

Si parte analizzando i dati provenienti dalle prove in SSE Caio Mario (tabella 7.18).

Siccome queste misure sono state svolte in SSE, i valori di R_{DC} e L_{DC} che si leggono in tabella 7.18 sono quelli di quel punto della rete. I dati della prova 1 e 2 vengono scartati perchè troppo elevati rispetto a quelli della altre rilevazioni. Si può affermare che:

$$R_{DC,CaioMario} \simeq R_{SSE}$$

$$L_{DC,CaioMario} \simeq L_{SSE}$$

A questo punto ci si pone come obiettivo quello di ricavare gli estremi di variazione di R_{DC} e L_{DC} .

Si analizzano le prove svolte in via Nicola (tabella 7.19). In questo caso, il corto circuito è avvenuto a fondo linea. I valori di R_{DC} e L_{DC} ricavati si riferiscono all'insieme di convertitore più la linea:

$$R_{DC,viaNicola} \simeq R_{SSE} + R_{linea}$$

$$L_{DC,viaNicola} \simeq L_{SSE} + L_{linea}$$

Il valore di R_{DC} dichiarato da InfraTO a fondo linea è pari a $0,25 \Omega$. Siccome le prove sono state svolte all'incirca al termine di via Nicola, i valori ottenuti sono affidabili. La letteratura scientifica ([6]) dichiara che all'incirca la resistenza di linea tranviaria è pari a $0,14 \text{ m}\Omega/\text{km}$. Ipotizzando che la linea sia lunga all'incirca 1 km si ottiene:

	$R_{\text{carico}}=0,48\Omega$		Senza carico			
	$dI_o/dt[\text{A/ms}]$	$I_o[\text{A}]$	$R_{\text{DC}}[\text{m}\Omega]$	$L_{\text{DC}}[\text{mH}]$	$dI_o/dt[\text{A/ms}]$	$I_o[\text{A}]$
Prova1	58,33	1068,96	199,87	10,69	58,84	3593,68
Prova2	50	1068,96	203,76	12,50	50,38	3531,16
Prova3	58,33	1064,10	203,01	10,69	58,85	3543,85
Prova4	41,67	1005,44	243,25	15,040	41,93	2791,90
Prova5	41,67	1006,79	242,27	15,040	41,93	2983,64
Prova6	41,67	1006,25	242,67	15,040	41,93	2978,94
Prova7	50	1062,98	203,74	12,501	50,38	3531,80
Prove senza carico						
Prova8	125	3691,67				
Prova9	133	3658				
Prova10	66,67	3650				
Prova11	66,67	3650				
Prova12	66,67	3692				

Tabella 7.19. Analisi delle prove in via Nicola

$$R_{\text{DC,CaioMario}} = 46 \div 84 m\Omega$$

$$R_{\text{DC,viaNicola}} = 199 \div 243 m\Omega$$

$$R_{\text{linea}} = 140 m\Omega$$

$$\Rightarrow R_{\text{DC,CaioMario}} = R_{\text{DC,viaNicola}} - R_{\text{linea}} = (243 \div 199) - 140 = 103 \div 59 m\Omega$$

Per la verifica dei valori di L_{DC} ; si prendono come riferimento le prove a tensione ridotta svolte in Caio Mario il 3 Dicembre 2009. L'induttanza di linea è variabile e si aggira intorno ai $2 \div 3$ mH. La letteratura scientifica([6]) assume un'induttanza di linea pari a $1,2 \div 1,5$ mH/km:

$$L_{\text{DC,provaVridotta}} = 2 \div 3 mH$$

$$L_{\text{DC,letteratura}} = 1,2 \div 1,5 mH/km$$

$$L_{\text{DC,viaNicola}} = 10 \div 15 mH$$

$$L_{\text{DC,CaioMario}} = 6 \div 10 mH$$

$$\Rightarrow L_{\text{DC,CaioMario}} \simeq L_{\text{DC,viaNicola}} - (L_{\text{DC,provaVridotta}} \circ L_{\text{DC,letteratura}})$$

A questo punto si possono ottenere gli estremi di variazione di R_{DC} e L_{DC} che verranno usati nelle simulazioni. Ad inizio linea è ragionevole usare i valori ottenuti nelle prove di Caio Mario mentre a fondo linea si usano quelli di via Nicola.

$$R_{\text{DC}} = 0,05 \div 0,2 \Omega$$

$$L_{\text{DC}} = 6 \div 15 mH$$

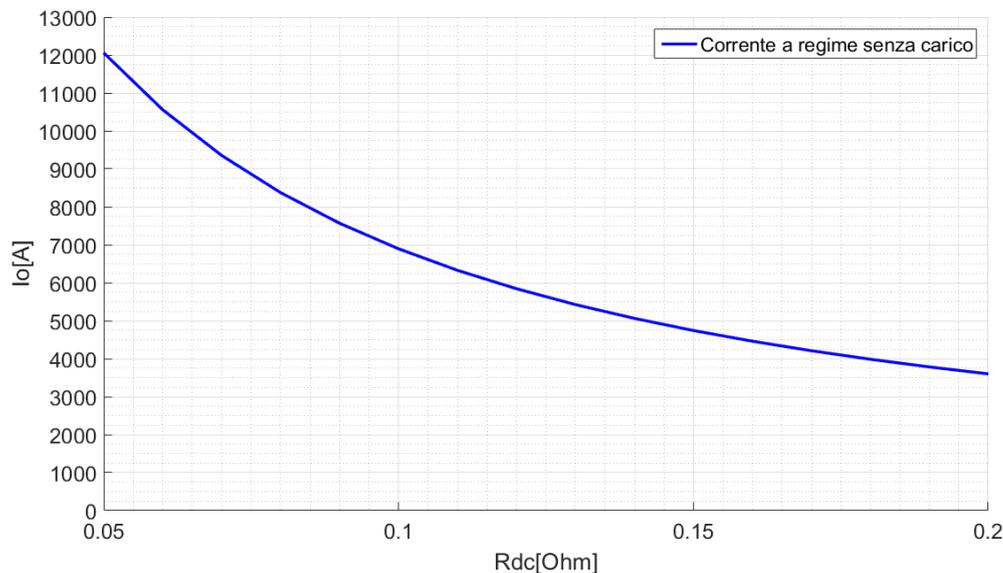


Figura 7.12. Variazione di I_o lungo la linea

Si ricorda che questi valori sono comprensivi della SSE e anche della linea. La simulazione viene condotta studiando l'andamento di I_o e dI_o/dt in funzione della variazione di questi parametri. Si considera il caso peggiore ossia il corto circuito franco, senza resistenza di carico. La variazione di I_o rispetto a R_{DC} si può leggere dal grafico 7.12 mentre la variazione di dI_o/dt in funzione di L_{DC} sul grafico 7.13.

Come ulteriore verifica dell'esattezza dei calcoli si possono confrontare le colonne evidenziate della tabella 7.19. Come si nota i valori dell'ultima colonna (che indicano la I_o calcolata con la formula usata in simulazione) sono molto simili quelli dell'altra colonna (che sono valori ottenuti da delle prove di corto circuito franco).

Si seguito si vanno ad elencare le analisi delle altre prove di corto circuito che ci erano fornite ossia: in piazza campanella (tabella 7.20) e a s.Paolo (tabella

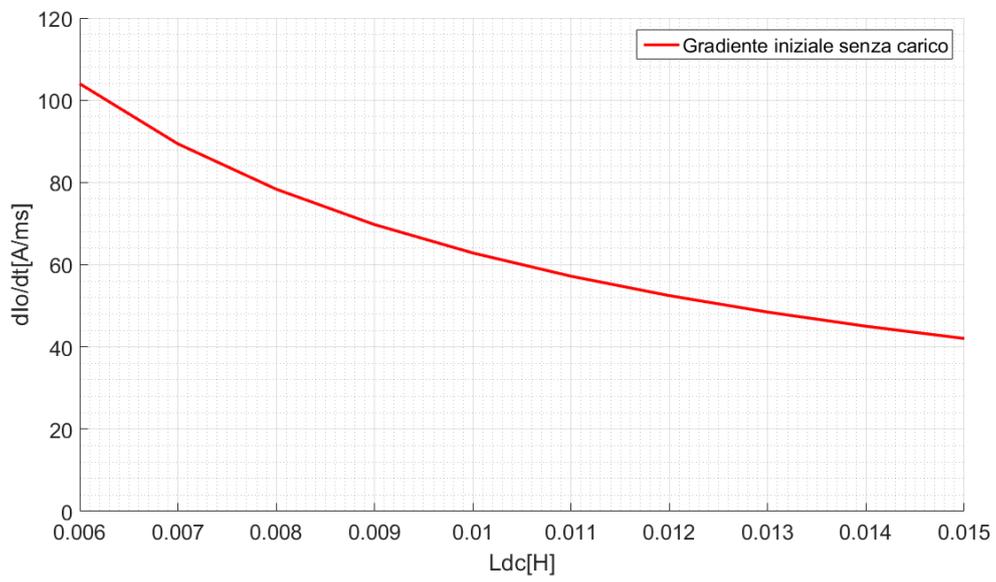


Figura 7.13. Variazione di dI_o/dt lungo la linea

	$R_{\text{carico}}=0,48 \Omega$		$R_{\text{DC}}[\Omega]$	$L_{\text{DC}}[\text{H}]$	Senza carico	
	$dI_o/dt[\text{A}/\text{ms}]$	$I_o[\text{A}]$			$dI_o/dt[\text{A}/\text{ms}]$	$I_o[\text{A}]$
Prova1	-	988	-	-	-	-
Prova2	41,69	984,79	0,259	0,015	41,93	2799,68
Prova3	50	1022,89	0,231	0,013	50,38	3128,34
Prova4	50	1014,19	0,237	0,013	50,38	3049,03
Prove senza carico						
Prova5	58,33	3308				
Prova6	58,33	3325				
Prova7	100,33	3617				
Prova8	100,033	3700				

Tabella 7.20. Analisi delle misure in piazza Campanella

	$R_{\text{carico}}=0,96\Omega$		$R_{\text{DC}}[\Omega]$	$L_{\text{DC}}[\text{H}]$	Senza carico	
	$dI_o/dt[\text{A}/\text{ms}]$	$I_o[\text{A}]$			$dI_o/dt[\text{A}/\text{ms}]$	$I_o[\text{A}]$
Prova1	43,750	670,167	0,124	0,014	44,33	5647,53
Prova2	46,875	647,351	0,118	0,013	47,54	5948,03
Prova3	-	6414,190	-	-	-	-
Prova4	34,375	629,40	0,195	0,018	34,73	3680,33
Prova5	31,250	639,154	0,177	0,020	31,54	4035,33
Prova6	37,750	639,154	0,159	0,017	37,92	4467,68
Prova7	50	649,294	0,117	0,012	50,76	5984,91
Prova8	46,875	674,840	0,117	0,013	47,54	5995,84
Prova9	46,875	674,840	0,117	0,013	47,54	5984,07
Prova10	46,875	674,829	0,117	0,013	47,54	5991,21
Prova11	50	674,225	0,118	0,020	50,76	5942,63
Prova12	-	-	-	-	-	-

Tabella 7.21. Analisi delle misure s.Paolo

7.21). Nel caso di piazza Campanella si possono confrontare i valori della I_o ottenuti nell'ultima colonna con quelli delle ultime quattro righe che si riferiscono a delle prove di corto circuito franco (tabella 7.20). Delle prove svolte a s.Paolo non si conosce il punto esatto dove si verifica il corto circuito, l'unica cosa che si conosce è che si sono svolte tutte con la resistenza.

7.3 Conclusioni

1. Si nota che la R_{carico} influisce in maniera molto più consistente sulla I_0 rispetto alla L_{carico} sulla dI_{carico}/dt .
2. Nella taratura del relè, non è possibile distinguere un corto circuito a fondo linea usando solo il parametro $A_{ms>}$. La dI_0/dt in caso di guasto assume valori bassi, confrontabili con la dI_0/dt di un passaggio sotto al divisore di zona. Per questo motivo si può pensare di tarare il parametro $A_{ms>}$ con dei valori simili a quelli registrati nel passaggio sotto al divisore mentre la dI_0/dt del guasto a fondo linea può essere usata per settare l' A/msD .
3. Per la taratura di $DR>$ bisogna confrontare le DR_{MAX} ottenute dalle cumulate del passaggio sotto al divisore delle motrici (in particolare della motrice 6000 che è quella che provoca una differenza di corrente maggiore e con forma simile a quella di un corto circuito) con la I_0 ottenuta nella simulazione illustrata in questo capitolo.
4. La taratura di iEn e tEx può essere svolta basandosi sul tempo impiegato dal peggior corto circuito a raggiungere la condizione di regime. Per questo si deve simulare un corto a fondo linea che è quello avente la costante di tempo più lunga.

Capitolo 8

Conclusioni

In questo capitolo si cercano di utilizzare i risultati descritti in precedenza per ottimizzare la taratura dei relè DIA-IGTv, installati a protezione della rete tranviaria.

8.1 Taratura del relè

I parametri di taratura del relè sono:

1. **$I>$** : **soglia di sovracorrente**. Serve per proteggere dal sovraccarico il cavo. Se si supera questo valore avviene lo scatto per $I>$.
2. **A/msD** : **soglia di riconoscimento della discontinuità**. Serve per far iniziare il ciclo di controllo del relè e per resettarlo nel caso in cui ci sia l'avviamento di più treni.
3. **$A/ms>$** : **soglia di massimo gradiente**. Serve per controllare il gradiente, se si supera questo valore avviene uno scatto per $dI>$
4. **A/msE** : **soglia di riconoscimento avviamento di un treno**. Può far uscire dal ciclo di controllo se il gradiente diventa più basso di essa.

Limiti di taratura			
Parametro	min	max	passo
$I>$	$0,2 \cdot I_n$	$9 \cdot I_n$	0,1
A/msD	5	100	1
$A/ms>$	50	500	1
A/msE	5	100	1
$DR>$	$0,1 \cdot I_n$	$3 \cdot I_n$	0,1
iEn	4	20	1
tEx	0	50	1
k	-	-	-

Tabella 8.1. Limiti di taratura

5. **$DR>$: soglia di controllo della differenza di corrente.** La differenza che viene controllata è $I-I_0$, dove I è la corrente attuale mentre I_0 la corrente di inizio ciclo. Quest'ultima è variabile in quanto dipende da un eventuale reset per superamento della soglia A/msD .
6. **iEn : numero di campionamenti.** Indica per quanto tempo si eseguono i controlli rispetto alle soglie $I>$, $A/ms>$, A/msD e A/msE .
7. **tEx : tempo di prolungamento del controllo.** Se nel tempo iEn non avviene alcuno scatto, il relè, per un tempo pari a questo parametro, controlla ulteriormente la corrente rispetto alle soglie $I>$ e la differenza $I-I_0$ rispetto a $DR>$ o $0,5 \cdot DR>$.

I possibili valori che possono assumere tali parametri sono mostrati in tabella 8.1. Il loro settaggio, deve permettere al relè la distinzione tra correnti di: spunto, passaggio sotto al divisore e corto circuito. Per caratterizzare le diverse tipologie di corrente, in ogni condizione si sono ricavate: la DR (differenza di corrente di regime meno quella iniziale del fenomeno) e la dI_0/dt (pendenza iniziale), quest'ultima approssimata con il valore di gradiente massimo. Si è notato che i valori assunti da questi parametri nelle condizioni di corto circuito e di passaggio sotto al divisore

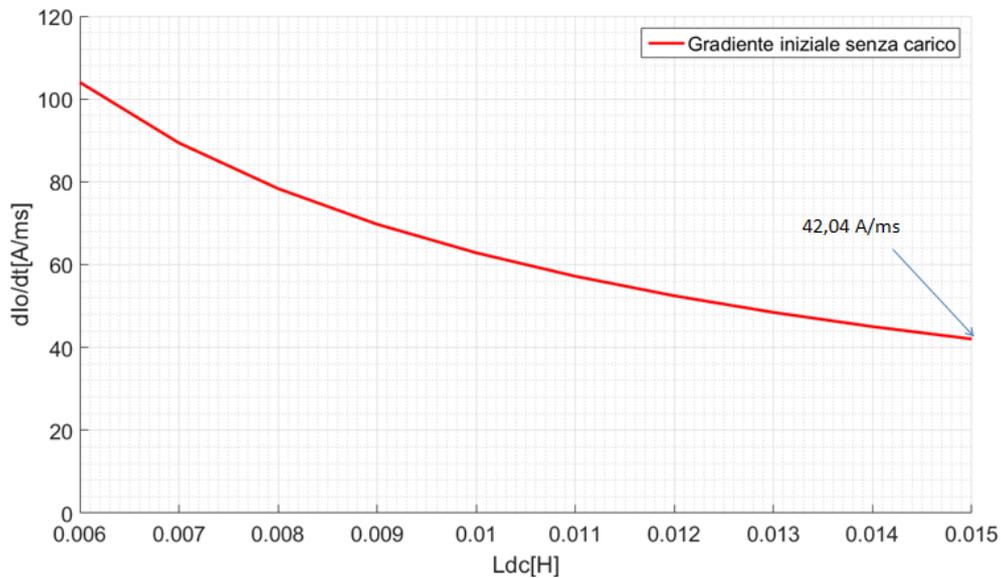
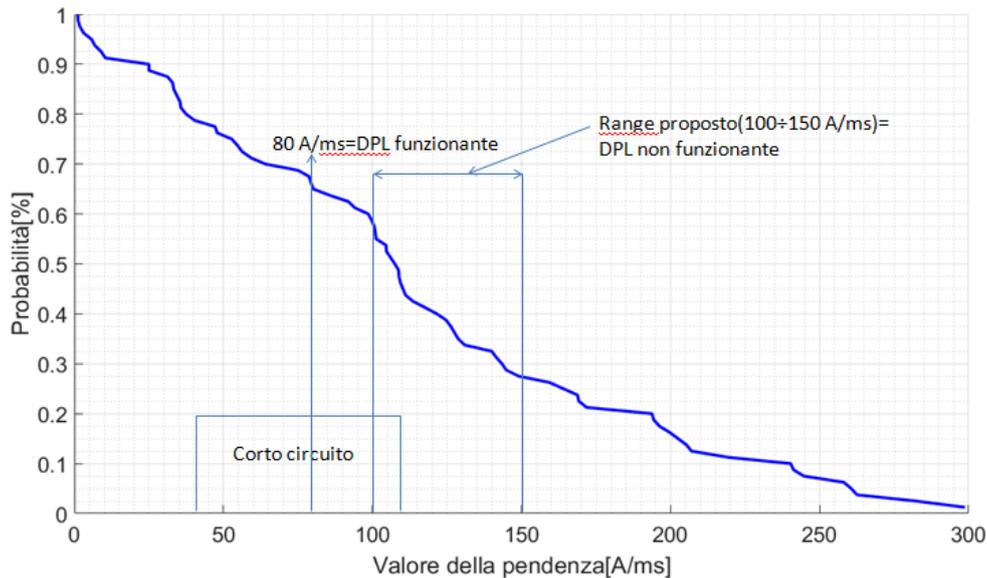


Figura 8.1. Variazione di dI_0/dt lungo la linea

possono essere confrontabili. In base a quanto affermato si propongono le seguenti tarature:

- a) Studiando la soglia di sovracorrente ($I >$) si nota che principalmente essa serve per la protezione dal sovraccarico del cavo. Si lascia come valore di settaggio quello impostato in ciascuna sottostazione in quanto il valore della corrente I_n cambia da zona a zona.
- b) Il primo confronto eseguito dal relè è quello che serve per farlo entrare nel ciclo di controllo ossia quello con A/msD . Per avere la certezza che il dispositivo inizi il controllo anche in una condizione critica, si deve studiare la pendenza iniziale del peggiore corto circuito ossia quello che avviene a fondo linea (figura 8.1). Il valore ottenuto dalle simulazioni del capitolo 7 è pari a 42 A/ms. Per essere certi di entrare nel ciclo anche con valori più bassi si settano 30 A/ms

c) Una volta entrati nel ciclo di controllo, il relè fa un nuovo confronto con la soglia di sovracorrente e poi va a controllare la soglia istantanea di $A_{ms} >$. Settantola correttamente il dispositivo dovrebbe distinguere una condizione critica del normale funzionamento (passaggio sotto al divisore) da un guasto. Per questo si possono confrontare gli estremi delle pendenze ottenute nel peggior corto circuito (simulato nel capitolo 7) con quelle ottenute nel capitolo 5 dalle misure sulle motrici. Dalla figura 8.2 emerge che per evitare ogni scatto intempestivo bisognerebbe settare 300 A/ms. Questo valore, tuttavia, si verifica molto raramente in quanto deriva da una misura in cui il tranviere è transitato alla massima velocità sotto al divisore (cosa non consentita dal regolamento); inoltre non consentirebbe di rilevare i guasti. Per contro si osserva che settando 100 A/ms e rilevando una parte dei guasti; in più del 50 % dei casi si avrebbe uno scatto intempestivo quando si transita sotto il divisore senza rispettare il regolamento. Inoltre, per la taratura di questo parametro, bisogna tenere conto della presenza in cabina del Dispositivo Prova Linea (DPL). Attualmente esso non è in grado di ripristinare il servizio nel tempo inferiore ad 1 minuto, specie quando le motrici 5000 hanno il banco di avviamento nella posizione 1 ([15]). In attesa di risolvere questo problema, per riuscire a distinguere almeno alcuni corto circuiti, si propone un range di taratura tra i $100 \div 150$ A/ms. Ovviamente, più il valore scelto è basso, più è alta la probabilità di scatti intempestivi. Più il valore scelto è elevato, meno è probabile che un guasto faccia scattare il relè immediatamente per $A/ms >$. In futuro, se verrà risolto il problema del DPL; questo valore potrà essere abbassato a 80 A/ms in modo da distinguere più situazioni di guasto. Si deve notare che la pendenza del passaggio sotto al divisore è indipendente dalla zona in cui transitiamo ed è unicamente correlata al tipo di motrice che si sta studiando. Per contro le pendenze che si ottengono nella simulazione del corto circuito

Figura 8.2. Settaggio di $A_{ms>}$

sono (in particolare quelle a fondo linea) dipendenti dalla zona che si stà analizzando. Il valore che si ottiene è simile a quello che propone il manuale che dice di prendere $A_{ms>} = (2 \div 3) \cdot (\text{gradiente del corto circuito peggiore})$. Nel nostro questa pendenza è circa 42 A/ms cosa che comporterebbe un settaggio tra 84 ÷ 126 A/ms di $A_{ms>}$.

- d) Dopo aver fatto i controlli con $A_{ms>}$ il ciclo prevede un eventuale reset che indica la partenza di un treno, quando il gradiente scende sotto alla soglia A/msE. Il manuale [8], per questo parametro, consiglia una taratura tra $(0,1 \div 0,3) \cdot A_{msD}$. Avendo scelto 30 A/ms per questa soglia, si può settare A/msE con un valore tra 3 ÷ 9 A/ms e quindi si scelgono 10 A/ms. Questa, deve consentire di continuare l'analisi qualora si sia verificato un guasto mentre nel caso in cui ci sia un avviamento o un passaggio sotto al divisore di resettare il ciclo e deve quindi essere correlata alla scelta della soglia DR>.

Se vi fosse un avviamento della motrice, all'interno del tempo $2 \cdot iEn$, e il gradiente diventasse inferiore a A/msE dovrebbe avvenire il reset. Se si osservano le cumulate del gradiente massimo (GRADMAX), ottenute dagli spunti delle motrici (capitolo 3) si nota che in tutti i casi si ha un valore inferiore ai 10 A/ms questo porta il DIA a riconoscere correttamente questa situazione.

e) La soglia $DR>$, viene confrontata con la differenza tra la corrente istantanea (I) e quella di inizio ciclo (I_o). Questa differenza ($I-I_o$) è di tipo cumulato, cioè il valore calcolato aumenta e si resetta solo qualora si verifichi la condizione $GRAD2 < A/msE$ nel tempo $2 \cdot iEn$. All'interno di questo intervallo temporale, $I-I_o$ viene anche paragonata con la soglia $DR>$ e qualora la superi, si ha uno scatto per $DR>$. Si devono confrontare i peggiori DR causati dal passaggio sotto al divisore (ossia quelli della motrice 6000) illustrati in figura 8.3 con quelli ottenuti nella simulazione del corto circuito a fondo linea (figura 8.4). Dato che dalla cumulata della massima DR della motrice 6000, emerge che si possono verificare (in condizioni critiche) delle differenze pari a 2300 A si può pensare di settare $DR>$ pari a 2500 A, valore che potrebbe causare uno scatto nel caso di un corto circuito a fondo linea dove emergono valori di I_o pari a 3600 A.

f) A questo punto si deve impostare la soglia iEn che corrisponde alla durata del calcolo in cui il relè ripete i controlli che si sono appena descritti. Il manuale consiglia la seguente taratura:

$$iEn = \frac{I_o}{4 \cdot \frac{dI_o}{dt}} \quad (8.1)$$

Per calcolarlo, si simula il peggior corto circuito che potrebbe avvenire lungo

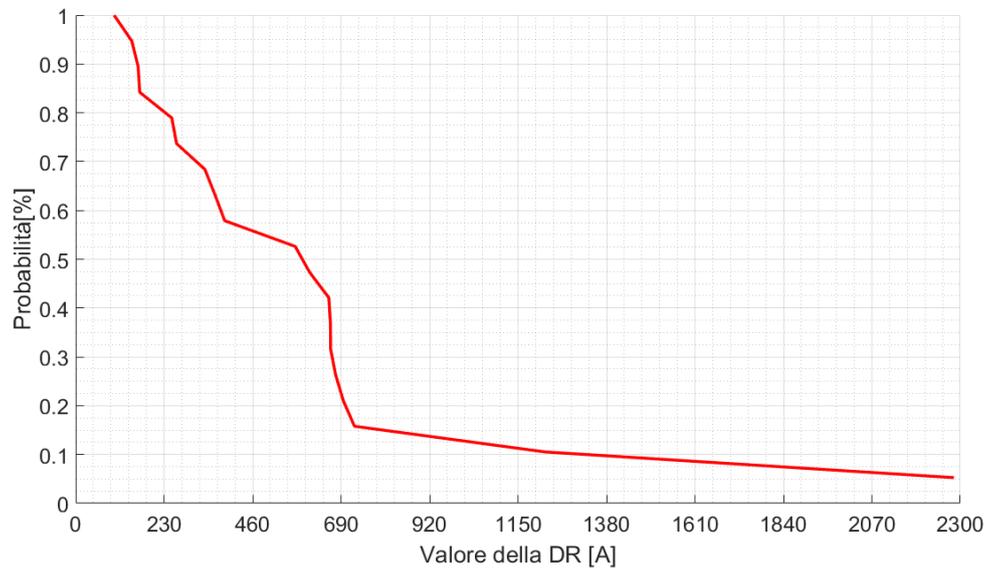


Figura 8.3. Cumulata di DR, motrice 6000

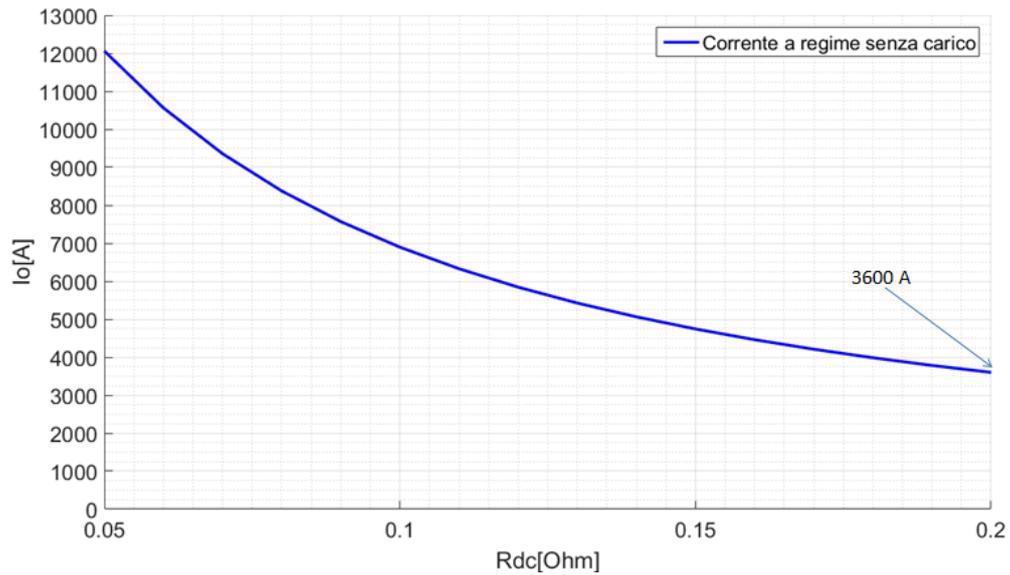


Figura 8.4. Variazione di $I_0 \simeq DR >$ lungo la linea durante il corto circuito

la rete con la formula:

$$i(t) = I_o \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (8.2)$$

Nell'equazione 8.2 la I_o viene ricavata dividendo la tensione di alimentazione (pari a 635 V) con la resistenza a fondo linea (pari a 0,2 Ω). La costante di tempo τ si ricava dividendo l'induttanza a fondo linea (15 mH) per questa resistenza. Si ottengono i risultati di figura 8.5 dove si nota una pendenza dI_o/dt pari a 41,92 A/ms. Sapendo che la I_o è pari a 3175 A ($635 \div 0,2$) si ottiene:

$$iEn = \frac{I_o}{4 \cdot \frac{dI_o}{dt}} = \frac{3175}{4 \cdot 41920} = 18,9ms \quad (8.3)$$

Si sceglie un tempo di campionamento equivalente un pò inferiore, tenendo un certo margine, pari a 18 ms.

- g) Una volta che il tempo ha raggiunto il valore pari a $2 \cdot iEn$; il relè fa una stima della corrente che si può avere a regime dividendo la differenza di corrente attuale per 0,632. Se questa è inferiore a $0,5 \cdot DR >$ allora resetta altrimenti si prolunga il tempo di osservazione per tEx secondi. In questo intervallo il dispositivo va a controllare che la corrente aumenti sempre fino a raggiungere un valore superiore alla soglia settata. Tutti i fenomeni che si sono studiati hanno una durata di pochi ms per questo si imposta come valore 1 s che dovrebbe essere più che sufficiente per distinguere il corto (anch'esso con durata di qualche ms).

Avendo a disposizione tutte le tarature si può pensare di fare un controllo di quanto avviene nei due casi limite ossia quando si ha il peggior passaggio sotto al divisore (motrice 6000) e quando si ha il peggior corto circuito. In figura 8.6 si può

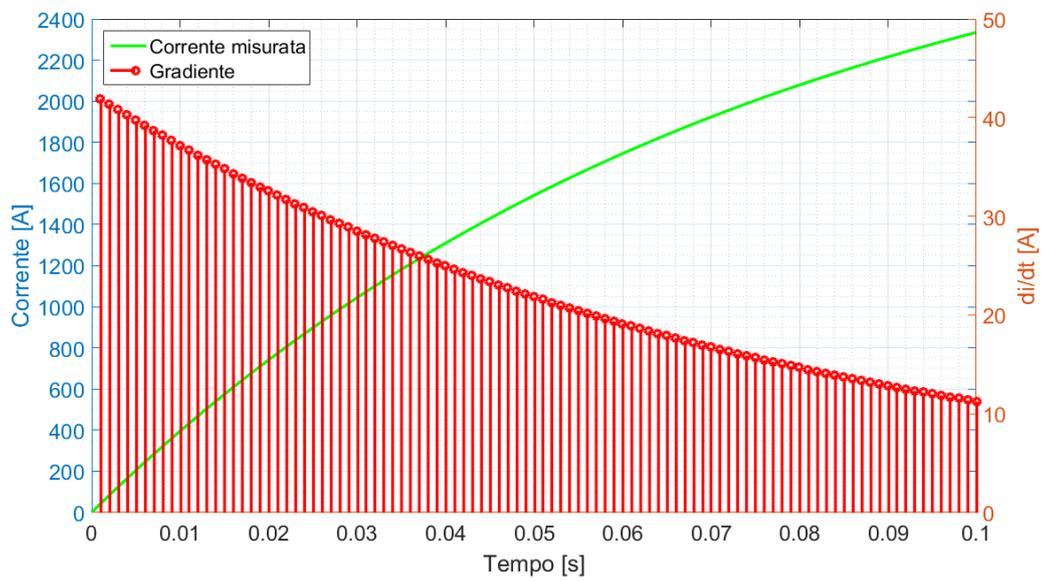


Figura 8.5. Simulazione del peggior corto circuito

notare cosa avviene nel primo caso; il relè entra nel ciclo al tempo pari a 3 ms con derivata $41 \text{ A/ms} > \text{A/msD}$ (30 A/ms) e analizza la corrente per un tempo pari a $2 \cdot i_{En}$ (36 ms) senza far avvenire alcuno scatto per $I >$ o per superamento della soglia $\text{A/ms} >$ ($100 \div 150 \text{ A/ms}$). Quando vengono raggiunti i 36 ms (perchè non si ha mai un gradiente inferiore alla soglia A/msE), legge la corrente e fa un calcolo di quella che potrebbe essere la corrente a regime ($DR_c = (I - I_0) / 0,632$); siccome questa corrente è pari a 2400 (inferiore a $DR >$ settato a 2500 A non si ha uno scatto. Viene prolungato il tempo di osservazione per 1 s ma siccome il fenomeno di passaggio sotto al divisore dopo la rampa esponenziale decresce, in questo intervallo temporale la differenza $I - I_0$ non diverrà mai superiore della $DR >$ (figura 8.7). Inoltre essendo settati 2500 A e avendo come differenza massima 2300 A l'affermazione appena fatta è corretta. Quello appena analizzato è un caso critico in quanto nel tempo $2 \cdot i_{En}$ la derivata non diventa mai inferiore ad A/msE (10 A/ms) se si osserva il passaggio sotto al divisore della motrice 5000 (figura 8.8) si nota che in questo tempo il relè (linea rossa) rileva delle derivate che diventano negative e quindi provocano il reset del ciclo. Il DR per le motrici 5000 non fa avvenire uno scatto anche nel caso critico in cui avvenga un reset e la curva si comporti in modo simile ad un esponenziale (figura 8.9), si ottengono al massimo 550 A contro i 2500 A settati. Anche nel caso della 2800 che ha un comportamento simile all'esponenziale nel tempo pari a 2 volte i_{En} non vengono raggiunti dei DR tali da far scattare il relè (figura 8.10).

Studiando il caso del peggior corto circuito (figura 8.11) si nota che il relè inizia subito a controllare poi fino al tempo pari a 36 ms non si ha alcun reset perchè il gradiente non scende al di sotto dei 10 A/ms settati e non si hanno degli scatti (la corrente è inferiore a $I >$ mentre il gradiente è sempre inferiore alla soglia $\text{A/ms} >$). Arrivato al tempo limite, calcola una stima della corrente di regime che è pari a 1909 A; questa è inferiore alla soglia di 2500 A ed è superiore al secondo controllo ossia alla metà di 2500 A per questo viene prolungato il tempo di osservazione di

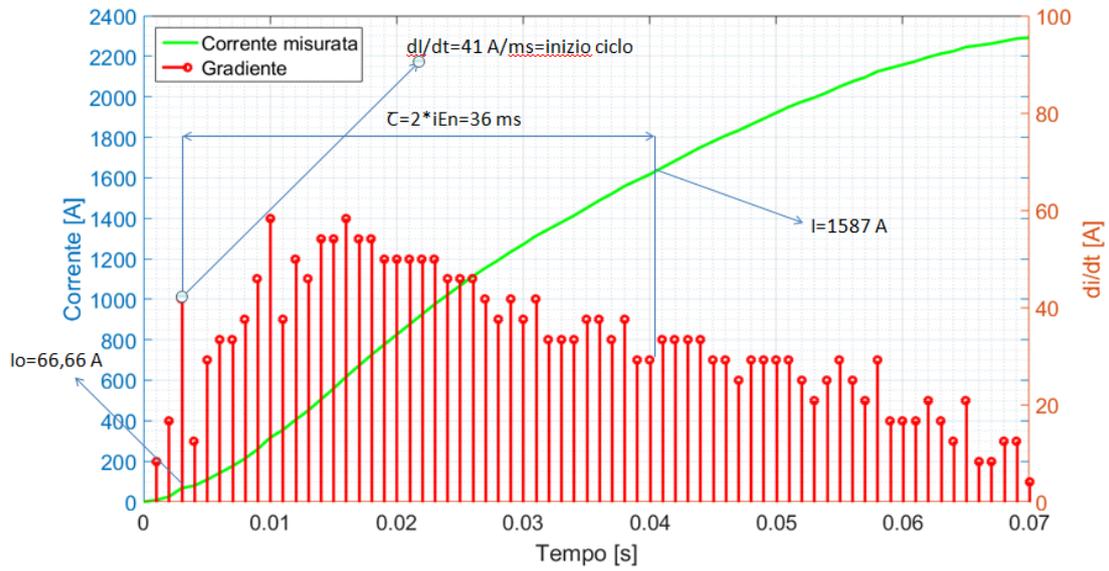


Figura 8.6. Peggior passaggio sotto al divisore

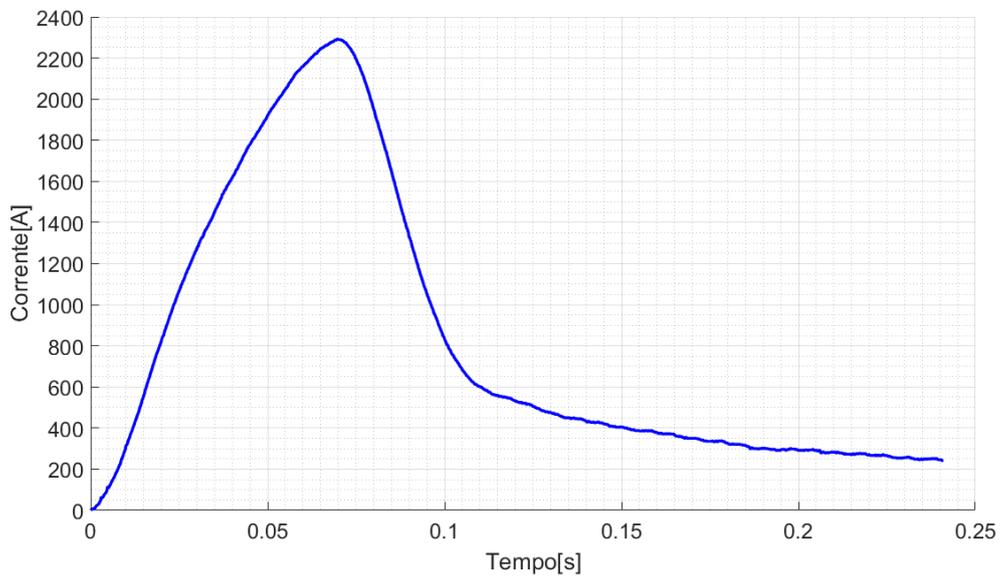


Figura 8.7. Peggior passaggio sotto al divisore della 6000

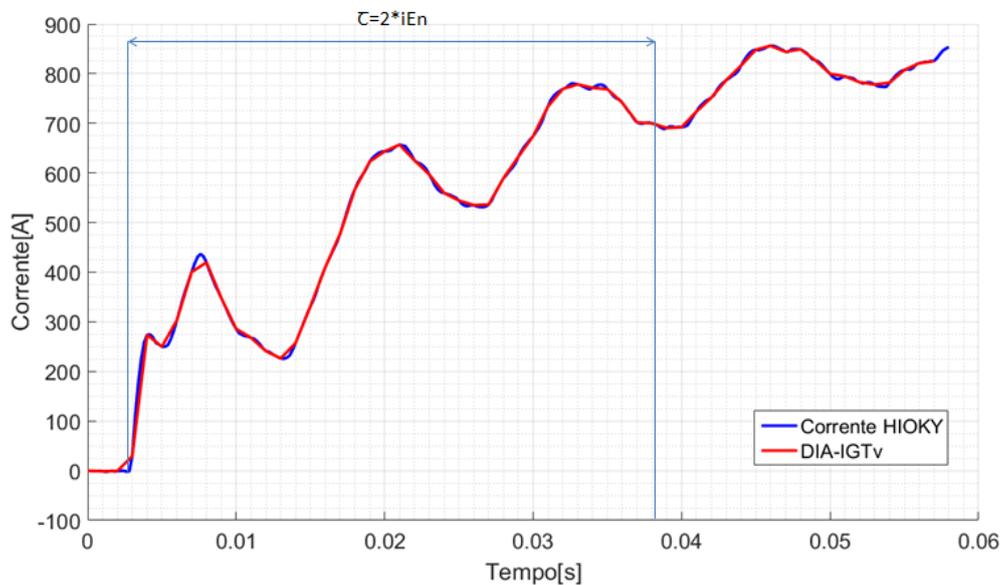


Figura 8.8. Passaggio sotto al divisore della 5000

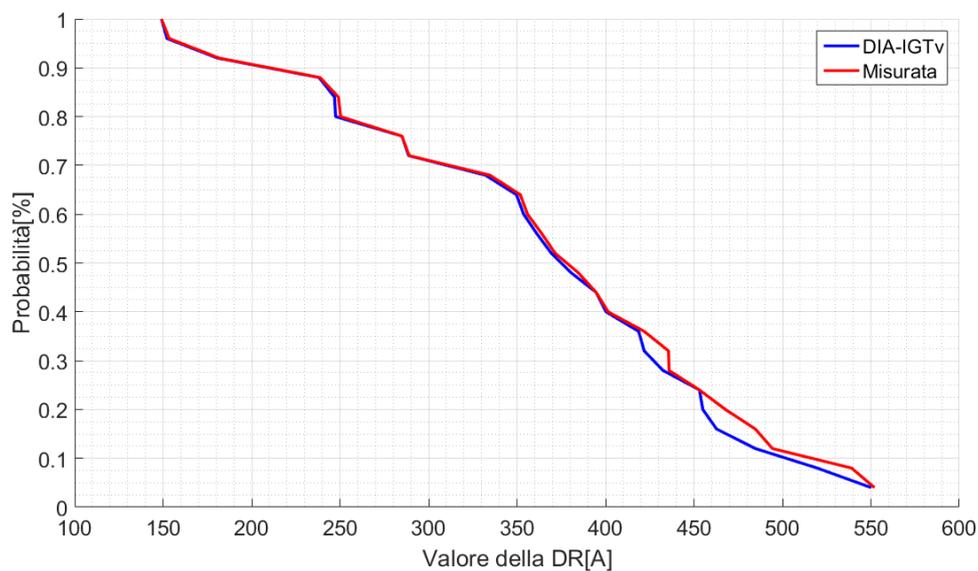


Figura 8.9. Cumulate con reset della motrice 5000

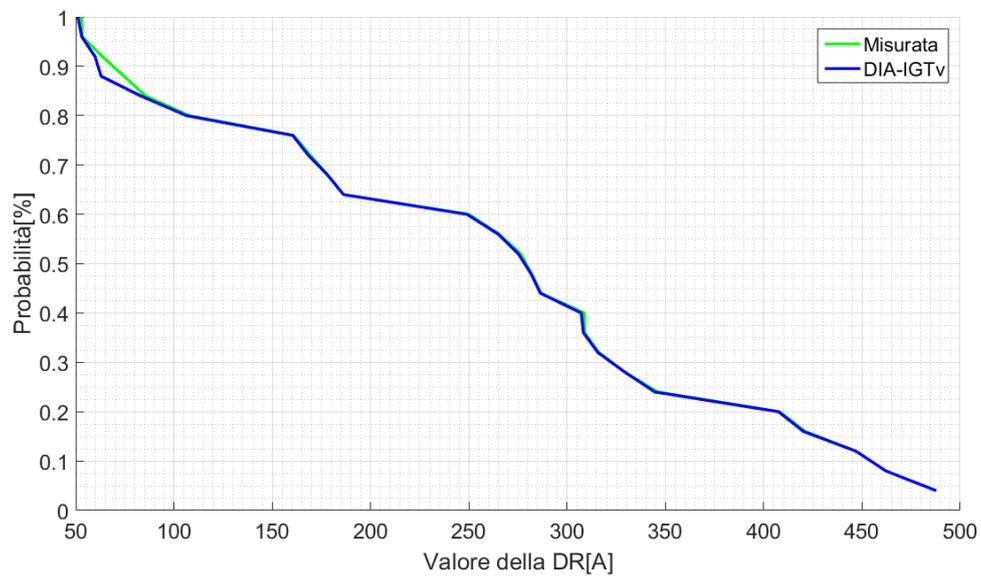


Figura 8.10. Cumulate della motrice 2800

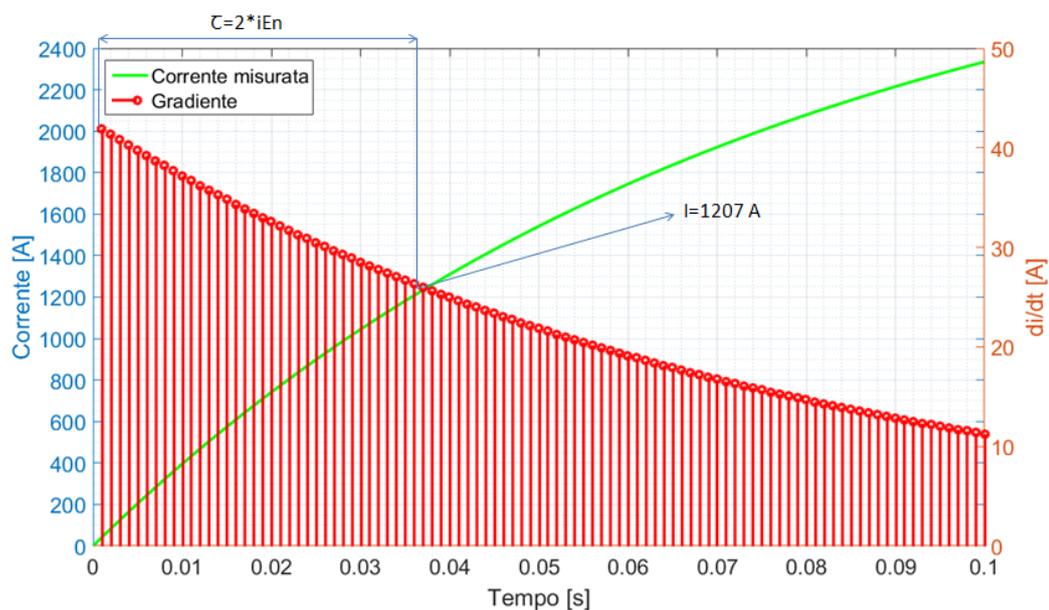


Figura 8.11. Zoom sul corto circuito a fondo linea

1 secondo. Anche se il corto circuito analizzato è quello peggiore (ossia con una costante di tempo molto lunga); si sviluppa per un tempo inferiore a t_{Ex} ed in questo tempo sicuramente la differenza $I-I_0$ diverrà superiore a 2500 A. In figura 8.12 si può notare quanto appena affermato, lo scatto per superamento di tale soglia avverrà intorno ai 0,11 s quindi all'interno della soglia t_{Ex} . Anche in questo caso si è analizzato un caso critico ossia un corto circuito con costante di tempo molto lunga, nella realtà questa è più breve e ciò comporta uno scatto in un tempo molto più breve.

Si possono confrontare le tarature proposte con quelle già presenti nella SSE Caio Mario (tabella 8.2). Si deve ricordare che le tarature che si hanno in ogni SSE possono differire per alcuni parametri, di solito quello che varia di più è $I >$ che dipende dalla corrente nominale dell'interruttore extra-rapido installato in SSE.

	Tarature vecchie	Tarature proposte
In [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 8.2. Confronto tra tarature

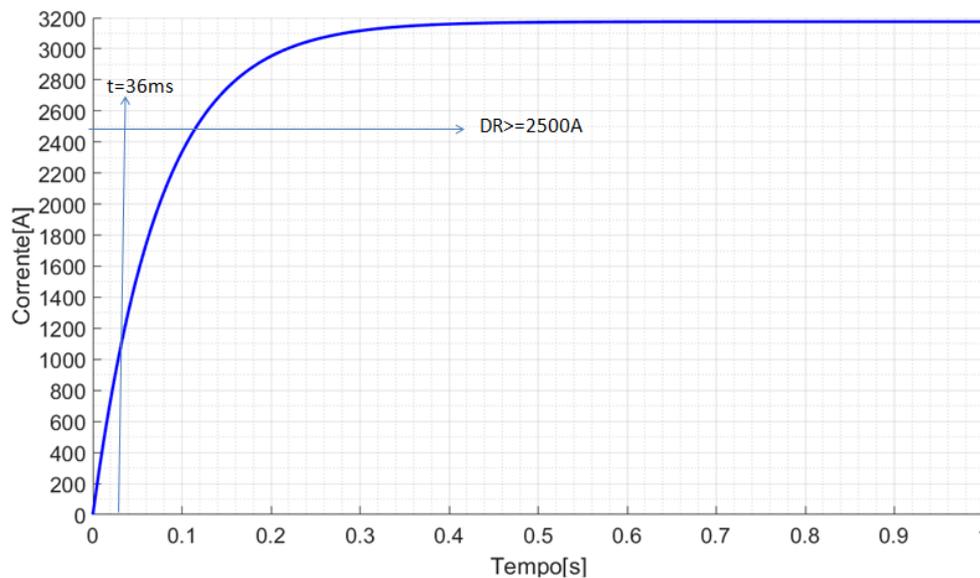


Figura 8.12. Corto circuito a fondo linea

8.2 Sviluppi futuri

Il seguente lavoro di tesi potrebbe essere ampliato andando a verificare le tarature proposte attraverso l'ausilio del simulatore REAL-TIME. Con questo si potrebbe approfondire meglio il metodo di misura del relè, come già fatto nel capitolo 4 con la differenza che lo studio da noi presentato consente unicamente di fornire delle forme periodiche mentre il simulatore permette di fornire dei profili d'onda identici alla realtà. Si potrebbe sviluppare un'interfaccia grafica (GUI) per ottimizzare l'uso del simulatore sviluppato nel capitolo 2 prima della prova sul campo delle tarature. Un terzo approfondimento sarebbe quello di studiare al meglio la causa dei picchi di assorbimento che si sono notati nel capitolo 6 in modo da capire un metodo che riduca queste pendenze. L'ultimo passo successivo è la messa in servizio del DIA-IGTv, dopo averlo testato in alcune zone critiche il comportamento del dispositivo.

Bibliografia

- [1] E.Pons. *"La sicurezza elettrica delle persone nei sistemi di alimentazione tranviaria torinese."* Torino:Politecnico di Torino, dottorato di ricerca, 2008.
- [2] E.Pons. *"Relazione sulle prove di corto circuito a tensione ridotta e sulla taratura dl relè DIA-IGTv."* Politecnico di Torino, 2010.
- [3] Reis, Marcus. *"Optimization of DC feeder rate of rise overcurrent protection settings using delta I cumulative distribution."* Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2004 IEEE. IEEE, 2004.
- [4] Pires, C. L., S. I. Nabeta, and J. R. Cardoso. *"Second-order model for remote and close-up short-circuit faults currents on DC traction supply."* IET Power Electronics 1.3 (2008): 348-355.
- [5] Pozzobon, Paolo. *"Transient and steady-state short-circuit currents in rectifiers for DC traction supply."* IEEE Transactions on Vehicular Technology 47.4 (1998): 1390-1404.
- [6] Mariscotti, Andrea, and Paolo Pozzobon. *"Synthesis of line impedance expressions for railway traction systems."* IEEE Transactions on Vehicular Technology 52.2 (2003): 420-430.
- [7] Pons, Enrico, Riccardo Tommasini, and Pietro Colella. *"Electrical safety of DC urban rail traction systems."* Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on. IEEE, 2016.

- [8] Specifica EMC. *"Manuale operativo:sistema di protezione e diagnostica DIA-IGTv"*.
- [9] HIOKY 3285. *"3285 clamp-on AC/DC HiTESTER, instruction manual"*.
- [10] HIOKY 3532-50. *"3532-50 LCR HiTESTER,instruction manual"*.
- [11] MS-Com. *"Programma per l'interfacciamento del relè"*.
- [12] Agilent 33220A. *"Agilent 33220A 20 MHz Waveform Generator User's Guide"*.
- [13] HIOKY Mr-8880. *"HIOKY HI-Recorder User's Guide"*.
- [14] Specifica tecnica. *"Gli interruttori extra-rapidi della serie IR6000"*.
- [15] F.Scolamiero. *"Ottimizzazione dei sistemi di protezione della rete tranviaria torinese"* Torino:Politecnico di Torino, tesi di laurea magistrale, 2016.

Elenco delle tabelle

2.1	Tarature del relè	7
2.2	Dati per il test dei primi tre cicli	7
2.3	Dati per il test del quarto ciclo	11
2.4	Dato per testare il quinto ciclo	13
2.5	Dati per il test del sesto ciclo	14
2.6	Dati per il test del settimo ciclo	16
2.7	Dati per il test ciclo più interno	19
3.1	Riassunto dei tempi di interpolazione	28
3.2	Riassunto dei valori letti da grafici, dati separati	48
3.3	Riassunto dei valori letti da grafici, separati in normale funzionamento e guasto	51
4.1	Alimentazione del banco	67
4.2	Caratteristiche del generatore di segnale	69
4.3	Resistenza da 154 Ω	71
4.4	Resistenza da 1 Ω	72
4.5	Misura della resistenza interna del relè	76
4.6	Confronto tra la misura sullo shunt e sul relè	81
4.7	Valutazione degli errori a regime con i tre tipi di filtro esterno all'HIOKY	88
4.8	Valutazione degli errori a regime con filtri interni all'HIOKY	89

4.9	Caratteristiche delle prove	92
4.10	Errori a regime	94
4.11	Riassunti errori a regime	94
4.12	Valutazione delle FFT	95
4.13	Caratteristiche delle fft	95
4.14	Caratteristiche prove con esponenziale	96
4.15	Risultati del fitting e errori percentuali sulla dI_o/dt	99
4.16	Tabella riassuntiva errori su dI_o/dt	99
4.17	Analisi delle fft	102
4.18	Analisi fft per la prima frequenza	102
4.19	Analisi fft per la seconda frequenza	102
4.20	Tabella riassuntiva delle prove con forme d'onda reali e esponenziali .	113
5.1	Settaggio pinze amperometriche	118
5.2	Settaggio canali del registratore	119
5.3	Correlazione corrente prima dell'arco-tempo passaggio sotto al divisore	125
5.4	Estremi di variazione nelle cumulate	133
5.5	Caratteristiche segnale originale vs DIA-IGTv	134
5.6	Tabella riassuntiva lettura cumulate	135
5.7	Estremi di variazione per la motrice 5000 e la motrice 6000	138
5.8	Settaggio pinze amperometriche	140
5.9	Settaggio canali del registratore	140
5.10	Estremi di variazione dei parametri per la taratura, vettura 2800 . . .	146
5.11	Caratteristiche del segnale originale vs DIA, motrice 2800	146
5.12	Tabella riassuntiva lettura cumulate, motrice 2800	147
5.13	Estremi di variazione per le tre motrici	151
6.1	Settaggi HIOKI	159
6.2	Diario di bordo delle misure	162

6.3	Misure analizzate	162
6.4	Tabella riassuntiva dei parametri caratteristici	166
7.1	Caratteristiche delle prove in piazza campanella	179
7.2	Eventi particolari nelle prove di corto in piazza campanella	179
7.3	dIo/dt e Io in piazza Campanella	182
7.4	Caratteristiche prove in SSE Caio Mario	184
7.5	dIo/dt e Io a Caio mario	184
7.6	Caratteristiche prove in via Nicola fronte civico 22	185
7.7	Io e dIo/dt via Nicola	186
7.8	Caratteristiche prove in zona s.Paolo	187
7.9	Dati di targa del trasformatore	189
7.10	Resistenze avvolgimenti primario	192
7.11	Resistenze degli avvolgimenti secondario a triangolo	193
7.12	Resistenza degli avvolgimenti,secondario a stella	194
7.13	Resistenza equivalenti di ogni fase	195
7.14	Induttanze delle fasi	195
7.15	Parametri circuito equivalente del TR a tre avvolgimenti	196
7.16	Valori rilevati	198
7.17	Valori di R_{carico} e L_{carico}	200
7.18	Analisi delle misure svolte in SSE Caio Mario	200
7.19	Analisi delle prove in via Nicola	202
7.20	Analisi delle misure in piazza Campanella	206
7.21	Analisi delle misure s.Paolo	206
8.1	Limiti di taratura	210
8.2	Confronto tra tarature	223

Elenco delle figure

2.1	Diagramma di flusso	6
2.2	Primi tre sottocicli	8
2.3	Forma d'onda test dei primi tre cicli	10
2.4	Quarto ciclo	11
2.5	Forma d'onda del quarto ciclo	12
2.6	Quinto ciclo	13
2.7	Sesto ciclo	14
2.8	Forma d'onda test del sesto ciclo	15
2.9	Settimo ciclo	15
2.10	Forma d'onda test del settimo ciclo	16
2.11	Ciclo particolare	18
2.12	Forma d'onda del ciclo particolare	20
2.13	Forma d'onda complessa	20
3.1	Interpolazione vettura 2800	28
3.2	Interpolazione vettura 5000	29
3.3	Interpolazione vettura 6000	29
3.4	Interpolazione vettura 6000+2800	30
3.5	Interpolazione del corto circuito	30
3.6	Interpolazione degli scatti	31
3.7	Interpolazione del passaggio sotto al divisore	31

3.8	Cumulata della differenza di corrente, vettura 2800	35
3.9	Cumulata del gradiente massimo, vettura 2800	35
3.10	Cumulata della differenza di corrente, vettura 5000	36
3.11	Cumulata del gradiente massimo, vettura 5000	36
3.12	Cumulata della differenza di corrente, vettura 6000	37
3.13	Cumulata del gradiente massimo, vettura 6000	37
3.14	Cumulata della differenza di corrente, vetture 2800+6000	38
3.15	Cumulata del gradiente massimo, vetture 2800+6000	38
3.16	Cumulata della differenza di corrente, prove di corto circuito	42
3.17	Cumulata del gradiente massimo, prove di corto circuito	42
3.18	Cumulata della differenza di corrente, scatti	43
3.19	Cumulata del gradiente massimo, scatti	43
3.20	Cumulata della differenza di corrente, scatti corretti	44
3.21	Cumulata del gradiente massimo, scatti corretti	44
3.22	Cumulata della differenza di corrente, passaggio sotto al divisore	45
3.23	Cumulata del gradiente massimo, passaggio sotto al divisore	45
3.24	Cumulata della differenza di corrente, normale funzionamento	46
3.25	Cumulata del gradiente massimo, normale funzionamento	46
3.26	Cumulata della differenza di corrente, guasti	47
3.27	Cumulata del gradiente massimo, guasti	47
3.28	Rappresentazione delle massime DR con $p[0-1]$	49
3.29	Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0-1]$	49
3.30	Rappresentazione delle massime DR con $p[0,1-0,9]$	50
3.31	Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0,1-0,9]$	50
3.32	Rappresentazione delle massime DR con $p[0-1]$, normale funzio- namento e guasto	52
3.33	Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0-1]$, normale funzio- namento e guasto	53

3.34	Rappresentazione delle massime DR con $p[0,1-0,9]$, normale funzionamento e guasto	54
3.35	Rappresentazione dei massimi gradienti con $p[0,1-0,9]$, normale funzionamento e guasto	55
3.36	Assorbimento giornaliero zona Duca	57
3.37	Massimi DR in zona Duca degli abruzzesi	57
3.38	Massimi gradienti in zona Duca degli abruzzesi	58
3.39	Interpolazione assorbimento giornaliero Sassi-Superga	60
3.40	Massime differenze di corrente per 4 ore 45 minuti	60
3.41	Massimi gradienti per 4 ore 45 minuti	61
4.1	Confronto pendenza sullo shunt e sul relè, misure vecchie	64
4.2	Schema di misura delle vecchie misure in SSE	66
4.3	Banco di lavoro	67
4.4	Caratteristiche componenti alimentati	68
4.5	Resistenze di shunt testate	70
4.6	Schema di misura per il test delle resistenze	70
4.7	Collegamento trasmettitore-shunt	74
4.8	Registrazione confronto canali	74
4.9	Schema collegamento per la misura della resistenza interna del relè	75
4.10	Schema di misura in cabina	77
4.11	Schema di misura per la verifica delle tensioni su shunt e relè	78
4.12	Dati di targa del ricevitore	80
4.13	Andamento delle correnti a regime	83
4.14	Andamento delle correnti con esponenziale in ingresso alla catena di misura	83
4.15	Schema di misura per la caratterizzazione dell'errore di misura	84
4.16	Alimentazione da batteria	85

4.17	Valori di induttanza per diversi gradienti	87
4.18	Rappresentazione delle tre soluzioni	88
4.19	Prova con forma d'onda esponenziale con filtri interni HIOKY	90
4.20	Forma del segnale fornito per valutare l'errore a regime	91
4.21	Zoom sulla parte alta del gradino su cui si valuta l'errore a regime	92
4.22	FFT del segnale in figura 4.21	94
4.23	Forma del segnale fornito per valutare l'errore su dI_o/dt	97
4.24	Fitting del segnale sullo shunt	98
4.25	Segnali fittati	99
4.26	Segnale di cui si farà la FFT	101
4.27	FFT del segnale in figura 4.26	101
4.28	Schema delle prove senza catena di misura	103
4.29	Prova con segnale senza RESET, differenze tra disturbato e non disturbato	105
4.30	Pendenze del segnale fornito, senza disturbo	105
4.31	Pendenze del segnale fornito, con disturbo	106
4.32	Pendenze del segnale misurato, senza disturbo	106
4.33	Pendenze del segnale misurato, con disturbo	107
4.34	Valutazione delle pendenze misurate dal DIA con e senza disturbo	107
4.35	Segnale fornito con reset, senza disturbo	108
4.36	Valutazione delle pendenze misurate dal DIA nella prova con reset	109
4.37	Esponenziale con pendenza 330,7 A/ms con e senza disturbo	110
4.38	Esponenziale con pendenza 330,7 A/ms, fornito	111
4.39	Valutazione delle pendenze misurate dal DIA	111
4.40	Esponenziale con pendenza 115 A/ms, fornito	112
4.41	Valutazione delle pendenze misurate dal DIA	112
4.42	Misura della differenza di corrente	114

5.1	Collegamento degli strumenti	119
5.2	Il passaggio sotto al divisore	121
5.3	Passaggio verso una zona disalimentata	122
5.4	Passaggio sotto il divisore a bassa velocità	123
5.5	Passaggio sotto il divisore a velocità elevata	124
5.6	Correlazione corrente prima dell'arco-T1+T2	124
5.7	Segnale misurato vs segnale DIA-IGTv	126
5.8	Cumulata MAXDR senza reset	127
5.9	Cumulata GRADMAX senza reset	128
5.10	Cumulata MAXDR con reset	128
5.11	Cumulata GRADMAX con reset	129
5.12	Cumulata MAXDR, reset vs no reset	130
5.13	Cumulata GRADMAX, reset vs no reset	131
5.14	Cumulata MAXDR, reset + no reset	131
5.15	Cumulata GRADMAX, reset + no reset	132
5.16	Forme d'onda per la motrice 5000 e 6000	136
5.17	Forme d'onda DR_{\min} - DR_{\max} per motrice 5000 e 6000	137
5.18	Forme d'onda $GRADMAX_{\min}$ - $GRADMAX_{\max}$ per motrice 5000 e 6000	137
5.19	Cumulate delle massime DR, motrice 5000 e 6000	138
5.20	Cumulate dei massimi gradienti, motrice 5000 e 6000	139
5.21	Collegamento strumenti e motrice	141
5.22	Passaggio sotto al divisore di una vettura 2800	143
5.23	Forma d'onda misurata e ipoteticamente campionata dal relè	144
5.24	Cumulate delle massime pendenze, motrice 2800	145
5.25	Cumulate delle massime DR, motrice 2800	145
5.26	Forme d'onda dovute ad un passaggio sotto al divisore delle tre vetture	149
5.27	Forme d'onda DR_{\min} - DR_{\max} per le tre vetture	149
5.28	Forme d'onda $GRADMAX_{\min}$ - $GRADMAX_{\max}$ per le tre vetture	150

5.29	Pendenza misurata delle tre vetture	151
5.30	DR misurato delle tre vetture	152
5.31	Pendenza massima misurata dal relè	152
5.32	DR massima misurata dal relè	153
5.33	Cumulata della pendenza, per tutte le motrici	154
5.34	Cumulata totale della DR, per tutte le motrici	155
6.1	Montaggio degli strumenti in SSE	158
6.2	Elementi presenti in cabina	160
6.3	Planimetria zona 22	161
6.4	Forma d'onda di una registrazione	163
6.5	Interpolazione delle misure	164
6.6	Cumulate della massima DR per tutta la registrazione HIOKI 1 . . .	164
6.7	Cumulata della massima pendenza, per tutta la registrazione HIOKI 1	165
6.8	Cumulate della massima DR, registrazione 1 HIOKY 2	166
6.9	Cumulata della massima pendenza, registrazione 1 HIOKI 2	167
6.10	Cumulate della massima DR, registrazione 2 HIOKY 2	167
6.11	Cumulata della massima pendenza, registrazione 2 HIOKI 2	168
6.12	Interpolazione come da relè	169
6.13	Cumulate con interpolazione 1ms	170
6.14	Oscillazioni	171
6.15	Zoom sulle oscillazioni	171
6.16	Mancata alimentazione dell'interruttore	172
6.17	Misura con pendenze elevate	173
6.18	Zoom delle pendenze elevate	174
7.1	Corto circuito in SSE	178
7.2	Corto circuito a fondo linea	178
7.3	Corto con resistenza, alimentazione S.Paolo	180

7.4	Corto con resistenza, alimentazione da Martinetto	180
7.5	Intervento per $tI >$ del DIA-IGTv	181
7.6	Intervento dell'extrarapido con DIA-IGTv inserito	181
7.7	Forma onda Prova1 in piazza Campanella	183
7.8	Resistenze del trasformatore in DC	190
7.9	Determinazione del circuito equivalente del trasformatore	192
7.10	Banco di lavoro per la misura di R_{carico} e L_{carico}	197
7.11	Spettro di frequenza per R_{carico} e L_{carico}	199
7.12	Variazione di I_o lungo la linea	204
7.13	Variazione di dI_o/dt lungo la linea	205
8.1	Variazione di dI_o/dt lungo la linea	211
8.2	Settaggio di $Ams >$	213
8.3	Cumulata di DR, motrice 6000	215
8.4	Variazione di $I_o \simeq DR >$ lungo la linea durante il corto circuito	215
8.5	Simulazione del peggior corto circuito	217
8.6	Peggior passaggio sotto al divisore	219
8.7	Peggior passaggio sotto al divisore della 6000	219
8.8	Passaggio sotto al divisore della 5000	220
8.9	Cumulate con reset della motrice 5000	220
8.10	Cumulate della motrice 2800	221
8.11	Zoom sul corto circuito a fondo linea	222
8.12	Corto circuito a fondo linea	224