

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Le motrici in servizio sulla rete
tranviaria torinese: prestazioni e criticità**



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatori

Prof. Enrico Pons

Prof. Pietro Colella

Ing. Roberto Rizzoli

Candidato

Riccardo Sinatra

Marzo 2018

Indice

1	Introduzione	4
2	La rete tranviaria torinese	7
2.1	Sottostazioni elettriche	7
2.2	Quadri positivi e negativi	9
2.3	Linee di contatto e binari	13
2.4	Le motrici	15
2.4.1	Motrici della serie 2800	15
2.4.2	Motrici della serie 5000	16
2.4.3	Motrici della serie 6000	25
2.5	Sistemi di protezione	27
2.5.1	Prescrizioni normative	27
2.5.2	Situazione attuale a Torino	29
3	DPL - Il problema delle motrici 5000 con banco settato ad 1 e IR chiusi	35
3.1	Misure di impedenza	36
3.2	Studio della nuova ipotesi	43
3.3	Verifica della nuova ipotesi - Misure all'Allianz Stadium	45
3.3.1	Registrazioni di tensione e corrente e verifica dello stato dei contattori	47
3.3.2	Misure di impedenza con impedenzometro	56
3.3.3	Validazione del modello mediante prove in DC	57
3.4	Considerazioni finali	63
4	Analisi delle sovratensioni sulla rete che hanno portato allo scoppio di scaricatori	65
4.1	Misura delle sovratensioni che si sviluppano in una zona durante il funzionamento ordinario	66
4.2	Analisi statistica delle sovratensioni che si sviluppano in una zona durante il funzionamento ordinario	68
4.2.1	Statistica oraria	68
4.2.2	Statistica dei picchi	69
4.2.3	Statistica delle durate	72
4.2.4	Statistica combinata di durate e picchi	74
4.3	Considerazioni finali sulle misure di tensione eseguite in zona Sabotino	77

4.4	Influenza delle motrici della serie 5000 sulle sovratensioni in rete	78
4.5	Considerazioni finali	81
5	Analisi dei consumi delle motrici più moderne circolanti sulla rete tran-	
	viaria torinese	85
5.1	Analisi dei consumi della motrice 5051 durante la marcia e la sosta	85
5.1.1	Descrizione delle misure	85
5.1.2	Risultati	87
5.1.3	Considerazioni finali sulla prova	92
5.2	Analisi dei consumi della motrice 6031 durante la marcia e la sosta	93
5.2.1	Descrizione delle misure	93
5.2.2	Risultati	93
5.2.3	Considerazioni finali sulla prova	102
5.3	Analisi dei risultati	103
6	Conclusioni	107
	Elenco delle tabelle	110
	Elenco delle figure	111
	Bibliografia	114
	Allegati	115
	Allegato A Schemi delle motrici serie 2800	116
	Allegato B Schemi delle motrici serie 5000	119
	Allegato C Schemi delle motrici serie 6000	128
	Allegato D Schema a blocchi del DPL	130
	Allegato E Interruzioni del servizio - Dati storici GTT	133
	Allegato F Regolatori choppers delle motrici serie 5000	135

Capitolo 1

Introduzione

Questa tesi analizza le prestazioni e le criticità delle motrici in servizio sulla rete tranviaria torinese ed è svolta in collaborazione con GTT ed InfraTo, rispettivamente l'azienda che si occupa della gestione dei sistemi di trasporto pubblici torinesi e l'azienda che detiene e gestisce le infrastrutture.

Dopo una descrizione del funzionamento della rete tranviaria torinese, l'elaborato si snoda su tre tematiche principali:

- Analisi delle cause che provocano il fallimento delle prove del Dispositivo Prova Linea (DPL) quando in rete è presente una motrice della serie 5000 con il banco settato in posizione 1 e gli IR (interruttori rapidi) chiusi.
- Analisi delle sovratensioni sulla rete che hanno portato allo scoppio di scaricatori.
- Analisi dei consumi delle motrici più moderne circolanti sulla rete tranviaria torinese (cioè le motrici della serie 5000 e 6000).

La prima tematica discussa in questa tesi affronta la problematica del fallimento delle prove DPL dovuto alla presenza in rete di motrici della serie 5000 con banco ad 1 e IR chiusi.

Per garantire un'elevata affidabilità del servizio, gli interruttori di linea della rete torinese (uno per ogni zona), sono provvisti di un sistema di richiusura automatica che permette di ripristinare il servizio nel più breve tempo possibile in caso di scatti intempestivi o guasti non permanenti. Per evitare richiusure su guasti, in ogni zona è installato un DPL che prima di permettere la richiusura dell'interruttore esegue una prova sulla linea. La prova consiste nell'alimentare la rete con una tensione ausiliaria di 30 Vac e nel misurare la corrente circolante in rete tramite dei trasduttori. Se la corrente misurata è minore della soglia impostata di 5,5 A la richiusura viene abilitata, altrimenti viene negata. La prova viene ripetuta tre volte e se tutte e tre le volte fallisce il DPL comanda il blocco dell'interruttore. Per ripristinare il servizio ordinario è necessario a questo punto l'intervento degli operatori che, dopo aver individuato e riparato il guasto, sbloccano l'interruttore e ne comandano la richiusura che, essendo il guasto riparato, va a buon fine.

Per come sono progettati i DPL, essi dovrebbero comandare il blocco di un interruttore solo in caso di guasto permanente sulla linea. Siccome negli anni si sono riscontrati

parecchi casi in cui è stato comandato il blocco dell'interruttore di linea senza che in rete ci fossero guasti permanenti, si è supposto che ci fosse almeno una condizione nel funzionamento ordinario della rete tale da determinare nelle prove circuito del DPL una corrente di linea maggiore di quella impostata come soglia.

Questa condizione risulta particolarmente onerosa per i gestori della rete; si verificano infatti disservizi di decine di minuti e si è costretti ad impiegare una squadra di tecnici per ispezionare la linea, a prescindere dal fatto che il guasto sia presente o meno.

Uno studio svolto in precedenza [1], ha affrontato questo problema cercando di individuarne la causa. In quel lavoro si sono analizzati tutti i componenti che possono provocare questo funzionamento imprevisto, cioè il DPL, la rete e le motrici. Mentre le prove svolte sul DPL e sulla rete non hanno evidenziato nessun problema, quelle sulle motrici hanno dato riscontro positivo: le motrici della serie 5000 sono infatti interpretate dal DPL come guasti quando il banco è settato ad 1 (predispositore di marcia settato in posizione 1) e gli IR (interruttori rapidi installati a bordo di ogni motrice per la protezione contro sovraccarichi e cortocircuiti) sono chiusi; in tali condizioni il banco di manovra della motrice è inserito, ma essa non è predisposta alla marcia (tutti i circuiti elettrici sono alimentati ad eccezione dei circuiti di trazione). Le vetture possono trovarsi in questa situazione durante la sosta al capolinea e durante le operazioni di avviamento e spegnimento [2].

Le motrici 5000 con banco ad 1 e IR chiusi sono quindi la fonte del problema dei blocchi intempestivi. Questo vuol dire che se, quando si comanda la chiusura dell'interruttore di una certa zona e il DPL esegue le prove per accertarsi di non chiudere su un guasto, è presente sulla zona anche solo una motrice 5000 con il banco settato su 1 e gli IR chiusi tutte le prove DPL falliscono e quindi viene comandato il blocco dell'interruttore di linea.

Il mio lavoro ha proseguito lo studio andando a studiare le ragioni per cui le motrici della serie 5000 con banco settato ad 1 e IR chiusi vengono interpretate dal DPL come dei guasti. Attraverso lo studio degli schemi elettrici delle motrici 5000 e mediante apposite misure si è caratterizzato il comportamento di queste vetture nella varie posizioni in cui può essere settato il banco. Una volta noto il fenomeno, si sono proposte possibili soluzioni al fine di arginare il problema dei blocchi intempestivi.

La seconda tematica discussa nell'elaborato affronta una seconda problematica della rete tranviaria, ovvero lo scoppio degli scaricatori di sovratensione installati nelle cabine. Oltre ad essere un rischio per gli operatori e per le apparecchiature, tali guasti determinano gravi disservizi sulla rete tranviaria.

È importante sottolineare che gli scaricatori sono stati installati per la protezione della rete contro le sovratensioni di origine atmosferica. Tuttavia le sovratensioni responsabili dei danni agli scaricatori sono riconducibili al funzionamento ordinario della rete, dal momento che i guasti si sono verificati in assenza di eventi temporaleschi.

Siccome la frequenza degli scoppi si è intensificata negli ultimi anni, si è ipotizzato che tali sovratensioni siano causate dalle motrici 5000 il cui servizio è stato esteso a tutta la rete solamente nel 2016 (prima circolavano solamente su qualche linea).

Il mio lavoro è consistito nel misurare le sovratensioni che si sviluppano durante il funzionamento ordinario in una zona della rete Torinese e nell'effettuare un'analisi statistica delle sovratensioni misurate. Tale analisi ha permesso di classificare le sovratensioni

in base al picco, alla durata, al momento ed alle condizioni in cui si manifestano. Inoltre tramite misure si è cercato di dimostrare il legame tra le sovratensioni e le motrici 5000.

L'ultima tematica discussa in questa tesi ha la finalità di valutare il consumo chilometrico (vetture in marcia) ed orario (vetture in sosta) in condizioni ordinarie delle motrici più recenti del parco macchine GTT, cioè le motrici della serie 5000 e le motrici della serie 6000. L'analisi è stata eseguita mediante delle prove effettuate a bordo di due motrici, la 5051 e la 6031. Le prove sono consistite nella misura delle tensioni applicate alle vetture e delle correnti assorbite/recuperate durante la marcia e durante la sosta al capolinea. Sulla base di questi dati si è poi eseguita un'elaborazione che ha permesso di calcolare tramite integrazione numerica l'energia consumata e l'energia recuperata. Note le lunghezze delle tratte percorse e le durate delle soste al capolinea è stato possibile calcolare il consumo chilometrico ed orario delle vetture.

Infine si è effettuato il confronto tra il consumo delle due motrici e il consumo di un autobus urbano in circolazione a Torino (Irisbus Citelis). Il consumo dell'autobus è stato stimato a partire dai dati riportati nelle schede tecniche di GTT.

A seguire viene riportata brevemente la struttura dei capitoli che compongono l'elaborato.

Nel capitolo 2 viene descritta la rete tranviaria torinese, riservando particolare attenzione al funzionamento delle motrici.

Nel capitolo 3 viene analizzata la tematica relativa ad i blocchi intempestivi causati dalla presenza in rete di una motrice 5000 con banco ad 1 e IR chiusi.

Nel capitolo 4 viene analizzata la tematica relativa alle sovratensioni sulla rete che hanno portato allo scoppio di scaricatori.

Nel capitolo 5 vengono analizzati i consumi delle motrici della serie 5000 e 6000.

Infine nel capitolo 6 sono riportate le conclusioni riguardo le tre tematiche discusse nella tesi.

Capitolo 2

La rete tranviaria torinese

In questo capitolo viene descritto l'insieme di elementi che compongono la rete tranviaria della città di Torino che è una delle più estese d'Italia. Essa è suddivisa in 49 zone che vengono alimentate alla tensione nominale di 600 Vdc da diverse sottostazioni elettriche (ogni sottostazione alimenta un certo numero di zone) come si vede in Figura 2.1. Le varie zone sono percorse da tre tipologie di motrice, la serie 2800, la serie 5000 e la serie 6000; queste motrici sono molto diverse tra loro soprattutto per quanto concerne la tecnologia di bordo, per capirlo basta pensare che le 2800 derivano da motrici risalenti agli anni '30 mentre le 6000 sono state costruite nei primi anni 2000.

Tutti i tram sono alimentati in DC tramite il pantografo da linee aeree dette linee di contatto. Sul pantografo è presente uno strato di grafite che strisciando sotto la linea di contatto permette l'alimentazione della motrice. Il circuito di ritorno è costituito dalle rotaie. A Torino durante il funzionamento normale le zone sono alimentate da una sola sottostazione elettrica. Vi è la possibilità di alimentare da una seconda sottostazione elettrica soltanto quando l'alimentazione principale è fuori uso. In questa configurazione il profilo di tensione lungo la linea dipende dalla tensione di alimentazione, dalle correnti assorbite o recuperate (quando possibile) dalle motrici e dalle posizioni di quest'ultime. In Figura 2.2 si riporta un modello semplificato della rete in cui è possibile osservare come il profilo di tensione sia variabile in base allo stato della motrice; nella zona in cui è presente una motrice in recupero il profilo di tensione si innalza rispetto alla tensione nominale, mentre nella zona in cui è presente una motrice in assorbimento il profilo di tensione si abbassa.

2.1 Sottostazioni elettriche

Tutte le sottostazioni elettriche (SSE) sono alimentate in MT a 22/27 kVac e forniscono in uscita una tensione nominale di 600 Vdc (se ci sono poche vetture in circolazione la tensione può superare il suo valore nominale fino al 20 %, come previsto dalle norme CEI per la trazione). In ogni SSE sono di norma installati due trasformatori a tre avvolgimenti (uno dei quali funge da riserva fredda). A valle di questi vi è un raddrizzatore a doppio ponte di Graetz (convertitore AC/DC con le uscite in parallelo) con bobina interfascica (permette di ridurre il contributo della componente alternata che si crea all'uscita dei due

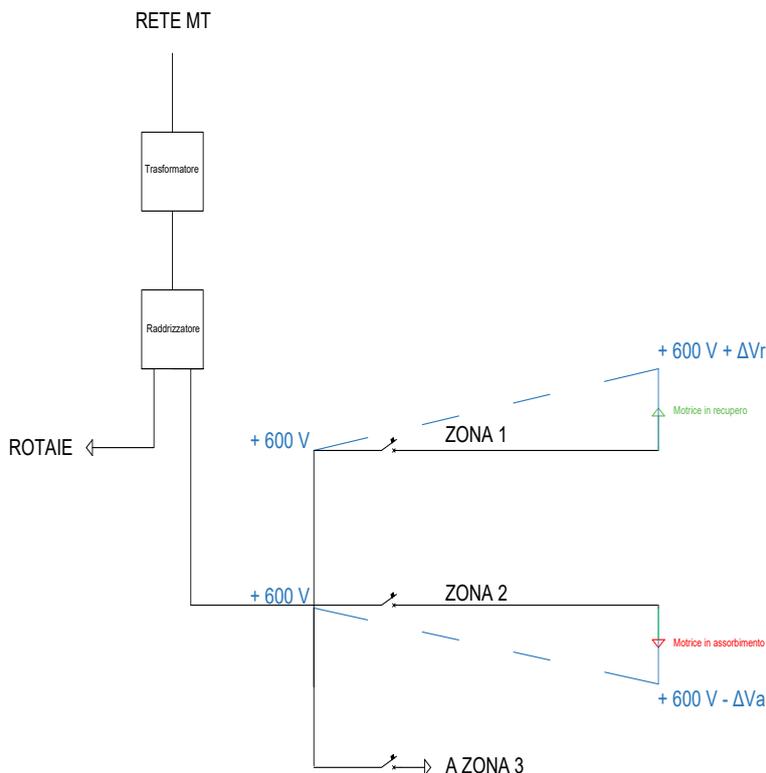


Figura 2.2: Modello semplificato della rete con profili di tensione

ponti) alla cui uscita vengono collegati i quadri positivi e i quadri negativi. In Figura 2.3 si riporta a titolo di esempio lo schema elettrico semplificato della sottostazione elettrica Trapani.

Le cabine di conversione dislocate in vari punti della città sono 21 (più la SSE Exilles che è alimentata ma non è collegata a nessuna zona elettrica), ogni cabina di conversione può alimentare da un minimo di 2 ad un massimo di 7 zone. Ogni cabina contiene in media sei o sette quadri di bassa tensione in DC, ognuno dei quali ha il compito di alimentare una determinata zona elettrica della rete.

A titolo di esempio si riportano in Tabella 2.1 e 2.2 i dati di targa di un trasformatore ([3], [4]) e di un raddrizzatore.

2.2 Quadri positivi e negativi

A valle del raddrizzatore a doppio ponte di Graetz, vi sono due sbarre, quella positiva (sbarra Omnibus in Figura 2.4) viene collegata ai quadri positivi (uno per ogni zona da alimentare) mentre quella negativa viene collegata ai quadri negativi. Come si vede in Figura 2.4, nel quadro positivo sono presenti l'interruttore di linea (interruttore extra-rapido che scatta in caso di eccessivo assorbimento di corrente, dovuto, ad esempio, al contemporaneo avviamento di più tram presenti nella stessa zona), i sezionatori di linea e

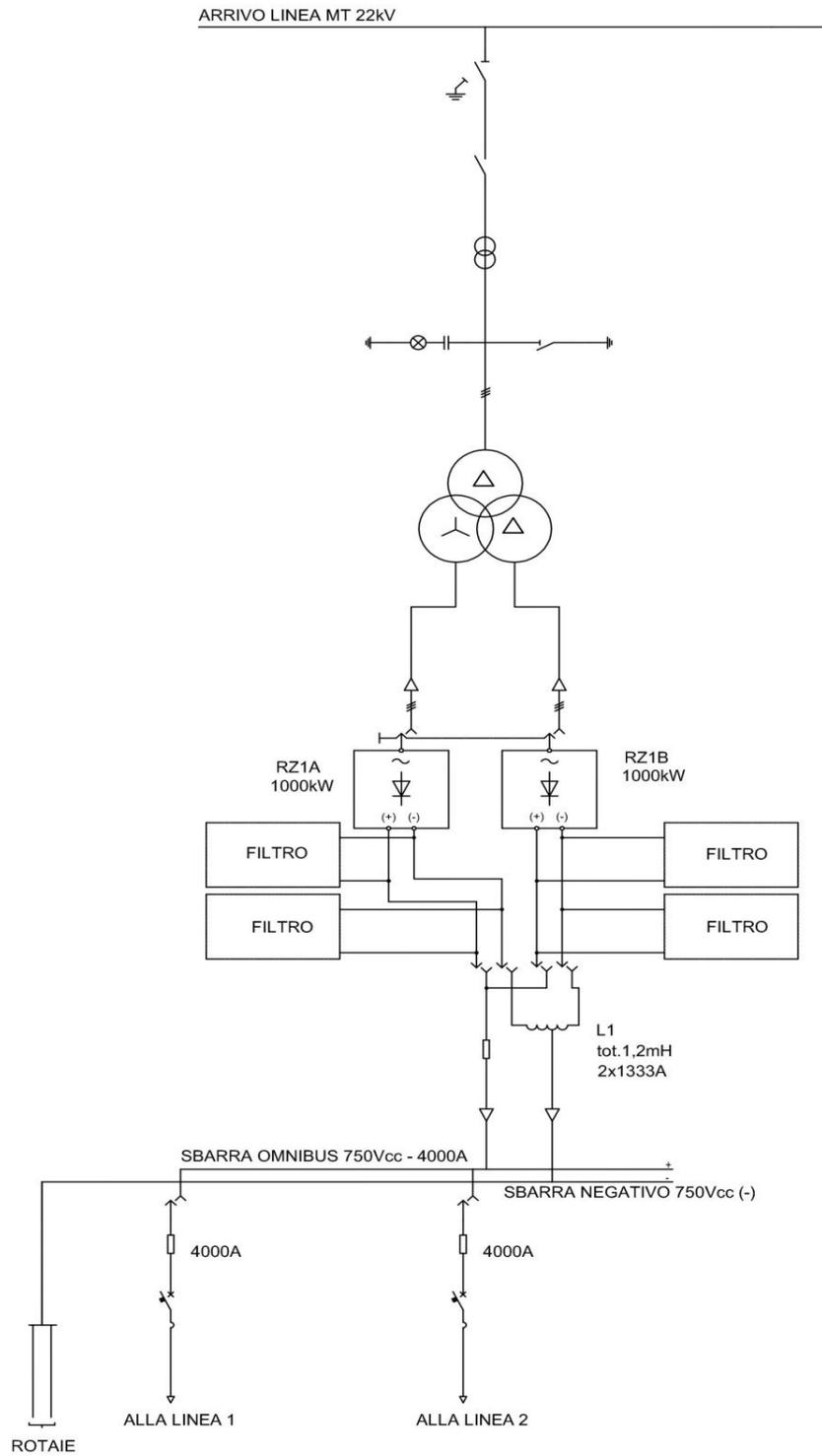


Figura 2.3: Schema generale di SSE Trapani

Tabella 2.1: Dati di targa del trasformatore

Modello	SPECIAL TRAFO
ANNO	91
N°	31471
An [kVA]	2200 (2 x 1100)
fn [Hz]	50
Vcc%	9,66/9,59 %
Gruppo	D/d 0DY11
Raffreddamento	ONAN
Massa	1000 kg
Massa olio	2500 kg
Lato MT	
Vn1 [V]	27000 \pm 2 x 5 %
In1 [A]	47
Cn1 [kV]	36
Collegamento	Δ
Lato BT	
Vn1 [V]	470 - 470
In1 [A]	1351 - 1351
Cn1 [kV]	3,6
Collegamento	Δ / Y

Tabella 2.2: Dati di targa del raddrizzatore

Modello	RADDRIZZATORE ANSALDO TIPO RD 7988 NP
P [kW]	200
Vcc [V]	600
Classe	IV (secondo norme CEI 22-1, edizioni 1968) 50 % per 2 ore 100 % per 1' non successivo alle 2 ore
Tensione lato CA [V]	470 (tensione efficace concatenata)
Tensione nominale lato CC [V]	600
Schema di collegamento	Doppio ponte di Graetz con bobina interfasica
Reazione	Dodecafascica
Connessione	I ponti sono collegati in parallelo attraver- so la reattanza di assorbimento
Diodi	Diodi Ansaldo tipo AR 749 S20
Coefficiente di sicurezza di tensione (K)	3

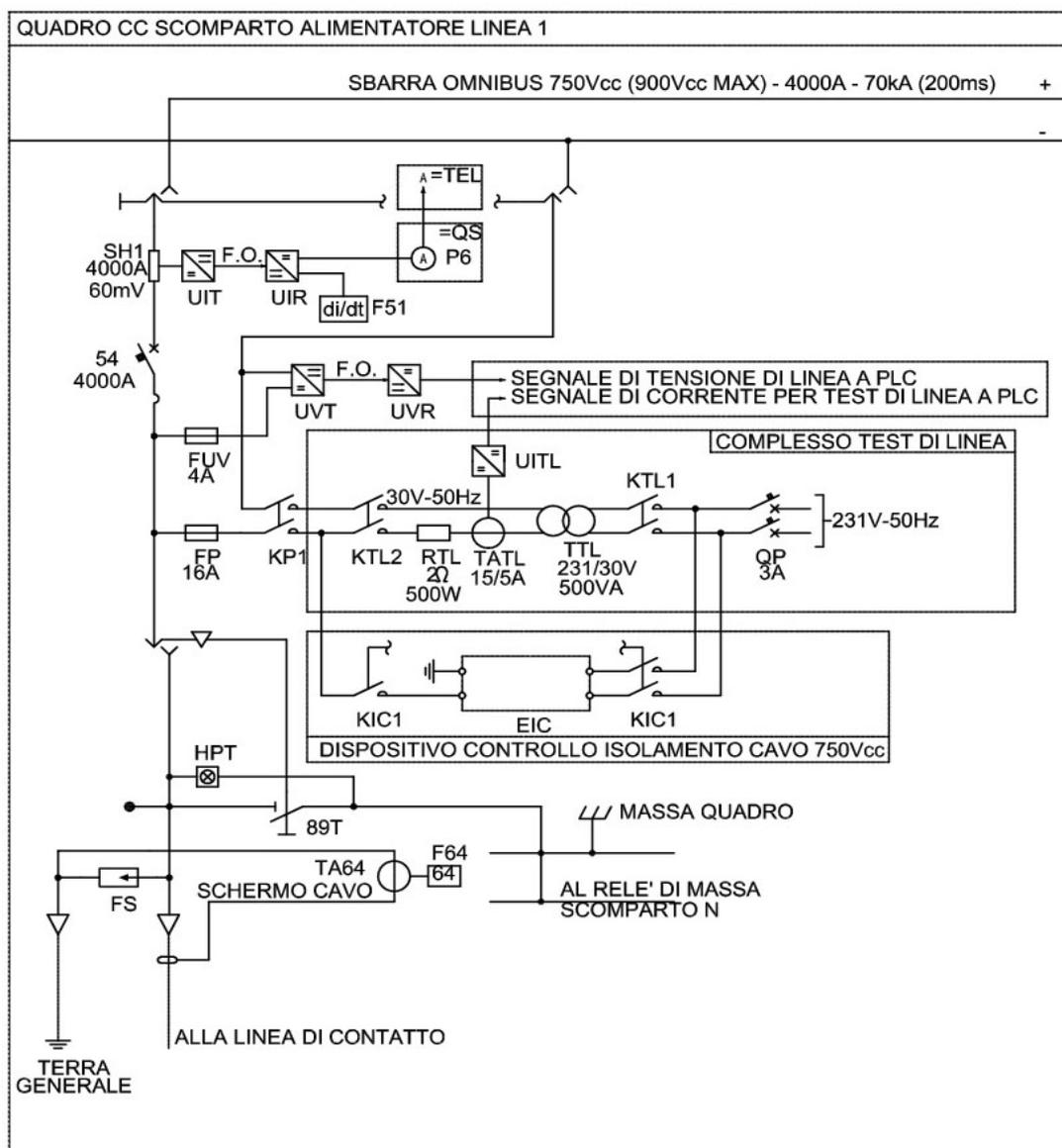


Figura 2.4: Quadro positivo SSE Trapani

di terra, lo scaricatore per sovratensioni, i dispositivi di misura, il dispositivo prova linea e il dispositivo per il controllo dell'isolamento del cavo.

Lo shunt SH1, rappresentato in Figura 2.4, serve per misurare la corrente di linea. Tramite questa misura, il relè DIA-IGTv (il cui funzionamento è descritto nel punto 2.5.2 della tesi) distingue, tramite una logica interna, le correnti di guasto da quelle di funzionamento ordinario. Al momento questo relè non è più abilitato a comandare l'interruttore di linea (che interviene automaticamente solo tramite lo sganciatore interno) in quanto dopo l'attivazione furono riscontrate delle difficoltà nella sua taratura che portavano ad

aperture intempestive dell'interruttore, con successivo blocco del servizio per la mancata richiusura dello stesso dovuta ad i fallimenti delle prove DPL. Gli interruttori extrarapidi di linea installati a Torino sono della serie IR6000 (costruiti in passato da Ansaldo ed ora da EMC Traction). Questi interruttori sono di tipo unipolare per corrente continua, in aria, a soffio magnetico e sgancio libero. Il meccanismo di chiusura è di tipo indipendente, con servomotore. L'aggancio è magnetico con bobina di ritenuta. Questi interruttori intervengono per correnti superiori alla soglia di taratura (solitamente 4000 A) entro 0,15 s. Esiste inoltre uno sganciatore primario di massima corrente incorporato nell'interruttore ed una bobina di apertura rapida (circa 5 ms) che può essere comandata da un segnale esterno (come quello del DIA-IGTV) [5]. In Tabella 2.3 si riportano a titolo di esempio i dati di targa di un interruttore.

Per quanto riguarda i quadri negativi, essi sono in numero minore di quelli positivi e come si può osservare in Figura 2.5 sono composti essenzialmente dal sezionatore di linea e da alcuni contattori comandati da appositi relè che servono a garantire che la differenza di potenziale tra terra e binari sia inferiore di una certa soglia, infatti se la soglia viene superata i binari vengono messi a terra tramite questi contattori.

A valle dei quadri positivi vi sono i cavi per l'alimentazione delle linee di contatto delle varie zone mentre a valle dei quadri negativi ci sono i cavi che li collegano ai binari. Questi cavi sono principalmente di due tipi:

- isolati con carta ed olio (usati in passato ma ancora largamente presenti);
- con isolamento estruso in gomma (in due tipologie, con e senza schermo).

I cavi per l'alimentazione delle linee di contatto vengono collegati alle linee di contatto in delle apposite cassette di alimentazione in cui sono presenti dei sezionatori.

Tabella 2.3: Dati di targa dell'interruttore

Modello	IR 6003
Corrente nominale [A]	3150
Tensione nominale [V]	750 (CC)
Potere di interruzione [kA]	120
Campo di taratura [A]	4000 ÷ 7500

2.3 Linee di contatto e binari

Le linee di contatto sono costituite da conduttori in rame, sospesi sopra ogni binario ad un'altezza media di 5,2 metri (con minimi a 4,8 m e massimi a 5,8 m), tramite una fitta rete di tiranti in *parafil* (materiale isolante con alta resistenza alla trazione che ha nel tempo sostituito la ceramica) [6].

Ogni zona elettrica è isolata rispetto alle zone adiacenti dai divisori di zona (tratto di materiale isolante lungo circa 70 cm), come visibile in Figura 2.6.

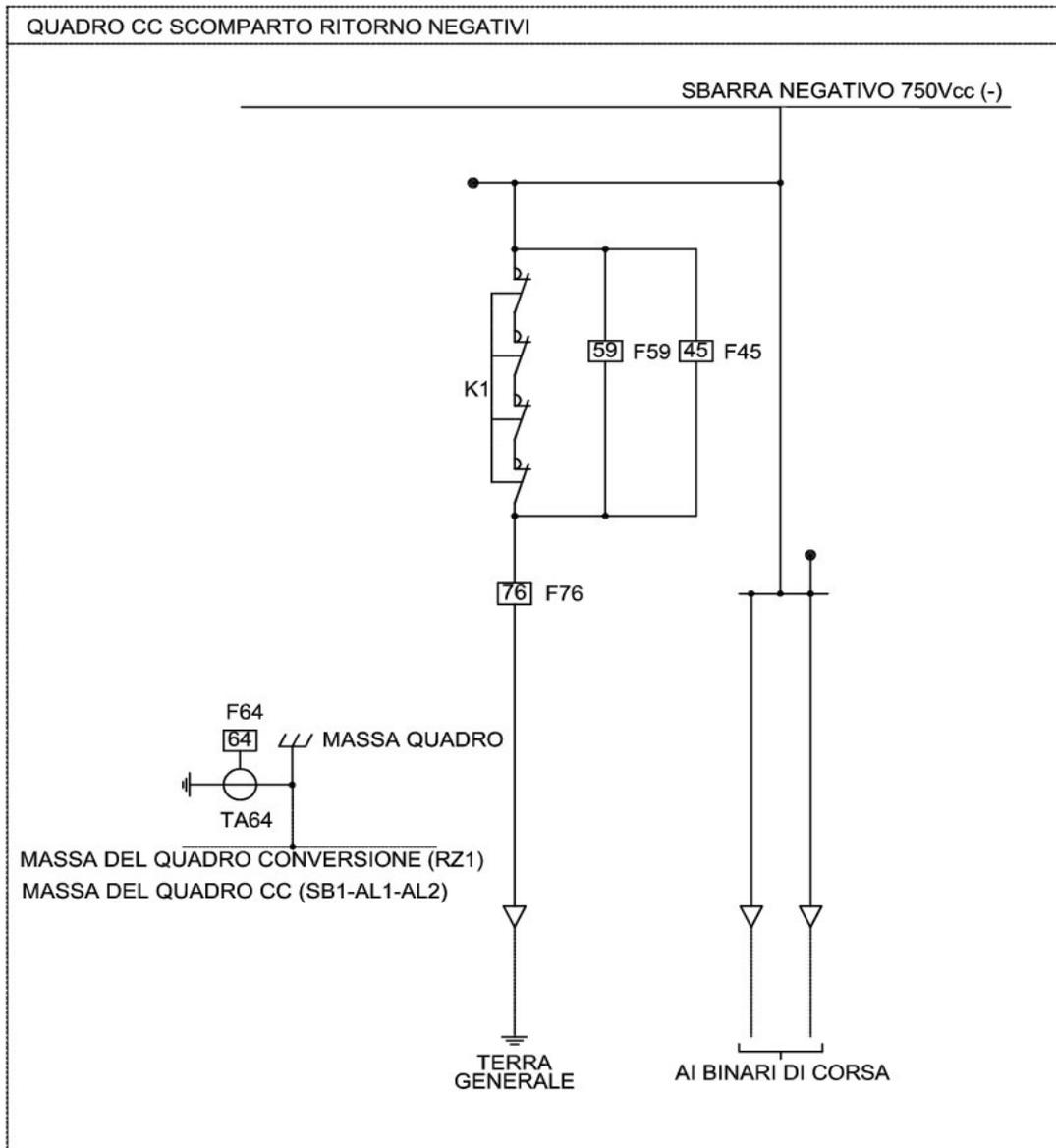


Figura 2.5: Quadro negativo SSE Trapani



Figura 2.6: Divisore di zona

In questo modo un eventuale guasto ad un cavo, ad una cassetta di alimentazione o ad un tratto di linea aerea facenti parte di una certa zona rimane circoscritto a quella zona mantenendo in regolare servizio il resto della rete, permettendo una facile individuazione e risoluzione del problema e semplificando il sistema di protezione. Il divisore di zona è segnalato da un apposito segnale. Il transito delle motrici in corrispondenza di qualsiasi divisore deve avvenire con trazione elettrica disinserita, cioè in marcia inerziale (coasting), in modo da evitare la formazione di archi elettrici che producono danni sia allo strisciante del pantografo, sia al materiale isolante costituente il divisore stesso [6].

La corrente quindi transita dal pantografo alla motrice e si richiude in cabina tramite le ruote a contatto con le rotaie collegate ai quadri negativi tramite cavi sotterranei.

2.4 Le motrici

In questo paragrafo si descrivono gli aspetti costruttivi e di funzionamento delle tre tipologie di motrici circolanti sulla rete tranviaria di Torino.

2.4.1 Motrici della serie 2800

Le motrici della serie 2800 (in Figura 2.7) sono movimentate da sei motori DC che vengono gestiti in serie o in parallelo con l'ausilio di alcuni resistori, queste motrici non presentano elettronica a bordo. Nonostante siano le macchine che dispongano di una tecnologia più vecchia e malgrado tutti i successivi acquisti di tram, rappresentano "la spina dorsale" dei mezzi a disposizione di GTT con circa 80 veicoli in servizio. Nonostante il fatto che ad una prima occhiata le motrici di questa serie possano sembrare tutte uguali, esse sono il frutto di complesse rielaborazioni di tram molto più vecchi e diversi tra loro e sono suddivise in due sottoserie dipendenti dal lotto di produzione 2800 - 2857 e 2858 - 2902 [6]. Per questa ragione non esistono schemi validi per tutte le motrici facenti parte di



Figura 2.7: Motrice della serie 2800

questa serie. Si può comunque fare riferimento agli schemi in Allegato A per avere un'idea indicativa di come funzionano le 2800.

A valle del pantografo è posizionato l'interruttore rapido IR (interruttore che protegge la motrice contro il sovraccarico ed il cortocircuito), a valle di questo e a monte dei motori DC vi è una rete di resistenze che permettono l'avviamento del tram senza che questo assorba correnti transitorie troppo elevate. Il tram è provvisto di sei assi, ogni asse è dotato di un motore per la trazione, l'inversione di marcia è gestita tramite contattori che invertono la polarità dell'alimentazione ai capi del motore.

Queste motrici dispongono di tre sistemi di frenatura cioè il freno pneumatico, il freno elettrico e i pattini elettromagnetici. Durante la frenata di servizio intervengono solamente il freno pneumatico e quello elettrico mentre durante la frenata di emergenza oltre a questi intervengono anche i pattini elettromagnetici.

La frenatura elettrica di servizio è attivabile in due posizioni (del rubinetto del freno) con la prima posizione viene inserita una resistenza di carico ad ogni coppia di motori (chiudono i contattori CF1 e CM, con riferimento allo schema in Allegato A), con la seconda si esclude una parte di resistenza ad ogni coppia di motori (si inserisce il contattore CF2), in modo da aumentare la potenza generata e di conseguenza la forza frenante. La frenatura elettrica di emergenza, invece, avviene spostando la maniglia dell'inseritore sull'apposita tacca oltre lo zero, e consiste nel collegare in cortocircuito in coppia tra loro i motori 1, 2, 3, 4 (chiudono i contatti FE1 e FE2) in modo da provocare la massima potenza di frenatura.

Le motrici della serie 2800 non prevedono la frenata con recupero di energia in rete.

2.4.2 Motrici della serie 5000

Le motrici della serie 5000 (in Figura 2.8), anche chiamate TPR (tram a pianale ribassato) furono acquistate nel 1990 per la nuova linea tranviaria che collegava lo Stadio delle Alpi alla città, ma con gli anni il loro utilizzo è stato esteso a numerose altre linee, fino al



Figura 2.8: Motrice della serie 5000

1° Gennaio 2016, data in cui la serie 5000 è stata abilitata al servizio su tutta la rete di Torino eccezion fatta per i tratti di rete senza anello di inversione e sulla curva che svolta da corso re Umberto a destra in corso Sommeiller. Il grandissimo vantaggio che danno questi tram rispetto alla serie più vecchia è che essendo a pianale ribassato sono privi di gradini ed in questo modo permettono l'accesso ai disabili, alle carrozzine ed uno spostamento più rapido dei passeggeri tra la fermata ed il mezzo. Le vetture acquistate nel 1990 furono 54, ma ad oggi in servizio ne sono rimasta solamente 53 in quanto la 5021 è stata demolita a seguito di un incidente [6].

I circuiti elettrici delle motrici di questa serie si possono distinguere in:

- Circuiti di trazione (azionamenti cassa A e cassa B)

I circuiti di trazione sono collegati alla tensione di linea tramite gli interruttori rapidi (1Q3 e 1Q5).

- Ausiliari AT (600 Vdc)

Gli ausiliari AT sono derivati a valle del pantografo prima degli IR. Essi sono:

- motocompressore aria impianto pneumatico;
- convertitore statico carica batterie 600/24 Vdc.;
- riscaldamento cabina.

- Carichi BT (24 Vdc)

Sono normalmente alimentati dal convertitore statico carica batterie 600/24 Vdc e si distinguono in carichi BT con alimentazione non privilegiata e in carichi BT con alimentazione privilegiata. Quelli con alimentazione non privilegiata raggruppano quelle utenze che, in caso di disinserzione o avaria del convertitore statico carica batterie, vengono automaticamente escluse, esse sono:

- scaldacrystalli frontale e laterale;

- elettroventilatori aerotermo cabina di guida;
- illuminazione interna fluorescente di servizio.

I carichi con alimentazione privilegiata sono le rimanenti utenze che, in caso di disinserzione o avaria del convertitore statico, vengono direttamente alimentate dalle batterie.

I circuiti di trazione (in Allegato B) consistono in due circuiti identici ed indipendenti tra di loro (azionamento cassa A ed azionamento cassa B) ognuno protetto da un apposito IR (1Q3 e 1Q5). Ogni azionamento è formato da più componenti, che possono essere suddivisi in base alla loro funzione:

- Linea di alimentazione e organi di protezione

Questo primo complesso è costituito dagli interruttori di protezione 1Q3 e 1Q5, i contattori di filtro 1K1 e 1K2, le resistenze di precarica dei condensatori di filtro 1R2 e 1R3, i contattori di ramo motorico 1K3 e 1K6 e quelli di marcia 1K5 e 1K8 ed infine lo scaricatore 1F2.

Gli interruttori rapidi 1Q3 e 1Q5 di protezione dei circuiti di marcia e frenatura sono bidirezionali in quanto possono essere attraversati da corrente fluente nei due sensi. Ogni interruttore è dotato della protezione di massima corrente che ne provoca l'apertura ultrarapida quando viene superata la corrente di soglia (regolata a 800 A). Gli interruttori di protezione hanno il compito di:

- sezionare l'azionamento di potenza in caso di guasto (coordinati in questo compito da altri organi quali i contattori di filtro, di ramo motorico e di marcia);
- intervenire come organo di protezione in caso di anomalie al circuito AT (cortocircuiti o anomalie nel convertitore di potenza a chopper).

I contattori di filtro 1K1 e 1K2 hanno il compito di cortocircuitare le resistenze di precarica quando la tensione ai capi del condensatore di filtro di linea ha raggiunto il valore minimo (400 V).

Le resistenze di precarica dei condensatori di filtro 1R2 e 1R3 hanno il compito di caricare i condensatori di filtro di linea con una opportuna costante di tempo.

I contattori di marcia 1K5 e 1K8 sono chiusi in marcia e aperti nei casi in cui il veicolo è fermo, in "coasting" o in frenatura; quelli di ramo motorico, 1K3 e 1K6, sono sempre chiusi a veicolo abilitato, aprono in caso di sovracorrenti o sovratensioni.

Lo scaricatore 1F2 derivato a valle del pantografo ha funzione di protezione dei circuiti AT contro le sovratensioni di origine atmosferica riducendo la cresta del fronte d'onda e attenuandone la rapidità.

- Filtro di linea e induttanza di spianamento

Il filtro di linea (1L2 e -C1 con riferimento all'azionamento cassa A), inserito a monte del chopper, ha il compito di attenuare le armoniche trasmesse in rete dal chopper, consentire gli assorbimenti impulsivi di corrente nonostante la presenza

dell'induttanza di linea e ridurre le sovratensioni in ingresso al sistema di potenza. La resistenza posta in parallelo permanente ai condensatori di filtro (-R3 con riferimento all'azionamento cassa A) permette la loro scarica in un tempo sufficientemente breve una volta che il circuito di potenza è isolato dalla linea di alimentazione. L'induttanza di spianamento (1L3 con riferimento all'azionamento cassa A), ha invece il compito di mantenere il ripple della corrente motorica entro una certa soglia.

- Chopper e motore di trazione

- Chopper

Il convertitore di potenza è di tipo "full chopper" ed è l'elemento principale dell'azionamento in quanto controlla e regola la corrente in avviamento e frenatura del motore di trazione in funzione degli ordini impartiti dal banco di manovra.

Il convertitore a chopper consente la frenatura con recupero di energia in linea, oltre che la frenatura reostatica con passaggio dall'una all'altra in modo automatico a seconda delle condizioni della tensione di linea e cioè delle sue capacità di assorbimento.

Il passaggio dalla configurazione "marcia avanti" a quella di "marcia indietro" e da "trazione" a "frenatura", così come lo shuntaggio del campo motore, sono effettuati mediante tiristori che costituiscono, unitamente con i componenti sia del chopper principale che del sistema di controllo delle resistenze di frenatura e tampone nonché delle opportune protezioni il blocco compatto della parte elettronica.

I semiconduttori di potenza sono immersi in Freon liquido entro un contenitore a tenuta stagna, raffreddato a sua volta per ventilazione naturale, soluzione che non necessita di alcuna manutenzione.

- Motore di trazione

Il motore di trazione è un motore serie a quattro poli, non compensato, autoventilato, di costruzione particolarmente adatta ad un servizio con correnti pulsanti (carcassa e poli ausiliari lamellati).

- Resistenza tampone, di frenatura e di shuntaggio permanente del campo motore

Nella spiegazione si farà riferimento allo schema relativo all'azionamento cassa A.

La resistenza tampone 1R5, quella di frenatura 1R7 e quella di shuntaggio 1R6, sono del tipo a ventilazione naturale e sono sistemate sull'imperiale del veicolo all'interno di un unico telaio in modo da essere opportunamente protette. La logica di inserzione delle resistenze tampone e di frenatura è la seguente:

- in frenatura a recupero

viene utilizzata la sola resistenza tampone che compensa la differenze di tensione tra motore e linea;

– in frenatura reostatica

quando la tensione di linea è prossima alla soglia, viene inserita in serie alla resistenza tampone la resistenza di frenatura. Tramite il GTO -V9 si shunta progressivamente la 1R7, arrivati al massimo grado di parzializzazione si esclude la resistenza tampone tramite il contattore 1K4 e si ripete il ciclo di shuntaggio sulla 1R7.

La resistenza di shuntaggio permanente del campo motore ha la funzione di cortocircuitare tutte le componenti armoniche che altrimenti interesserebbero il campo stesso.

- Monitoraggio

in cui si comprendono i numerosi trasduttori di tensione e corrente.

Uno schema semplificato dell'azionamento cassa A è riportato in Figura 2.9.

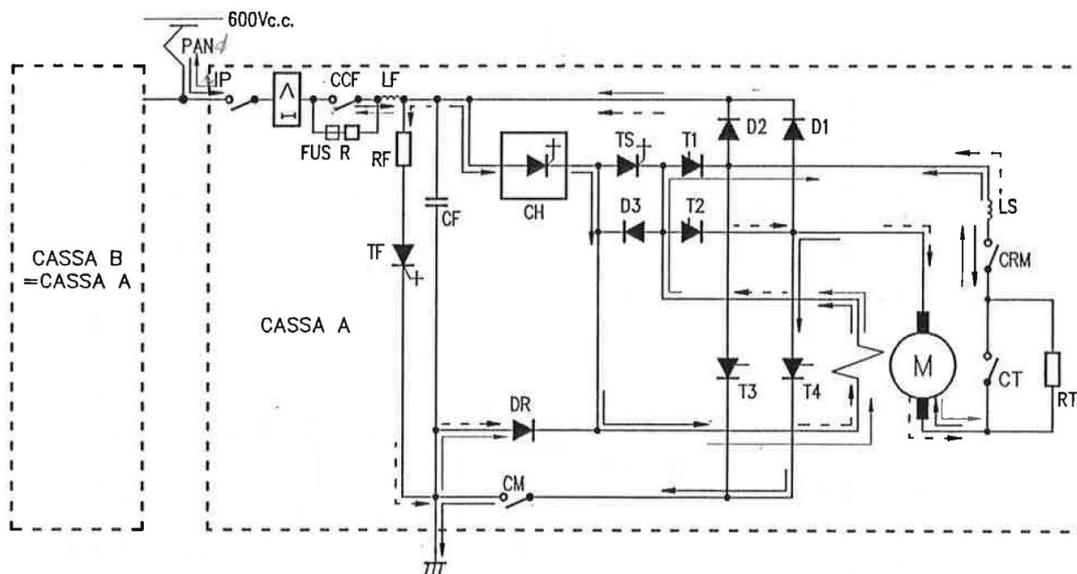


Figura 2.9: Schema di potenza motrice serie 5000 - Particolare azionamento cassa A

Frenata

La vettura dispone di diversi sistemi di frenatura:

- freno elettrodinamico;
- freno pneumatico;
- pattini elettromagnetici.

Tali sistemi vengono coordinati in modo diverso a seconda del tipo di frenatura richiesta. I diversi tipi di frenatura che possono essere richiesti sono:

- di servizio (azione combinata del freno elettrodinamico e del freno pneumatico);
- di emergenza (massima frenatura pneumatica ed elettrodinamica, azionamento dei pattini elettromagnetici);
- di soccorso (da azionare solo in caso di estrema gravità, consiste nella massima frenatura pneumatica non graduabile su tutti i carrelli, dovuta allo scarico della condotta generale freno).

Il veicolo è dotato inoltre di un freno di stazionamento a molla.

Nel seguito si descrive con maggiore dettaglio la frenatura elettrodinamica (avviene in modo identico su entrambe gli azionamenti).

In queste motrici la frenatura elettrodinamica è distinta in due fasi, la prima è quella relativa alla frenata di tipo rigenerativo e la seconda è quella relativa alla frenata reostatica. Durante la frenata di tipo rigenerativo si invertono i poli dell'armatura del motore che quindi invece di assorbire potenza la genera in rete provocando una diminuzione dell'energia cinetica del tram e di conseguenza il suo rallentamento. Questo tipo di frenata avviene però a condizione che la tensione sia minore di una certa soglia, questo perché l'immissione di potenza da parte del tram altera il profilo di tensione sulla rete facendola alzare in prossimità del pantografo della vettura in frenata. La resistenza tampone si occupa di sopperire alla differenza di potenziale tra la rete ed il motore. L'energia reimpressa in rete durante questa fase può essere assorbita solamente da altre motrici che si trovano in zone alimentate dalla stessa SSE che alimenta la zona dove è presente la motrice in frenata, è infatti impossibile reimmettere potenza nella rete di distribuzione MT in quanto i raddrizzatori sono unidirezionali in corrente. Quindi se tra tutte le zone alimentate da una certa SSE solo una è percorsa da un unico tram, quel tram può effettuare solamente la frenata reostatica. La frenata reostatica avviene dissipando l'energia cinetica del tram su dei grossi resistori sistemati sull'imperiale del veicolo. In Figura 2.10 si riportano le possibili configurazioni circuitali in cui si può trovare la motrice in funzione dei comandi impartiti dal tranviere. Come si vede in figura, durante la frenata rigenerativa è inserita solamente la resistenza tampone RT (viene inserita con l'apertura del contattore CT che durante la marcia è chiuso), quando la tensione supera la soglia la frenata diviene reostatica e tramite il tiristore TF viene inserita progressivamente anche la resistenza di frenatura RF. Quando la resistenza di frenatura è completamente inserita viene disinserita la resistenza tampone e si ripete lo shuntaggio sulla RF.

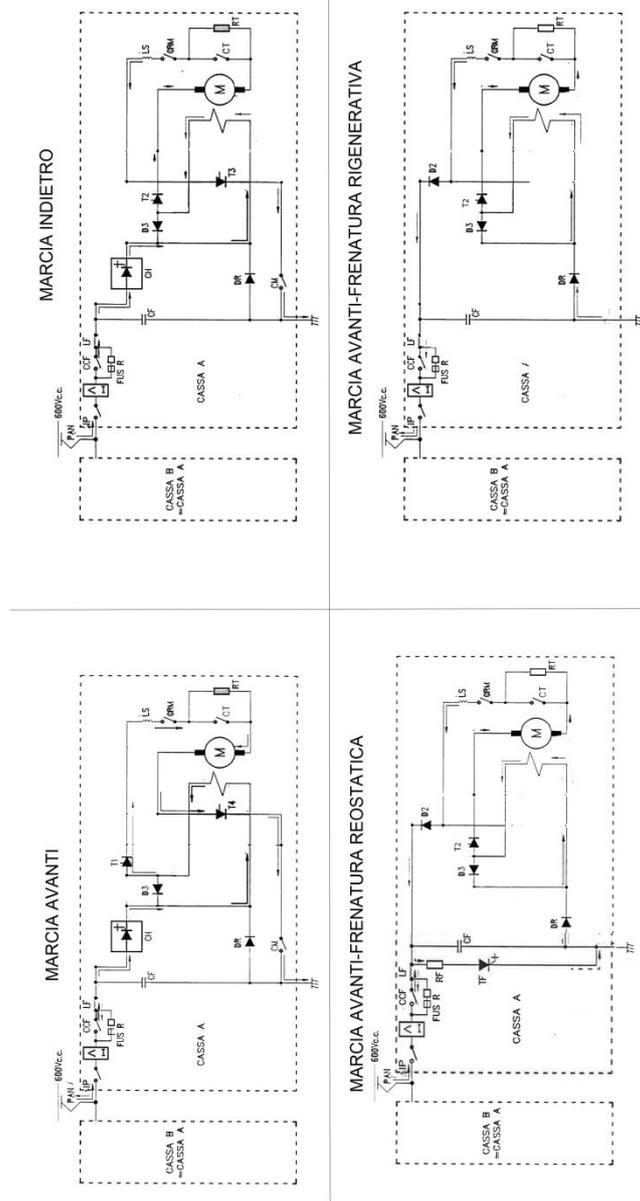


Figura 2.10: Possibili configurazioni in marcia e in frenatura per motrici serie 5000

Banco di comando

In Figura 2.11 si riporta il banco di comando della motrice.

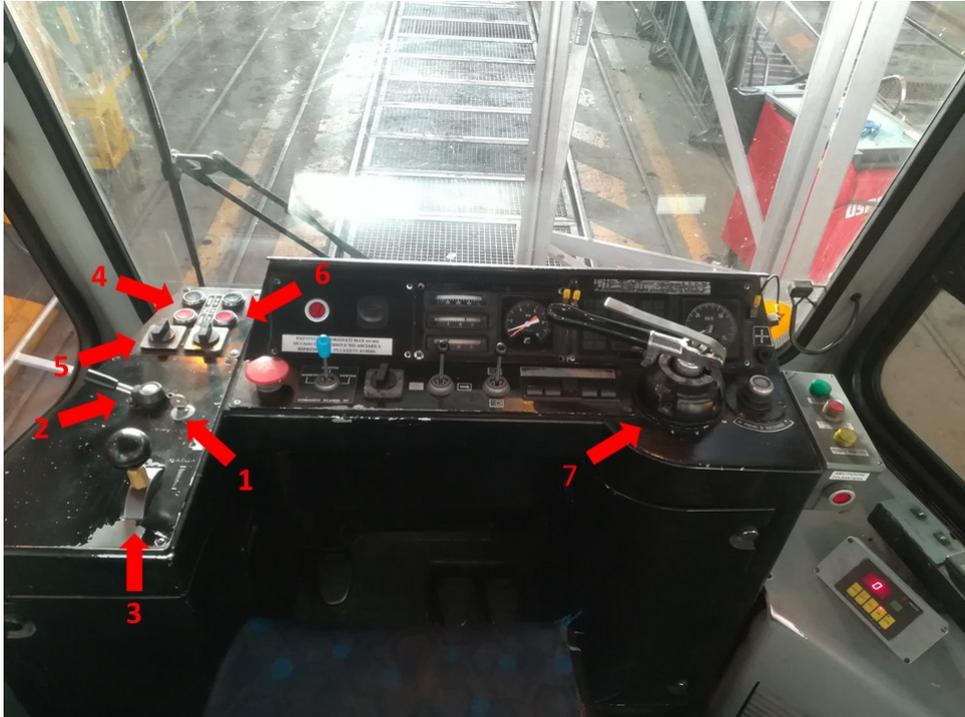


Figura 2.11: Banco di comando di una motrice della serie 5000

I principali strumenti osservabili sono [2]:

1. Chiave di blocco abilitazione banco di manovra

Blocco meccanico per predispositore, abilitazione banco e manipolatore di marcia.

2. Predispositore di marcia ed abilitazione banco di manovra

Comanda l'abilitazione del banco di manovra ed il senso di marcia. Ha quattro posizioni:

- "0" banco di manovra disinserito;
- "1" banco di manovra inserito;
- "AV" banco di manovra inserito e predisposizione marcia avanti;
- "IN" banco di manovra inserito e predisposizione marcia indietro.

Con il predispositore in posizione "0" possono essere alimentati i seguenti circuiti elettrici:

- illuminazione di emergenza passeggeri;
- luci sosta di emergenza;

- comando apertura-chiusura porta di servizio;
- alimentazione circuiti S.I.S. ;
- alimentazione convertitore statico carica batteria.

Con il predispositore in posizione "1" tutti i circuiti sono alimentati (esclusi quelli di trazione).

Il passaggio dalla posizione "AV" a quella "IN" e viceversa, deve essere eseguito a veicolo fermo.

3. Manipolatore di marcia

Si sposta per un angolo massimo di 45° quando il predispositore è in posizione "AV" o "IN". Muovendo il manipolatore si provoca la movimentazione del veicolo. Trattandosi di un azionamento regolato in coppia motrice, l'accelerazione sarà maggiore quanto maggiore è l'inclinazione della leva. Dopo aver mosso il veicolo se si riporta il manipolatore in posizione "0", questo si muoverà in marcia inerziale (coasting). Il segnale di marcia impostato mediante il manipolatore, è automaticamente escluso non appena si ruota il rubinetto freno in posizione di frenatura, cioè il segnale di frenatura inibisce quello di marcia (come già accennato in precedenza).

4. Pulsante alzamento/abbassamento pantografo

Premendo questo pulsante si provoca l'alzamento/abbassamento del pantografo, segnalato dal voltmetro di linea che indicherà 600 V oppure 0 V.

5. Commutatore inserzione freno di stazionamento

Ha due posizioni:

- "0" inserito
- "1" disinserito

Quando è inserito si accende la relativa segnalazione.

6. Pulsante apertura/chiusura IR

Comanda la chiusura/apertura degli interruttori rapidi di linea dei gruppi di trazione "A" e "B". I circuiti di comando degli interruttori rapidi sono alimentati a 24 Vdc direttamente dalle batterie. Gli interruttori, oltre a collegare i gruppi di trazione alla tensione di rete, ne proteggono i circuiti aprendosi automaticamente in caso di sovraccarico o anomalia. **La chiusura degli interruttori rapidi può essere effettuata solo con il predispositore di marcia in posizione "1".**

7. Rubinetto del freno

È del tipo autoregolatore, vale a dire che lo sforzo frenante è direttamente proporzionale all'angolo di spostamento del manettino nel settore "FRENATURA".

2.4.3 Motrici della serie 6000

Le motrici della serie 6000 (in Figura 2.12) sono denominate *Cityway* e sono le motrici più recenti a disposizione di GTT, sono movimentate da sei motori trifase alimentati da inverter. Le 55 vetture in servizio, a parte i primi sei esemplari (6000 - 6005), sono di tipo bidirezionale per permetterne l'utilizzo sull'intera rete (in particolare sulla linea 4). La modernità di queste motrici è però causa di problemi che sugli altri veicoli non si riscontrano, infatti la complessa elettronica presente a bordo delle motrici rende queste vetture molto delicate, infatti il loto MTBF (mean time between failures) reale registrato dalle officine GTT è più breve di quello delle altre motrici tranviarie. I sistemi di sicurezza di queste macchine essendo molto sensibili impongono soventi passaggi obbligatori in officina: basta che una pinza di un freno non chiuda perfettamente o che uno degli 8 condizionatori d'aria (presenti su ciascuna vettura) non funzioni a dovere, che il sistema ne segnala il guasto e blocca la vettura finché il problema non è risolto. Se da un lato ciò garantisce l'immissione in servizio solo di vetture in condizioni ottimali, dall'altro lato, molte segnalazioni sono superflue su un veicolo che circola solo in città. I sistemi di sicurezza della vettura sono infatti molto vicini a quelli di una motrice di tipo ferroviario, per questo la diagnostica di bordo è molto sensibile e per minime inefficienze sono necessari interventi in officina. Queste motrici hanno un pianale totalmente ribassato ed hanno tutti gli apparati di bordo spostati dalla parte inferiore del tram alla zona dell'imperiale in modo da rendere queste vetture più comode e facilmente accessibili da tutti, inoltre, con i loro 34 m, questi tram sono i più lunghi circolanti sulla rete torinese [6].



Figura 2.12: Motrice della serie 6000

Per capire il funzionamento di questa serie di macchine si può fare riferimento allo schema funzionale della distribuzione di alta tensione del convertitore di trazione e ausiliari in Allegato C.

A valle del pantografo è posizionato l'IR che non è un interruttore extrarapido tradizionale (come quelli visti in precedenza sulle altre motrici), ma è un contattore (KIL)

coordinato con fusibile AT che permette la protezione contro sovratensioni e cortocircuiti dell'intero convertitore (Figura 2.13).

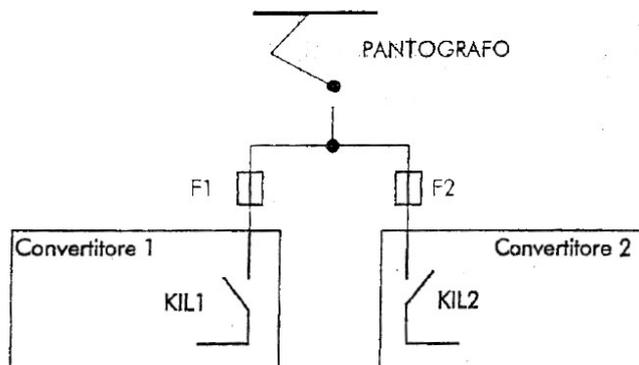


Figura 2.13: Schema fusibile più contattore in uso sulle motrici della serie 6000

L'apertura e la chiusura vengono gestite dal regolatore di trazione in parallelo con il comando del relè differenziale RDG che è collegato sull'ingresso dell'alta tensione e in caso di perdita d'isolamento degli apparati al suo interno e/o dei motori provvede a comandare l'apertura dell'IR. A valle del contattore sono collegati i due poli del sezionatore (SM) che, cortocircuitano a massa il cavo AT proveniente dal fusibile AT ed il morsetto +AT del filtro d'ingresso, mettendo a massa i filtri AT del convertitore (condensatore d'ingresso) ed attenuando così la protezione contro eventuali contatti diretti con parti in alta tensione su tutti i circuiti all'interno del convertitore ed a valle di esso (motori). Il filtro d'ingresso, costituito dall'induttanza LF e dal condensatore CF, serve per limitare le correnti di picco a fronte di transitori di tensione provenienti dalla linea e per limitare la corrente assorbita dalla linea durante la chiusura dell'IR (carica condensatore d'ingresso). Il valore dell'induttanza garantisce che la corrente di picco non superi durante la chiusura dell'IR i 2000 A. Ai fini della sicurezza in parallelo ai condensatori sono previsti due rami di resistenze di scarica per ridurre la tensione residua sui condensatori sotto i 50 Vdc, in un tempo di scarica inferiore a quello necessario ad aprire i pannelli, anche senza azionare la manovra di messa a terra. A valle del filtro sono poi collegati i moduli di potenza degli inverter (che vanno poi ad alimentare i motori), del chopper di frenatura e del convertitore ausiliario. Si può inoltre osservare nel circuito la presenza di numerosi trasduttori in grado di sorvegliare il corretto funzionamento di tutto l'impianto [7].

Per ridurre la probabilità di aperture per sovraccarico dell'interruttore di linea, la massima corrente assorbita dalle motrici serie 6000 è stata limitata a 1300 A.

Queste motrici dispongono di tre sistemi di frenatura cioè il freno meccanico, il freno elettrico e i pattini elettromagnetici. Durante la frenata di servizio intervengono solamente il freno meccanico e quello elettrico mentre durante la frenata di emergenza oltre a questi intervengono anche i pattini elettromagnetici. La frenatura elettrica è di tipo elettrodinamico e consente di recuperare energia in rete. Su queste motrici il recupero viene però gestito diversamente rispetto a quanto capita sulle 5000, infatti il flusso di corrente in uscita è regolato tramite inverter; quando la tensione ai capi della motrice

arriva ad un livello tale che non è più sufficiente la regolazione dell'inverter (800 V) il chopper di frenatura inserisce un reostato (di frenatura) che dissipa l'energia in eccesso. Il chopper di frenatura consente quindi di controllare la corrente immessa in rete quando viene superata la soglia di tensione impostata. La frenata reostatica è analoga a quella osservata sulle motrici 5000 e consiste nel dissipare l'energia cinetica della macchina su un apposito reostato. Analogamente a quanto capita per le 5000 se in una certa zona non sono presenti motrici in grado di assorbire l'energia immessa in rete da una motrice 6000 in frenata essa può effettuare solamente la frenata reostatica.

2.5 Sistemi di protezione

In questo paragrafo si riportano le prescrizioni normative che riguardano questo argomento e in seguito si descrivono i sistemi protezione presenti sulla rete tranviaria torinese.

2.5.1 Prescrizioni normative

La norma che riguarda i sistemi di protezione delle linee tranviarie è la CEI EN 50123-7-7:2003-11 [8]. Secondo la norma lo schema di protezione deve incentrarsi sulle seguenti prescrizioni:

- Funzionare per tutte le soluzioni previste di alimentazione.

Nel caso della rete torinese l'unica soluzione possibile è quella di alimentazione da una sola SSE per volta, in quanto al momento non è previsto che una linea possa essere alimentata da due SSE contemporaneamente.

- Discriminare tra correnti di trazione e correnti di guasto.

Soddisfare questo punto non è banale, basti pensare che le correnti di trazione (soprattutto quando più tram partono contemporaneamente) raggiungono transitoriamente valori più alti di quelli che si avrebbero durante un guasto.

- Permettere la ripresa del corretto funzionamento nel minimo tempo.
- Permettere la discriminazione tra protezioni primarie e di rincalzo.

Sempre secondo la norma, i guasti elettrici che richiedono mezzi di rilevazione sono:

- Guasto tra polo positivo e polo negativo, bassa resistenza, cortocircuito (stabile), in pratica quei guasti che si verificano lungo la linea di trazione;
- Guasto tra polo positivo e terra in sottostazione;
- Guasto tra polo positivo e polo negativo verso terra (per i sistemi con ambedue i poli isolati da terra)

Come accennato in precedenza, è possibile che, in funzione delle caratteristiche delle vetture e delle impedenze di linea, la corrente di carico di una sezione di linea sia maggiore di quella di guasto a distanza. Si capisce quindi che il livello di protezione istantanea per sovracorrente non può distinguere tra correnti di servizio e correnti di guasto, per questo motivo la norma prescrive che si adottino alcune o tutte le seguenti funzioni aggiuntive di protezione:

- protezione che esamini la forma d'onda della corrente (di/dt , ΔI);
- protezione a tempo inverso;
- protezione a tempo inverso in rapporto alla sovracorrente con immagine termica;
- protezione di minima tensione;
- protezione ad impedenza per caduta di tensione.

Un'ulteriore prescrizione prevista dalla norma è quella del **dispositivo di prova della linea** (DPL), un sistema usato sugli interruttori di linea, prima della chiusura, per evitare che essi chiudano in condizioni di guasto.

La richiusura automatica è necessaria in quanto nei sistemi di trazione gli interventi di apertura degli interruttori di linea sono spesso provocati da sovraccarichi generati dall'accelerazione contemporanea di più motrici, in questi casi si ha l'esigenza di chiudere in automatico l'interruttore in modo da aumentare l'affidabilità del sistema. Bisogna però fare attenzione a non richiudere l'interruttore quando esso si apre a causa di un guasto ed a questo scopo, come detto, la norma prescrive il dispositivo di prova linea.

Il principio di funzionamento del dispositivo prova linea è semplice, l'autorichiusura è affidata ad un meccanismo a tempo che da luogo a diversi tentativi di chiusura distanziati tra loro da un tempo fissato. Raggiunto il numero massimo consentito di fallimenti la richiusura viene bloccata. Il blocco può essere rimosso in seguito da un operatore elettricamente o manualmente, ma sempre in seguito ad un comando esterno.

In Figura 2.14 si riporta il circuito base di un DPL proposto dalla norma.

Si inserisce un resistore per mezzo di un contattore opportunamente dimensionato tra le sbarre del quadro e la linea di contatto in modo che la resistenza di carico agisca come una resistenza di piede nei confronti del resistore inserito e, misurando la tensione tra alimentatore e circuito di ritorno, può permettere o bloccare un segnale di chiusura. Quando la tensione misurata è al di sotto di un dato livello prescritto, c'è un sovraccarico sulla linea e la chiusura è impedita, quando invece la tensione è maggiore del livello prescritto la chiusura è consentita (in alternativa si può utilizzare un'alimentazione ausiliaria come tensione di prova e misurare la corrente, a Torino viene usato un dispositivo di questo tipo e verrà descritto con maggiore dettaglio nel seguito). Questo schema è soggetto all'effetto della caduta di tensione negativa che può verificarsi nel circuito di ritorno a causa delle correnti che circolano su utenze a 600 V che restano collegate lungo la linea (come ad esempio le resistenze di riscaldamento degli scambi). Questo effetto può essere causa di un'interpretazione fuorviante delle misure del dispositivo. Il problema può essere risolto inserendo un resistore più piccolo; tuttavia più è piccolo il resistore utilizzato e più sono

alte le correnti che circolano nel circuito e ciò causa un aumento della pericolosità della prova per le persone che dovessero trovarsi in contatto anche solo con i binari o la terra.

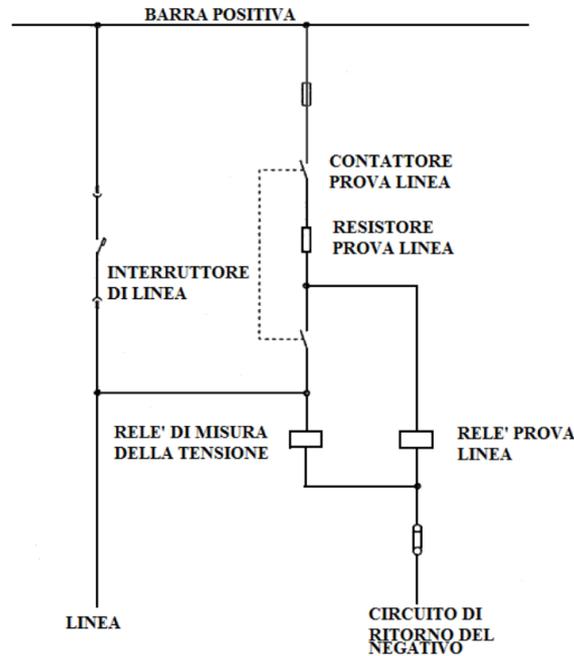


Figura 2.14: DPL da norma CEI EN 50123-7-1 [8]

2.5.2 Situazione attuale a Torino

Il sistema di protezione della rete tranviaria torinese è progettato per essere gestito con dei relè posizionati in cabina chiamati DIA-IGTv. Questi relè monitorano le grandezze elettriche e determinano lo sgancio dell'interruttore quando le condizioni lo richiedono. Tuttavia, a seguito di numerosi interventi intempestivi, su iniziativa di GTT, i DIA-IGTv sono stati scollegati ed al momento eseguono soltanto la diagnostica della rete, affidando la protezione delle linee allo sganciatore interno dell'interruttore e al DPL. La taratura di questi relè è al momento oggetto di studio.

Il relè DIA-IGTv

Il DIA-IGTv è un dispositivo prodotto dalla EMC Traction. Viene mostrato in Figura 2.15.

Questo relè integra tutte le funzionalità richieste dalla norma, esso infatti ha le seguenti funzioni integrate in un solo modulo [9]:

- DIA-I, funzione di diagnosi dello stato dell'interruttore (diagnostica interruttore);
- DIA-G, funzione di analisi della forma d'onda di corrente quando si ha una presa di carico in modo da discriminare se si tratta della partenza di uno o più motori oppure di un guasto (analisi del carico);

- DIA-T, funzione di controllo dell'andamento teorico della temperatura di un componente (immagine termica).



Figura 2.15: Relè DIA-IGTv [10]

I segnali di ingresso del dispositivo sono tre, due di corrente ed uno di tensione. I due segnali di corrente sono prelevati mediante uno shunt ($IP/60\text{ mV}$). Il segnale di tensione misurato sullo shunt viene inviato ad un convertitore V/I e sdoppiato in due segnali di corrente con rapporto di intensità pari a 1:10 che vengono mandati agli ingressi del relè. Ciò viene fatto per ottimizzare la misura in funzione dell'ampiezza del segnale, il segnale amplificato viene utilizzato fino a $1,5\text{ IP}$ e successivamente si usa l'altro ingresso. Per quanto riguarda il segnale di tensione questo sdoppiamento non è previsto, infatti esso è prelevato direttamente dalle sbarre attraverso un convertitore V/I.

Il DIA-IGTv è predisposto per la comunicazione seriale con un PC ed utilizza il protocollo MODBUS RTU. Inoltre è fornito di una memoria non volatile in grado di memorizzare i parametri relativi agli ultimi tre interventi. Per ogni intervento viene effettuata una registrazione di 300 ms (200 ms prima dell'intervento e 100 ms dopo) della corrente, della tensione, dello stato dell'interruttore e della funzione che ha determinato l'intervento.

Il dispositivo dispone di cinque relè di uscita (R1, R2, R3, R4, R5):

- R1, R2, R3, R4 normalmente sono diseccitati e ognuno può essere indirizzato ad una o più delle seguenti funzioni:
 - massima corrente ($I>$);
 - massima corrente ritardato ($tI>$);
 - massimo gradiente ($dI>$);
 - massima variazione di corrente $DR>$);
 - temperatura di allarme (Ta);
 - superamento I^2t ;

- raggiungimento 90 % numero di manovre.

Uno qualsiasi tra questi relè può essere usato come trigger della registrazione. Il riarmo dopo l'intervento avviene quando:

- il parametro causa dell'intervento scende sotto la soglia (per le funzioni $I>$, $tI>$);
 - la corrente si annulla (per le funzioni $dI>$, $DR>$);
 - la corrente scende sotto il valore $2It$ (per la funzione I^2t);
 - la curva di raffreddamento lo consente (funzione Ta)
- R5 normalmente è eccitato, viene utilizzato per la segnalazione di:
 - mancanza alimentazione ausiliaria;
 - guasto interno al relè;
 - Modulo di programmazione (MODO PROGR);
 - temperatura oltre la soglia di richiusura (Tc/n);
 - raggiungimento del numero massimo di manovre (in questa condizione il relè si diseccita solo in seguito all'intervento della manutenzione con conseguente azzeramento dei contatori).

Il dispositivo di prova linea (DPL)

Come accennato in precedenza il DPL in uso a Torino (esempio in Figura 2.16) è differente da quello descritto dalla norma [8] ma fornisce gli stessi risultati. L'evoluzione tecnologica ha fatto sì che col tempo venissero installate diverse tipologie di DPL (il funzionamento è il medesimo per tutte, quello che cambia è il livello di tecnologia dei dispositivi), attualmente se ne possono individuare tre gruppi:

- DPL MONT-ELE in dotazione alle cabine più recenti progettate da InfraTO;
- DPL in dotazione alle cabine Tiraboschi, Martinetto e Stadio;
- DPL storico in dotazione a tutte le altre cabine.

Il dispositivo ha un relè di tensione che si occupa di controllare la presenza di tensione in linea. Il sistema sviluppa le proprie funzioni sotto il controllo di un programma dedicato. Il software comunica con l'hardware tramite dei dispositivi di I/O, i segnali vengono letti ed elaborati da un PLC.

In Figura 2.17 si riporta lo schema elettrico del DPL in dotazione ad InfraTO.

Si descrive nel seguito il principio di funzionamento dei DPL usati a Torino (il cui schema a blocchi è riportato in allegato D).

Diversamente da quanto descritto nella norma, quando si vuole richiudere l'interruttore extrarapido, dopo aver appurato che la rete non è in tensione, viene inserita un'alimentazione a 30 Vac fra il cavo positivo ed il cavo negativo che provoca la circolazione di una corrente. Tale corrente viene misurata e confrontata con una soglia di riferimento,

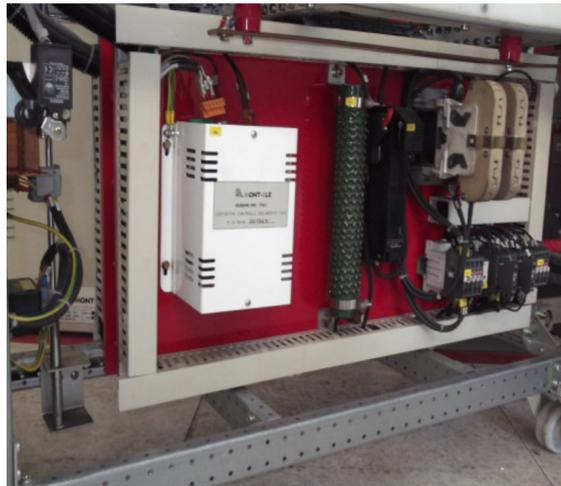


Figura 2.16: DPL in SSE - Trapani [1]

se la corrente è maggiore della soglia il PLC non permette la chiusura dell'interruttore, al contrario se la corrente è minore della soglia la chiusura viene consentita.

Si immagini di essere in un istante tale per cui l'interruttore extrarapido è aperto, la tensione sulla linea è nulla, non vi sono interventi delle protezioni e il sistema è in posizione "richiusura inclusa". Quando viene dato il comando di chiusura (da telecomando o da pulsante locale), si accende la spia "anomalia prova cavi", viene disattivata l'uscita che predispone l'attrazione della bobina di ritenuta dell'interruttore e si avvia la prova. Trascorsi 4 s, se continua ad essere attivo l'ingresso che indica l'assenza di tensione sui cavi, viene attivato il teleruttore 173 che inserisce l'alimentazione a 30 Vac avviando la prova. La corrente che ora circola nel circuito è funzione dello stato di isolamento dei cavi, delle linee di contatto e dei veicoli nella zona considerata. Se l'isolamento è perfetto la corrente è nulla, ma se esiste un guasto la corrente raggiunge un livello tale da superare la soglia di 5,5 A impostata sul relè di misura (relè S). Questo relè attivandosi commuta l'ingresso del PLC che riconosce la prova come fallita. Dopo aver atteso 10 s la prova viene ripetuta con le stesse modalità; giunti alla terza prova fallita e dopo una pausa di 6 s viene comandato il blocco dell'interruttore. Se invece, al termine di una delle tre prove, non vi è l'attivazione del relè S, l'automatismo dopo 4 s diseccita il relè 173 e dà il comando di chiusura all'interruttore, cioè avvia il motore dell'extrarapido e attiva l'uscita che effettua l'eccitazione della bobina di ritenuta. Contemporaneamente al motore dell'extrarapido viene attivato un temporizzatore impostato a 5 s, il quale garantisce che se l'interruttore ha delle anomalie la chiusura viene comunque negata. Infatti se quando il temporizzatore ha finito di contare l'extrarapido non si è ancora chiuso, viene considerato in anomalia e posto in stato di blocco. Se l'interruttore si chiude regolarmente, viene attivato un altro temporizzatore impostato a 200 ms; se, quando il temporizzatore ha finito di contare, l'interruttore si è riaperto vuol dire che si era tentata la chiusura su un guasto non rilevato e viene comandato il blocco dell'interruttore.

Esiste anche la possibilità che all'avvio del ciclo di prova venga rilevata la presenza della tensione sulla rete, in questo caso viene inibita la prova e dopo un tempo di 4 s

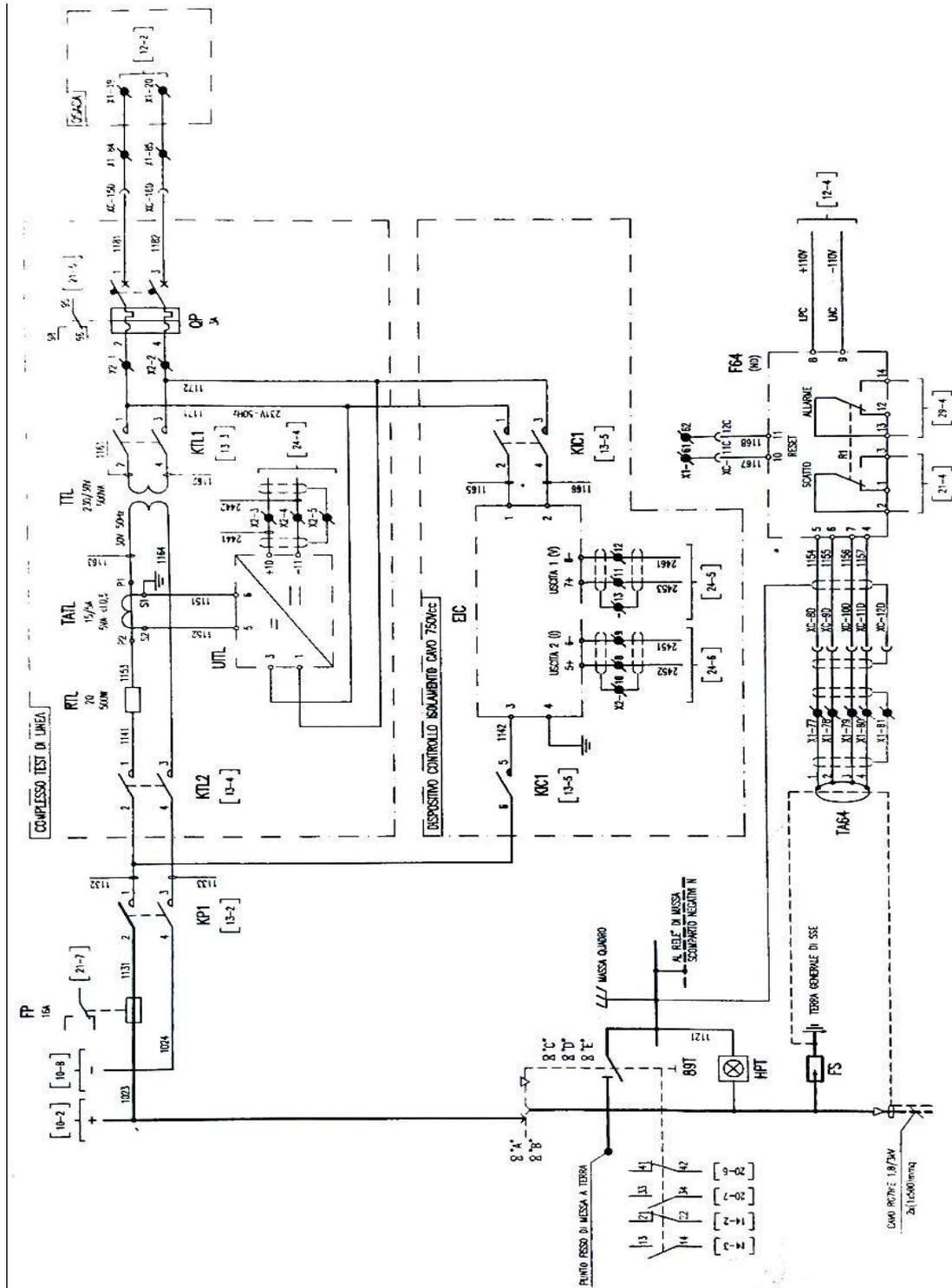


Figura 2.17: Schema DPL in dotazione ad InfraTO

viene abilitato il comando di chiusura dell'interruttore con le modalità spiegate poc'anzi.

Una volta che l'interruttore extrarapido si è chiuso il PLC esegue il programma ciclicamente fino a quando non rileva una variazione degli ingressi. Gli eventi che possono provocare una variazione degli ingressi, sono:

- Scatto spontaneo dell'interruttore in quanto la corrente supera la soglia impostata. Il PLC avverte la variazione di stato dell'interruttore e dopo 4 s avvia la procedura di prova.
- Intervento della protezione immagine termica (protezione che tiene conto del riscaldamento del cavo). Tale protezione può interdire la chiusura dell'interruttore per decine di minuti (finchè la temperatura non scende sotto la soglia), tuttavia l'operatore può forzare la chiusura manualmente pur in presenza dell'allarme sull'immagine termica.
- Apertura manuale dell'operatore in locale o con telecomando.
- Posizionamento del dispositivo in stato di "esclusione richiusura". Viene impedita ogni manovra di chiusura in modo da essere certi che durante le prove d'isolamento eseguite da Ireti su i cavi gli interruttori non vengano chiusi.

I DPL presenti a Torino presentano tutti una resistenza interna di valore pari a 3Ω .

Capitolo 3

DPL - Il problema delle motrici 5000 con banco settato ad 1 e IR chiusi

Come accennato nell'introduzione, la necessità di questo studio nasce dal fatto che si riscontrano casi in cui il DPL comanda il blocco dell'interruttore di linea, causando un'interruzione del servizio, senza che in rete siano presenti guasti permanenti che lo giustificano. Quando un interruttore viene messo in stato di blocco gli operatori sono obbligati a percorrere tutta la linea per identificare ed eventualmente riparare il guasto, questa operazione dura qualche decina di minuti ed ovviamente per questo arco di tempo il servizio è interrotto, quindi nel caso in cui il guasto non sussista si ha un'interruzione del servizio ingiustificata. Quando gli operatori di linea comandano a tutte le motrici presenti nella zona interessata di abbassare i pantografi e viene ritentata la chiusura essa va a buon fine. Questo lascia pensare che il fenomeno sia dovuto ad un funzionamento anomalo, ma transitorio dei componenti che compongono la rete. Gli elementi che possono determinare il fallimento delle prove DPL che comporta il blocco dell'interruttore sono: il DPL stesso, la rete e le motrici.

Uno studio svolto in precedenza [1], ha analizzato il funzionamento di questi tre componenti con delle prove e da questo lavoro è emerso che il DPL e la rete funzionano come da progetto mentre non tutte le motrici si comportano come previsto. Le prove sulle motrici sono state effettuate nella zona dell'Allianz Stadium in quanto è percorsa da motrici solo in occasione di eventi sportivi. Si ha quindi la certezza che i fenomeni osservati siano dovuti alla sola motrice su cui si stanno effettuando le misure, senza che siano perturbati dal passaggio di altre vetture. Le prove sono consistite nell'aprire e chiudere l'interruttore extrarapido di zona collegando in linea prima una per volta e poi in diverse configurazioni le differenti tipologie di motrici circolanti sulla rete torinese (2800, 5000 e 6000) nelle possibili condizioni di funzionamento in cui esse possono venirsi a trovare durante l'esercizio ordinario. Dai risultati ottenuti, si è osservato come la richiusura dell'extrarapido fosse concessa in tutti i casi tranne nel caso in cui le motrici della serie 5000 hanno il banco settato su 1 e gli IR chiusi. Basta infatti che una motrice 5000 abbia il banco settato su 1 e gli IR chiusi per provocare il fallimento delle prove

DPL, qualsiasi siano le condizioni di funzionamento delle altre motrici. Quindi il DPL interpreta le motrici 5000 con il banco settato ad 1 e gli IR chiusi come dei circuiti di guasto e ciò causa i blocchi intempestivi degli interruttori extrarapidi delle varie zone che spesso si verificano in rete.

Il fatto che il blocco non avvenga sempre è dovuto al fatto che le motrici 5000 possono trovarsi nella condizione banco ad 1 e IR chiusi (banco di manovra inserito ma motrice non predisposta alla marcia) solo nelle seguenti situazioni:

- durante le operazioni di apertura e chiusura degli IR della motrice (quindi sicuramente durante le operazioni di avvio e spegnimento della motrice);
- in sosta al capolinea (il manuale di guida delle motrici 5000 [2] consiglia la posizione 1 con apertura degli IR, ma può capitare che essi siano sbadatamente lasciati chiusi dai tranvieri).

Se il tentativo di richiusura avviene quando le motrici hanno il banco settato a 0 (banco di manovra disinserito e motrice non predisposta alla marcia) o su AVANTI/INDIETRO (banco di manovra inserito e motrice predisposta alla marcia), esso invece va a buon fine. Quindi, quando le motrici sono ferme in deposito o sono in marcia, in genere il problema non viene riscontrato.

Ciò è confermato da un'analisi effettuata su un campione di dati relativi ad i blocchi degli interruttori di linea installati sulla rete torinese fornito da GTT (Allegato E). I dati sono stati rilevati dal 13/12/13 al 25/08/16 e nonostante siano incompleti e frammentari hanno evidenziato la presenza di 44 casi in cui la causa che ha comportato il blocco dell'interruttore è sconosciuta (probabili blocchi intempestivi). Di questi 44 casi, 38 sono avvenuti in una zona in cui è presente un deposito o un capolinea. Questo vuol dire che l'86 % dei blocchi con causa non emersa presenti nel campione analizzato avviene in zone in cui è presente un capolinea o un deposito e quindi può essere ricondotto alla presenza di una motrice 5000 con banco ad 1 e IR chiusi. Il rimanente 14 % può essere dovuto a tentativi di richiusura dell'interruttore di linea durante le fasi di accensione o spegnimento di una 5000 o a guasti che si sono autoestinti in un tempo medio lungo.

In [1] viene ipotizzato che le motrici della serie 5000 con banco ad 1 e IR chiusi siano interpretate come guasti dal DPL a causa di un comportamento capacitivo anomalo, tale per cui, in AC (cioè durante le prove DPL) le motrici si comportino come dei cortocircuiti a terra (impedenza equivalente della motrice molto piccola), mentre in DC (cioè durante il funzionamento ordinario) si comportino come delle impedenze elevate.

Uno degli obiettivi di questa tesi è capire perché le motrici 5000 con banco a 1 e IR chiusi sono interpretate dal DPL come guasti in linea, perciò, per prima cosa, si verifica tale ipotesi.

3.1 Misure di impedenza

Per verificare la tesi proposta in [1] si sono eseguite delle misure di impedenza sulle motrici 5000 con il banco settato nelle diverse posizioni possibili con l'idea di dimostrare che quando il banco è settato su 1 e gli IR sono chiusi l'impedenza equivalente della

motrice a 50 Hz è molto bassa (circa un cortocircuito) mentre negli altri stati del banco l'impedenza equivalente della motrice è non trascurabile.

Le misure sono state eseguite il 15/11/17 nel deposito di corso Tortona su due motrici differenti, la 5031 e la 5051. Le misure di impedenza sono state eseguite con un impedenzometro Hioki 3532-50 LCR HiTESTER (Figura 3.1). Questo strumento permette di misurare l'impedenza incognita impostando ai suoi capi una tensione regolabile sia in ampiezza (tra 0 e 5 V) che in frequenza, questa tensione forza nell'impedenza una corrente che lo strumento misura e che elabora in funzione della tensione applicata in modo da fornire come output il valore di impedenza incognito alla frequenza impostata.

L'impedenzometro è stato impostato in modo da imporre all'impedenza incognita sempre una tensione di 5 V ma a frequenza variabile tra 50 Hz e 10 kHz. Le misure vengono effettuate a frequenza variabile in modo da verificare che il comportamento anomalo delle motrici 5000 sia provocato dai fenomeni capacitivi ipotizzati in [1].

Lo schema elettrico della misura con impedenzometro è quello di Figura 3.2.



Figura 3.1: Impedenzometro Hioki 3532-50 LCR HiTESTER

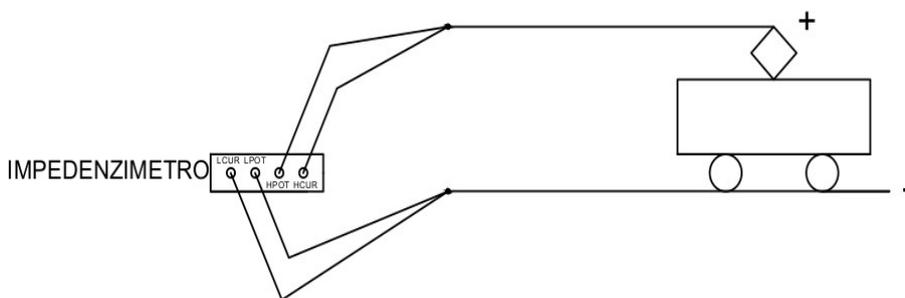


Figura 3.2: Schema elettrico della misura di impedenza con impedenzometro

Le misure sono state eseguite in tutte le condizioni possibili in cui può essere settato il banco delle motrici 5000, cioè:

- banco a 0;
- banco a 1 con IR aperti;
- banco a 1 con IR chiusi;
- banco AVANTI (INDIETRO).

Durante le misure la motrice era disconnessa dalla rete in quanto il pantografo era abbassato; gli ausiliari BT con alimentazione privilegiata erano alimentati in quanto le batterie erano inserite.

Nel seguito si riportano i risultati delle misure. Siccome quando sono state eseguite le prove uno dei due IR della motrice 5031 era guasto, ci si aspetta che nelle misure effettuate con IR chiusi l'impedenza misurata sulla 5031 sia circa doppia rispetto a quella misurata sulla 5051, questo perché i due azionamenti sono identici e collegati in parallelo quindi se uno dei due è scollegato l'impedenza globale sarà circa doppia.

Tabella 3.1: Misura di impedenza motrici 5000 con banco a 0

5051			5031		
f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^\circ$]	f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^\circ$]
50	595,42	-0,28	50	13120,00	-36,04
500	606,33	-0,82	500	6172,50	-35,85
1000	608,11	-1,69	1000	4562,10	-60,92
1500	604,07	-2,54	1500	3240,00	-68,45
2000	602,21	-3,56	2000	2491,00	-72,16
2500	599,39	-4,62	2500	2017,70	-73,99
3000	596,51	-5,66	3000	1693,60	-74,83
3500	593,50	-6,79	3500	1459,90	-75,15
4000	590,16	-7,88	4000	1281,90	-75,03
4500	585,13	-8,89	4500	1145,10	-74,85
5000	580,29	-9,87	5000	1034,70	-74,47
5500	575,00	-10,92	5500	944,65	-74,02
6000	569,45	-11,93	6000	869,51	-73,47
6500	563,83	-12,82	6500	805,63	-72,86
7000	557,73	-13,72	7000	751,60	-72,21
7500	551,70	-14,6	7500	705,00	-71,55
8000	545,70	-15,41	8000	663,83	-70,82
8500	539,52	-16,17	8500	628,21	-70,12
9000	533,80	-16,95	9000	596,48	-69,38
9500	527,94	-17,66	9500	568,15	-68,64
10000	521,90	-18,36	10000	543,06	-67,88

Tabella 3.2: Misura di impedenza motrici 5000 con banco a 1 e IR aperti

5051			5031		
f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^\circ$]	f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^\circ$]
50	597,12	-1,73	50	16062,00	-40,31
500	605,85	-0,82	500	8606,70	-56,96
1000	607,70	-1,69	1000	4265,10	-53,57
1500	603,51	-2,57	1500	3271,70	-70,6
2000	601,80	-3,56	2000	2506,40	-73,46
2500	599,19	-4,58	2500	2025,70	-74,87
3000	596,12	-5,67	3000	1698,10	-75,56
3500	593,54	-6,73	3500	1462,40	-75,71
4000	589,49	-7,84	4000	1284,70	-75,53
4500	584,81	-8,9	4500	1146,50	-75,22
5000	580,03	-9,95	5000	1036,30	-74,86
5500	574,81	-10,92	5500	945,41	-74,3
6000	569,35	-11,9	6000	870,27	-73,68
6500	563,67	-12,82	6500	806,34	-73,02
7000	557,63	-13,72	7000	752,21	-72,41
7500	551,69	-14,58	7500	705,47	-71,74
8000	545,57	-15,41	8000	664,08	-71,03
8500	539,85	-16,27	8500	628,22	-70,3
9000	533,76	-16,95	9000	596,96	-69,53
9500	527,93	-17,65	9500	568,55	-68,79
10000	521,93	-18,35	10000	543,27	-68,02

Tabella 3.3: Misura di impedenza motrici 5000 con banco a 1 e IR chiusi

5051			5031		
f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^{\circ}$]	f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^{\circ}$]
50	47,97	-0,52	50	101,00	-0,36
500	48,25	3,61	500	102,18	3,37
1000	48,98	6,87	1000	103,94	6,38
1500	49,82	9,86	1500	105,75	9,08
2000	50,82	12,61	2000	108,15	11,56
2500	51,97	15,15	2500	110,93	13,78
3000	53,26	17,49	3000	114,01	15,82
3500	54,65	19,67	3500	117,44	17,65
4000	56,13	21,64	4000	121,11	19,24
4500	57,68	23,44	4500	125,01	20,64
5000	59,30	25,1	5000	129,14	21,86
5500	60,97	26,6	5500	133,45	22,9
6000	62,68	27,98	6000	137,91	23,78
6500	64,44	29,26	6500	142,55	24,47
7000	66,25	30,43	7000	147,33	25,03
7500	68,09	31,5	7500	152,18	25,44
8000	69,96	32,49	8000	157,05	25,74
8500	71,86	33,4	8500	162,06	25,91
9000	73,79	34,22	9000	167,02	25,95
9500	75,76	34,97	9500	172,07	25,89
10000	77,76	35,67	10000	177,09	25,68

Tabella 3.4: Misura di impedenza motrici 5000 con banco AVANTI

5051			5031		
f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^{\circ}$]	f [Hz]	Z [Ω]	angle [$^{\circ}$]
50	47,86	-0,6	50	101,36	-0,42
500	48,26	3,6	500	102,18	3,37
1000	49,00	6,87	1000	103,91	6,39
1500	49,82	9,86	1500	105,73	9,09
2000	50,83	12,61	2000	108,15	11,55
2500	51,99	15,15	2500	110,93	13,8
3000	53,26	17,48	3000	114,01	15,81
3500	54,66	19,66	3500	117,48	17,64
4000	56,14	21,63	4000	121,15	19,23
4500	57,69	23,43	4500	125,02	20,63
5000	59,30	25,08	5000	129,15	21,86
5500	60,97	26,6	5500	133,48	22,9
6000	62,69	27,98	6000	137,96	23,75
6500	64,45	29,26	6500	142,55	24,47
7000	66,25	30,42	7000	147,27	25,04
7500	68,09	31,49	7500	152,14	25,46
8000	69,95	32,49	8000	157,04	25,74
8500	71,83	33,37	8500	162,12	25,92
9000	73,80	34,21	9000	167,10	25,94
9500	75,76	34,96	9500	172,10	25,86
10000	77,75	35,66	10000	177,10	25,68

In Tabella 3.1 sono riportati i risultati delle misure di impedenza sulle due motrici 5000 con banco settato su 0. Come lecito aspettarsi, in questa configurazione, si misura un'impedenza molto elevata infatti quando il banco è settato a 0 il banco di comando è disattivato e i circuiti di potenza della motrice sono aperti (gli IR sono aperti). Il valore di impedenza che ci si aspetterebbe da un circuito aperto sarebbe tuttavia ancora maggiore rispetto a quello misurato, i valori ottenuti sono giustificati dal fatto che nonostante il banco sia disattivato e gli IR siano aperti ci sono alcuni circuiti non aperti in parallelo ad i circuiti di potenza come ad esempio quelli del convertitore statico carica batteria (come indicato nel Capitolo 2). Tali circuiti hanno comunque un'impedenza elevata in quanto l'impedenza equivalente della motrice risulta nel complesso elevata. Probabilmente l'impedenza misurata sulla 5051 risulta così bassa rispetto a quella misurata sulla 5031 a causa di maggiori dispersioni provocate da difetti nell'isolamento.

In Tabella 3.2 sono riportati i risultati delle misure di impedenza sulle due motrici 5000 con banco settato su 1 con IR aperti. Questa situazione è analoga al caso con banco a 0, infatti essendo gli IR aperti i circuiti di potenza della motrice non sono collegati e di conseguenza l'impedenza misurata risulta elevata come atteso.

In Tabella 3.3 sono riportati i risultati delle misure di impedenza sulle due motrici 5000 con banco settato su 1 con IR chiusi. In questo caso i circuiti di potenza delle motrici vengono collegati (IR chiusi) ed infatti l'impedenza misurata risulta minore che nei casi precedenti (non vi è un più un circuito aperto in parallelo a dei circuiti chiusi ad alta impedenza). Come atteso l'impedenza misurata sulla 5031 è circa doppia rispetto a quella misurata sulla 5051. I risultati ottenuti a 50 Hz (valore di frequenza a cui vengono effettuate le prove DPL) però non sono quelli attesi in quanto un'impedenza equivalente di circa 50Ω è troppo elevata per giustificare il fallimento delle prove DPL. Infatti se si applica una tensione di 30 Vac ad un'impedenza da circa 50Ω (a cui bisogna sommare l'impedenza interna del DPL che vale 3Ω e l'impedenza della linea) la corrente che circola è ben inferiore a 5,5 A (soglia di corrente oltre la quale le prove DPL falliscono).

In Tabella 3.4 sono riportati i risultati delle misure di impedenza sulle due motrici 5000 con banco settato su AVANTI. I risultati ottenuti sono analoghi a quelli ottenuti per il caso con banco a 1 e IR chiusi.

Dai risultati delle prove quindi sembrerebbe che il caso con banco a 1 e IR aperti sia analogo (dal punto di vista dell'impedenza equivalente misurata) a quello con banco a 0, mentre il caso con banco a 1 e IR chiusi sia analogo al caso con banco AVANTI. Era lecito aspettarsi la prima situazione in quanto sia con banco a zero che con banco a 1 e IR aperti gli azionamenti della motrice sono aperti, mentre lo stesso non si può dire della seconda situazione. Infatti ci si aspettava un'impedenza misurata con banco ad 1 e IR chiusi molto minore (circa nulla) di quella misurata con banco AVANTI.

Dai risultati ottenuti quindi è possibile escludere l'ipotesi che le motrici della serie 5000 con banco a 1 e IR chiusi siano viste dal DPL come dei guasti a causa di un comportamento capacitivo anomalo tale per cui, in AC (cioè durante le prove DPL) le motrici si comportano come dei cortocircuiti a terra (impedenza equivalente della motrice molto piccola), mentre in DC (cioè durante il funzionamento ordinario) si comportano come delle impedenze elevate.

Per giustificare i blocchi intempestivi degli interruttori extrarapidi di zona quando

sono presenti motrici 5000 con il banco settato a 1 e gli IR chiusi è quindi necessario formulare una nuova ipotesi.

3.2 Studio della nuova ipotesi

Per prima cosa si sono analizzate le differenze tra le prove effettuate in [1] e quelle effettuate in deposito Tortona in modo da capire a quali eventi può essere legato il cambiamento di configurazione nelle motrici che ha portato ad ottenere risultati così diversi. Le differenze principali tra le due misure sono due:

1. Le prove in deposito sono state effettuate su delle motrici disconnesse dalla rete da qualche giorno mentre le prove effettuate in [1] sono avvenute immediatamente dopo aver tolto tensione alle vetture. Quindi potrebbe esistere un qualche dispositivo temporizzato che appena viene tolta la tensione collega il pantografo a terra (ad esempio per scaricare i condensatori) e dopo qualche minuto (una volta finita la scarica) viene rimosso.
2. Le prove in deposito sono state effettuate dopo aver ricollegato le batterie delle motrici. Da notare che, da quando le vetture sono state portate in deposito fino all'inizio delle prove, le batterie sono rimaste sezionate. Durante le prove effettuate in [1] invece le batterie non sono mai state sezionate. Quindi il sezionamento delle batterie potrebbe resettare la logica della vettura variando la configurazione della motrice.

Il problema quindi potrebbe dipendere dalla logica di controllo delle vetture che varia la configurazione circuitale della motrice con banco a 1 e IR chiusi al variare delle condizioni esterne (ad esempio la disconnessione dalla rete o il sezionamento delle batterie).

Con questa idea si sono analizzati gli schemi elettrici delle motrici 5000 (in Allegato B), tenendo conto che, quando il banco è settato ad 1 con IR chiusi sono alimentati tutti i circuiti tranne quelli di trazione (i tiristori che alimentano i motori sono aperti) .

Quello che è emerso dall'analisi è che entrambi gli azionamenti sono dotati di un circuito di precarica del condensatore di filtro formato da un fusibile e da una resistenza (1F1 e 1R2 per l'azionamento B e 1F3 e 1R3 per l'azionamento A) di valore 100 Ω che viene disinserito una volta che i condensatori di filtro (-C1 per entrambe gli azionamenti) sono carichi, tramite i contattori di filtro (1K1 per l'azionamento cassa B e 1K2 per l'azionamento cassa A). Si è quindi scoperto che esiste un circuito con impedenza di circa 50 Ω (considerando il parallelo) che può essere inserito o meno dalla logica di controllo della vettura a seconda delle condizioni in cui essa si trova, cioè in base allo stato di carica dei condensatori. Il circuito di ogni azionamento della motrice quando il banco è a 1 è quindi formato dalla serie della resistenza di precarica, dell'induttore di filtro e della capacità di filtro quando il circuito di precarica è inserito (1K1 e 1K2 sono aperti) mentre è formato dalla sola serie dell'induttore di filtro e della capacità di filtro quando il circuito di precarica è disinserito (1K1 e 1K2 sono chiusi). Siccome i parametri del circuito sono noti è stato possibile disegnare il circuito equivalente e calcolare l'impedenza

equivalente della motrice nei due casi, con contattori di filtro aperti (Figura 3.3) e chiusi (Figura 3.4). Nel modello non vengono considerati gli ausiliari in parallelo ad i circuiti di trazione in quanto hanno un'impedenza sensibilmente più elevata di 50Ω (come possibile osservare dai risultati ottenuti dalle misure d'impedenza con IR aperti). Le resistenze di cortocircuito linea dei due azionamenti (1R8 e 1R12 negli schemi in Allegato B) non vengono considerate in quanto sono state rimosse dai tecnici GTT (infatti negli schemi sono contrassegnate da una X) a seguito di numerosi guasti.

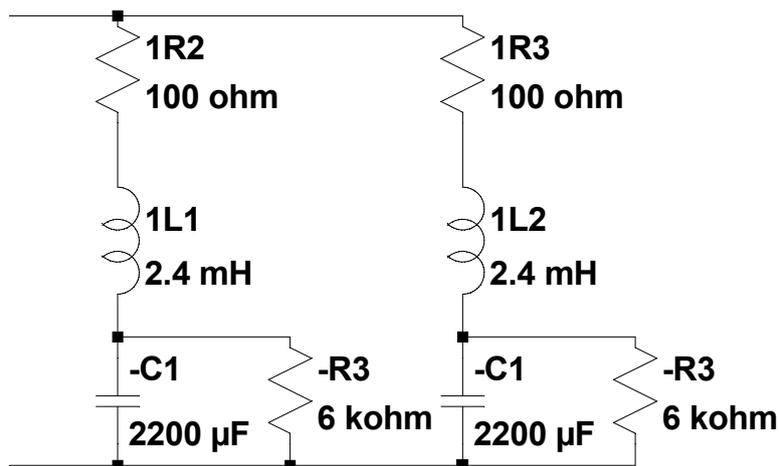


Figura 3.3: Circuito equivalente delle motrici 5000 con banco ad 1 e contattori 1K1 e 1K2 aperti

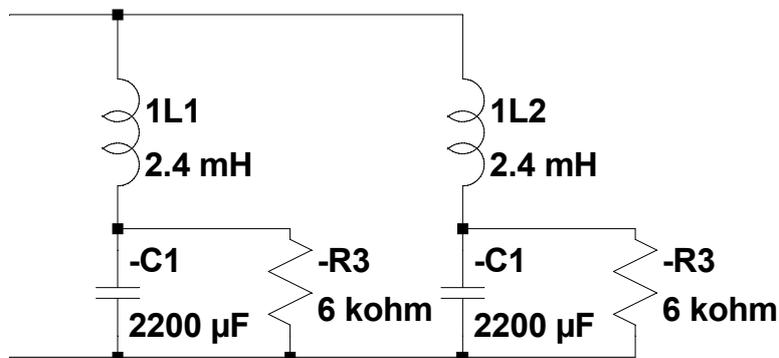


Figura 3.4: Circuito equivalente delle motrici 5000 con banco ad 1 e contattori 1K1 e 1K2 chiusi

L'impedenza equivalente a 50 Hz nel caso con contattori di filtro aperti risulta essere di circa 50Ω , mentre l'impedenza equivalente nel caso con contattori chiusi risulta essere pari a circa $0,3 \Omega$.

Se i contattori di filtro venissero aperti dalla logica di controllo al mancare della tensione per tutti gli stati possibili del banco tranne che quando il banco è settato ad 1 e gli

IR sono chiusi, si spiegherebbe il motivo per cui le prove DPL falliscono soltanto quando la motrice è in queste condizioni. Infatti una tensione di 30 Vac applicata ad un'impedenza di circa $3,3 \Omega$ (impedenza interna DPL + impedenza equivalente motrice) imporrebbe la circolazione di una corrente di circa 10 A, maggiore della soglia di 5,5 A del DPL. Se quanto ipotizzato fosse vero, si spiegherebbero anche i risultati ottenuti in deposito, infatti, durante le prove in deposito, le motrici sono sempre rimaste disalimentate, ciò vuol dire che la carica dei condensatori di filtro non si è mai completata, quindi i contattori di filtro non si sono mai chiusi e l'impedenza equivalente della motrice a 50 Hz è rimasta costante a circa 50Ω , per questo non si è misurata l'impedenza molto bassa che ci si aspettava.

Quindi si presume che quando si è con banco AVANTI se si apre l'interruttore di linea e la motrice rimane disalimentata i contattori di filtro si aprono mentre se si è con banco a 1 ciò non accade. Inoltre, si presume che passando da banco a 0 (azionamenti disalimentati e contattori di filtro aperti) a banco a 1 i contattori rimangono aperti mentre invece se si passa da banco AVANTI con carica dei condensatori di filtro esaurita (contattori di filtro chiusi) a banco a 1 i contattori rimangono chiusi.

Le ipotesi fatte devono essere però verificate mediante delle misure che provino che il comportamento della logica di controllo delle vetture sia quello presunto.

3.3 Verifica della nuova ipotesi - Misure all'Allianz Stadium

Per verificare le ipotesi bisogna quindi dimostrare:

- la mancata apertura dei contattori di filtro quando viene tolta tensione nel caso in cui il banco è settato su 1;
- l'apertura dei contattori di filtro quando viene tolta tensione nel caso in cui il banco è settato su AVANTI;
- che l'impedenza equivalente della motrice con banco a 1 e contattori di filtro aperti è di circa 50Ω ;
- che l'impedenza equivalente della motrice con banco a 1 e contattori di filtro chiusi è di circa $0,3 \Omega$.

Lo stato dei contattori può essere osservato dai regolatori choppers (uno per ciascun azionamento, in Figura 3.5 è riportato il regolatore dell'azionamento A della motrice 5047), presenti a bordo delle vetture. Tali regolatori dispongono di due schede di interfaccia a led che permettono di osservare lo stato dei tiristori, dei GTO e dei contattori del circuito, tra cui i contattori di filtro. Quindi una volta individuati i led che indicano lo stato dei contattori 1K1 e 1K2 è sufficiente osservare se essi sono accesi o no per verificare se i contattori sono aperti o chiusi (in Figura 3.5 si indica con una freccia rossa il led che segnala lo stato del contattore di filtro dell'azionamento cassa A, 1K2). In allegato F si riporta il manuale di lettura dei led dei regolatori choppers (il led che permette di osservare lo stato dei contattori è indicato come "DILF - Consenso CPR chiuso accesa").



Figura 3.5: Regolatore chopper dell'azionamento A della motrice 5047

Per verificare le ipotesi formulate si sono eseguite tre prove:

- registrazioni di tensione e corrente e verifica dello stato dei contattori con banco della motrice settato nei vari stati possibili;
- misura di impedenza con impedenzometro della motrice con banco a 1 e contattori aperti e chiusi;
- validazione del modello mediante prove in DC.

Le prove sono state eseguite nella zona dell'Allianz Stadium il 12/12/17 che, come già accennato, è percorsa da tram solo in concomitanza degli eventi sportivi.

Le tre prove, che verranno descritte dettagliatamente nel seguito, sono state eseguite sulla motrice 5047. Al fine di validare il comportamento della logica di controllo osservato sulla 5047, la prima prova è stata eseguita anche sulla motrice 5002, ma senza effettuare registrazioni, solo controllando lo stato dei contattori a bordo macchina.

3.3.1 RegISTRAZIONI di tensione e corrente e verifica dello stato dei contattori

Queste prove sono svolte con la finalità di registrare gli andamenti di tensione e corrente durante le prove DPL con il banco della motrice nei diversi stati possibili e contemporaneamente per verificare che il comportamento dei contattori di filtro sia quello ipotizzato.

Descrizione delle misure

Le registrazioni sono state eseguite in cabina, tramite un registratore digitale Hioki modello MR 8880. Per la misura del segnale di corrente si sono utilizzate due pinze amperometriche, una con fondo scala 20 A, ma che consente di misurare solo la AC (pinza amperometrica Hioki 9018 - 50) ed una con fondo scala 200 A, ma che permette di misurare sia la DC che la AC (pinza amperometrica Hioki modello 3285). Siccome si misura un solo segnale di corrente sarebbe sufficiente usarne solo una delle due ma si preferisce misurarlo con entrambe in modo da poter scegliere la misura più precisa tra le due. Per la misura del segnale di tensione si è invece usata una sonda differenziale di tensione Hioki 9322 di proprietà di InfraTO. I segnali di tensione e corrente sono poi stati portati al registratore tramite dei cavi coassiali con connettori BNC. La disposizione degli strumenti di misura in cabina è osservabile in Figura 3.6.



Figura 3.6: Disposizione degli strumenti di misura in cabina stadio

Per effettuare le prove DPL si comanda l'apertura dell'interruttore extrarapido della zona ove è posizionata la motrice dalla centrale, si aspetta di misurare 0 V ai capi della linea dopodiché si comanda la richiusura dell'interruttore (sempre da centrale), a questo punto con le modalità descritte nel Capitolo 2 avvengono le prove DPL che a seconda del risultato permettono o negano la chiusura dell'interruttore. Le registrazioni vengono fatte partire poco prima del comando di richiusura in modo di registrare gli andamenti di tensione e corrente di tutte le eventuali prove DPL.

Le misure sono state eseguite con la seguente procedura:

- prova a vuoto per verificare il funzionamento del DPL;
- collegamento della motrice alla linea (si alza il pantografo);
- prova con banco a 0:
 - settare il banco a 0 (i contattori 1K1 e 1K2 sono sicuramente aperti in quanto tutti i circuiti sono disalimentati);
 - apertura interruttore extrarapido;
 - verifica dello stato dei contattori 1K1 e 1K2 (ci si aspetta che rimangano aperti);
 - comando richiusura interruttore extrarapido;
 - verifica avvenuta richiusura (ci si aspetta che la richiusura vada a buon fine);
- prova con banco AVANTI:
 - settare il banco a 1 e chiudere gli IR;
 - settare il banco AVANTI;
 - verifica che dopo un breve tempo (quando i condensatori di filtro sono carichi) i contattori 1K1 e 1K2 si chiudono;
 - apertura interruttore extrarapido;
 - verifica dello stato dei contattori 1K1 e 1K2 (ci si aspetta che si aprano);
 - comando richiusura interruttore extrarapido;
 - verifica avvenuta richiusura (ci si aspetta che la richiusura vada a buon fine);
- prova con banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1):
 - settare il banco AVANTI;
 - attendere la chiusura dei contattori 1K1 e 1K2;
 - settare il banco a 1 (IR chiusi);
 - verifica dello stato dei contattori 1K1 e 1K2 (ci si aspetta che rimangano chiusi);
 - apertura interruttore extrarapido;
 - verifica dello stato dei contattori 1K1 e 1K2 (ci si aspetta che rimangano chiusi);

- comando richiusura interruttore extrarapido;
- verifica avvenuta richiusura (ci si aspetta che tutte e tre le prove DPL falliscano e che quindi la richiusura non vada a buon fine);
- prova con banco a 1 (passaggio da banco 0 a banco a 1):
 - aprire gli IR e settare il banco a 0 (i contattori 1K1 e 1K2 sono sicuramente aperti in quanto tutti i circuiti sono disalimentati);
 - chiudere l'interruttore extrarapido;
 - settare il banco a 1 e chiudere gli IR;
 - verifica dello stato dei contattori 1K1 e 1K2 (ci si aspetta che rimangano aperti);
 - apertura interruttore extrarapido prima della chiusura dei contattori di filtro;
 - verifica dello stato dei contattori 1K1 e 1K2 (ci si aspetta che rimangano aperti);
 - comando richiusura interruttore extrarapido;
 - verifica avvenuta richiusura (ci si aspetta che la richiusura vada a buon fine);

Come accennato in precedenza il controllo dello stato dei contattori 1K1 e 1K2 viene effettuato tramite i regolatori choppers presenti a bordo della vettura.

Risultati

In Figura 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.13 sono riportati gli andamenti di tensione e corrente registrati durante le diverse prove. La traccia in rosso rappresenta la tensione mentre sia quella verde che quella blu rappresentano la corrente; la traccia verde rappresenta la corrente misurata con la pinza amperometrica solo AC con fondo scala 20 A (canale 2), mentre quella blu rappresenta sempre la stessa corrente misurata con la pinza di corrente AC + DC con fondo scala 200 A (canale 3).

- Prova a vuoto:

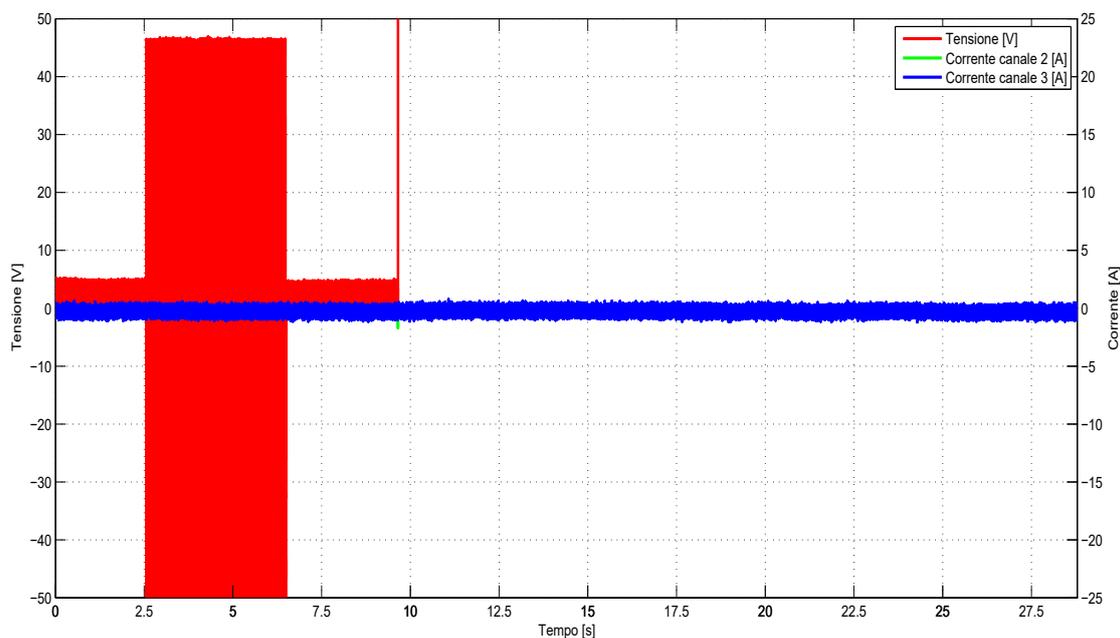


Figura 3.7: Andamento di corrente e tensione registrati durante la prova a vuoto

In Figura 3.7 si vede che dopo 2,5 s viene effettuata la prova DPL che da esito positivo e quindi l'interruttore si richiude ripristinando i 600 V ai capi della linea. Il funzionamento del DPL risulta quindi verificato.

- prova con banco a 0:

In Figura 3.8 si osserva che, come atteso, la prova DPL va a buon fine e la richiusura viene concessa. Anche lo stato dei contattori è quello atteso infatti essi rimangono aperti dopo l'apertura dell'interruttore extrarapido di linea.

- prova con banco AVANTI:

In Figura 3.9 si osserva che, come atteso, la prova DPL va a buon fine e la richiusura viene concessa. Anche lo stato dei contattori è quello atteso infatti essi si chiudono quando si completa il transitorio di carica dei condensatori di filtro, ma si aprono appena l'interruttore extrarapido di linea viene aperto.

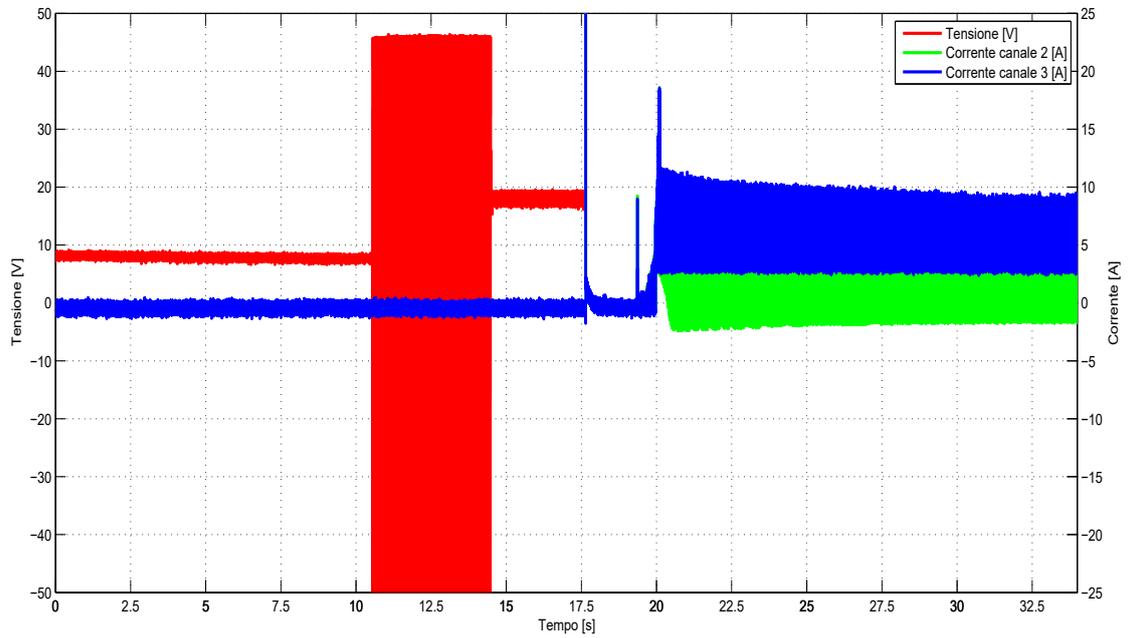


Figura 3.8: Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco a 0

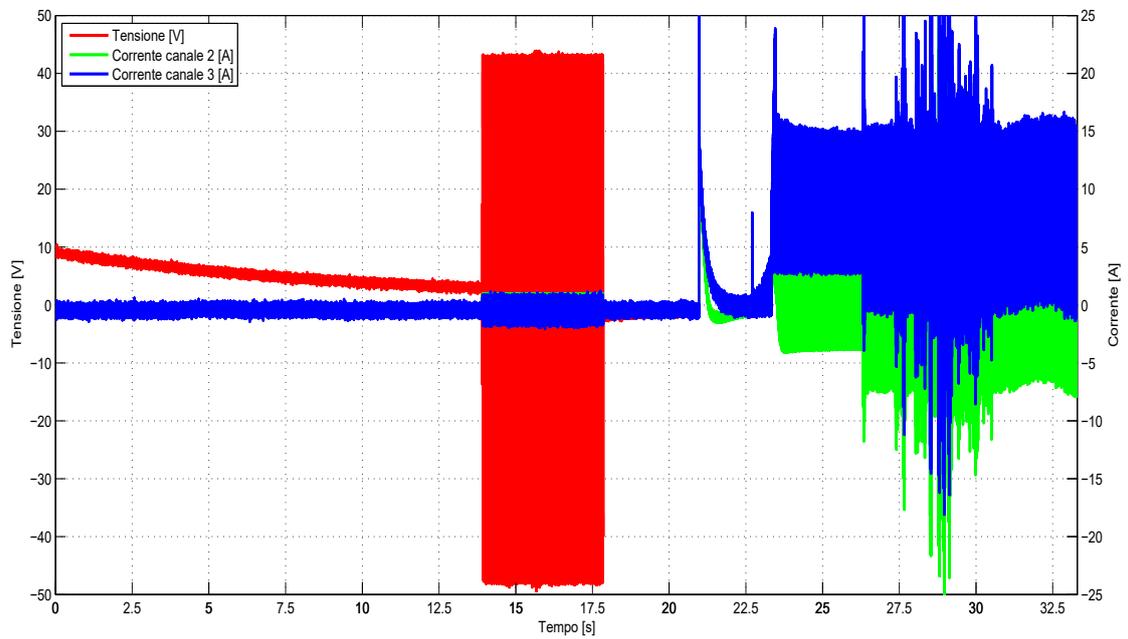


Figura 3.9: Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco AVANTI

- prova con banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1):

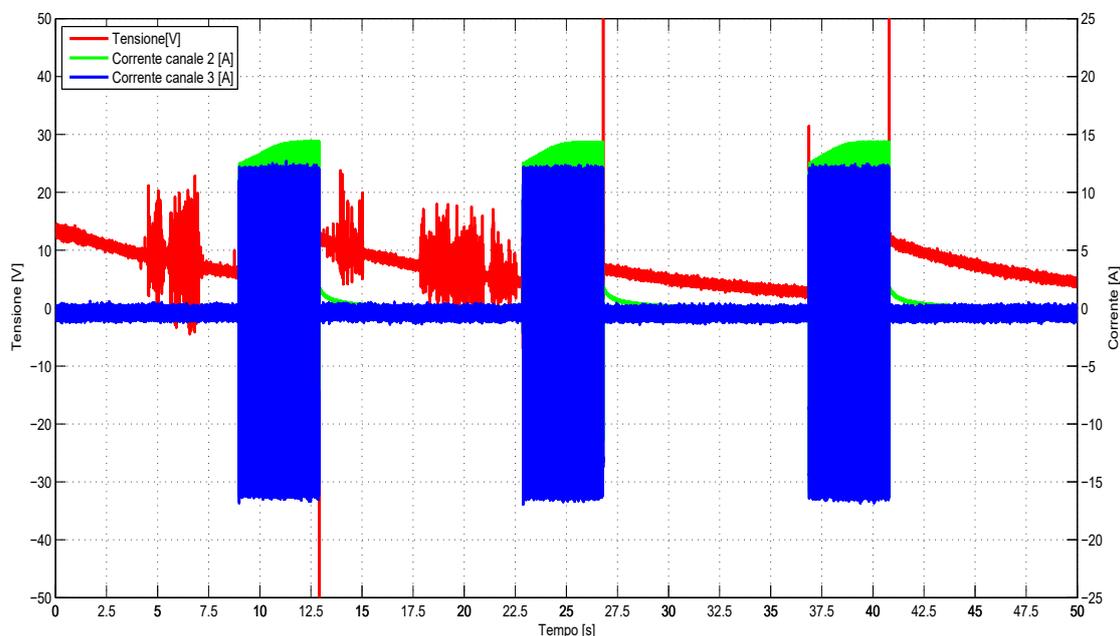


Figura 3.10: Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1)

In Figura 3.10 si osserva che, come atteso, tutte e tre le prove DPL falliscono e la richiusura non viene concessa. Anche lo stato dei contattori è quello atteso infatti essi si chiudono quando si esaurisce il transitorio di carica dei condensatori, rimangono chiusi quando si passa da banco AVANTI a banco a 1 e rimangono ancora chiusi quando si apre l'interruttore di linea. In Figura 3.11 si riporta un ingrandimento della prima prova DPL e in Figura 3.12 si riporta il diagramma fasoriale ottenuto sempre dagli andamenti di tensione e corrente registrati durante la prima prova DPL. Per ottenere il diagramma fasoriale si sono importati su Matlab i tratti di registrazione di tensione e corrente a regime relativi alla prima prova DPL i quali hanno andamento sinusoidale (le prove DPL vengono effettuate alimentando la linea con una tensione di 30 V a 50 Hz) e se ne è fatta la DFT (trasformata discreta di Fourier) in modo da ottenere i fasori di tensione e corrente a 50 Hz.

Una volta calcolati i fasori di tensione e corrente è possibile effettuare il calcolo (approssimato) dell'impedenza equivalente della motrice. Siccome la differenza tra le due misure di corrente è minima, è indifferente usare una o l'altra per i calcoli quindi si utilizza la corrente misurata sul canale 2 (pinza di corrente con fondoscala 20 A).

$$\underline{V} = 2,662 / -169,5^\circ \text{ V}$$

$$\underline{I} = 9,86 / -150,6^\circ \text{ A}$$

$$\underline{Z} = \underline{V} / \underline{I} = 0,270 / -18,9^\circ \Omega$$

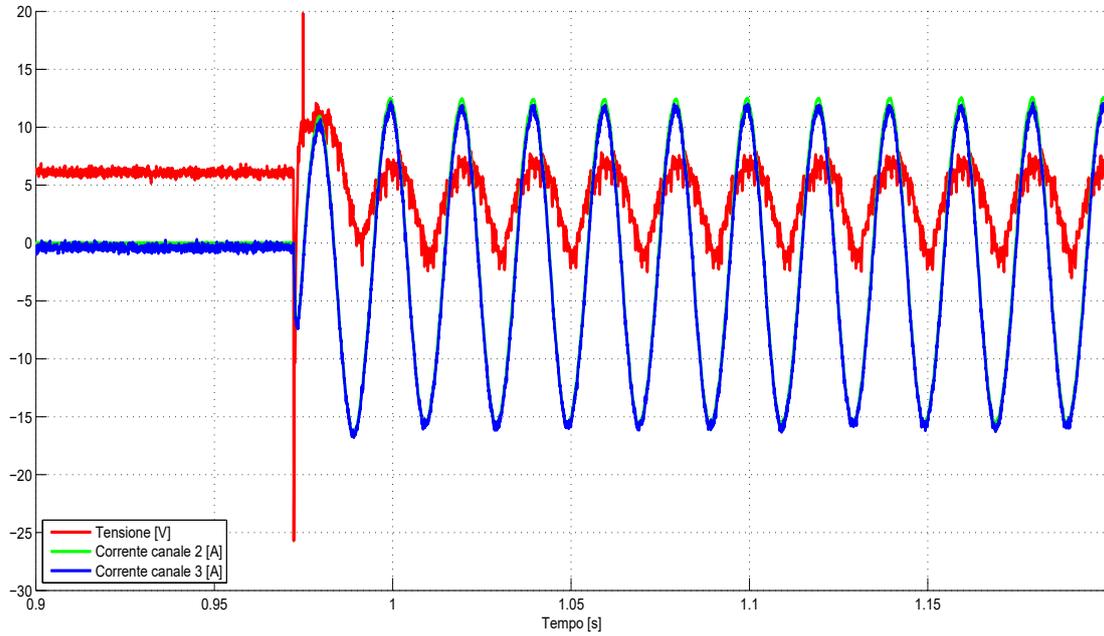


Figura 3.11: Banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1) - Ingrandimento delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL

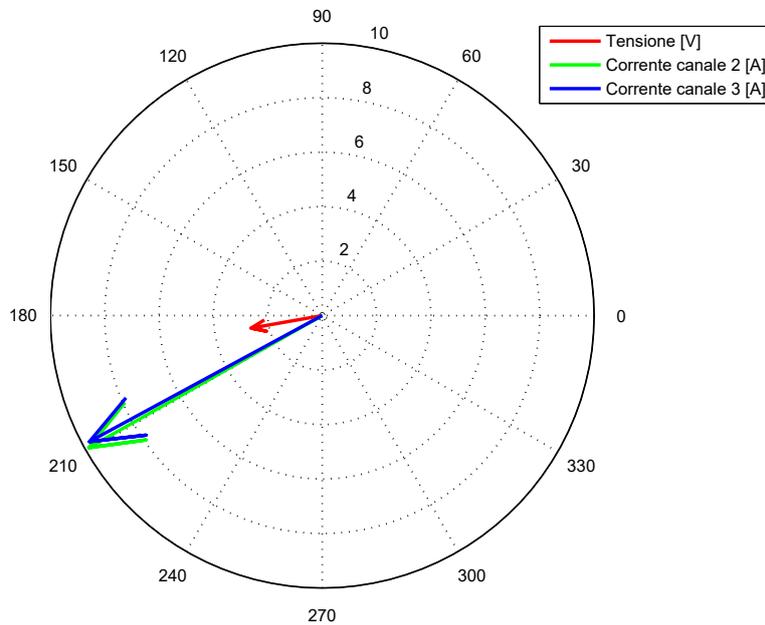


Figura 3.12: Banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1) - Diagramma fasoriale delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL

Si osserva che l'impedenza risultante da questo calcolo approssimato è di circa $0,3 \Omega$ in accordo con quanto calcolato dagli schemi.

- prova con banco a 1 (passaggio da banco a 0 a banco a 1):

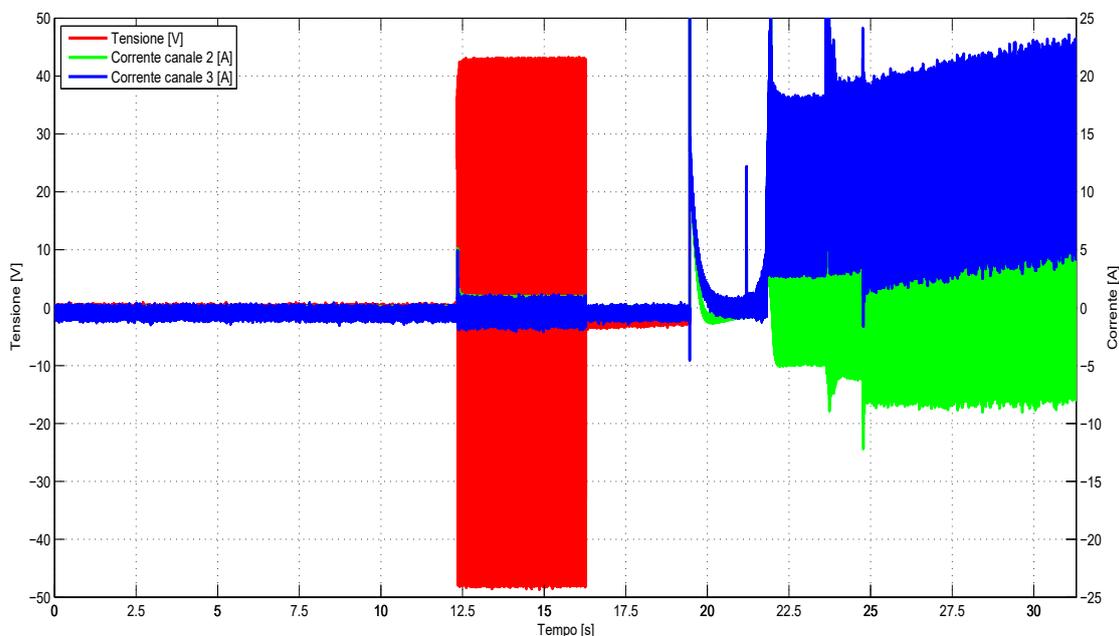


Figura 3.13: Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco a 1 (passaggio da banco a 0 a banco a 1)

In Figura 3.13 si osserva che, come atteso, la prova DPL va a buon fine e la richiusura viene concessa. Anche lo stato dei contattori è quello atteso infatti essi sono aperti quando il banco viene settato a 0 e si mantengono aperti sia quando si passa il banco a 1 e sia quando viene aperto l'interruttore. Come fatto nel caso precedente in Figura 3.14 si riporta un ingrandimento della prima prova DPL e in Figura 3.15 si riporta il diagramma fasoriale ottenuto sempre dagli andamenti di tensione e corrente a regime registrati durante la prima prova DPL.

Anche in questo caso, una volta ottenuti i fasori di tensione e corrente è possibile effettuare il calcolo (approssimato) dell'impedenza equivalente della motrice (come nel caso precedente la differenza tra le due correnti è minima, quindi si usa ancora quella misurata sul canale 2).

$$\underline{V} = 31,7 \angle -115,4^\circ \text{ V}$$

$$\underline{I} = 0,630 \angle -116,9^\circ \text{ A}$$

$$\underline{Z} = \underline{V}/\underline{I} = 50,3 \angle 1,5^\circ \Omega$$

Si osserva che l'impedenza risultante da questo calcolo approssimato è circa 50Ω in accordo con quanto calcolato dagli schemi.

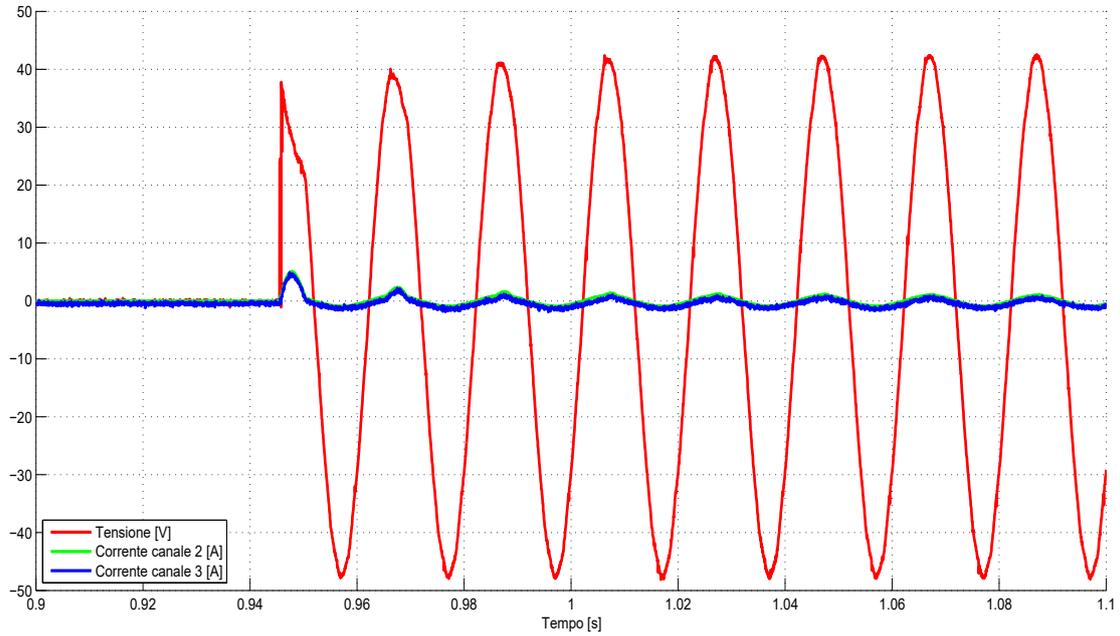


Figura 3.14: Banco a 1 (passaggio da banco a 0 a banco a 1) - Ingrandimento delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL

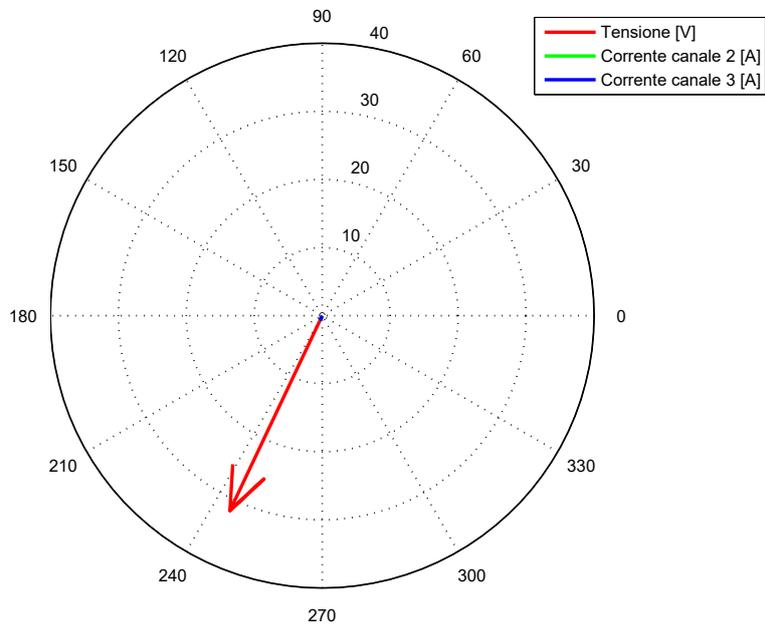


Figura 3.15: Banco a 1 (passaggio da banco a 0 a banco a 1) - Diagramma fasoriale delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL

In Tabella 3.5 si riassumono i risultati di questa serie di prove.

Le stesse prove sono state ripetute con le stesse modalità con la motrice 5002 senza effettuare le registrazioni, ma solo osservando i fenomeni e come lecito aspettarsi essa si è comportata in modo identico rispetto alla 5047 delle cui misure sono appena stati riportati i risultati.

I risultati ottenuti hanno quindi soddisfatto le attese e confermato l'ipotesi iniziale. I prossimi due step di misura sono verifiche di quanto ottenuto fino ad ora e servono a validare i risultati ottenuti con la prova precedente ed il modello proposto in precedenza.

Tabella 3.5: Risultati del primo set di prove effettuate allo stadio

Banco	Stato 1K1 e 1K2 prima dell'apertura dell'interruttore	Stato 1K1 e 1K2 dopo l'apertura dell'interruttore	Interruttore in blocco	Note
/	/	/	NO	Prova a vuoto
0	APERTI	APERTI	NO	/
AVANTI	CHIUSI	APERTI	NO	/
1 (IR chiusi)	CHIUSI	CHIUSI	SÌ	Passaggio da banco AVANTI a banco ad 1
1 (IR chiusi)	APERTI	APERTI	NO	Passaggio da banco a 0 a banco ad 1

3.3.2 Misure di impedenza con impedenzometro

Descrizione delle misure

Le misure di impedenza sono state eseguite in cabina, si sono collegati i coccodrilli positivi dell'impedenzometro al positivo della linea che alimenta la zona e i coccodrilli negativi al negativo in modo da misurare l'impedenza della motrice (il contributo della linea è minimo in quanto la motrice era parcheggiata immediatamente fuori dalla cabina).

Le misure sono state eseguite solo nei due casi di interesse, cioè con banco a 1 (ovviamente gli IR si intendono sempre chiusi) e contattori di filtro chiusi e con banco a 1 e contattori di filtro aperti. L'impedenzometro è stato impostato in modo da imporre all'impedenza incognita sempre una tensione di 5 V ma a tre frequenze diverse, 50 Hz , 500 Hz e 1000 Hz; in questo modo si misura l'impedenza equivalente della motrice ai tre livelli di frequenza impostati.

Le misure di impedenza sono state svolte solo sulla motrice 5047.

Risultati

In Tabella 3.6 si riportano i risultati delle misure di impedenza con banco a 1 contattori di filtro chiusi, mentre in Tabella 3.7 si riportano i risultati del caso con contattori di filtro aperti.

Tabella 3.6: Misure di impedenza banco a 1 e contattori di filtro chiusi

Frequenza [Hz]	Z [Ω]	Angolo [$^\circ$]
50	0,33	-40
500	4,87	83
1000	9,5	83

Tabella 3.7: Misure di impedenza banco a 1 e contattori di filtro aperti

Frequenza [Hz]	Z [Ω]	Angolo [$^\circ$]
50	51	-1
500	52	4
1000	53	8,5

I valori si di impedenza ottenuti a 50 Hz sono concordi a quanto ottenuto in precedenza e con quanto calcolato degli schemi quindi le misure di impedenza con l'impedenziometro confermano quanto già ottenuto in precedenza.

3.3.3 Validazione del modello mediante prove in DC

La validazione del modello è avvenuta confrontando i risultati ottenuti mediante delle prove in DC effettuate allo stadio con i risultati delle stesse prove in DC eseguite su LTspice (programma per la simulazione del funzionamento dei circuiti) considerando i modelli di motrice con banco a 1 con contattori aperti e chiusi riportati in precedenza. Se i risultati ottenuti allo stadio coincidono con quelli simulati, il modello è considerato validato. Innanzitutto si descrivono le misure effettuate allo stadio e se ne riportano i risultati, in seguito vengono descritti i modelli utilizzati su LTspice ed infine si esegue il confronto dei risultati.

Descrizione delle misure

Le misure sono avvenute in cabina e sono state eseguite collegando delle batterie da 48 V nominali ai capi della linea che alimenta la zona. Anche in questo caso le misure sono state eseguite solo per le due condizioni di interesse cioè banco ad 1 e contattori di filtro chiusi e banco a 1 e contattori di filtro aperti. In entrambe i casi si sono registrati gli andamenti di tensione e corrente tramite il registratore Hioki usato per le prove precedenti, il segnale

di tensione viene acquisito direttamente senza utilizzare la sonda differenziale di tensione mentre il segnale di corrente viene acquisito tramite un pinza amperometrica LEM PR30 adatta a misurare la DC. Le prove sono avvenute con le seguenti modalità:

- banco a 1 e contattori di filtro chiusi:
 - alimentazione della motrice con 600 V;
 - settare il banco AVANTI;
 - attendere la chiusura dei contattori di filtro;
 - settare il banco a 1 (IR chiusi);
 - apertura interruttore extrarapido di linea;
 - collegamento delle batterie;
 - inizio registrazioni e chiusura interruttore delle batterie;
 - stop registrazioni e apertura interruttore batterie;

- banco a 1 e contattori di filtro aperti:
 - lasciare interruttore extrarapido di linea aperto e batterie collegate;
 - aprire gli IR e settare il banco a 0;
 - settare il banco a 1 e chiudere gli IR;
 - inizio registrazioni e chiusura interruttore delle batterie;
 - stop registrazioni e apertura interruttore batterie;

Risultati

Gli andamenti di tensione e corrente registrati sono quelli riportati in Figura 3.16 e in Figura 3.17. La traccia rossa rappresenta la tensione mentre la traccia verde rappresenta la corrente.

Descrizione delle simulazioni su LTspice

Per eseguire le simulazioni su LTspice si sono utilizzati i modelli di Figura 3.4 per il caso con contattori chiusi ed il modello di Figura 3.3 per il caso con contattori aperti. A questi circuiti è stato semplicemente collegato il modello di una sorgente di tensione in DC che si comportasse come le batterie usate durante le prove allo stadio e si sono effettuate le simulazioni.

I circuiti utilizzati per eseguire le simulazioni sono quindi quelli di Figura 3.18 per il caso con contattori chiusi e di Figura 3.19 per il caso con contattori aperti.

I parametri usati per la sorgente di tensione sono stati scelti in funzione delle misure eseguite allo stadio. La prova con contattori aperti è stata eseguita dopo la prova con contattori chiusi, ciò significa che la carica della batteria non era la stessa e di conseguenza la tensione che la stessa era in grado di fornire non era la medesima. Per questo la tensione erogata dalla sorgente di tensione nei due modelli non è la stessa, essa è stata impostata in funzione della tensione misurata a regime nei due casi.

In Figura 3.20 e in Figura 3.21 si riportano i risultati delle simulazioni nel caso con contattori chiusi e con contattori aperti.

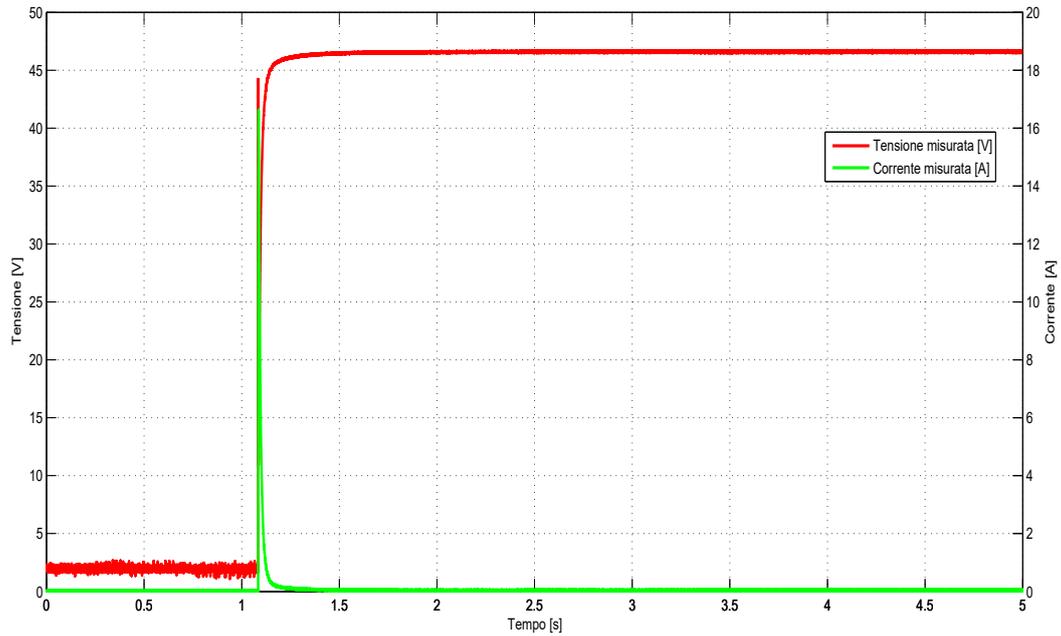


Figura 3.16: Prova Dc - Banco a 1 e contattori di filtro chiusi - Andamenti di tensione e corrente

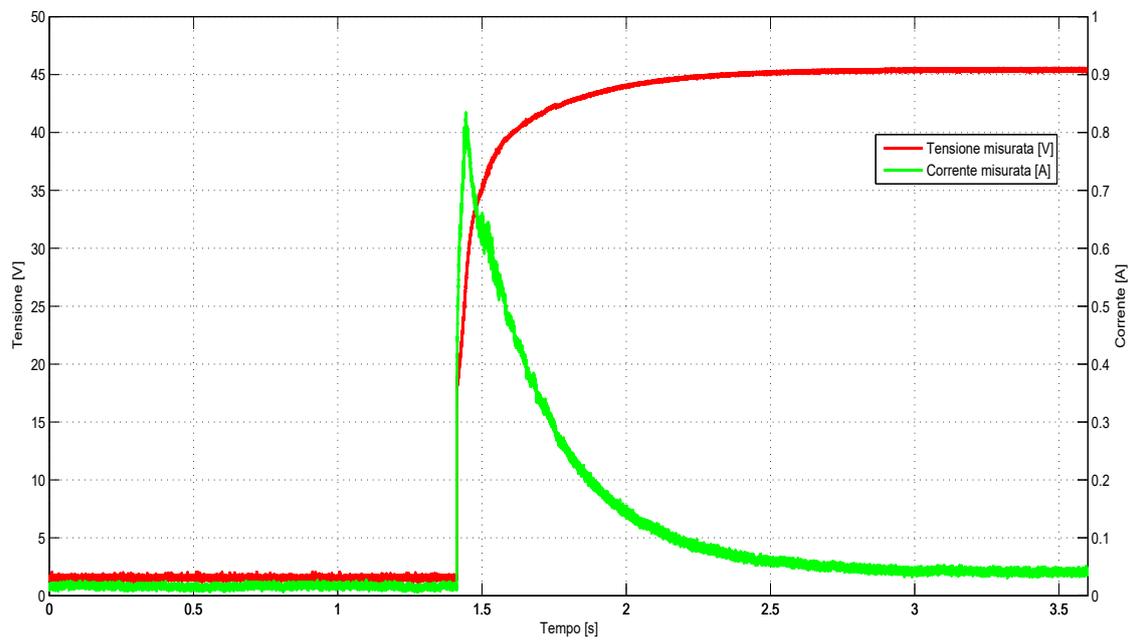


Figura 3.17: Prova Dc - Banco a 1 e contattori di filtro aperti - Andamenti di tensione e corrente

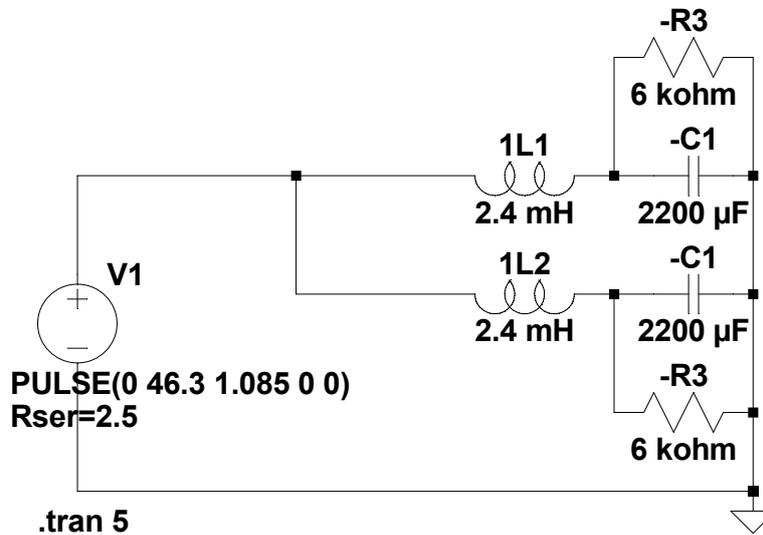


Figura 3.18: Prova Dc - Modello del circuito delle 5000 con banco a 1 e contattori chiusi usato su LTspice

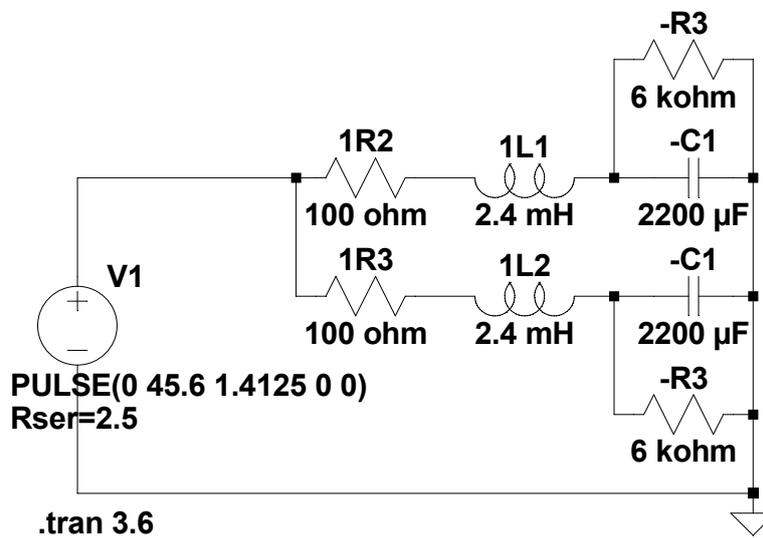


Figura 3.19: Prova Dc - Modello del circuito delle 5000 con banco a 1 e contattori aperti usato su LTspice

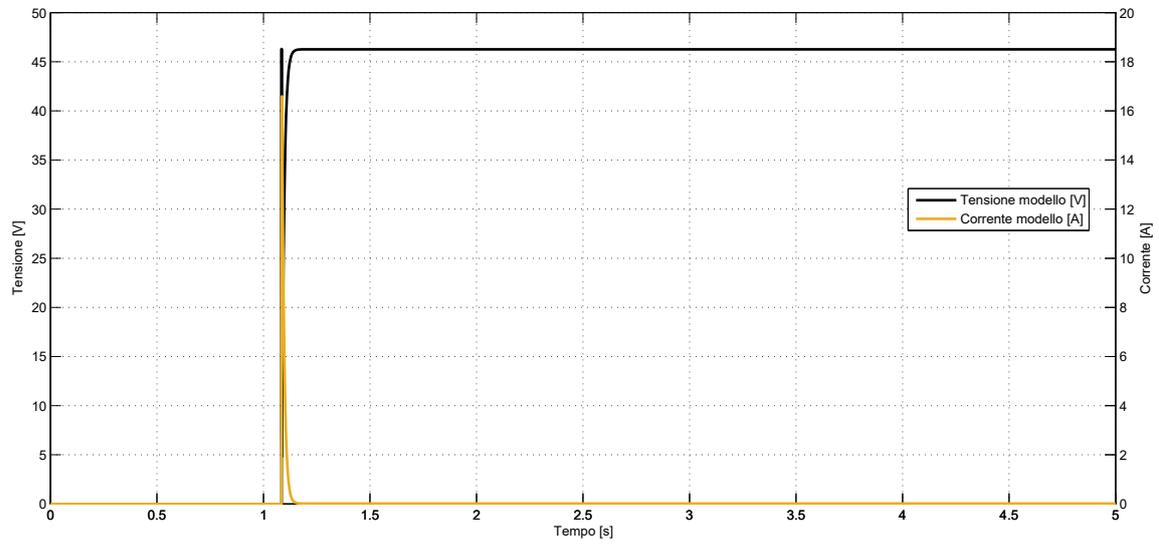


Figura 3.20: Prova Dc - Risultati della simulazione del caso con banco a 1 e contattori chiusi

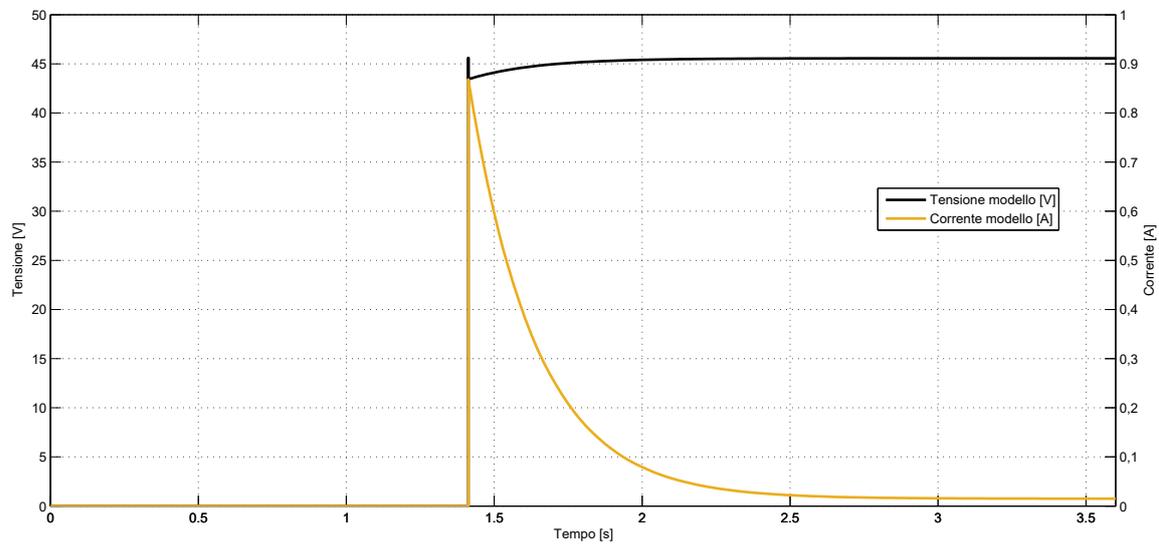


Figura 3.21: Prova Dc - Risultati della simulazione del caso con banco a 1 e contattori aperti

Confronto tra i risultati delle misure e delle simulazioni

In Figura 3.22 e in Figura 3.23 si riportano i confronti tra i risultati delle misure e delle simulazioni, rispettivamente per il caso con contattori chiusi e con contattori aperti.

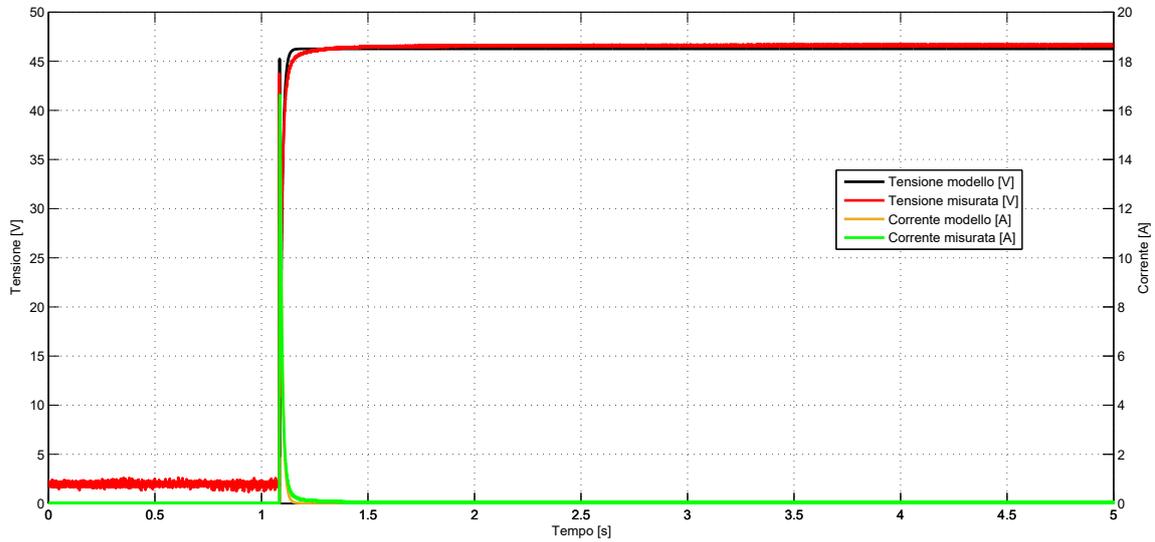


Figura 3.22: Prova Dc - Confronto tra i risultati del modello e le misure effettuate allo stadio, caso contattori chiusi

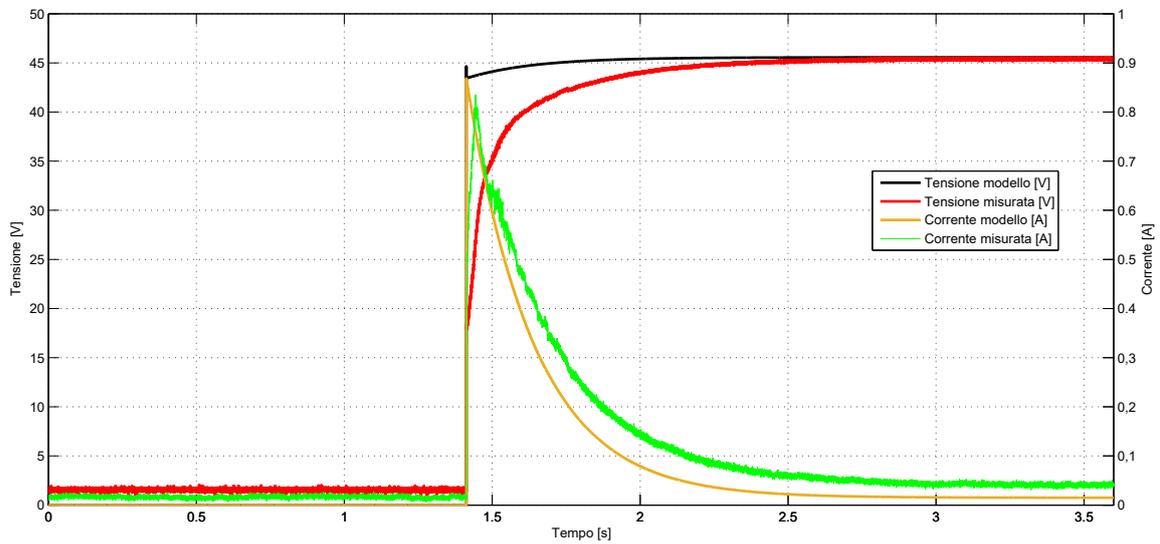


Figura 3.23: Prova Dc - Confronto tra i risultati del modello e le misure effettuate allo stadio, caso contattori aperti

I confronti evidenziano la bontà dei modelli proposti soprattutto nel caso con contattori chiusi, il caso con contattori aperti presenta invece qualche leggera imprecisione attribuibile alla scarica delle batterie, non rappresentata in modo troppo preciso nelle simulazioni. Quindi il confronto tra gli andamenti ottenuti con il modello LTspice e quelli misurati allo stadio validano i modelli di Figura 3.4 per il caso con contattori chiusi ed il modello di Figura 3.3 per il caso con contattori aperti.

3.4 Considerazioni finali

Le prove effettuate allo stadio appena descritte hanno permesso di validare le ipotesi effettuate.

I blocchi intempestivi degli interruttori extrarapidi delle varie zone sono quindi provocati dalla logica di controllo delle motrici 5000 che, probabilmente per un errore in fase di progettazione, quando il banco è a 1 e viene a mancare tensione non comanda l'apertura dei contattori di filtro (in tutti gli altri stati del banco, invece, al mancare della tensione i contattori di filtro vengono aperti).

La mancata apertura dei contattori di filtro rende l'impedenza equivalente della motrice molto bassa (circa $0,3 \Omega$ a 50Hz) e questo causa il fallimento delle prove DPL. Infatti considerando che il DPL ha un'impedenza interna di 3Ω , se la motrice ha un'impedenza equivalente di $0,3 \Omega$ quando viene eseguita la prova DPL (alimentazione di 30 V a 50 Hz) la corrente che circola in linea è di circa 10 A, un valore ben più elevato della soglia imposta dal DPL (5,5 A), a causa del quale la prova DPL fallisce.

Durante le prove effettuate in deposito Tortona l'impedenza equivalente delle motrici 5000 con banco ad 1 e IR chiusi risultava essere sempre pari a 50Ω perché i contattori di filtro non si chiudevano mai. Infatti tali prove sono state eseguite con le motrici non alimentate, di conseguenza la carica dei condensatori non avveniva ed i contattori di filtro non si chiudevano.

Un caso tipico in cui si può presentare il problema dei blocchi intempestivi è durante l'orario di punta, si immagina che in una certa zona durante l'orario di punta una motrice della serie 5000 sia ferma al capolinea con banco settato ad 1 e IR chiusi e che contemporaneamente sempre in quella zona due o tre motrici molto cariche richiedano la massima coppia disponibile. La corrente richiesta sarà molto elevata e molto probabilmente l'interruttore extrarapido di zona scatterà. A questo punto verrà tentata la richiusura e partiranno le prove DPL che in teoria dovrebbero andare a buon fine in quanto l'apertura non è stata provocata da un guasto permanente ma solo da un sovraccarico temporaneo, ciò però non accade a causa della presenza della motrice 5000 ferma al capolinea con banco a 1 e IR chiusi che crea un collegamento tra linea e binari a bassa impedenza che viene interpretato dal DPL come un guasto. Quindi le prove DPL falliscono e viene comandato il blocco dell'interruttore di linea. Gli operatori di rete, rilevato il blocco dell'interruttore, ricercheranno il guasto ma non troveranno nulla. Quando essi proveranno a richiudere l'interruttore, la richiusura andrà a buon fine in quanto verrà imposto l'abbassamento dei pantografi di tutte le motrici presenti nella zona ma il servizio sarà rimasto interrotto per qualche decina di minuti.

Per risolvere il problema sarebbe quindi necessario intervenire sulla logica di controllo e modificarla in modo che anche quando il banco è settato ad 1 con IR chiusi, se viene tolta tensione, i contattori di filtro si aprano. Tale soluzione però risulta impraticabile in quanto avrebbe dei costi eccessivi. Infatti, siccome si andrebbe a modificare il programma di controllo delle motrici, sarebbe necessario omologare nuovamente tutte le vetture, operazione molto costosa e non giustificata dall'età delle 5000.

Una soluzione alternativa potrebbe essere quella di installare sulle vetture della serie 5000 dei relè temporizzati di minima tensione. Tali relè potrebbero essere tarati in modo che quando la tensione misurata ai capi della motrice sta sotto una certa soglia per più di un certo numero di secondi, essi forzino l'apertura dei contattori di filtro indipendentemente dalla logica di controllo. In questo modo se venisse tolta tensione alla motrice (a seguito dell'apertura dell'interruttore extrarapido) il relè se ne accorgerebbe e forzerebbe l'apertura dei contattori a prescindere dallo stato del banco della motrice. Quando verrebbe poi tentata la richiusura dell'extrarapido e quindi comincerebbero le prove DPL, anche se in rete fosse presente una motrice 5000 ferma con banco a 1 e IR chiusi, la sua impedenza equivalente non risulterebbe più essere di circa $0,3 \Omega$, ma di circa 50Ω , di conseguenza la corrente circolante in linea non sarebbe più di circa 10 A ma molto più bassa, quindi le prove DPL andrebbero a buon fine e la richiusura sarebbe concessa. Per rendere l'intervento il più sicuro possibile per la motrice è necessario integrare questa soluzione, in modo che l'apertura forzata dei contattori di filtro avvenga solo quando il banco è settato a 1 ed a motrici ferme. Ciò per evitare che in caso di guasto al relè di tensione si provochino guasti alla resistenza di precarica la quale non è progettata per sostenere le correnti di trazione. Piuttosto che utilizzare dei relè è quindi verosimile progettare una scheda di controllo dedicata all'apertura dei contattori di filtro che ne comandi l'apertura solo in caso che tutte e tre le condizioni (tensione inferiore alla soglia, banco a 1 e motrice ferma) perdurino per un tempo impostato.

Capitolo 4

Analisi delle sovratensioni sulla rete che hanno portato allo scoppio di scaricatori

La necessità di questo studio nasce dai numerosi scoppi che negli ultimi anni hanno interessato gli scaricatori di sovratensione installati nelle cabine della rete tranviaria torinese. Tali eventi, oltre ad essere un rischio per gli operatori e per le apparecchiature determinano gravi disservizi sulla rete tranviaria.

È importante sottolineare che gli scaricatori sono stati installati per la protezione della rete contro le sovratensioni di origine atmosferica. Tuttavia le sovratensioni responsabili degli scoppi non sono di origine atmosferica in quanto i guasti si sono verificati in assenza di eventi temporaleschi.

Dal momento che la frequenza degli scoppi si è intensificata negli ultimi anni, si suppone che i guasti agli scaricatori siano legati alle motrici 5000 il cui servizio è stato esteso a tutta la rete solo nel 2016 (prima circolavano solo su qualche linea).

Per provocare lo scoppio degli scaricatori, le sovratensioni devono avere un contenuto energetico molto elevato. Tuttavia è possibile che lo scoppio di uno scaricatore non sia causato da un unico evento di contenuto energetico elevatissimo, ma da una serie di eventi a contenuto energetico ridotto che logorano poco alla volta il componente fino a determinarne il cedimento.

In Figura 4.1 si riporta un esempio di scaricatore scoppiato in cabina.

Al fine di caratterizzare le sovratensioni che si sviluppano in rete durante il funzionamento ordinario si sono effettuate delle misure di tensione su una zona (considerare tutta la rete sarebbe stato impraticabile). I risultati delle misure sono poi stati elaborati tramite un'analisi statistica atta a classificare le sovratensioni in base al picco, alla durata, al momento ed alle condizioni in cui si manifestano. Infine, si è approfondito il legame tra le sovratensioni e le motrici 5000.



Figura 4.1: Esempio di scaricatore scoppiato in cabina

4.1 Misura delle sovratensioni che si sviluppano in una zona durante il funzionamento ordinario

Siccome effettuare delle misure di tensione su tutta la rete sarebbe stato impraticabile, le misure sono state eseguite su un'unica zona, in particolare la zona Sabotino.

Le misure sono avvenute dal 30/10/17 al 14/11/17 e sono consistite nel registrare le sovratensioni che si sviluppano nella zona durante il funzionamento ordinario tramite un registratore digitale Hioki di proprietà di InfraTO. Lo strumento è stato installato a fondo linea (in cabina Duca d'Aosta) ed è stato configurato in modo che registrasse solo tensioni maggiori di 800 V e che registrasse per 10 s prima e 10 s dopo il superamento della soglia in modo da avere una descrizione completa del fenomeno. La soglia è stata impostata a 800 V (nonostante la tensione nominale sia di 600 V) perché impostandola ad un livello più basso si sarebbero registrate un numero enorme di misure e la maggior parte sarebbe stata poco significativa dal punto di vista di questo lavoro. Le misure vengono effettuate a fondo linea in quanto dal punto di vista delle sovratensioni è la condizione peggiore, sia per la linea stessa che per gli scaricatori. Infatti le rilevazioni vengono effettuate in cabina Duca d'Aosta che funge da riserva fredda alla zona che è alimentata prioritariamente dalla cabina San Paolo. Uno schema semplificato di come era alimentata la zona e del posizionamento del registratore durante le misure è riportato in Figura 4.2.

Le sovratensioni misurate durante i 15 giorni in cui sono state effettuate le misure sono state 207. Dall'osservazione delle registrazioni è stato possibile suddividere le sovratensioni qualitativamente in base alla loro durata in due categorie:

- sovratensioni impulsive;
- sovratensioni lunghe.

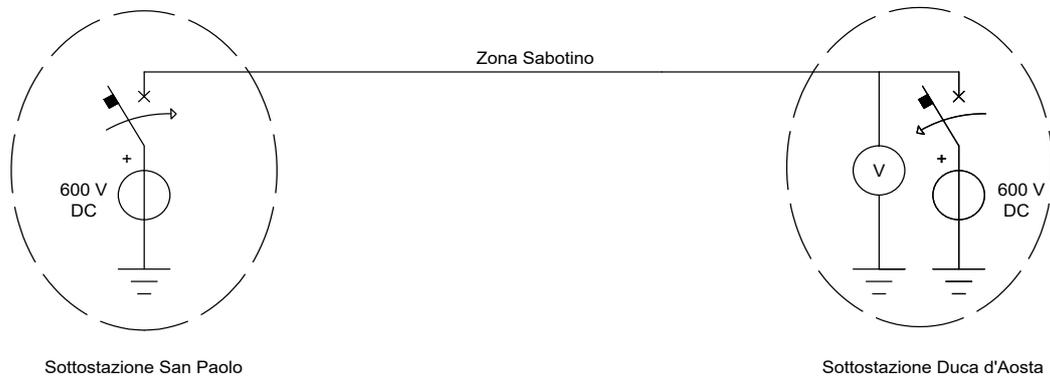


Figura 4.2: Alimentazione delle zona Sabotino durante le misure

Le sovratensioni impulsive hanno durata di qualche millisecondo ed anche se possono raggiungere picchi elevati non hanno un contenuto energetico elevato. Le sovratensioni lunghe, invece, oltre ad avere dei picchi discretamente elevati possono avere delle durate di qualche secondo, ragione per cui, visto l'elevato contenuto energetico, si sono subito identificate come possibili cause dei guasti agli scaricatori.

Un esempio di sovratensione impulsiva è riportato in Figura 4.3, mentre un esempio di sovratensione lunga è riportato in Figura 4.4.

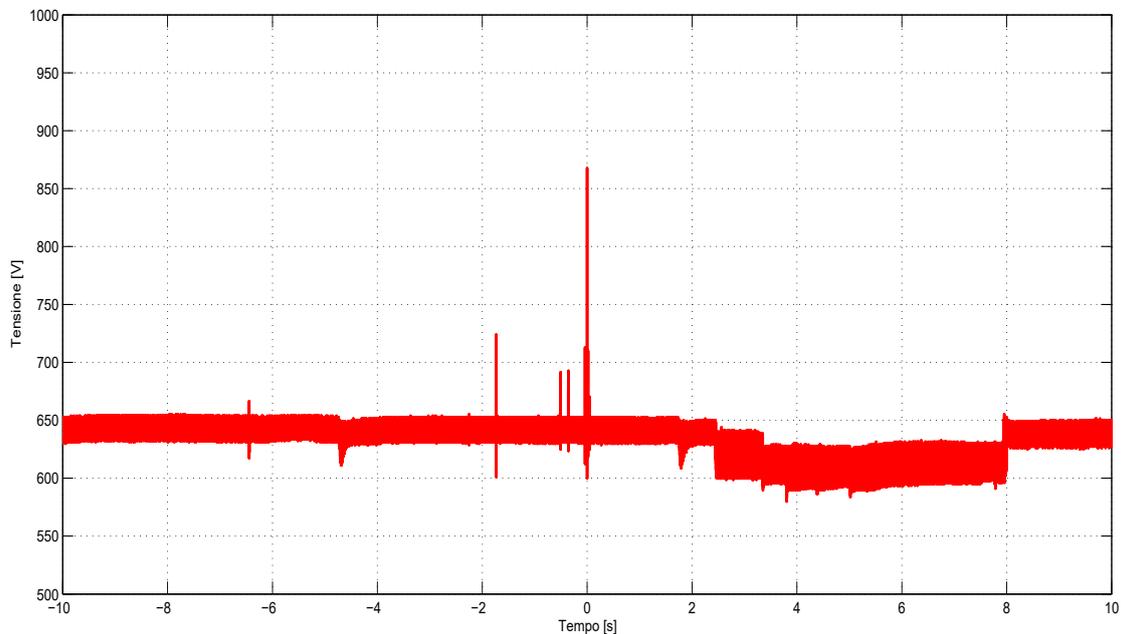


Figura 4.3: Esempio di sovratensione impulsiva

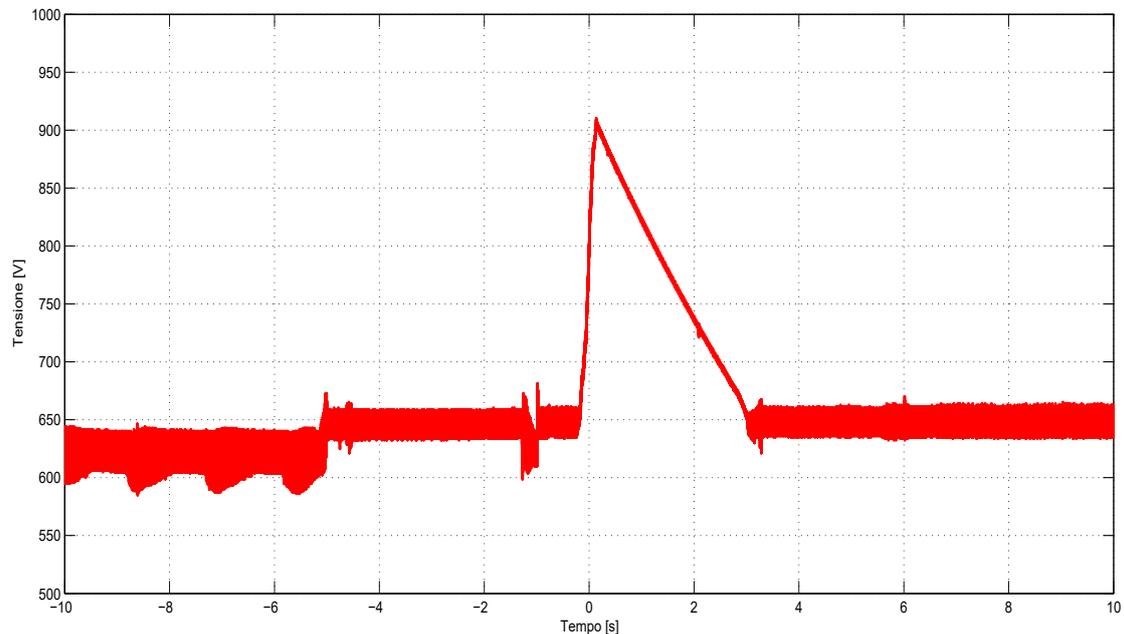


Figura 4.4: Esempio di sovratensione lunga

4.2 Analisi statistica delle sovratensioni che si sviluppano in una zona durante il funzionamento ordinario

Dalle registrazioni è stato possibile risalire a diverse informazioni:

- ora e giorno a cui è avvenuta la sovratensione;
- picco della sovratensione;
- durata della sovratensione;

sulla base delle quali è stato possibile effettuare l'analisi statistica.

4.2.1 Statistica oraria

La statistica oraria serve a mettere in evidenza se le sovratensioni registrate che superano gli 800 V (sia impulsive che lunghe) avvengono con più frequenza ad una certa ora rispetto ad un'altra. L'analisi è stata effettuata considerando solamente l'orario in cui la sovratensione è avvenuta (non la data) ed è consistita nel suddividere la giornata in blocchi da 10 minuti e nel contare il numero di occorrenze che si sono verificate in ogni blocco. Il risultato della statistica oraria è riportato in Figura 4.5.

Dalla statistica emerge che le sovratensioni si distribuiscono in maniera abbastanza omogenea lungo tutto l'arco della giornata e non si riscontrano periodi in cui avvengono con più frequenza rispetto ad altri. Nel periodo che va dall'1:00 alle 4:00 (circa) il servizio è interrotto e le sovratensioni rilevate sono dovute allo spostamento delle motrici fuori servizio che entrano o escono dal deposito.

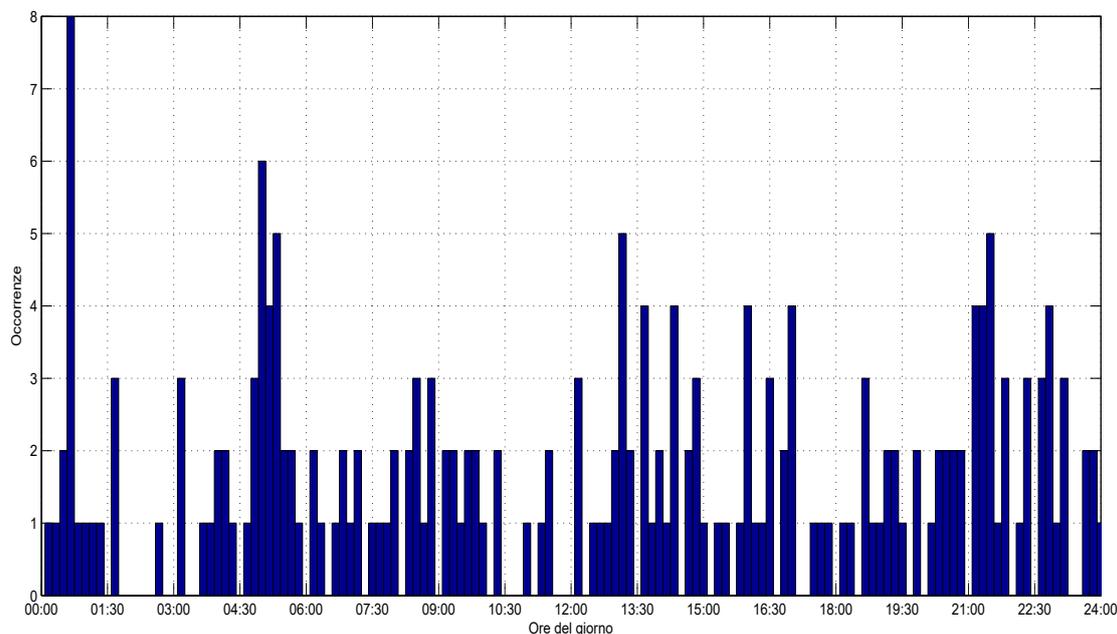


Figura 4.5: Statistica oraria delle sovratensioni

4.2.2 Statistica dei picchi

La statistica dei picchi serve a mettere in evidenza il valore massimo che raggiungono le sovratensioni registrate.

Per prima cosa si è costruito un diagramma che mostrasse con quale occorrenza le sovratensioni raggiungono un certo picco (Figura 4.6) ed in seguito si è tracciata la cumulata dei picchi (Figura 4.7).

Quello che emerge è che nella maggior parte dei casi le sovratensioni registrate hanno dei picchi compresi tra 800 V e 900 V (nell' 80 % dei casi circa), ma anche se con bassa percentuale possono essere raggiunti dei picchi molto elevati. Il massimo picco rilevato è stato infatti di circa 1450 V.

Il diagramma di Figura 4.8 mette in relazione i picchi con il giorno in cui sono avvenuti.

Dal diagramma emerge innanzitutto che i picchi più elevati non si sono presentati tutti in un giorno particolare, bensì sono distribuiti lungo tutti i giorni su cui sono state effettuate le misurazioni. Soprattutto si è potuto osservare che anche le sovratensioni in generale sono distribuite in modo uniforme lungo tutto il tempo di misurazione e quindi i giorni festivi (come il 1° Novembre o le domeniche) non differiscono da quelli feriali.

Infine, in Figura 4.9 si sono messi in relazione i picchi delle sovratensioni con le ore a cui esse sono avvenute.

Anche dal diagramma orario emerge che i picchi più elevati non si presentano ad ore particolari ma avvengono in momenti casuali della giornata.

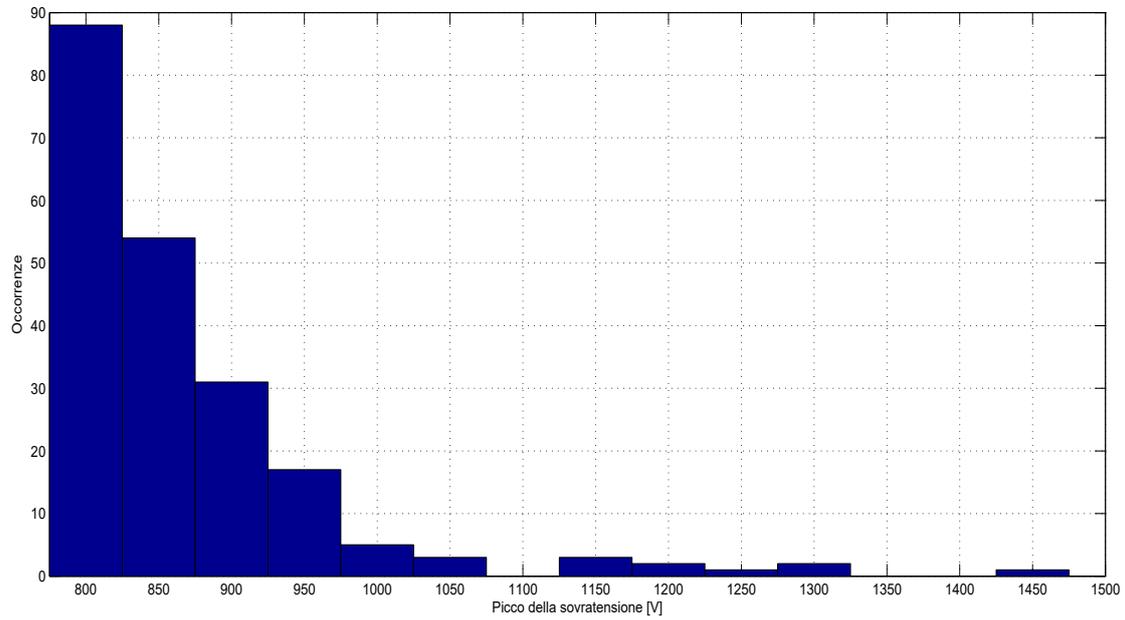


Figura 4.6: Istogramma delle occorrenze dei picchi

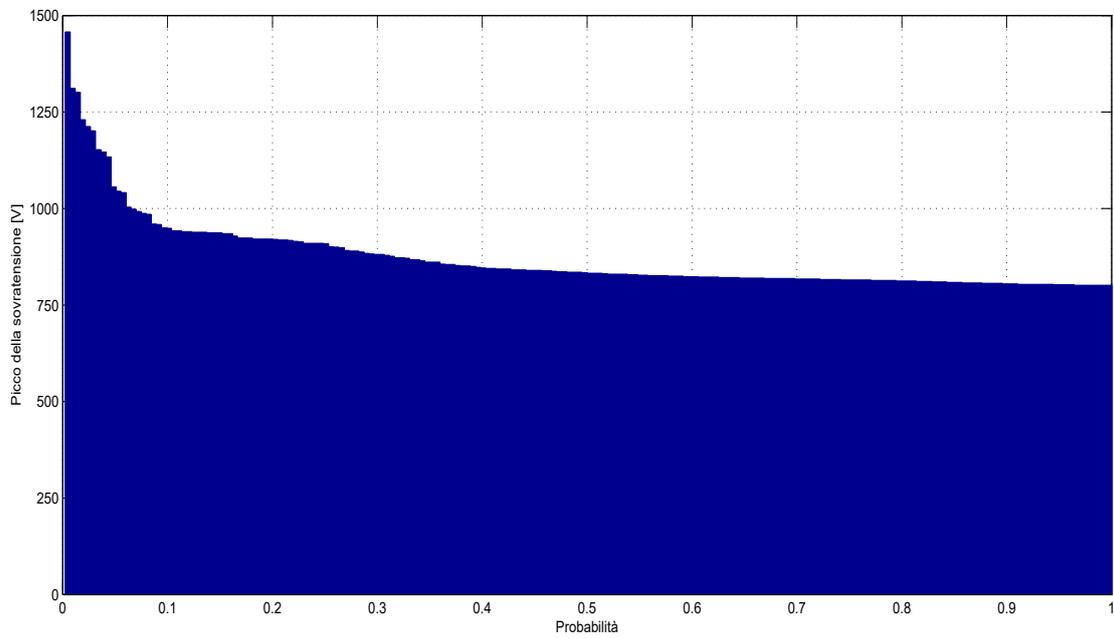


Figura 4.7: Cumulata dei picchi

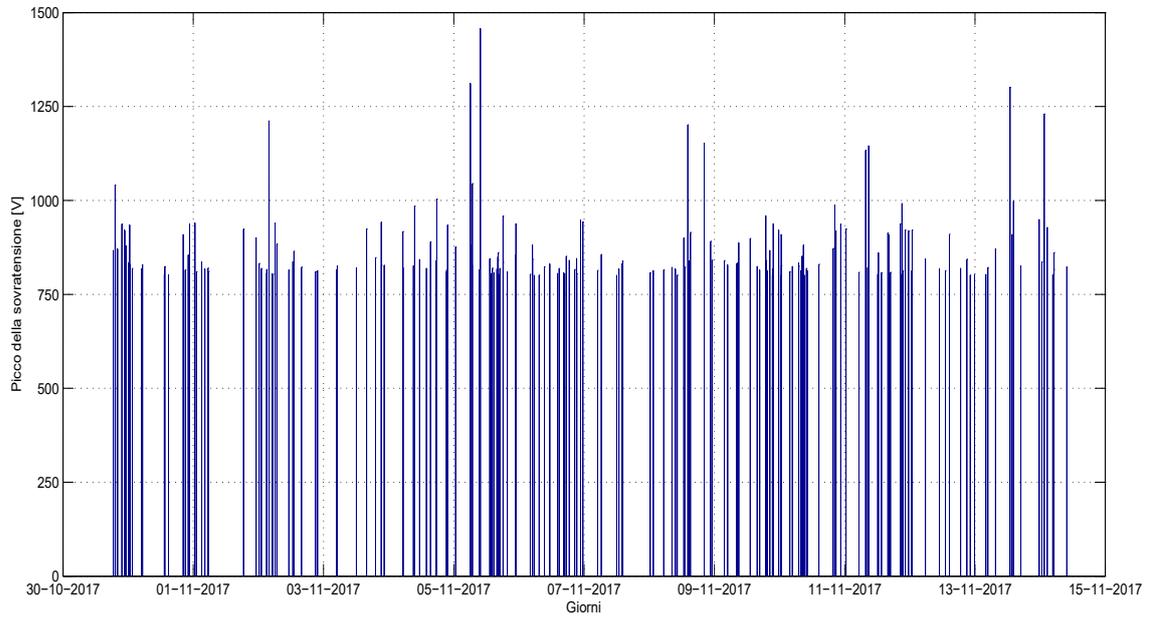


Figura 4.8: Diagramma giornaliero dei picchi

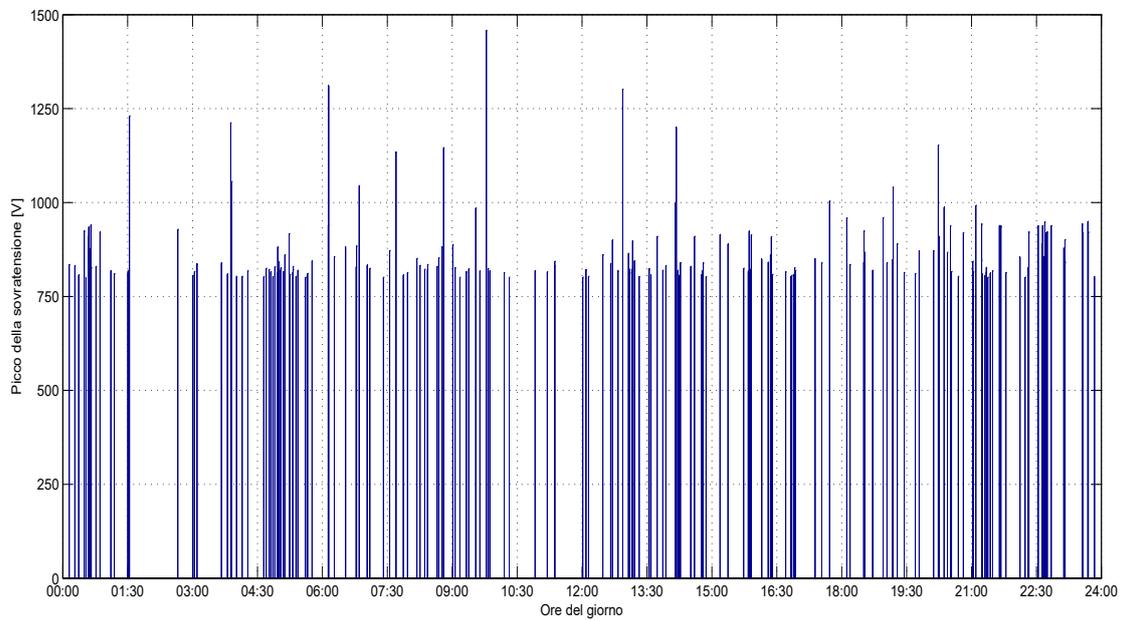


Figura 4.9: Diagramma orario dei picchi

Dalla statistica dei picchi è quindi emerso che esistono delle sovratensioni aventi picchi molto elevati, ma la probabilità che esse si verificano è molto bassa. Inoltre tali picchi di alto valore non avvengono in giorni particolari o in momenti particolari della giornata, ma avvengono in maniera casuale.

4.2.3 Statistica delle durate

La statistica delle durate serve a classificare le sovratensioni in funzione della loro durata. La durata è intesa come il tempo per cui la tensione è maggiore di 700 V (la tensione nominale è di 600 V).

Analogamente a quanto fatto per i picchi per prima cosa si è costruito un diagramma che mostrasse con quale occorrenza le sovratensioni hanno una certa durata (Figura 4.10) ed in seguito si è tracciata la cumulata delle durate (Figura 4.11).

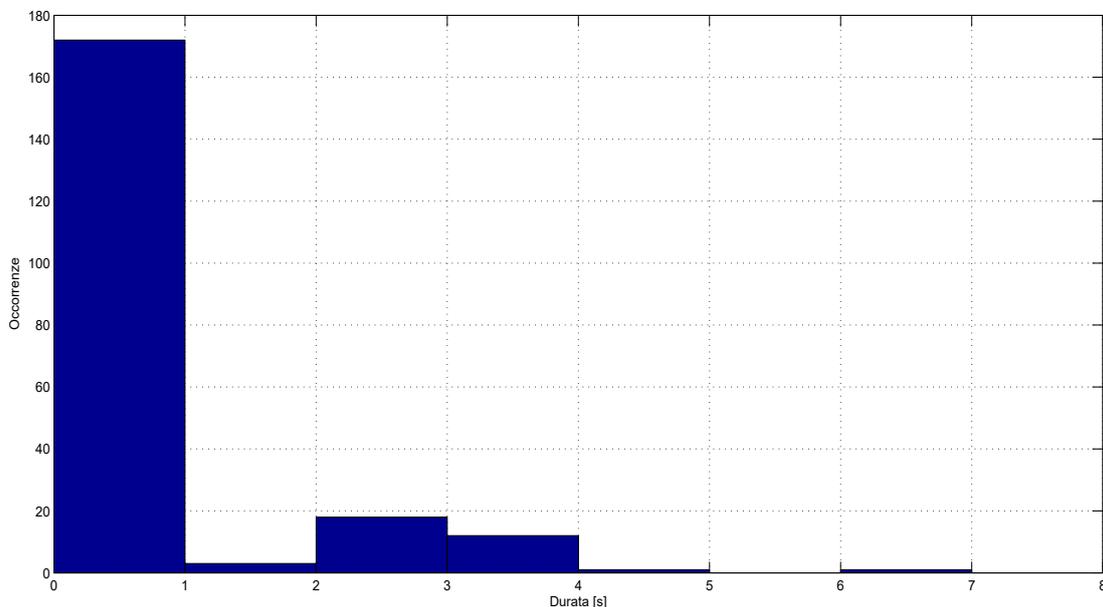


Figura 4.10: Istogramma delle occorrenze delle durate

Quello che emerge è che la maggior parte delle sovratensioni ha durata minore di 1 s, questo era atteso, in quanto tutte le sovratensioni di tipo impulsivo rientrano in questa categoria. Esistono comunque delle sovratensioni di durata molto importante, infatti la massima durata rilevata è di circa 6 s. Dalla cumulata si può osservare che solo nel 30 % dei casi le sovratensioni sono di durata non trascurabile e che solo nel 18 % circa dei casi si hanno sovratensioni maggiori di 1 s.

Il diagramma di Figura 4.12 mette in relazione le durate delle sovratensioni in funzione dei giorni in cui esse sono avvenute.

Dal diagramma emerge che sia le sovratensioni di lunga durata che quelle impulsive sono distribuite uniformemente lungo tutto il periodo di misurazione, non concentrandosi in giorni particolari come ad esempio i festivi.

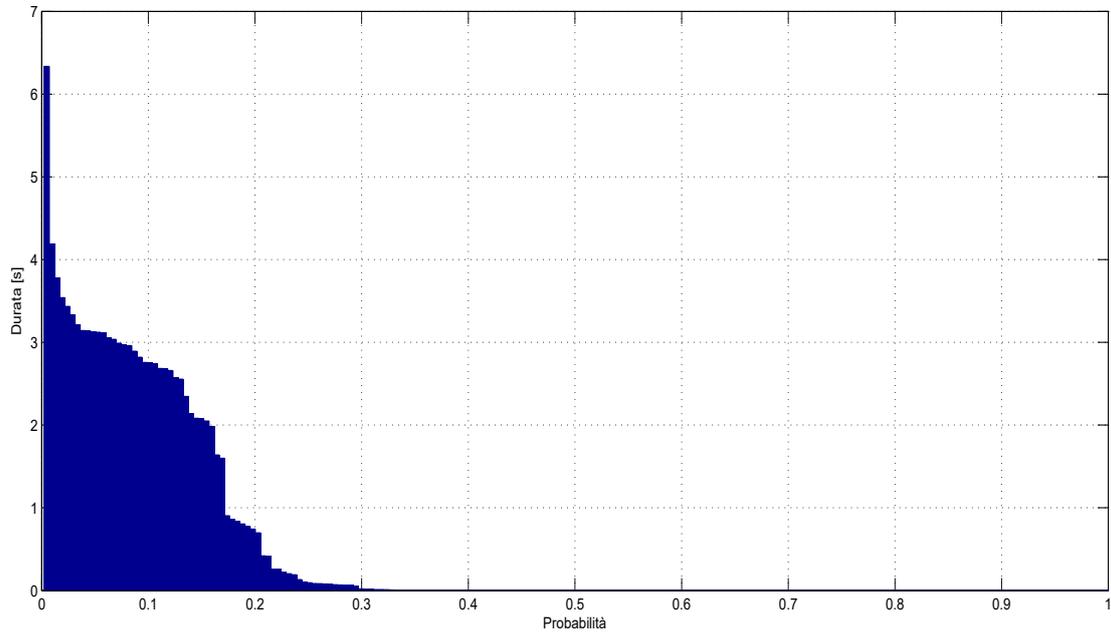


Figura 4.11: Cumulata delle durate

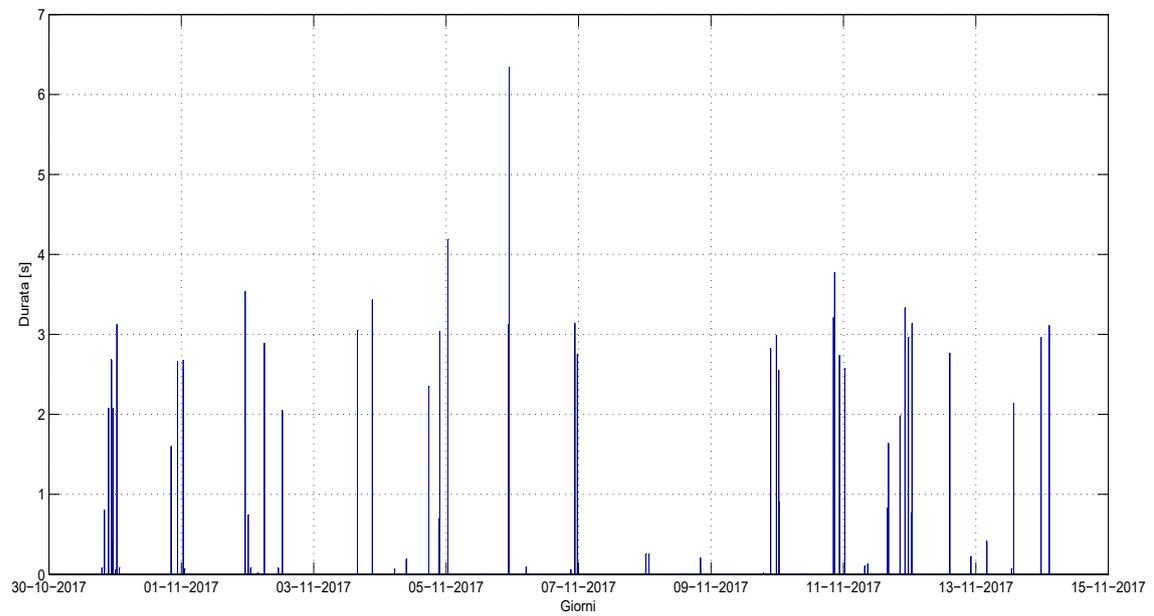


Figura 4.12: Diagramma giornaliero delle durate

Infine, in Figura 4.13 si sono messi in relazione le durate delle sovratensioni con le ore a cui esse sono avvenute.

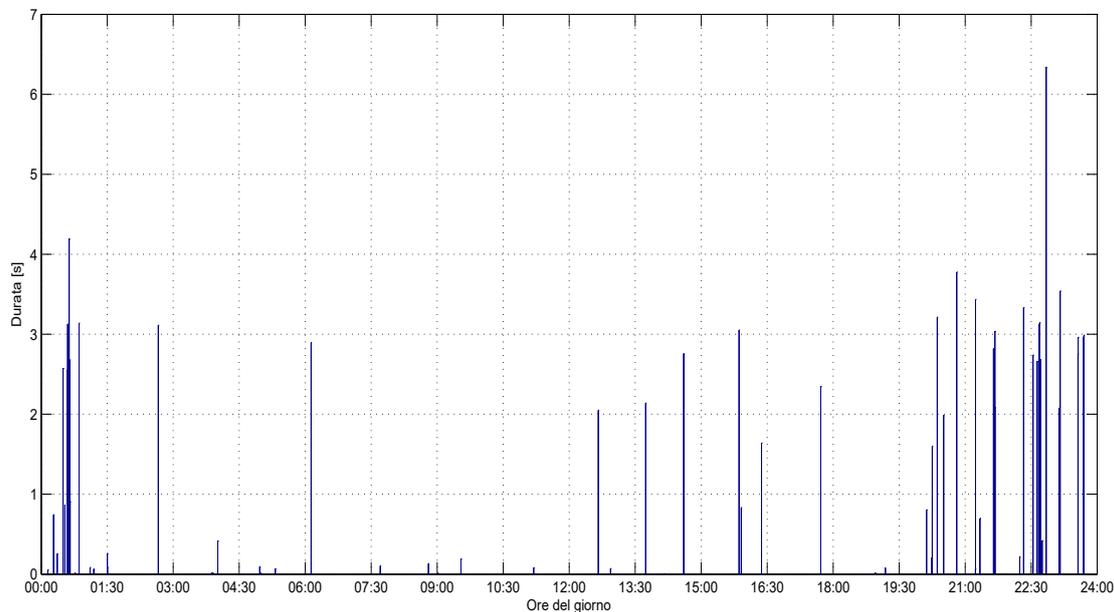


Figura 4.13: Diagramma orario delle durate

Quello che emerge dal diagramma è che le sovratensioni aventi lunga durata si concentrano principalmente nelle ore notturne, cioè quando circola un numero minore di motrici, mentre quelle impulsive sono distribuite lungo tutto l'arco della giornata.

Quanto detto è messo ancora più in evidenza nei grafici di Figura 4.14 e di Figura 4.15, rispettivamente il diagramma orario delle sovratensioni impulsive e delle sovratensioni lunghe. In questo caso la distinzione tra sovratensioni impulsive e lunghe non è più qualitativa, si sono considerate impulsive le sovratensioni che superano 700 V per una durata minore di 20 ms mentre sono considerate lunghe le sovratensioni che superano 700 V per una durata maggiore di 20 ms.

4.2.4 Statistica combinata di durate e picchi

Questa statistica serve a mettere in relazione il picco e la durata delle sovratensioni registrate in modo da poter avere un'idea del loro contenuto energetico. Il diagramma di tale statistica è riportato in Figura 4.16. Per ogni sovratensione è riportata l'ora a cui avvenuta sull'asse delle ascisse e il picco raggiunto sull'asse delle ordinate. La durata di ogni evento invece è proporzionale all'area della circonferenza che lo identifica.

Il diagramma conferma che le sovratensioni con maggiore contenuto energetico sono quelle lunghe e che queste si sviluppano principalmente in orari notturni cioè quando presente un minor numero di motrici. Dal diagramma emerge inoltre che la maggior parte delle sovratensioni lunghe ha un picco compreso tra 900 e 1000 V anche se esistono sovratensioni con picco maggiore di 1000 V di durata non trascurabile.

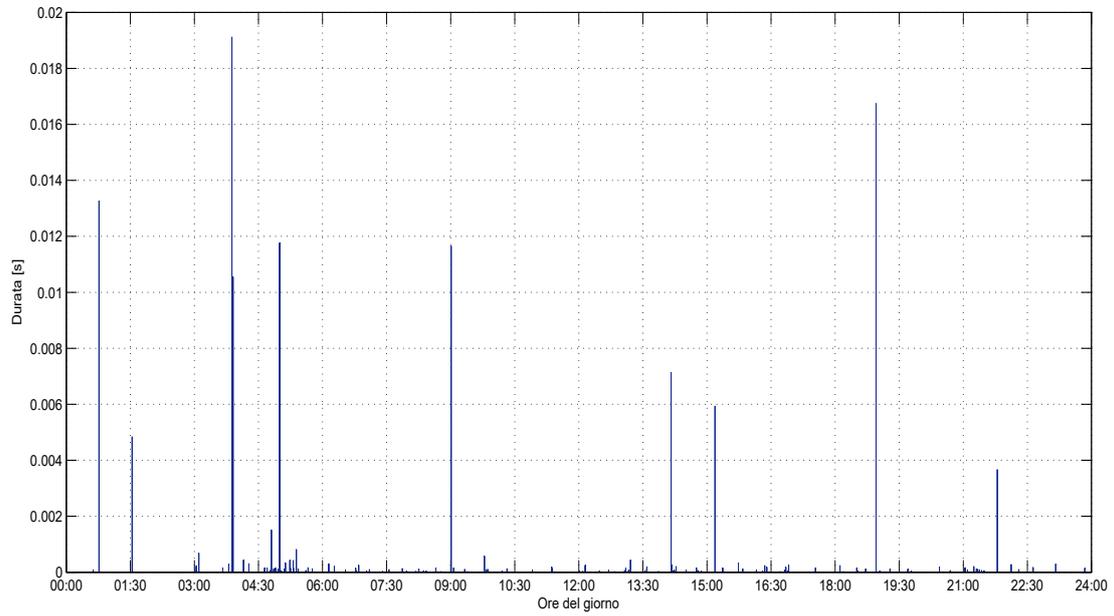


Figura 4.14: Diagramma orario delle sovratensioni impulsive

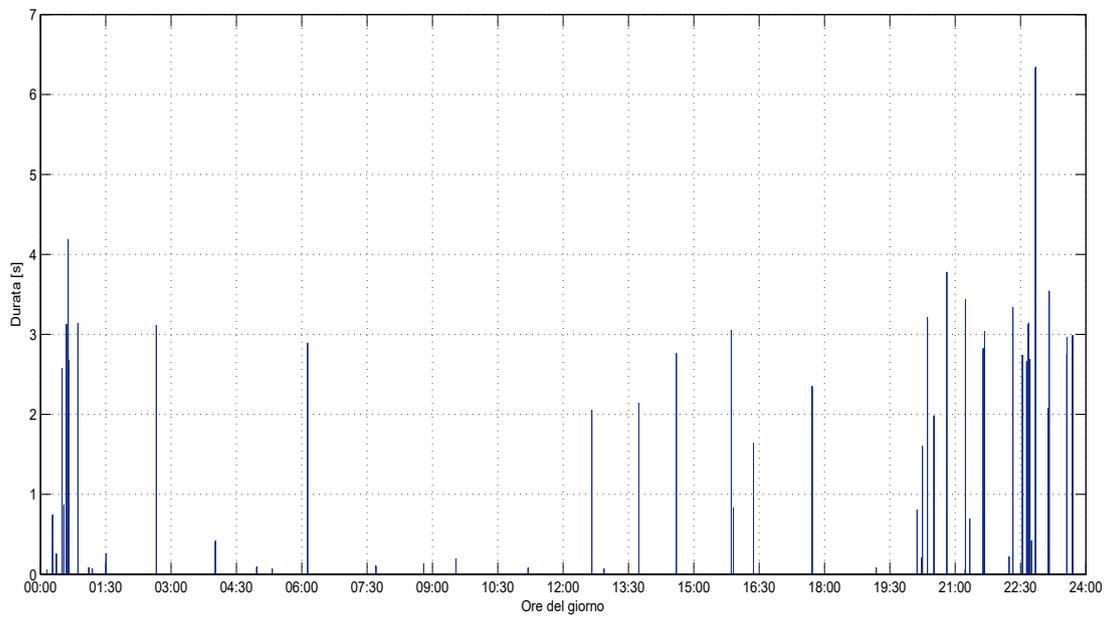


Figura 4.15: Diagramma orario delle sovratensioni lunghe

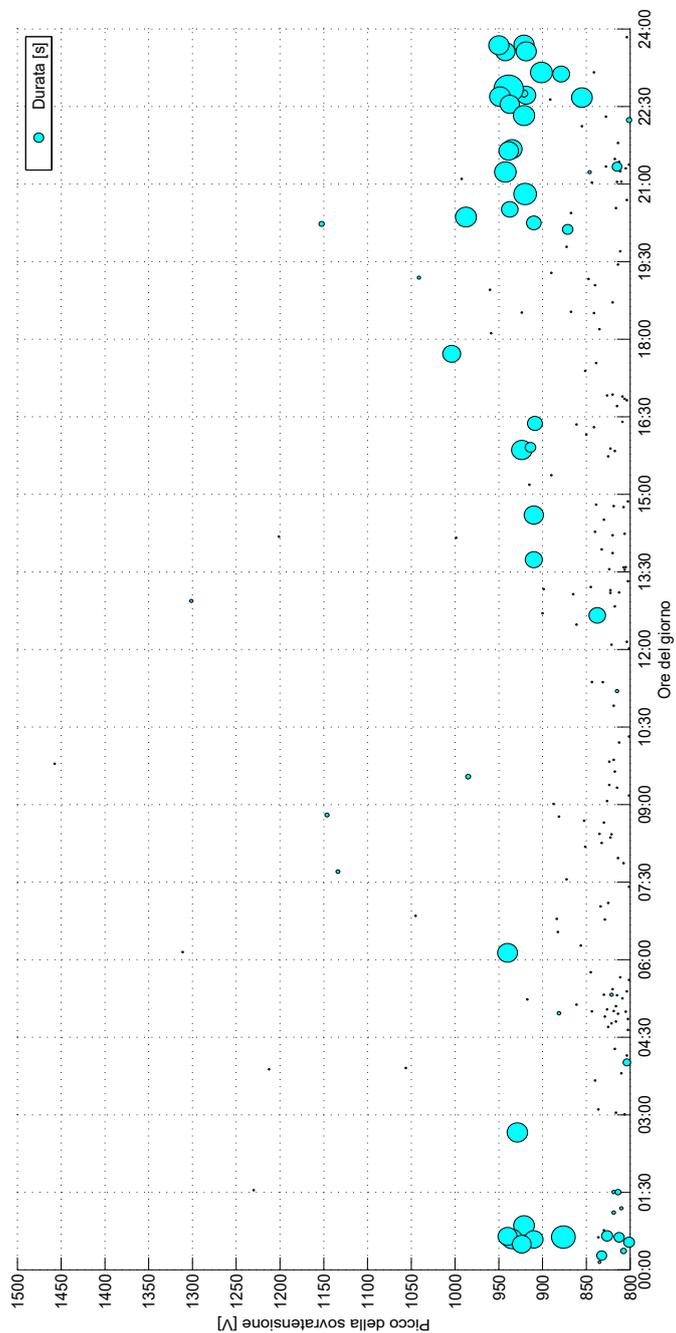


Figura 4.16: Statistica combinata di durate e picchi

4.3 Considerazioni finali sulle misure di tensione eseguite in zona Sabotino

L'analisi effettuata sulle tensioni misurate in zona Sabotino ha evidenziato che durante il funzionamento ordinario in rete si sviluppano due tipi di sovratensione, le sovratensioni impulsive e quelle lunghe.

Le sovratensioni impulsive presentano picchi elevati (fino a circa 1450 V), ma hanno durata brevissima (qualche millisecondo), di conseguenza il loro contenuto energetico è ridotto. Queste sovratensioni non vengono quindi ritenute responsabili degli scoppi degli scaricatori. Tali sovratensioni non avvengono in giorni o in momenti della giornata particolari, infatti si sono verificate in modo casuale lungo tutto il periodo di misurazione. È ipotizzabile che le sovratensioni impulsive siano sovratensioni di manovra causate dai numerosi archi elettrici che si creano durante il funzionamento ordinario della rete. Come affermato in [11] tra le operazioni che possono provocare sovratensioni di manovra in una rete tranviaria DC, vi sono:

- Interruzione da parte di interruttori.

Le interruzioni della corrente in DC generano archi elettrici con sovratensioni transitorie dell'ordine di 2,5 volte la tensione nominale del sistema.

- Contatto irregolare tra pantografo e linea di contatto.

Il contatto irregolare tra il pantografo e la linea di contatto è causa di archi elettrici. L'intensità dell'arco e della sovratensione associata possono dipendere da diversi fattori come dalla corrente che sta assorbendo la motrice, la velocità del veicolo, la distanza che si crea tra pantografo e linea di contatto e le condizioni meteo.

Con riferimento a quanto detto le sovratensioni impulsive registrate possono quindi essere causate da:

- Passaggio delle motrici sotto i divisori di zona.

Da regolamento il passaggio delle motrici sotto i divisori di zona dovrebbe avvenire in coasting (marcia inerziale) cioè senza trazionare. Quando per una svista il tranviere trazione durante il passaggio sotto un divisore di zona si crea un arco elettrico e di conseguenza una sovratensione.

- Passaggio delle motrici sotto gli incroci;

Gli incroci tra le linee aeree che formano angoli vicini a 90 gradi sono protetti da apposite piastre (Figura 4.17) che impediscono che il pantografo subisca colpi. Nonostante le piastre siano opportunamente sagomate, quando il pantografo giunge in corrispondenza di una di queste subisce un abbassamento la cui entità dipende dalla velocità della motrice. Transitando con trazione elettrica inserita ed in velocità, lo strisciante si stacca momentaneamente dalla rete provocando un arco elettrico e di conseguenza una sovratensione.

- apertura degli IR a bordo delle motrici.



Figura 4.17: Piastra di metallo posizionata in corrispondenza di un incrocio

Per quanto riguarda le sovratensioni lunghe, esse presentano picchi discretamente elevati (nella maggior parte dei casi compresi tra 900 V e 1000 V) ed hanno durate di qualche secondo (la più lunga dura circa 6 s). È evidente che il contenuto energetico di tali sovratensioni è nettamente più elevato di quello delle sovratensioni impulsive. Si suppone quindi che, a differenza di quanto detto per le sovratensioni impulsive, esista un legame tra le sovratensioni lunghe e gli scoppi degli scaricatori. Siccome durante il periodo in cui si sono effettuate le misure, in zona Sabotino non si sono verificati scoppi, si ritiene che le sovratensioni lunghe, sviluppandosi più volte al giorno tutti i giorni, provochino un deterioramento progressivo degli scaricatori che culmina nello scoppio. Si scarta quindi la possibilità che gli scoppi siano causati da singoli eventi con contenuto energetico molto elevato.

L'analisi statistica ha messo in evidenza che le sovratensioni lunghe si verificano con maggiore frequenza in periodi della giornata in cui vi è un ridotto traffico tranviario. Tale informazione induce a pensare che tali eventi siano legati ad una non perfetta gestione della frenata rigenerativa delle motrici. Infatti quando in rete non sono presenti motrici in grado di assorbire l'energia recuperata da una motrice in frenata, il recupero dovrebbe essere impedito. Essendo i raddrizzatori presenti in cabina unidirezionali, è impossibile immettere corrente nella rete MT. Quindi, se anche per un breve tempo, una motrice in frenata inietta una corrente che nessun'altra motrice può assorbire, tale corrente va a caricare i condensatori presenti in rete innalzando il livello di tensione. La tensione torna al suo valore nominale quando si attiva la frenata reostatica e quindi le capacità possono scaricarsi.

4.4 Influenza delle motrici della serie 5000 sulle sovratensioni in rete

Come accennato in precedenza, l'intensificarsi degli scoppi degli scaricatori di sovratensione è coinciso con l'estensione del servizio delle motrici 5000 a tutta la rete. Per questo motivo si suppone che vi sia un legame tra questa motrici e le sovratensioni.

Alla luce di quanto emerso dall'analisi statistica si sospetta quindi che la frenata rigenerativa delle motrici 5000 sia la fonte delle sovratensioni lunghe osservate in zona Sabotino.

Al fine di verificare tale ipotesi si sono effettuate delle misure di tensione a bordo di una motrice 5000 in frenata. La motrice su cui sono state eseguite le misure è la 5051. Le misure sono state effettuate con lo stesso registratore Hioki con cui si sono eseguite le misure in zona Sabotino. Lo strumento è stato configurato analogamente a quanto fatto in cabina Duca d'Aosta, l'unica differenza è relativa alla soglia che attiva la registrazione (trigger) che in questo caso è stata settata a 700 V anziché a 800 V.

Come atteso i risultati delle misure hanno evidenziato che durante la frenata rigenerativa le motrici 5000 causano in rete delle sovratensioni lunghe analoghe a quelle misurate in zona Sabotino. In Figura 4.18 se ne riporta un esempio.

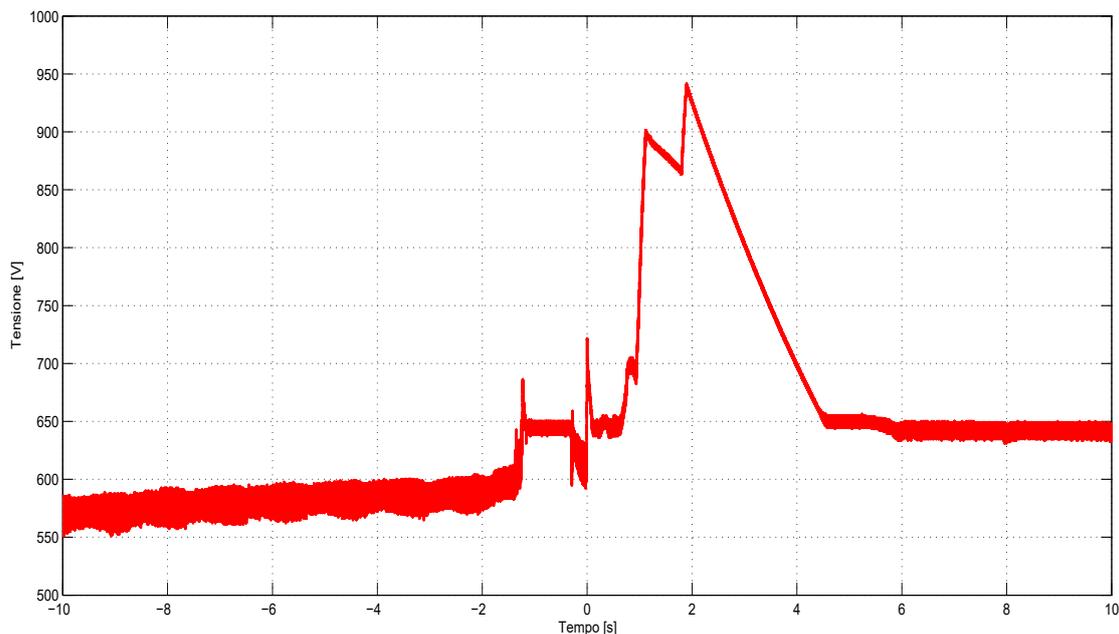


Figura 4.18: Sovratensione lunga rilevata a bordo della motrice 5051

Per formulare delle ipotesi che giustifichino un tale comportamento si riportano le informazioni note riguardo la frenata delle motrici 5000.

Come accennato nel Capitolo 2, la frenata elettrodinamica sulle motrici 5000 avviene in due fasi, la frenata rigenerativa e la frenata reostatica. Quando inizia la frenata si invertono i poli dell'armatura del motore, quindi il verso della corrente si inverte. Durante la frenata rigenerativa, tale corrente viene iniettata in rete; mentre durante la frenata reostatica viene dissipata in appositi reostati (resistenze di frenatura). Il passaggio da un tipo di frenata all'altro è gestito dalla logica di controllo delle vetture in funzione della tensione misurata ai capi della motrice. Quando tale tensione, supera la soglia impostata la frenata passa da rigenerativa a reostatica, cioè vengono inserite le resistenze di frenatura. Durante la frenata a recupero, così come durante la prima parte della frenata reostatica vengono inserite in serie ad i motori dei due azionamenti le resistenze tampone, le quali servono a sopperire alla differenza di potenziale tra la rete ed il motore. Il principio con cui vengono inserite le resistenza tampone e di frenatura viene riportato

nel seguito (facendo riferimento al solo azionamento cassa A):

- Frenata rigenerativa

Durante la frenata rigenerativa è inserita la sola resistenza tampone (1R5).

- Frenata reostatica

Durante la frenata reostatica si inserisce anche la resistenza di frenatura (1R7). Tale resistenza viene shuntata progressivamente tramite il GTO di frenatura (-V9), quando si è arrivati al massimo grado di parzializzazione viene esclusa la resistenza tampone tramite l'apposito contattore (1K4) e si ripete il ciclo di shuntaggio sulla resistenza di frenatura.

La frenata rigenerativa può avvenire solo se nella zona in cui è presente la motrice in frenata vi sono altre motrici disponibili ad assorbire la corrente recuperata. Se non vi sono motrici disponibili, siccome i raddrizzatori presenti in cabina sono unidirezionali, la frenata rigenerativa non può essere effettuata, quindi viene effettuata la frenata reostatica.

In Figura 4.19 si riporta lo schema elettrico dell'azionamento cassa A della motrice. Su tale schema si sono evidenziati i percorsi principali della corrente durante la marcia AVANTI (in rosso) e la frenatura AVANTI (in verde e in azzurro). In azzurro si è riportato il percorso nel circuito di frenatura reostatica, quindi durante la frenata rigenerativa il percorso della corrente è quello in verde, durante la reostatica a questo bisogna aggiungere il percorso in azzurro. Negli schemi si considera il percorso di frenatura prima dell'esclusione della resistenza tampone.

Sulla base di quanto noto sulla frenata delle 5000, si suppone che la causa delle sovratensioni lunghe osservate sia attribuibile ad una non perfetta coordinazione tra la frenata rigenerativa e la frenata reostatica. Se, quando in rete non sono presenti motrici in grado di assorbire la corrente iniettata da una 5000 in frenata, il circuito di frenata reostatica viene attivato con un certo ritardo, vi è un intervallo di tempo in cui la motrice inietta in rete una corrente che, non potendo essere assorbita da altre motrici e non potendo essere restituita alla rete MT (raddrizzatori unidirezionali), va a caricare le capacità del circuito (le capacità parassite della rete e le capacità di filtro della motrice stessa) facendo alzare il livello di tensione. Quando poi si attiva la frenatura reostatica e vengono inseriti nel circuito i reostati di frenatura le capacità si scaricano e la tensione torna al suo livello nominale. Tale scarica però avviene molto lentamente perciò il livello di tensione rimane elevato per un tempo molto lungo (qualche secondo).

Al fine di porre le basi per uno studio futuro si è costruito su LTspice un modello che in primissima approssimazione possa rappresentare la frenata di una motrice 5000 in marcia inerziale in una zona in cui non sono presenti altre motrici. Il modello proposto viene riportato in Figura 4.20.

I parametri del circuito proposto sono noti solo in parte. I dati relativi alla rete ed alla cabina di alimentazione sono tratti da un lavoro precedente [12] (ad eccezione della capacità e della resistenza verso terra che sono state ipotizzate). I parametri circuitali della motrice 5000 sono noti dagli schemi elettrici in Allegato B (ad eccezione dell'induttanza -L1 che è stata ipotizzata). Tutti i tempi di intervento dei tiristori, dei GTO e dei contattori sono incogniti (i valori riportati nello schema sono stati ipotizzati). Il comportamento dei motori durante la frenata è stato ipotizzato (in modo molto semplificato)

con un generatore a gradino di corrente (in quanto si suppone che la frenata avvenga a coppia costante) ma il comportamento reale è incognito. L’inserimento della resistenza di frenatura avviene con un duty cycle variabile ma la velocità con cui la resistenza viene inserita è incognita.

Le resistenze di cortocircuito linea (1R8 e 1R12) nel modello sono appese in quanto sono state rimosse da GTT a causa dei numerosi guasti che le interessavano. Tuttavia si sospetta che tali resistenze potessero influire sulle sovratensioni generate durante la frenatura.

Visti i numerosi dati mancanti il modello presentato non è in grado di rappresentare quello che accade nella realtà. Per proseguire lo studio relativo alla frenata delle motrici 5000 e affinare il modello, si ritiene quindi fondamentale:

- individuare i tempi con cui vengono gestiti i GTO di frenatura e i contattori di esclusione resistenza tampone;
- individuare il duty cycle con cui il GTO di frenatura inserisce la resistenza di frenatura;
- capire il comportamento dei motori durante la fase di frenatura;
- approfondire l’influenza delle resistenze di cortocircuito linea sulla frenatura.

In conclusione per proseguire lo studio relativo alla frenata delle motrici 5000, siccome non è noto il programma che gestisce la logica di controllo è necessario fare delle misure a bordo delle vetture per ricavare i parametri incogniti. Noti i parametri incogniti sarà possibile affinare il modello e di conseguenza validare l’ipotesi effettuata o eventualmente proporre di nuove.

4.5 Considerazioni finali

L’analisi effettuata ha dimostrato l’esistenza di sovratensioni di lunga durata che vengono generate in rete dalla frenata elettrodinamica delle motrici 5000, quando il traffico tranviario è ridotto.

Si suppone che tali sovratensioni usurando gli scaricatori più volte al giorno tutti i giorni, ne determinino il cedimento.

Per dimostrare tale ipotesi si ritiene necessario verificare come gli scaricatori vengono usurati dalle sovratensioni lunghe, ad esempio tramite un monitoraggio degli SPD con pinze amperometriche che consenta di verificare se e quanto frequentemente gli scaricatori vanno in conduzione. Vi è infatti la possibilità che le sovratensioni lunghe rilevate durante le misure in zona Sabotino siano solo quelle che non hanno mandato in conduzione lo scaricatore (in quanto probabilmente non erano abbastanza elevate). Quelle che invece lo hanno mandato in conduzione è possibile che non siano state rilevate (o che siano state rilevate come impulsive), in quanto tagliate dall’intervento dell’SPD.

Anche se non si ha la certezza che le sovratensioni lunghe osservate siano la causa degli scoppi degli scaricatori, queste sovratensioni incidono negativamente sull’isolamento delle linee e dei componenti che le devono sostenere. Si ritiene dunque necessario, a

prescindere dall'esito delle prove sugli SPD, approfondire tramite uno studio dedicato il funzionamento della frenata elettrodinamica delle motrici 5000 in modo da affinare il modello proposto e trovare delle soluzioni a questa problematica.

Al momento GTT, su suggerimento di InfraTO, sta provvedendo alla sostituzione degli SPD con altri aventi soglia di intervento maggiore di 2000 V. Tuttavia tale sostituzione non è risolutiva dei problemi sugli altri componenti presenti nell'impianto di trazione che potrebbero subire danneggiamenti nel tempo, dovuti alle sovratensioni generate dalle motrici.

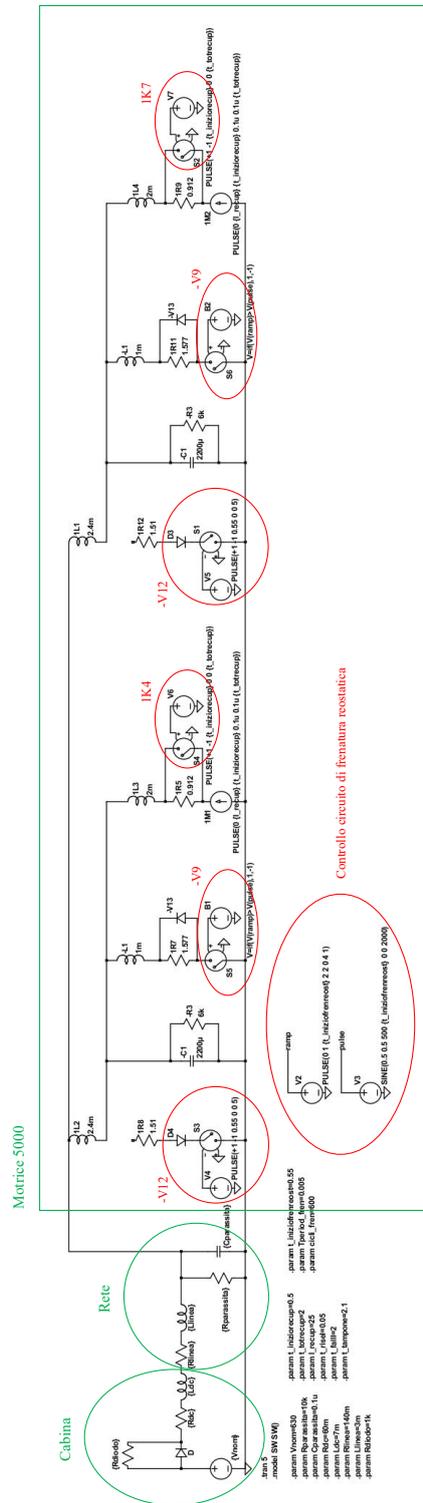


Figura 4.20: Modello LTSpice della frenata delle 5000

Capitolo 5

Analisi dei consumi delle motrici più moderne circolanti sulla rete tranviaria torinese

In questo capitolo vengono presentate le prove e vengono riportati i calcoli necessari per valutare il consumo chilometrico (vetture in marcia) e orario (vetture in sosta) delle motrici più moderne a disposizione di GTT, cioè le motrici delle serie 5000 e 6000.

A tale scopo sono state eseguite due prove, una sulla motrice 5051 ed una sulla motrice 6031, che verranno descritte nel seguito.

Inoltre, eseguita l'elaborazione dei dati ottenuti dalle due prove, si sono confrontati i consumi ottenuti per i due tram con il consumo stimato di un autobus urbano in circolazione a Torino.

5.1 Analisi dei consumi della motrice 5051 durante la marcia e la sosta

5.1.1 Descrizione delle misure

Le misure sono state eseguite il 17 Novembre 2017 a bordo della motrice 5051. Per effettuare la misura in condizioni di funzionamento il più realistiche possibili la motrice è stata zavorrata con una massa di circa 6 tonnellate (Figura 5.1). Per l'esecuzione delle misure è stato utilizzato un registratore digitale Hioki modello MR 8880 di proprietà del Politecnico (Figura 5.2). Per la misura dell'assorbimento di corrente totale della motrice si è installata sull'imperiale della stessa una pinza amperometrica Hioki modello 3285, sempre di proprietà del Politecnico (Figura 5.3a); il segnale è stato portato al registratore all'interno del veicolo tramite cavi coassiali con connettori BNC. Per la misura di tensione è stata utilizzata invece una sonda differenziale Hioki 9322 di proprietà di Infra.To (Figura 5.3b). Il registratore Hioki è stato poi alimentato tramite inverter collegato alle batterie della motrice.

Il tragitto percorso è stato registrato mediante GPS.



Figura 5.1: Cassoni utilizzati per zavorrare la motrice 5051



Figura 5.2: Registratore digitale Hioki MR 8880



(a) Pinza amperometrica Hioki 3285



(b) Sonda di tensione Hioki 9322

Figura 5.3: Sonde di corrente e tensione.

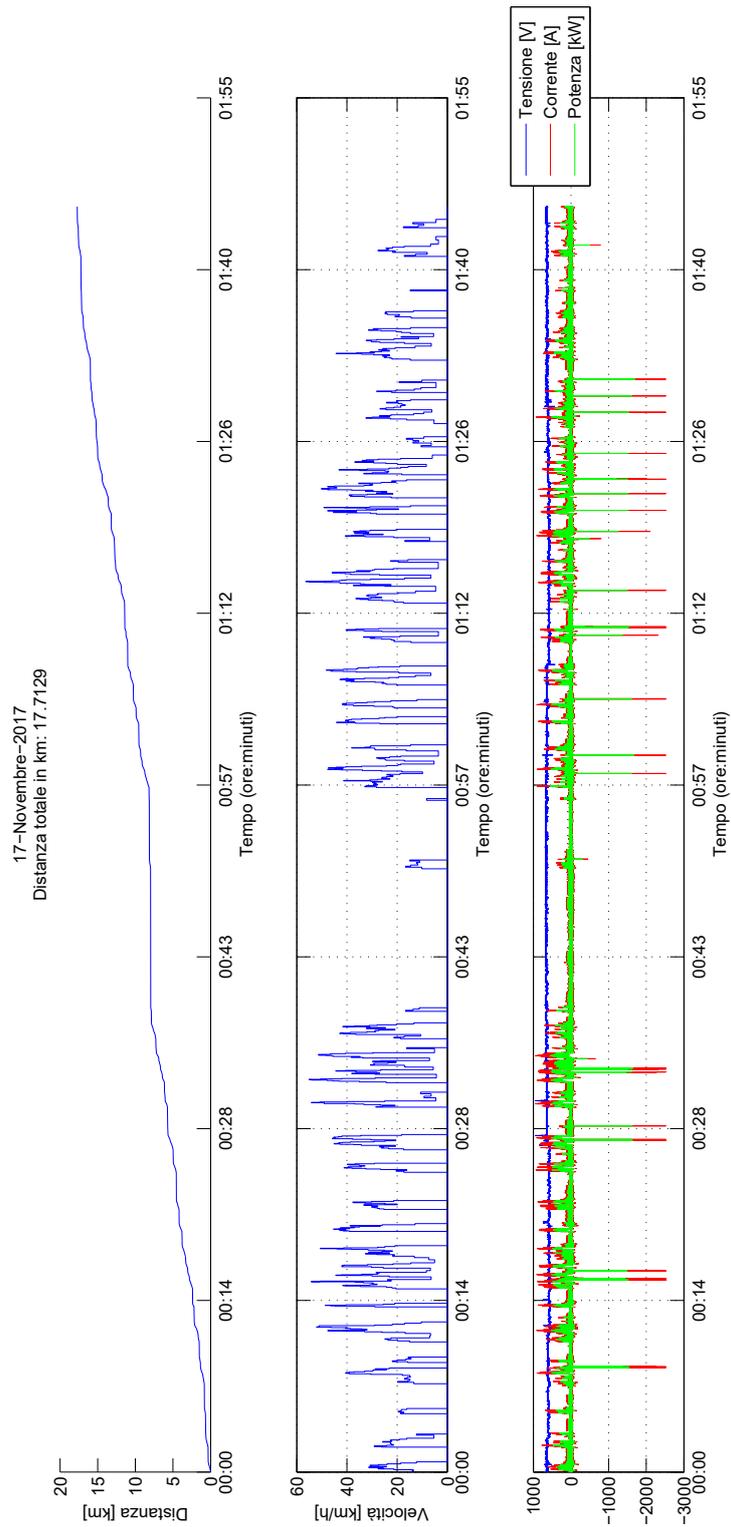


Figura 5.5: 5051 - Andamenti in funzione del tempo.

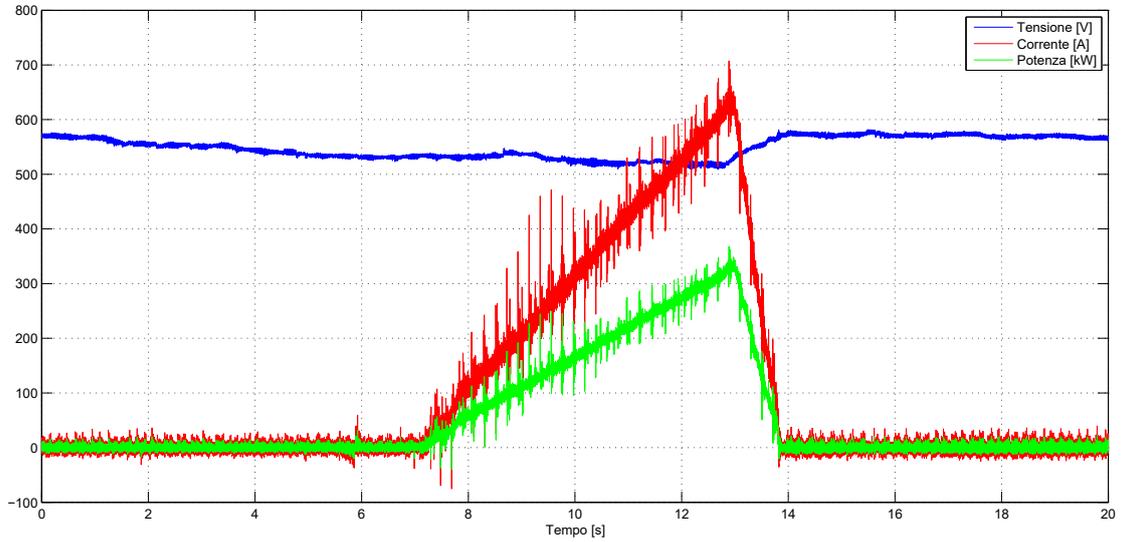


Figura 5.6: 5051 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di accelerazione.

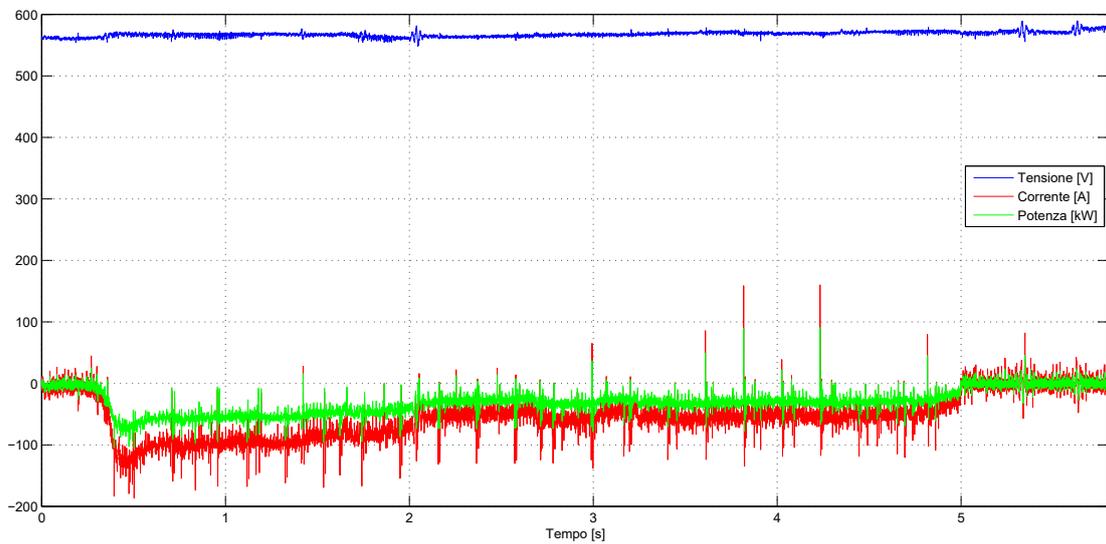


Figura 5.7: 5051 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di recupero.

Per eliminare gli spike e rendere le forme d'onda più pulite è possibile applicare al segnale misurato un filtro passa-basso. Per le fasi di accelerazione e frenatura il risultato è mostrato in Figura 5.8 e Figura 5.9. Per l'intera durata delle prove i segnali filtrati sono mostrati in Figura 5.10.

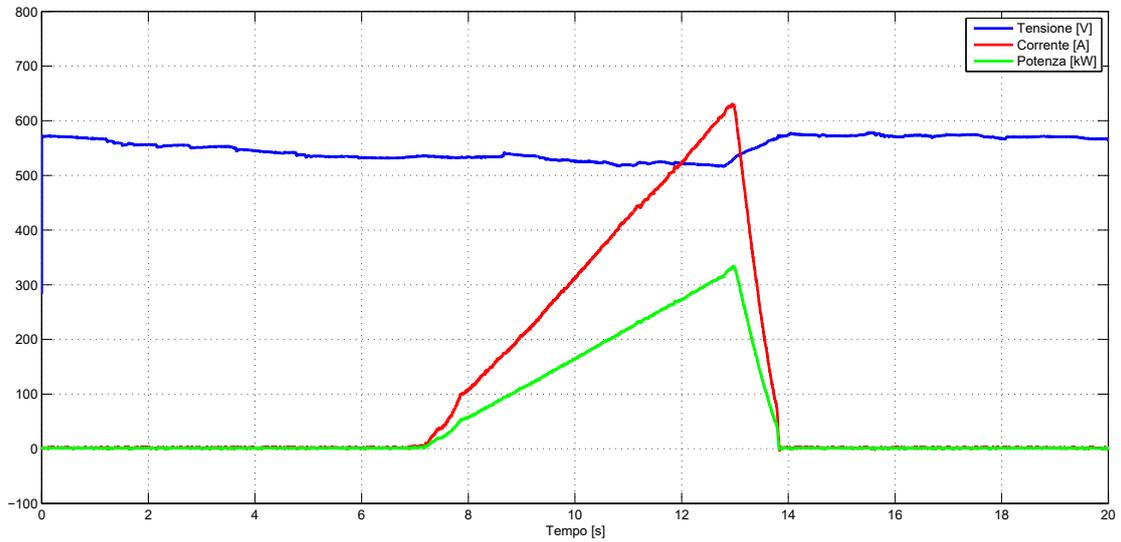


Figura 5.8: 5051 - Andamenti delle grandezze elettriche filtrate in fase di accelerazione.

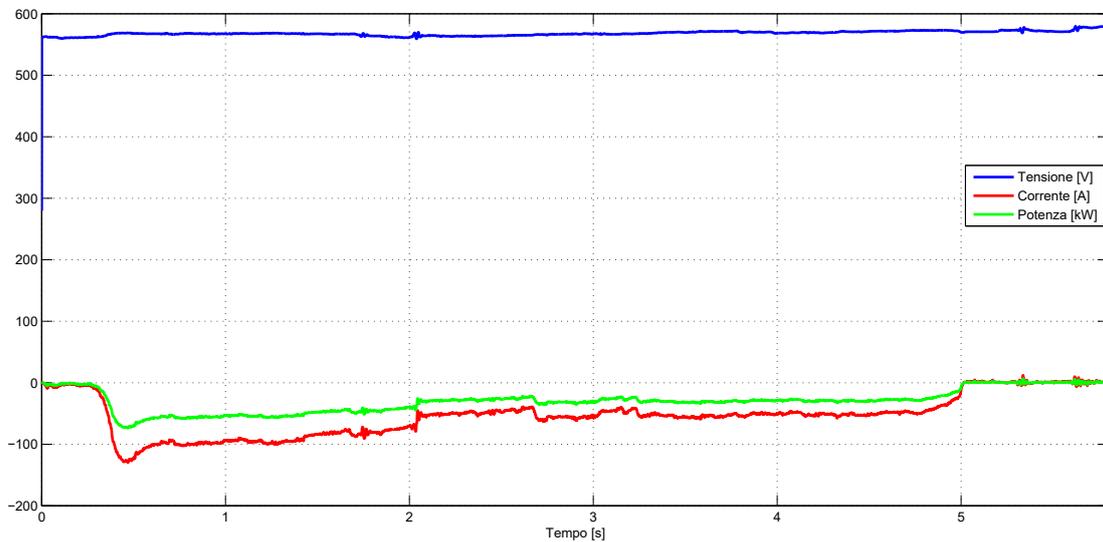


Figura 5.9: 5051 - Andamenti delle grandezze elettriche filtrate in fase di recupero.

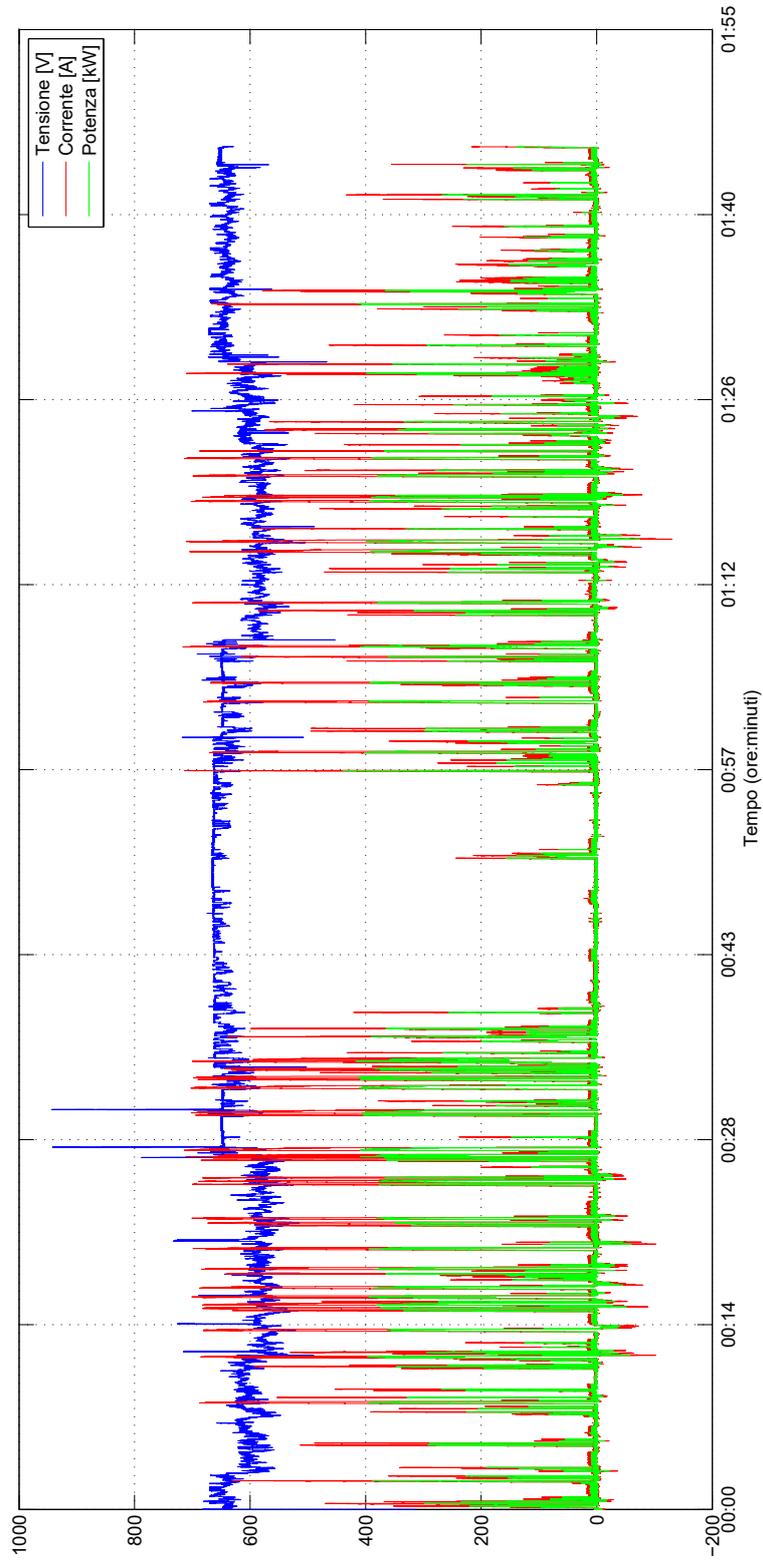


Figura 5.10: 5051 - Andamenti delle grandezze elettriche filtrati

L'energia può a questo punto essere calcolata sulle forme d'onda filtrate integrando la potenza istantanea nel tempo. Per le fasi di accelerazione e frenatura con recupero tipiche, le energie assorbite e recuperate risultano essere rispettivamente $E_A = 0,32$ kWh e $E_R = 0,048$ kWh.

In Figura 5.11 è mostrato nel dettaglio l'assorbimento della motrice durante la sosta al capolinea delle Vallette. Si possono osservare in tale figura gli avviamenti del compressore. L'energia assorbita durante la sosta (circa 11 minuti) è $E_S = 0,29$ kWh. Questo corrisponde ad un consumo, quando il veicolo è in sosta, di circa 1,58 kWh/h.

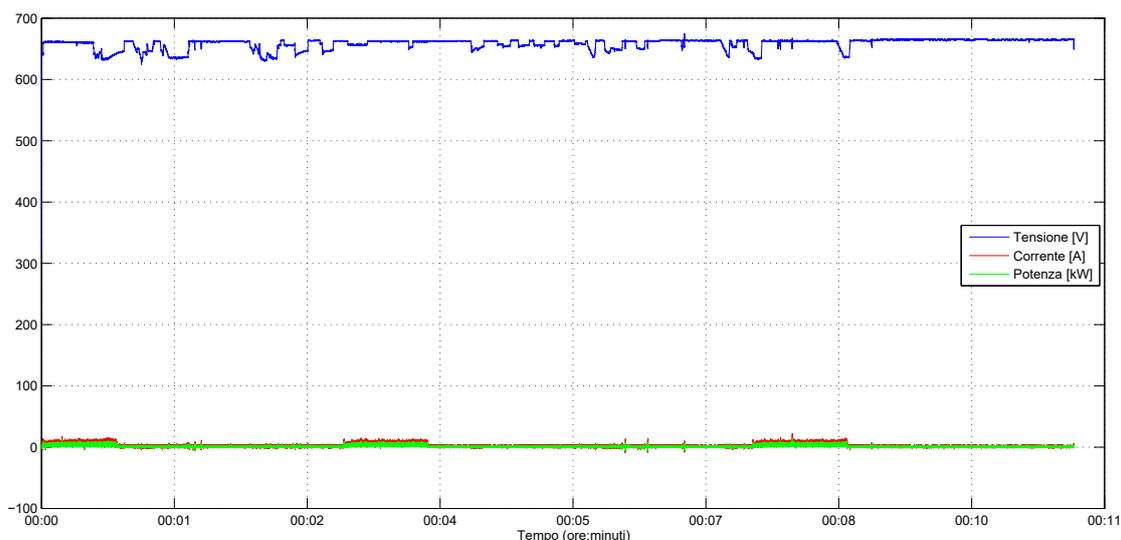


Figura 5.11: 5051 - Andamenti delle grandezze elettriche durante la sosta al capolinea delle Vallette.

Per l'intera durata della prova si è invece ottenuto un consumo di energia pari a $E_A = 59$ kWh ed una energia recuperata totale pari a $E_R = 0,82$ kWh. Il consumo netto è quindi $E_N = E_A - E_R = 58,2$ kWh. Per una distanza percorsa di 17.7 km ciò corrisponde ad un consumo chilometrico di circa 3,3 kWh/km.

5.1.3 Considerazioni finali sulla prova

In conclusione, per l'intera durata della prova, si è ottenuto un consumo di energia totale pari a $E_A = 59$ kWh ed una energia recuperata totale pari a $E_R = 0,82$ kWh.

Il consumo netto è quindi $E_N = E_A - E_R = 58,2$ kWh.

Per una distanza percorsa di 17.7 km ciò corrisponde ad un consumo chilometrico di circa **3,3 kWh/km**.

L'energia assorbita durante la sosta al capolinea (durata circa 11 minuti) è $E_S = 0,29$ kWh. Questo corrisponde ad un consumo, quando il veicolo è in sosta, di circa **1,58 kWh/h**.

Dai risultati emerge inoltre il fatto che il recupero in frenatura funziona solo se la tensione in linea è minore di 600 V.

5.2 Analisi dei consumi della motrice 6031 durante la marcia e la sosta

5.2.1 Descrizione delle misure

Le misure sono state eseguite il 15 Dicembre 2017 a bordo della motrice 6031. La misura è stata effettuata senza utilizzare zavorre, il carico della motrice è dato dal solo peso delle persone a bordo (circa 800 kg). Le misure sono state effettuate usando gli stessi strumenti e con le stesse modalità descritte nel caso della motrice 5031 ma con due leggere differenze:

- la sonda di tensione è stata installata sull'imperiale della motrice insieme alla pinza di corrente, come mostrato in Figura 5.12. Entrambe i segnali sono stati portati al registratore all'interno del veicolo tramite cavi coassiali con connettori BNC;
- l'inverter che alimenta la sonda di tensione e il registratore è alimentato tramite una presa di corrente a bordo della vettura anziché direttamente dalle batterie.

Anche in questo caso il tragitto percorso è stato registrato mediante GPS.



Figura 5.12: Posizionamento della pinza amperometrica e della sonda di tensione sull'imperiale della motrice 6031

La misura è stata effettuata sul percorso della linea 4 con punto di partenza e arrivo al deposito di corso Tortona. La lunghezza del tragitto percorso è di circa 36 km e il tempo di percorrenza è stato di circa 3 ore, facendo tutte le fermate previste per la linea 4 e aspettando fermi circa una ventina di minuti al capolinea di Falchera.

A partire dalle misure di tensione e corrente è possibile calcolare la potenza istantanea assorbita dalla motrice durante le diverse fasi della marcia; è poi possibile calcolare l'energia assorbita integrando la potenza istantanea assorbita nel tempo. Conoscendo il tempo di campionamento è possibile effettuare una integrazione numerica.

5.2.2 Risultati

In Figura 5.13 è mostrato il percorso su cui sono state eseguite le misure.

La prova è stata suddivisa in quattro parti al fine di rendere più leggibili i risultati. La prima parte considera il percorso che va dal deposito di corso Tortona al capolinea

di Falchera, la seconda parte considera le registrazioni effettuate con la motrice ferma al capolinea di Falchera, la terza parte considera il percorso che va dal capolinea di Falchera alla fermata Caio Mario nord ed infine la quarta parte considera il percorso che va dalla fermata Caio Mario nord al capolinea di Drosso e il ritorno dal capolinea Drosso al deposito di corso Tortona. Si riportano i risultati ottenuti per le quattro parti in cui è stata suddivisa la misura, si riportano una accelerazione ed una frenata rigenerativa tipica e se ne calcolano rispettivamente il consumo e il recupero.

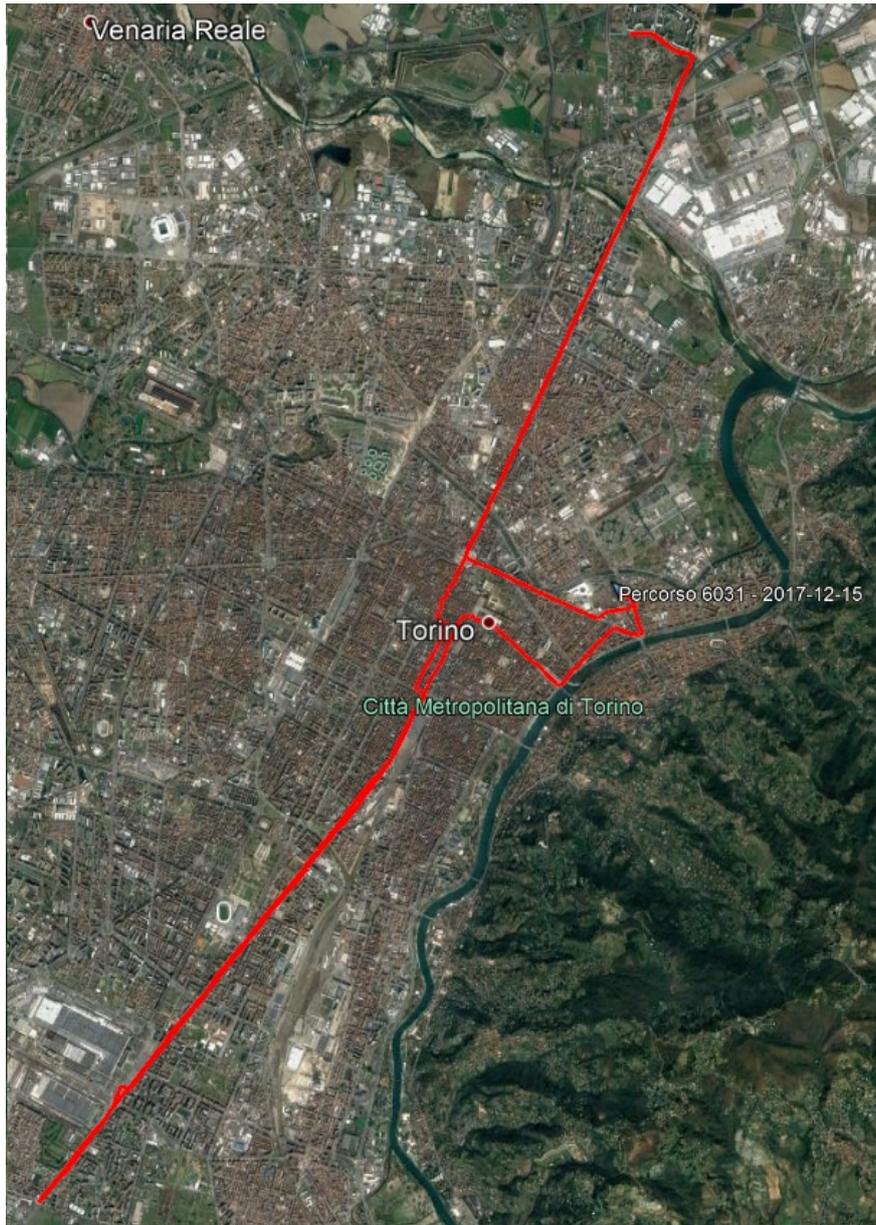


Figura 5.13: 6031 - Percorso su cui è stata effettuata la misura.

Parte 1 - Dal deposito di corso Tortona al capolinea di Falchera

In Figura 5.14 sono riportati nell'ordine: la distanza percorsa rispetto al tempo, la velocità di percorrenza rispetto al tempo e gli andamenti di tensione (blu), corrente assorbita (rosso) e potenza istantanea (verde) riguardanti la prima parte delle misure; in Tabella 5.1 sono invece riportati i dati della misura ed i risultati energetici ottenuti dai calcoli.

Tabella 5.1: 6031 - Risultati parte uno

Ora inizio	10:09
Ora fine	10:52
Lunghezza tratta [km]	9,1
Consumo totale [kWh]	51,2
Recupero totale [kWh]	5,4
Consumo netto [kWh]	45,8
Consumo chilometrico [kWh/km]	5,03

Parte 2 - Motrice ferma al capolinea di Falchera

In Figura 5.15 sono riportati gli andamenti di tensione (blu), corrente assorbita (rosso) e potenza istantanea (verde) riguardanti la seconda parte delle misure (i grafici reattivi alla distanza percorsa rispetto al tempo ed alla velocità di percorrenza rispetto al tempo non sono riportati in quanto la motrice è ferma); in Tabella 5.2 sono invece riportati i dati della misura ed i risultati energetici ottenuti dai calcoli.

Si osservano dei tratti in cui l'andamento di tensione è stato approssimato, ciò è dovuto al fatto che in questi tratti la sonda di tensione non ha funzionato correttamente e quindi il segnale di tensione non è stato registrato in modo corretto. L'errore sui risultati dei calcoli dovuto all'utilizzo di una tensione stimata si può considerare ridotto.

Tabella 5.2: 6031 - Risultati parte due

Ora inizio	10:54
Ora fine	11:12
Consumo totale [kWh]	8,6
Recupero totale [kWh]	0
Consumo netto [kWh]	8,6
Consumo orario [kWh/h]	28,4

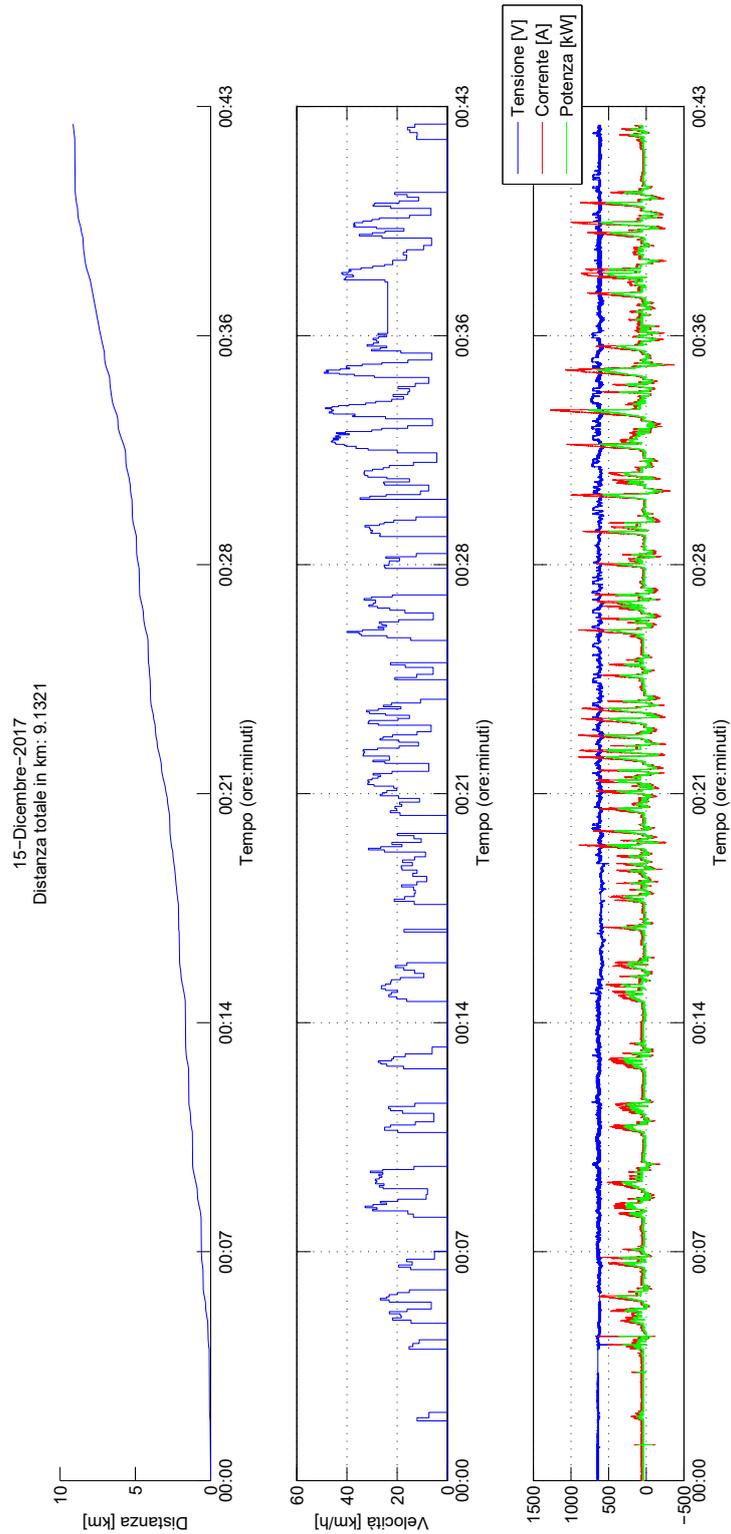


Figura 5.14: 6031 - Parte uno, andamenti in funzione del tempo.

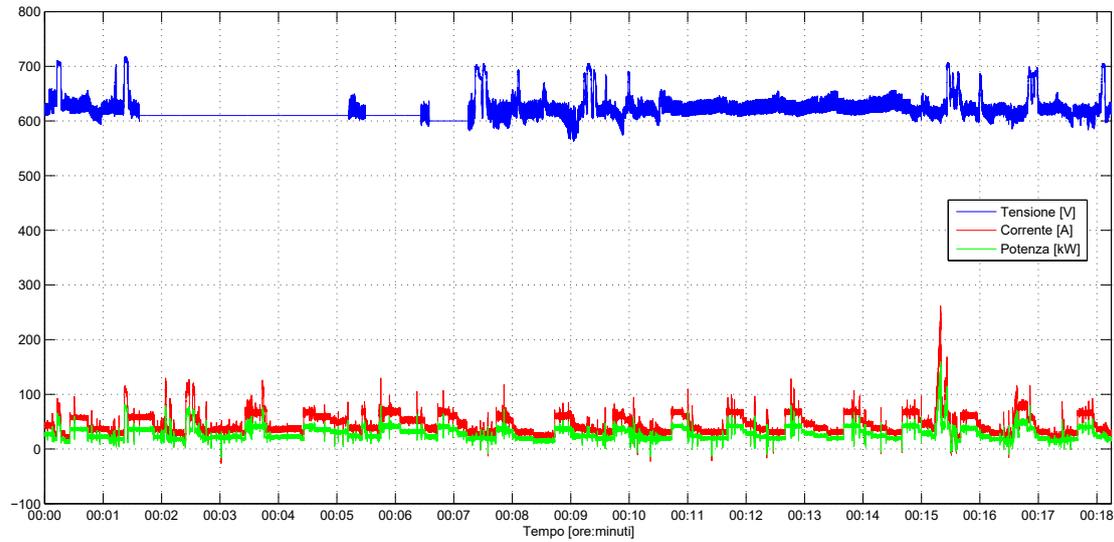


Figura 5.15: 6031 - Parte due, andamenti in funzione del tempo.

Parte 3 - Dal capolinea di Falchera alla fermata Caio Mario nord

In Figura 5.16 sono riportati nell'ordine: la distanza percorsa rispetto al tempo, la velocità di percorrenza rispetto al tempo e gli andamenti di tensione (blu), corrente assorbita (rosso) e potenza istantanea (verde) riguardanti la terza parte delle misure; in Tabella 5.3 sono invece riportati i dati della misura ed i risultati energetici ottenuti dai calcoli.

Tabella 5.3: 6031 - Risultati parte tre

Ora inizio	11:13
Ora fine	12:14
Lunghezza tratta [km]	14,25
Consumo totale [kWh]	71,3
Recupero totale [kWh]	8,7
Consumo netto [kWh]	62,6
Consumo chilometrico [kWh/km]	4,4

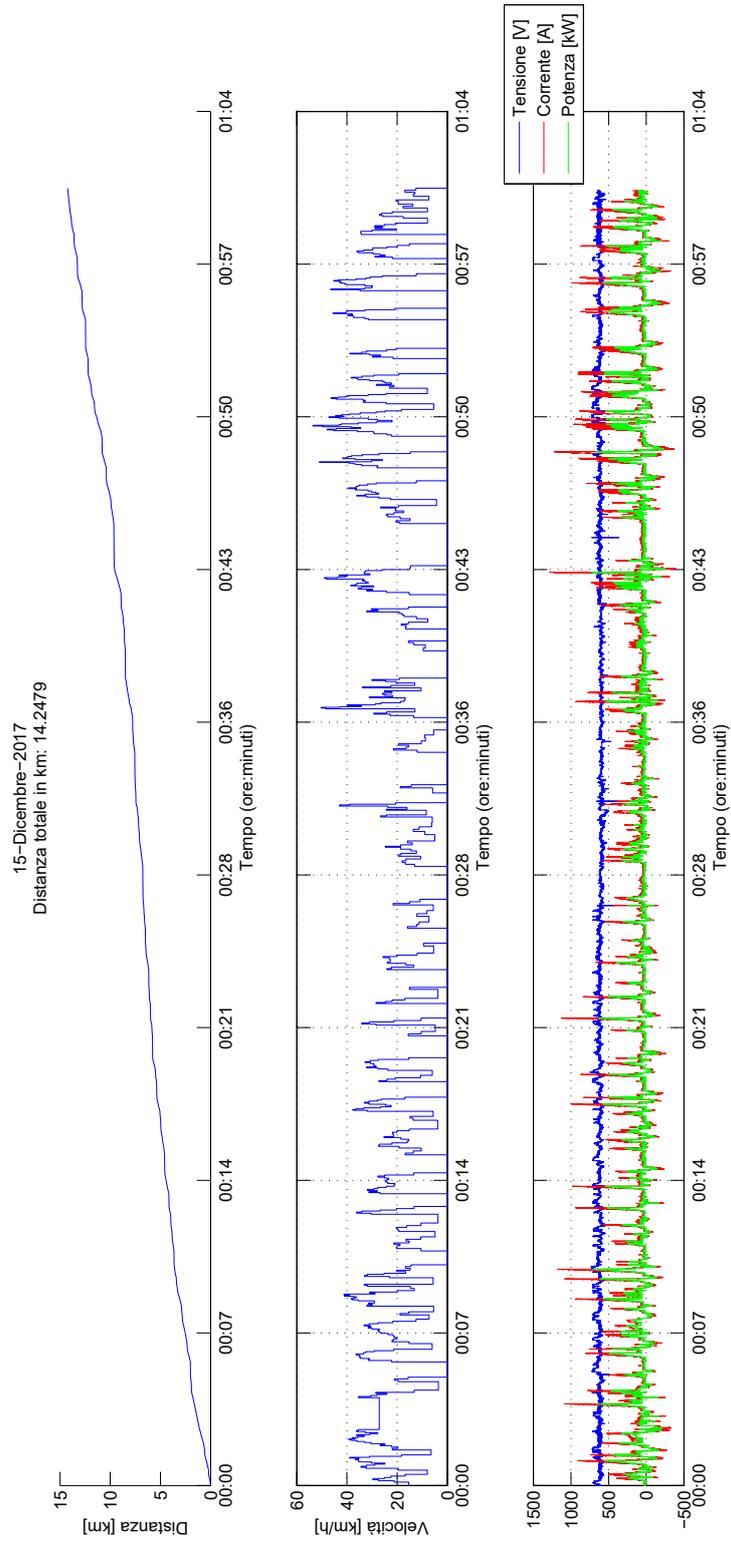


Figura 5.16: 6031 - Parte tre, andamenti in funzione del tempo.

Parte 4 - Dalla fermata Caio Mario nord al capolinea Drosso e ritorno al deposito Tortona

In Figura 5.17 sono riportati nell'ordine: la distanza percorsa rispetto al tempo, la velocità di percorrenza rispetto al tempo e gli andamenti di tensione (blu), corrente assorbita (rosso) e potenza istantanea (verde) riguardanti la quarta parte delle misure; in Tabella 5.4 sono invece riportati i dati della misura ed i risultati energetici ottenuti dai calcoli.

Durante tutta la durata della parte quattro la tensione è stata approssimata a 650 V perchè durante la misura, nei pressi della fermata Caio Mario nord, il morsetto della sonda di tensione si è staccato ed è stato possibile proseguire solo con la registrazione della corrente. Si può inoltre osservare che ad un certo punto della registrazione sia la tensione che la corrente sono nulle, questo è dovuto al fatto che in quel punto l'alimentazione del registratore si è interrotta per problemi all'inverter; il tratto interessato da questo problema è però breve e dopo poco tempo la misura riprende normalmente.

Tabella 5.4: 6031 - Risultati parte quattro

Ora inizio	12:14
Ora fine	13:13
Lunghezza tratta [km]	12,66
Consumo totale [kWh]	61,6
Recupero totale [kWh]	7,6
Consumo netto [kWh]	54
Consumo chilometrico [kWh/km]	4,26

Accelerazione tipica

In Figura 5.18 sono riportati gli andamenti di tensione (blu), corrente assorbita (rosso) e potenza istantanea (verde) durante una fase di accelerazione tipica. L'energia assorbita durante questa fase di accelerazione risulta essere pari a $E_A = 0,711$ kWh.

Frenata rigenerativa tipica

In Figura 5.19 sono riportati gli andamenti di tensione (blu), corrente assorbita (rosso) e potenza istantanea (verde) durante una fase di frenatura tipica. L'energia immessa in rete durante questa fase di frenatura risulta essere pari a $E_R = 0,161$ kWh.

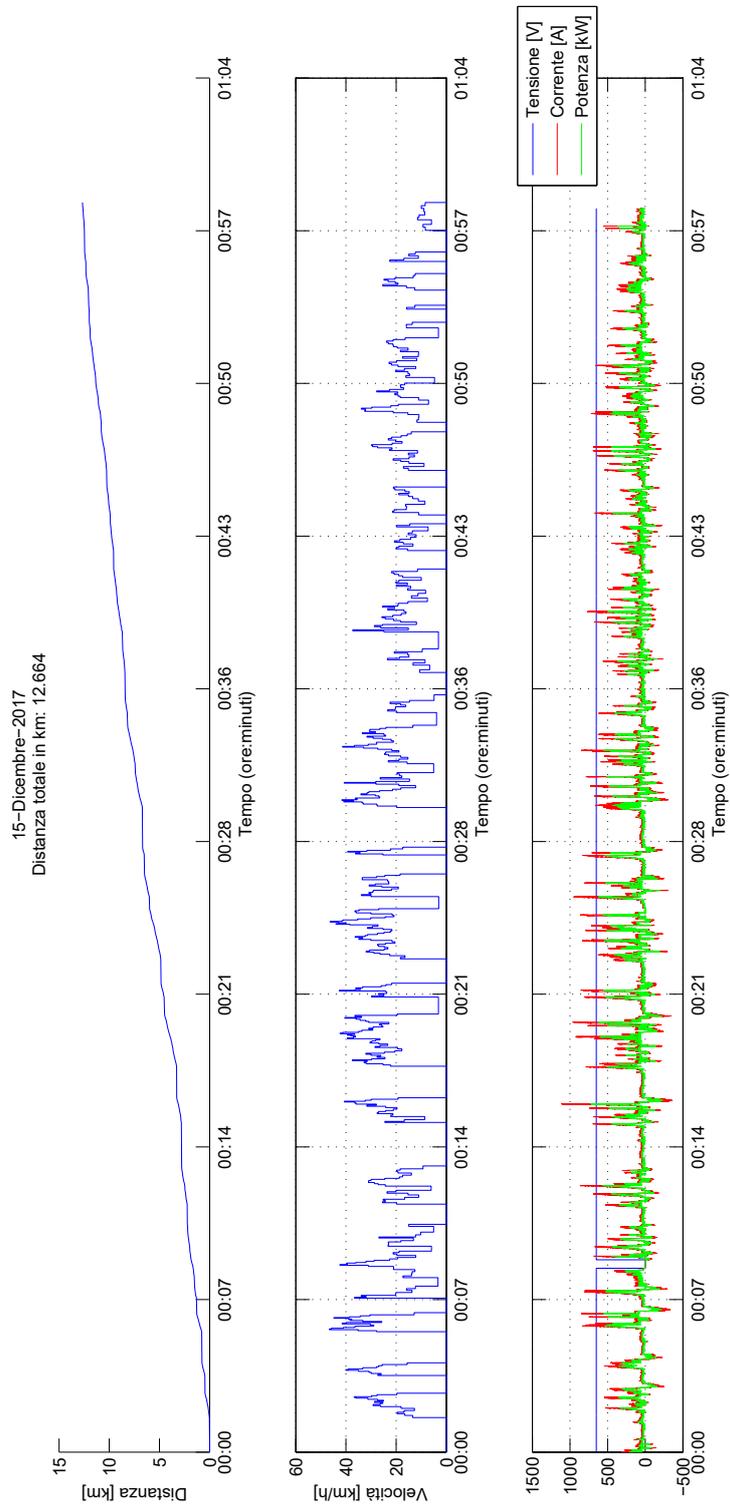


Figura 5.17: 6031 - Parte quattro, andamenti in funzione del tempo.

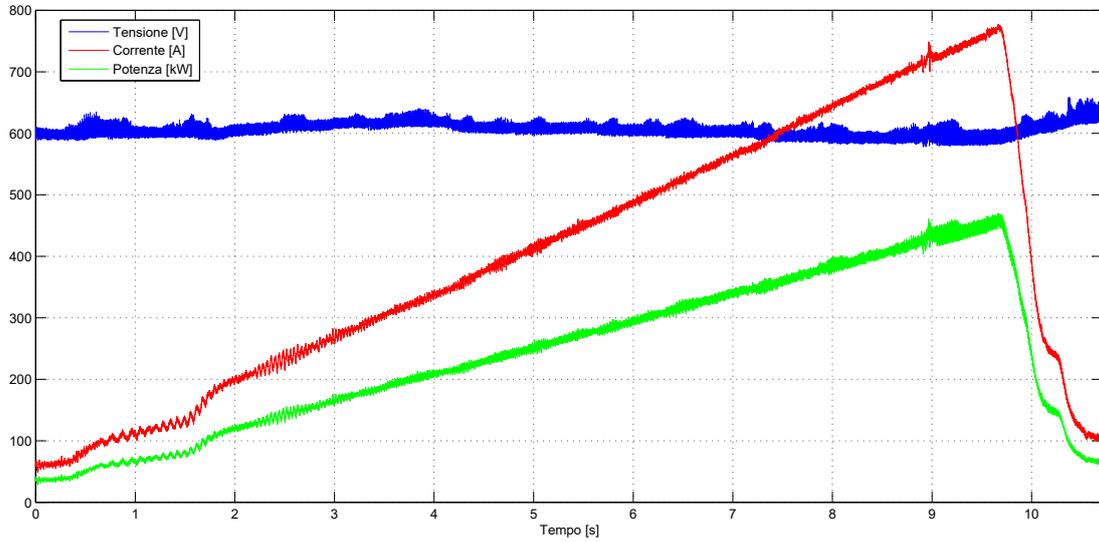


Figura 5.18: 6031 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di accelerazione

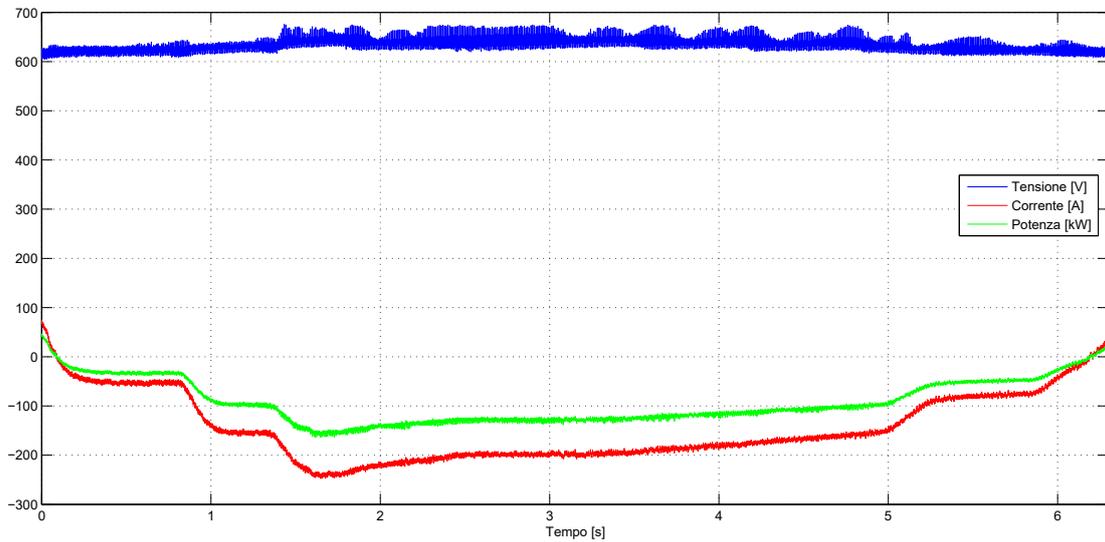


Figura 5.19: 6031 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di recupero

5.2.3 Considerazioni finali sulla prova

In conclusione, per l'intera durata della prova, si è ottenuto un consumo di energia totale pari a $E_A = 192,7$ kWh ed una energia recuperata totale pari a $E_R = 21,7$ kWh.

Il consumo netto è quindi $E_N = E_A - E_R = 171$ kWh.

Per una distanza percorsa di 36 km ciò corrisponde ad un consumo chilometrico di circa **4,74 kWh/km**,

L'energia assorbita durante la sosta al capolinea (durata circa 18 minuti) è $E_S = 7,2$ kWh. Questo corrisponde ad un consumo, quando il veicolo è in sosta, di circa **28,4 kWh/h**.

Dai risultati emerge inoltre che, a differenza di quanto capita sulle 5000, il recupero avviene anche per tensioni maggiori di 600 V senza che si generino sovratensioni significative.

In Tabella 5.5 sono riportati i dati di consumo misurati dal sistema di diagnostica della motrice e, nell'ultima colonna, i consumi netti misurati con la strumentazione installata appositamente sulla motrice. Si può ipotizzare dal confronto dei risultati che il "Consumo Montante" rappresenti con buona approssimazione il consumo netto della motrice. I dati di energia recuperata misurati dalla motrice non coincidono invece con quelli misurati dalla strumentazione esterna.

Tabella 5.5: 6031 - Confronto risultati

Ora	E contatore [kWh]	E Recuperata [kWh]	Cabina	Consumi Montante [kWh]	E netta misurata [kWh]
10:06	281426570	0	1	0	0
10:08	281426571	0	1	1	0
10:51	281426619	2	1	48	45,8
10:58	281426621	2	2	51	-
12:18	281426696	7	2	126	-
13:12	281426746	9	2	176	171

5.3 Analisi dei risultati

In Tabella 5.6 si riportano i risultati relativi al consumo chilometrico (vetture in marcia) e orario (vetture in sosta) delle motrici 5051 e 6031.

Tabella 5.6: Consumo chilometrico e orario delle motrici 5051 e 6031

Motrice 5051	
Consumo chilometrico [kWh/km]	3,30
Consumo orario in sosta [kWh/h]	1,58
Motrice 6031	
Consumo chilometrico [kWh/km]	4,74
Consumo orario in sosta [kWh/h]	28,40

Come si osserva in Tabella 5.6 la motrice 6031 risulta avere un consumo in marcia e in sosta maggiore della 5051. Quindi si può affermare che le motrici della serie 6000 siano più energivore di quelle della serie 5000.

Bisogna inoltre tenere in conto che solo la motrice 5051 è stata zavorrata durante le misure, quindi il consumo chilometrico calcolato per la motrice 6031 sottostima il reale consumo della vettura.

Tuttavia, un ulteriore aspetto di cui bisogna tenere conto è quello relativo agli ausiliari. Infatti gli ausiliari a bordo delle due serie di vetture sono molto diversi tra loro, ad esempio sulle 6000 è previsto il condizionamento di tutta la vettura mentre sulle 5000 è previsto il condizionamento della sola cabina di guida. Ciò è dimostrato dall'enorme differenza riscontrata sui consumi orari con motrice in sosta, i quali considerano i soli consumi degli ausiliari. Estrapolando il consumo degli ausiliari lungo tutta la tratta dal consumo globale delle due motrici, è possibile calcolare il consumo chilometrico delle vetture relativo alla sola locomozione. Si riportano i risultati in Tabella 5.7.

Dai calcoli emerge che il consumo chilometrico dovuto alla sola locomozione della motrice 6031 è minore di quello della motrice 5051. Ciò dimostra il fatto che il maggior consumo chilometrico globale ottenuto per le motrici delle serie 6000, è dovuto ad un maggiore consumo da parte degli ausiliari che, come nel caso del condizionamento, è un valore aggiunto per il comfort dei passeggeri.

Dal punto di vista del recupero, le motrici della serie 6000 presentano un miglior recupero di energia in frenata rispetto alle 5000. Infatti la 6031 presenta un recupero chilometrico pari a 0,60 kWh/km, mentre la 5051 presenta un recupero chilometrico pari a 0,046 kWh/km.

Infine è possibile confrontare il consumo in tep dei due tram analizzati con quello di un autobus urbano in circolazione a Torino in modo da quantificare la differenza in termini di consumo fra questi veicoli.

Per il confronto si considera l'autobus urbano a 2 assi IRISBUS CITELIS 12.29 DIESEL EEV (GTT dispone di 100 veicoli di questo tipo in dotazione [13]).

Nelle tabelle 5.8, 5.9 e 5.10 sono riportati i dati salienti rispettivamente delle motrici 5000, delle motrici 6000 e del bus considerato, tratti da [13].

Tabella 5.7: Consumo chilometrico relativo alla sola locomozione

Motrice 5051	
Spazio percorso [km]	17,7
Tempo impiegato [h]	1,77
Velocità media [km/h]	10,0
Consumo totale netto [kWh]	58,2
Consumo totale netto nell'unità di tempo [kWh/h]	32,9
Consumo ausiliari nell'unità di tempo (Consumo orario con motrice ferma) [kWh/h]	1,58
Consumo relativo alla sola locomozione nell'unità di tempo [kWh/h]	31,32
Consumo chilometrico relativo alla sola locomozione [kWh/km]	3,13
Motrice 6031	
Spazio percorso [km]	36,0
Tempo impiegato [h]	3,0
Velocità media [km/h]	12,0
Consumo totale netto [kWh]	171,0
Consumo totale netto nell'unità di tempo [kWh/h]	57,0
Consumo ausiliari nell'unità di tempo (Consumo orario con motrice ferma) [kWh/h]	28,4
Consumo relativo alla sola locomozione nell'unità di tempo [kWh/h]	28,6
Consumo chilometrico relativo alla sola locomozione [kWh/km]	2,38

Tabella 5.8: Dati delle motrici della serie 5000

Anno di costruzione	1989 ÷ 1992
Lunghezza	22200 mm
Massa complessiva	41800 kg
Alimentazione	600 V DC
Posti totali	181

Tabella 5.9: Dati delle motrici della serie 6000

Anno di costruzione	2001 - 2002 - 2003
Lunghezza	34000 mm
Massa complessiva	60900 kg
Alimentazione	600 V DC
Posti totali	197

Tabella 5.10: Dati dell'autobus urbano IRISBUS CITELIS 12.29 DIESEL EEV

Anno immatricolazione	2009 - 2010
Lunghezza	11990 mm
Massa complessiva	18994 kg
Alimentazione	Gasolio
Consumo Gasolio	50,9 l/100km
Posti totali	102

Il confronto viene eseguito calcolando il consumo in tep al km per persona considerando che le vetture trasportino il numero massimo di persone consentito. Per quanto riguarda le motrici si considera il consumo chilometrico globale. I calcoli vengono riportati in Tabella 5.11.

Il fattore di conversione t di gasolio \rightarrow tep è aggiornato al 07/04/14, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Allegato A.

Il fattore di conversione kWh \rightarrow tep è aggiornato alla Delibera EEN 3/08 dell'Autorità del gas e dell'energia.

I risultati ottenuti mettono in evidenza che la motrice della serie 5000 presenta il minor consumo in tep al km per persona dei tre veicoli considerati, mentre l'autobus presenta il maggiore. Infatti, nonostante un consumo al km molto basso, l'autobus presenta una capienza ridotta (102 posti) mentre la motrice 5000, nonostante un consumo chilometrico maggiore, può trasportare circa il doppio delle persone (181 posti). La motrice della serie 6000 è quella con maggiore capienza (197 posti) ma anche quella con il maggior consumo globale al km. Di conseguenza il suo consumo in tep al km per persona è di poco inferiore

a quello dell'autobus. Le 6000, nonostante abbiano dimensioni e massa nettamente più grandi delle 5000, dispongono di una quantità di posti maggiore di sole 16 unità. La differenza di posti disponibili nei due tram è così minima in proporzione alla differenza di dimensioni tra le due vetture che si possa ipotizzare che la capienza delle 6000 riportata in [13] ne sottostimi la reale capacità e che di conseguenza il dato relativo al consumo in tep al km per persona calcolato sia sovrastimato (bisogna però anche tenere conto del fatto che i consumi della 6000 sono stati calcolati con la motrice non zavorrata).

Tabella 5.11: Confronto consumo bus - tram

Motrice 5051	
Consumo chilometrico [kWh/km]	3,30
Fattore conversione kWh – > tep	0,000187
tep consumati al km	0,0006171
Numero posti	181
tep al km per persona	$3,4094 \cdot 10^{-6}$
Motrice 6031	
Consumo chilometrico [kWh/km]	4,74
Fattore conversione kWh – > tep	0,000187
tep consumati al km	0,00088638
Numero posti	197
tep al km per persona	$4,4994 \cdot 10^{-6}$
Autobus urbano IRISBUS CITELIS 12.29 DIESEL EEV	
Consumo/km [l/km]	0,509
Densità gasolio [kg/l]	0,835
Consumo carburante [kg/km]	0,425015
Consumo carburante [t/km]	0,000425015
Fattore conversione t gasolio – > tep	1,08
tep consumati al km	0,000459016
Numero posti	102
tep al km per persona	$4,5002 \cdot 10^{-6}$

Capitolo 6

Conclusioni

Questo lavoro ha affrontato tre temi: il problema dei blocchi intempestivi quando in rete è presente una motrice 5000 con banco ad 1 e IR chiusi, il problema dello scoppio degli scaricatori di sovratensione installati nelle cabine e l'analisi dei consumi delle motrici della serie 5000 e 6000.

Per quanto riguarda il problema dei blocchi intempestivi, a seguito delle misure di impedenza eseguita in deposito Tortona, delle misure eseguite all'Allianz Stadium e dello studio dei circuiti elettrici delle motrici, si può affermare che le motrici della serie 5000 con il banco settato ad 1 e gli IR chiusi sono interpretate come dei circuiti di guasto dal Dispositivo di Prova Linea a causa di un errore di progetto nella logica di controllo di tali vetture. Infatti è emerso che a differenza di quanto capita in tutti gli altri possibili stati del banco, quando il banco è settato ad 1 con IR chiusi e viene tolta tensione alla motrice, la logica di controllo non comanda l'apertura dei contattori di filtro (1K1 e 1K2 con riferimento agli schemi degli azionamenti in allegato B). La mancata apertura di tali contattori rende l'impedenza equivalente della motrice molto bassa (circa $0,3 \Omega$) e ciò causa il fallimento delle prove DPL.

Quindi, se quando una motrice della serie 5000 è ferma al capolinea con banco ad 1 e IR chiusi (a causa di una svista del tranviere), l'interruttore extrarapido di linea si apre a causa di un guasto non permanente (ad esempio un sovraccarico temporaneo della linea) i contattori di filtro della motrice non vengono aperti. Quando viene tentata la richiusura e vengono eseguite le prove DPL, l'impedenza della motrice è quindi di circa $0,3 \Omega$ e causa la circolazione di una corrente maggiore della soglia del DPL, provocando il blocco dell'interruttore. Gli operatori di rete, rilevato il blocco dell'interruttore, ricercano il guasto ma non trovano nulla. Quando essi provano a richiudere l'interruttore, la richiusura va a buon fine in quanto viene imposto l'abbassamento dei pantografi di tutte le motrici presenti nella zona. Nel frattempo, però, il servizio è rimasto interrotto per decine di minuti.

Per risolvere tale problema la soluzione più efficace sarebbe modificare il programma che gestisce la logica interna della vettura in modo che i contattori di filtro, al mancare della tensione ai capi della motrice, vengano aperti anche quando il banco è settato su 1, così come capita per tutte le altre posizioni possibili. Tale soluzione però risulta impraticabile in quanto avrebbe dei costi eccessivi. Infatti, siccome si andrebbe a modificare il

programma che gestisce la logica di controllo delle motrici, sarebbe necessario omologare nuovamente tutte le vetture, operazione molto costosa e non giustificata dall'età delle 5000.

La soluzione proposta è più praticabile, in quanto il suo funzionamento è facilmente dimostrabile agli ENTI (USTIF) preposti per il rilascio delle necessarie autorizzazioni. Tale soluzione consiste nell'installare su ogni motrice della serie 5000 una scheda di controllo dedicata all'apertura dei contattori di filtro che ne comandi l'apertura se per un tempo maggiore rispetto a quello impostato si verifica contemporaneamente che:

- la tensione ai capi della motrice è inferiore alla soglia impostata;
- il banco è settato ad 1;
- la motrice è ferma.

In questo modo, una volta aperti i due contattori di filtro, l'impedenza equivalente della motrice sarebbe di circa 50Ω (come dimostrato dalle prove), un valore di impedenza che permette di avere una corrente circolante in linea minore di 5,5 A durante le prove DPL e che quindi evita il fallimento delle prove ed i blocchi intempestivi degli interruttori di linea. Ai fini di evitare i blocchi intempestivi sarebbe sufficiente adottare un relè di minima tensione temporizzato, ma ciò sarebbe poco sicuro per i circuiti delle motrici infatti in caso di guasto al relè, la resistenza di precarica potrebbe essere sottoposta alle correnti di trazione che non è in grado di sopportare.

Per quanto riguarda la problematica relativa agli scoppi degli scaricatori di sovratensione, le misure di tensione effettuate in zona Sabotino hanno permesso di distinguere le sovratensioni che si sviluppano in rete durante il funzionamento ordinario in due categorie:

- sovratensioni lunghe;
- sovratensioni impulsive.

Le sovratensioni impulsive possono avere picchi molto elevati (il massimo rilevato è di circa 1450 V) ma hanno una durata brevissima (qualche millisecondo), di conseguenza hanno un contenuto energetico esiguo. Si reputa perciò che tali sovratensioni non influiscano sensibilmente sugli scoppi degli scaricatori. Queste sovratensioni si ritiene che siano riconducibili a manovre. Tra le operazioni che possono provocare sovratensioni di manovra in una rete tranviaria DC vi sono l'interruzione da parte di interruttori e il contatto irregolare tra pantografo e linea di contatto (passaggio sotto incroci o divisori di zona).

Le sovratensioni lunghe invece hanno picchi discretamente elevati (generalmente compresi tra 900 V e 1000 V) e hanno durata di qualche secondo (la più lunga dura circa 6 s), di conseguenza hanno un contributo energetico molto elevato. Si ipotizza quindi che tali sovratensioni siano la causa degli scoppi degli scaricatori. Tramite misure eseguite a bordo della motrice 5051, si è dimostrato che le sovratensioni lunghe sono generate durante la frenata elettrodinamica delle motrici della serie 5000 quando il traffico tranviario è ridotto. Siccome non sono note con precisione le tempistiche e le modalità con cui avviene la frenatura di queste vetture è stato possibile solamente ipotizzare che tale

fenomeno sia legato alle tempistiche di coordinamento della frenata rigenerativa e della frenata reostatica.

Siccome durante il periodo in cui sono state eseguite le misure non si sono verificati scoppi di scaricatori, si suppone che le sovratensioni lunghe non provochino gli scoppi con eventi singoli, ma per logoramento. Si suppone cioè che siccome tali sovratensioni si verificano più volte al giorno tutti i giorni logorino gli scaricatori fino a provocarne il cedimento.

A seguito dell'analisi sviluppata in questa tesi si ritiene necessario:

- verificare come le sovratensioni lunghe influiscano sul deterioramento degli scaricatori di sovratensione in modo da validare o scartare l'ipotesi proposta;
- approfondire tramite uno studio dedicato come avviene la frenata sulle motrici della serie 5000 in modo da capire le cause per cui vengono generate le sovratensioni lunghe ed eventualmente per validare l'ipotesi proposta.

Infine, dall'analisi dei consumi è emerso che le motrici della serie 6000 sono più energivore di quella della serie 5000. Infatti, le misure effettuate sulla motrice 5051 hanno evidenziato un consumo al km pari a 3,30 kWh/km ed un consumo orario con motrice in sosta pari a 1,58 kWh/h, mentre quelle sulla motrice 6031 hanno evidenziato un consumo al km pari a 4,74 kWh/km ed un consumo orario con motrice in sosta pari a 28,40 kWh/h.

Il consumo chilometrico relativo alla sola locomozione, ottenuto estrapolando il consumo degli ausiliari lungo tutta la tratta dal consumo globale è pari a 3,13 kWh/km per la motrice 5051 mentre è pari a 2,38 kWh/km per la motrice 6031. Ciò dimostra il fatto che il maggior consumo chilometrico globale ottenuto per le motrici delle serie 6000, è dovuto ad un maggiore consumo da parte degli ausiliari che, come nel caso del condizionamento (le 6000 dispongono della climatizzazione di tutto il veicolo mentre le 5000 della sola cabina di guida), è un valore aggiunto per il comfort dei passeggeri.

Il confronto fra il consumo globale dei due tram analizzati e quello dell'autobus urbano a 2 assi IRISBUS CITELIS 12.29 DIESEL EEV ha messo in evidenza che la motrice della serie 5000 presenta il minor consumo in tep al km per persona dei tre veicoli considerati, mentre l'autobus presenta il maggiore. Infatti, nonostante un consumo al km molto basso, l'autobus presenta una capienza ridotta (102 posti) mentre la motrice 5000, nonostante un consumo chilometrico maggiore, può trasportare circa il doppio delle persone (181 posti). La motrice della serie 6000 è quella con maggiore capienza (197 posti) ma anche quella con il maggior consumo globale al km. Di conseguenza il suo consumo in tep al km per persona è di poco inferiore a quello dell'autobus.

Elenco delle tabelle

2.1	Dati di targa del trasformatore	11
2.2	Dati di targa del raddrizzatore	11
2.3	Dati di targa dell'interruttore	13
3.1	Misura di impedenza motrici 5000 con banco a 0	38
3.2	Misura di impedenza motrici 5000 con banco a 1 e IR aperti	39
3.3	Misura di impedenza motrici 5000 con banco a 1 e IR chiusi	40
3.4	Misura di impedenza motrici 5000 con banco AVANTI	41
3.5	Risultati del primo set di prove effettuate allo stadio	56
3.6	Misure di impedenza banco a 1 e contattori di filtro chiusi	57
3.7	Misure di impedenza banco a 1 e contattori di filtro aperti	57
5.1	6031 - Risultati parte uno	95
5.2	6031 - Risultati parte due	95
5.3	6031 - Risultati parte tre	97
5.4	6031 - Risultati parte quattro	99
5.5	6031 - Confronto risultati	102
5.6	Consumo chilometrico e orario delle motrici 5051 e 6031	103
5.7	Consumo chilometrico relativo alla sola locomozione	104
5.8	Dati delle motrici della serie 5000	105
5.9	Dati delle motrici della serie 6000	105
5.10	Dati dell'autobus urbano IRISBUS CITELIS 12.29 DIESEL EEV	105
5.11	Confronto consumo bus - tram	106

Elenco delle figure

2.1	Zone di alimentazione della rete tranviaria torinese, in concessione da GTT	8
2.2	Modello semplificato della rete con profili di tensione	9
2.3	Schema generale di SSE Trapani	10
2.4	Quadro positivo SSE Trapani	12
2.5	Quadro negativo SSE Trapani	14
2.6	Divisore di zona	15
2.7	Motrice della serie 2800	16
2.8	Motrice della serie 5000	17
2.9	Schema di potenza motrice serie 5000 - Particolare azionamento cassa A .	20
2.10	Possibili configurazioni in marcia e in frenatura per motrici serie 5000 . .	22
2.11	Banco di comando di una motrice della serie 5000	23
2.12	Motrice della serie 6000	25
2.13	Schema fusibile più contattore in uso sulle motrici della serie 6000	26
2.14	DPL da norma CEI EN 50123-7-1 [8]	29
2.15	Relè DIA-IGTv [10]	30
2.16	DPL in SSE - Trapani [1]	32
2.17	Schema DPL in dotazione ad InfraTO	33
3.1	Impedenzometro Hioki 3532-50 LCR HiTESTER	37
3.2	Schema elettrico della misura di impedenza con impedenzometro	37
3.3	Circuito equivalente delle motrici 5000 con banco ad 1 e contattori 1K1 e 1K2 aperti	44
3.4	Circuito equivalente delle motrici 5000 con banco ad 1 e contattori 1K1 e 1K2 chiusi	44
3.5	Regolatore chopper dell'azionamento A della motrice 5047	46
3.6	Disposizione degli strumenti di misura in cabina stadio	47
3.7	Andamento di corrente e tensione registrati durante la prova a vuoto . . .	50
3.8	Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco a 0	51
3.9	Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco AVANTI	51
3.10	Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1)	52
3.11	Banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1) - Ingrandimento delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL . .	53

3.12 Banco a 1 (passaggio da banco AVANTI a banco a 1) - Diagramma fasoriale delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL	53
3.13 Andamenti di tensione e corrente registrati durante la prova con banco a 1 (passaggio da banco a 0 a banco a 1)	54
3.14 Banco a 1 (passaggio da banco a 0 a banco a 1) - Ingrandimento delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL	55
3.15 Banco a 1 (passaggio da banco a 0 a banco a 1) - Diagramma fasoriale delle registrazioni di tensione e corrente durante la prima delle 3 prove DPL	55
3.16 Prova Dc - Banco a 1 e contattori di filtro chiusi - Andamenti di tensione e corrente	59
3.17 Prova Dc - Banco a 1 e contattori di filtro aperti - Andamenti di tensione e corrente	59
3.18 Prova Dc - Modello del circuito delle 5000 con banco a 1 e contattori chiusi usato su LTspice	60
3.19 Prova Dc - Modello del circuito delle 5000 con banco a 1 e contattori aperti usato su LTspice	60
3.20 Prova Dc - Risultati della simulazione del caso con banco a 1 e contattori chiusi	61
3.21 Prova Dc - Risultati della simulazione del caso con banco a 1 e contattori aperti	61
3.22 Prova Dc - Confronto tra i risultati del modello e le misure effettuate allo stadio, caso contattori chiusi	62
3.23 Prova Dc - Confronto tra i risultati del modello e le misure effettuate allo stadio, caso contattori aperti	62
4.1 Esempio di scaricatore scoppiato in cabina	66
4.2 Alimentazione delle zona Sabotino durante le misure	67
4.3 Esempio di sovratensione impulsiva	67
4.4 Esempio di sovratensione lunga	68
4.5 Statistica oraria delle sovratensioni	69
4.6 Istogramma delle occorrenze dei picchi	70
4.7 Cumulata dei picchi	70
4.8 Diagramma giornaliero dei picchi	71
4.9 Diagramma orario dei picchi	71
4.10 Istogramma delle occorrenze delle durate	72
4.11 Cumulata delle durate	73
4.12 Diagramma giornaliero delle durate	73
4.13 Diagramma orario delle durate	74
4.14 Diagramma orario delle sovratensioni impulsive	75
4.15 Diagramma orario delle sovratensioni lunghe	75
4.16 Statistica combinata di durate e picchi	76
4.17 Piastra di metallo posizionata in corrispondenza di un incrocio	78
4.18 Sovratensione lunga rilevata a bordo della motrice 5051	79
4.19 Azionamento cassa A - Percorsi principali di corrente - Marcia AVANTI e frenatura AVANTI	83

4.20	Modello LTspice della frenata delle 5000	84
5.1	Cassoni utilizzati per zavorrare la motrice 5051	86
5.2	Registratore digitale Hioki MR 8880	86
5.3	Sonde di corrente e tensione.	86
5.4	5051 - Percorso su cui è stata effettuata la misura.	87
5.5	5051 - Andamenti in funzione del tempo.	88
5.6	5051 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di accelerazione.	89
5.7	5051 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di recupero.	89
5.8	5051 - Andamenti delle grandezze elettriche filtrate in fase di accelerazione.	90
5.9	5051 - Andamenti delle grandezze elettriche filtrate in fase di recupero.	90
5.10	5051 - Andamenti delle grandezze elettriche filtrati	91
5.11	5051 - Andamenti delle grandezze elettriche durante la sosta al capolinea delle Vallette.	92
5.12	Posizionamento della pinza amperometrica e della sonda di tensione sull'imperiale della motrice 6031	93
5.13	6031 - Percorso su cui è stata effettuata la misura.	94
5.14	6031 - Parte uno, andamenti in funzione del tempo.	96
5.15	6031 - Parte due, andamenti in funzione del tempo.	97
5.16	6031 - Parte tre, andamenti in funzione del tempo.	98
5.17	6031 - Parte quattro, andamenti in funzione del tempo.	100
5.18	6031 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di accelerazione	101
5.19	6031 - Andamenti delle grandezze elettriche in fase di recupero	101

Bibliografia

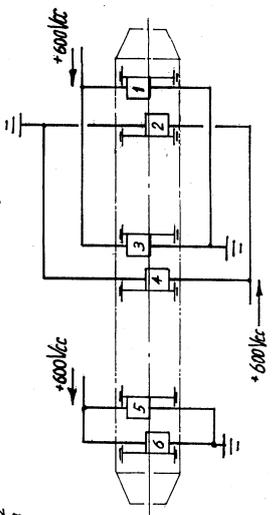
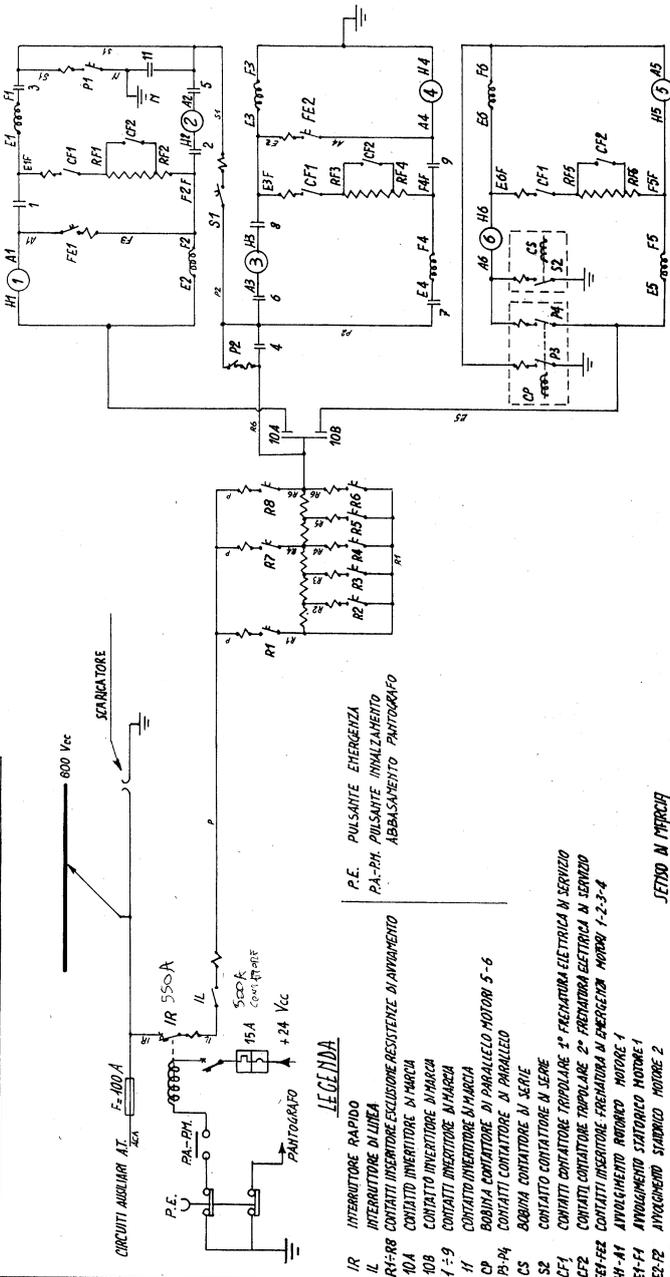
- [1] F.Scolamiero, Ottimizzazione dei sistemi di protezione della rete tranviaria torinese, Torino: Politecnico di Torino, Tesi di Laurea Magistrale 2016.
- [2] Motrici tranviarie a pavimento ribassato, Descrizione e norme di guida
- [3] Norma CEI EN 50327 (classificazione CEI 9-81), Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Armonizzazione dei valori di targa per gruppi di conversione e prove sui gruppi di conversione, Milano, CEI, 2003.
- [4] Norma CEI EN 50327/A1 (9-81;V1), Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Armonizzazione dei valori di targa per gruppi di conversione e prove sui gruppi di conversione, Milano, CEI, 2005.
- [5] Specifica tecnica: interruttori extrarapidi serie IR6000.
- [6] <Tram di Torino>, [Online]. Available: <http://www.tramditorino.it/>.
- [7] Elettromotrice tramviaria a pavimento ribassato serie 6000. Descrizione, uso e manutenzione.
- [8] Norma CEI EN 50123-7-1, Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi - Apparecchiatura a corrente continua.
Parte 7: Apparecchi di misura, comando e protezione per uso specifico in sistemi di trazione a corrente continua .
Sezione 1: Guida applicativa.
- [9] EMC, Manuale operativo: Sistema di protezione e diagnostica DIA-IGTV.
- [10] E.Pons, La sicurezza elettrica delle persone nei sistemi di alimentazione della rete tranviaria torinese, Torino: Politecnico di Torino, dottorato di ricerca 2008.
- [11] D.Paul, "Light rail transit DC traction power system surge overvoltage protection" IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 38, No. 1, pp. 21-28, Jan./Feb. 2002.
- [12] L.Bramardi, Studio sperimentale delle correnti ordinarie e di guasto nella rete tranviaria torinese per l'ottimizzazione delle protezioni, Torino: Politecnico di Torino, Tesi di Laurea Magistrale 2017.
- [13] Schede tecniche del parco veicoli GTT, Novembre 2015.

Allegati

Allegato A

Schemi delle motrici serie 2800

N.B.: Schema ausiliari. A.T. M. ATM n° 19523
 Schema contatti dell'interuttore M.S. ATM n° 19521
 Schema ausiliari circuiti di avviamento B.T. D.S. ATM n° 19537



am 770 azienda tranvie municipali-torino

Materiale Mobile Programmazione Organizzazione e Sviluppo Ufficio Tecnico

Matrici tranviarie Serie 2800 I e II

SCHEMA DI AVVIAMENTO E FRENATURA

disegn. *Gioco* *Antoni* *Costo*

scab. *Costo*

data 16-11-92

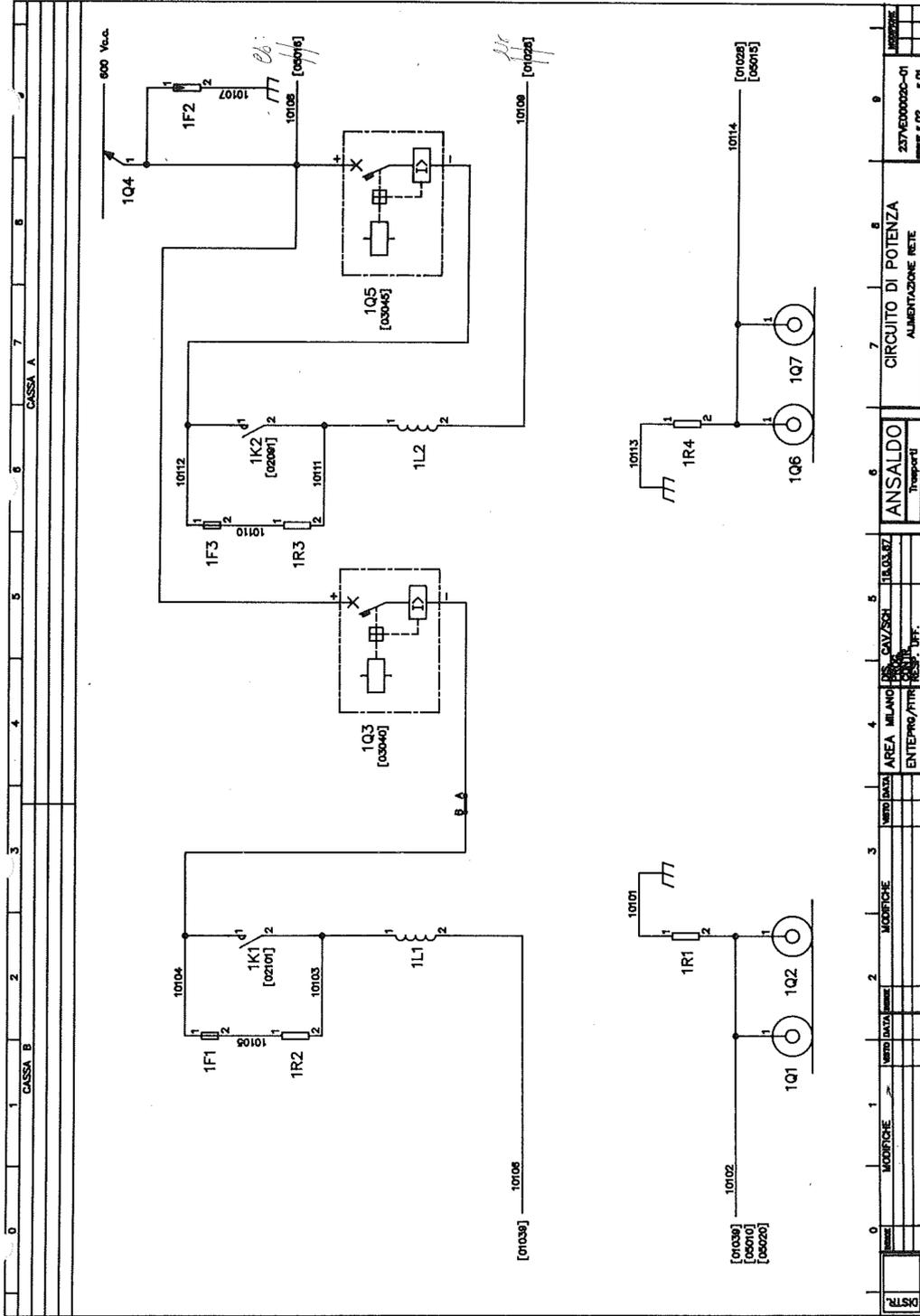
posizione archivio 7/6/13

numero del disegno 19522/3

(3) MODIFICA INERZIONE R410 1-3... (R4-5-8)
 (2) Agente F. B. L. (5/6/91)
 (1) Agente L. R. e P. F. (7-4-95)

Allegato B

Schemi delle motrici serie 5000



0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pos.	Schema	Denominazione	A. TR.	Tipo	Identificazione	Rif. fogli	Ubicaz. veicolo	Note	
1	1A1	Convertitore di potenza a chopper cassa A	A. TR.		ST70.0329	02	IMA		
2	-C1	Condensatori di filtro di linea							
3	-G1	Convertitore cc/cc di comando GTO							
4	-G2	Convertitore cc/cc di comando GTO							
5	-G3	Convertitore cc/cc di comando GTO							
6	-L1	Induttanza di protezione							
7	-R1	Resistenza serie trasduttore -U2							
8	-R2	Resistenza serie trasduttore -U4							
9	-R3	Resistenza di scarica condens. di filtro							
10	-T1	Trasformatore di corrente condens. di filtro							
11	-U1	Trasduttore corrente armatura motore							
12	-U2	Trasduttore tensione armatura motore							
13	-U3	Trasduttore corrente campo motore							
14	-U4	Trasduttore tensione condens. di filtro							
15	-U5	Trasduttore corrente di linea							
16	-V1	Tiristore di configurazione marcia 'AV'						= TC4	
17	-V2	Diode di frenatura marcia 'AV'							
18	-V3	Tiristore di configurazione marcia 'IN'						= TC3	
19	-V4	Diode di frenatura marcia 'IN'							
20	-V5	Tiristore di configurazione marcia 'AV'						= TC1	
21	-V6	Tiristore di configurazione marcia 'IN'						= TC2	
22	-V7	G.T.O. di shuntaggio campo motore							
23	-V8	Diode di ricalco campo motore							
24	-V9	G.T.O. di frenatura							
25	-V10	G.T.O. principale							
26	-V11	Diode di ricalco							
27	-V12	Tiristore di cortocircuito linea							
28	-V13	Diode di ricalco res. di frenatura							

BNA = Banco di manovra	CCHA = Cassone comando Ch.A	SCA = Sottocassa A	IMA = Imperiale A	TAA = Telaio app. auell. A
CBC = Cabina di guida	CCHB = Cassone comando Ch.B	SCB = Sottocassa B	IMB = Imperiale B	PPT = Piattaforma post.
VPA = Vano app. pneumat. A	PSB = Pannello sez. batt.			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
MODIFICHE	DATA	INIZIATE	MODIFICHE	DATA	INIZIATE	MODIFICHE	DATA	INIZIATE
APPROVAZIONE	DATA	INIZIATE	APPROVAZIONE	DATA	INIZIATE	APPROVAZIONE	DATA	INIZIATE
ANSA LDO						CIRCUITO DI POTENZA		
ELENCO COMPONENTI						ELENCO COMPONENTI		
237-V000003C-61						237-V000003C-61		
REVISIONE						REVISIONE		

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pos.	Schema	Denominazione		Tipo	Identificazione	Rif. fogli	Ubicaz. veicolo	Note	
29	-X1	Connettore							
30	-X2	Connettore							
31	-X3	Connettore							
32									
33	1A2	Convertitore di potenza a chopper cassa B	A.T.R.		S170.0329	03	IMB		
34	-C1	Condensatori di filtro di linea							
35	-G1	Convertitore cc/cc di comando G.T.O.							
36	-G2	Convertitore cc/cc di comando G.T.O.							
37	-G3	Convertitore cc/cc di comando G.T.O.							
38	-L1	Induttanza di protezione							
39	-R1	Resistenza serie trasduttore -U2							
40	-R2	Resistenza serie trasduttore -U4							
41	-R3	Resistenza di scarica condens. di filtro							
42	-T1	Trasformatore di corrente condens. di filtro							
43	-U1	Trasduttore corrente armatura motore							
44	-U2	Trasduttore di tensione armatura motore							
45	-U3	Trasduttore corrente campo motore							
46	-U4	Trasduttore tensione condens. di filtro							
47	-U5	Trasduttore corrente di linea							
48	-V1	Tristore di configurazione marcia 'AV'							
49	-V2	Diode di frenatura marcia 'AV'							
50	-V3	Tristore di configurazione marcia 'IN'							
51	-V4	Diode di frenatura marcia 'IN'							
52	-V5	Tristore di configurazione marcia 'AV'							
53	-V6	Tristore di configurazione marcia 'IN'							
54	-V7	G.T.O. di shuntaggio campo motore							
55	-V8	Diode di rielenco campo motore							
56	-V9	G.T.O. di frenatura							

BMA = Banco di manovra CCHA = Cassone comando Ch.A SCA = Sottocassa A IMA = Imperiale A TAA = Telaio app. ausil. A
 CBG = Cabina di guida CCHB = Cassone comando Ch.B SCB = Sottocassa B IMB = Imperiale B PPT = Piattaforma post.
 VPA = Vano app. pneumat. A PSB = Pannello sez. batt.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
LEADER	MODIFICHE	DATA	AREA	ENTE	TRAGUARZI	ANSALDO	CIRCUITO DI POTENZA	237VE00002C-61	237VE00002C-61
IN	DATA	AREA	ENTE	TRAGUARZI	ANSALDO	CIRCUITO DI POTENZA	237VE00002C-61	237VE00002C-61	237VE00002C-61
IN	DATA	AREA	ENTE	TRAGUARZI	ANSALDO	CIRCUITO DI POTENZA	237VE00002C-61	237VE00002C-61	237VE00002C-61

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pos.	Schema	Denominazione	Tipo	Identificazione	Rif. fogli	Ubicaz. veicolo	Note		
85									
86									
87									
88	1M1	Motore di trazione	TIBB -4E.L02245-.540V, 150KW	ST95.0331	02	SCA	Competenza TIBB		
89	1M2	Motore di trazione	TIBB -4E.L02245-.540V, 150KW	ST95.0331	03	SCB	Competenza TIBB		
90									
91									
92									
93	1Q1	Dispositivo ritorno corr. carrello mot. B	FERRAZ		01	SCB	Competenza meccanico		
94	1Q2	Dispositivo ritorno corr. carrello mot. B	FERRAZ		01	SCB	Competenza meccanico		
95	1Q3	Interruttore rapido di linea azion. B	B.B.C.(TIBB)-UR 6 E d e 24T, bob=24Vcc		01	CCHA	Competenza TIBB		
96	-K1	Bobina di comando interruttore							
97	-S1	Contatto ausiliario di scambio interruttore							
98	-S2	Contatto ausiliario di scambio interruttore							
99	-S3	Contatto ausiliario di scambio interruttore							
100	-S4	Contatto ausiliario di scambio interruttore							
101	-S5	Contatto ausiliario di scambio interruttore							
102	-S6	Contatto ausiliario di scambio interruttore							
103									
104									
105	1Q4	Pentografo	SOCIMI PTA 08.2390	ST15.0326	01	IMA			
106	1Q5	Interruttore rapido di linea azion. A	B.B.C.(TIBB)-UR 6 E d e 24T, bob=24Vcc		01	CCHA	Competenza TIBB		
107	-K1	Bobina di comando interruttore							
108	-S1	Contatti ausiliari di scambio interruttore							
109	-S2	Contatti ausiliari di scambio interruttore							
110	-S3	Contatti ausiliari di scambio interruttore							
111	-S4	Contatti ausiliari di scambio interruttore							
112	-S5	Contatti ausiliari di scambio interruttore							

BMA = Banco di manovra
 CBG = Cabina di guida
 VPA = Vano app. pneumat. A
 CCHA = Cassone comando Ch.A
 CCHB = Cassone comando Ch.B
 PCB = Pannello sez. batt.

IMA = Imperiale A
 IMB = Imperiale B
 TAA = Telaio app. ausil. A
 PPT = Piattaforma post.

ANSALDO
 CIRCUITO DI POTENZA
 ELENCO COMPONENTI

2576300000-01
 18.03.87
 AREA
 ENTE

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pos.	Signo schema	Denominazione	Identificazione	Tipologia	Identificazione	Rif. Ubicaz. fogli veicolo	Note		
113	-S6	Contatti ausiliari di scambio interruttore							
114									
115									
116	106	Dispositivo ritorno corr. carrello mot. A	FERRAZ			01	Competenza meccanica		
117	107	Dispositivo ritorno corr. carrello mot. A	FERRAZ			01	Competenza meccanica		
118									
119									
120									
121	1R1	Resistenza di terra cassa B	ANSALDO-4100CSP42B-0,42ohm+-10% - 440W		211VR00024B01	01	SCB		
122	1R2	Resistenza di precarica cond. di filtro B	SECI RSS 260.100ohm+-5% - TA		211VR00025B02	01	CCHB		Mont. su supp. tel. S17/A 280 Spec. met. 211V00026B01
123	1R3	Resistenza di precarica cond. di filtro A	SECI RSS 260.100ohm+-5% - TA		211VR00025B02	01	CCHA		Mont. su supp. tel. S17/A 280 Spec. met. 211V00026B01
124	1R4	Resistenza di terra cassa A	ANSALDO-4100CSP42B-0,42ohm+-10% - 440W		211VR00024B01	01	SCA		
125	1R5	Resistenza di shuntaggio campo motore A	MICROELETRICA SCIENTIFICA - 0,32ohm/40A		ST30.0322	02	IMA		Fissata su unico telaio con 1R7;1R9;1R11. Competenza TBB
126	1R6	Resistenza tampona azionamento cassa A	MICROELETRICA SCIENTIFICA - 0,912ohm		ST30.0330	02	IMB		Fissata su unico telaio con 1R5;1R9;1R11. Competenza TBB
127	1R7	Resistenza di frenatura azionam. cassa A	MICROELETRICA SCIENTIFICA -1,577ohm		ST30.0330	02	IMA		Le due sezioni di resistenza devono essere collegate in //
128	1R8	Resistenza di frenatura di linea az. A	ANSALDO-4100C5SP15C0102-1,51ohm-1220W		211ER20723B01	02	IMA		Fissata su unico telaio con 1R5;1R7;1R11. Competenza TBB
129	1R9	Resistenza tampona azionamento cassa B	MICROELETRICA SCIENTIFICA - 0,912ohm		ST30.0330	03	IMB		
130	1R10	Resistenza di shuntaggio campo motore B	MICROELETRICA SCIENTIFICA - 0,32ohm/40A		ST30.0332	03	IMB		Fissata su unico telaio con 1R5;1R9;1R11. Competenza TBB
131	1R11	Resistenza di frenatura azion. cassa B	MICROELETRICA SCIENTIFICA - 1,577ohm		ST30.0330	03	IMB		Le due sezioni di resistenza devono essere collegate in //
132	1R12	Resistenza di frenatura di linea az. B	ANSALDO-4100C5SP15C0102-1,51ohm-1220W		211VR00024B02	03	IMB		

BMA = Banco di manovre; A
 CBC = Cabina di guida
 VPA = Vano opp. pneumatici; A
 CCHA = Cassone comando Ch.A
 CCHB = Cassone comando Ch.B
 VPS = Pannello sez. batt.

IMA = Imperiale A
 IMB = Imperiale B

TAA = Telaio app. ausil. A
 PPT = Piattaforma post.

ANSALDO
 AREA MILANO
 ENTITE ISV
 BRG CAL/SSA
 CONT. 18.03.87
 RESP. UFF.

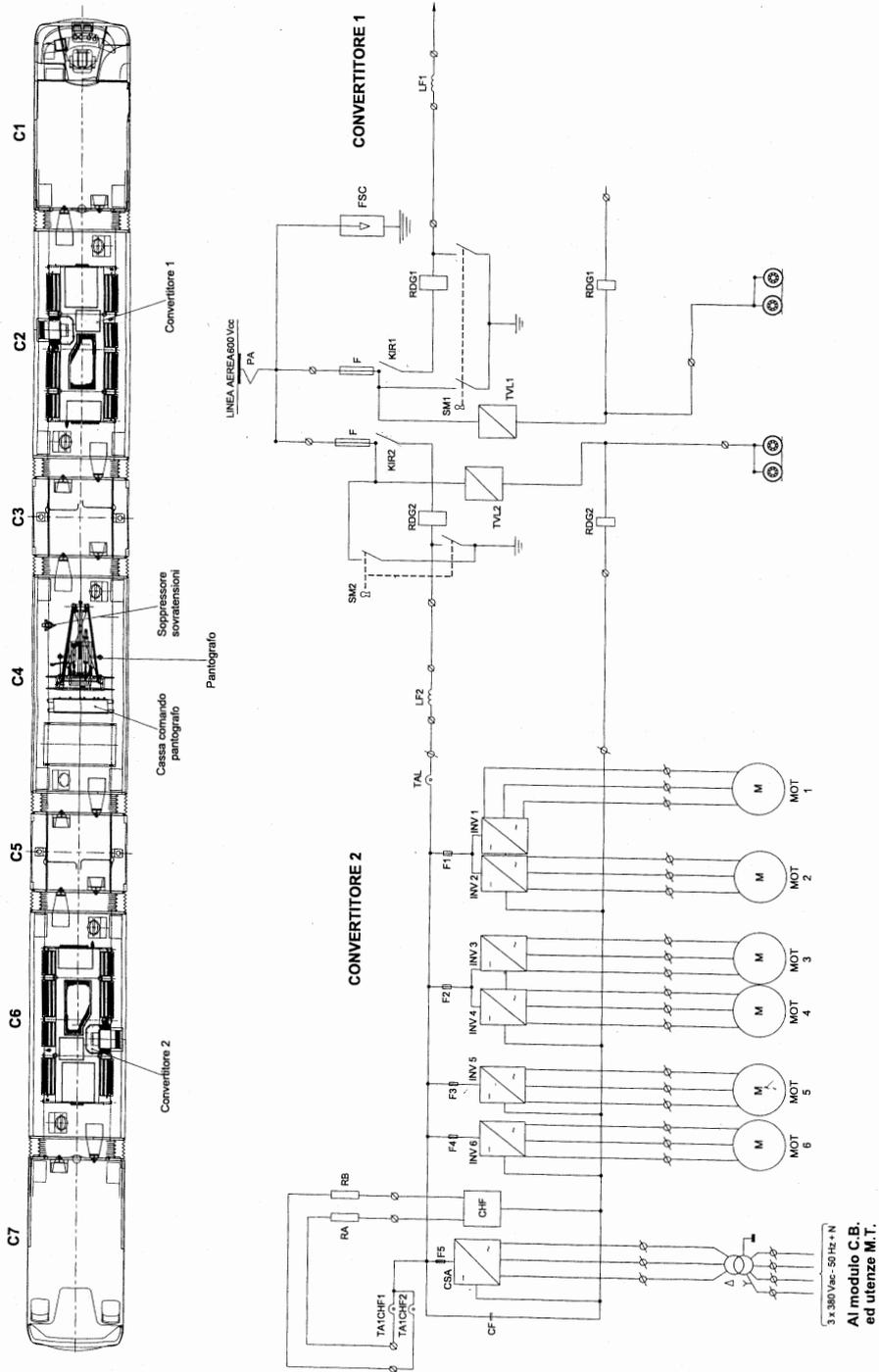
CIRCUITO DI POTENZA
 ELENCO COMPONENTI

LABORERIE
 237VE0002C-61
 SECF. F. --- F.05.

Allegato C

Schemi delle motrici serie 6000

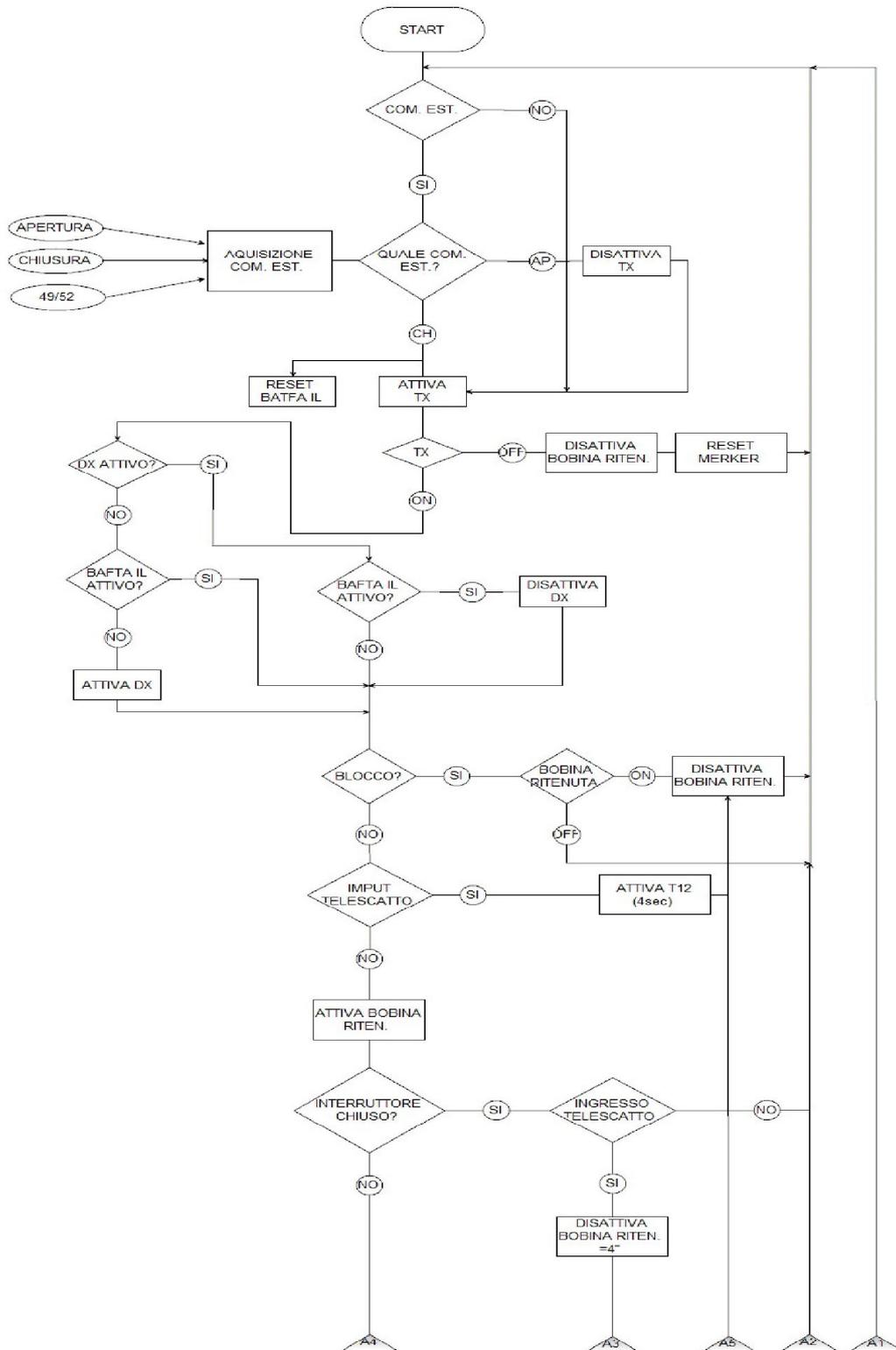
FIG. 2-5 CONFIGURAZIONE EQUIPAGGIAMENTO DI TRAZIONE



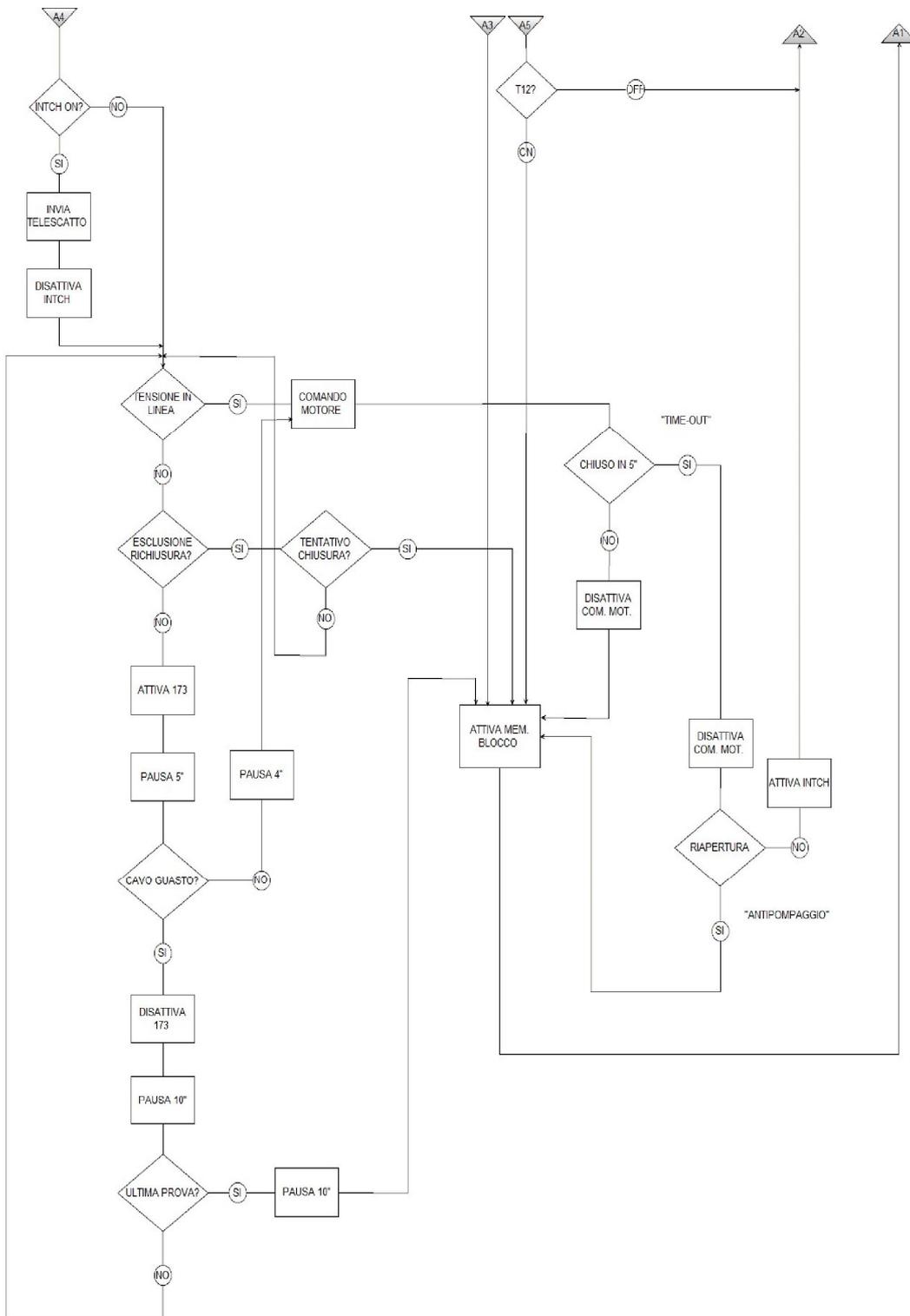
2-19 (2.20 Bianca)

Allegato D

Schema a blocchi del DPL



D – Schema a blocchi del DPL



Allegato E

**Interruzioni del servizio - Dati
storici GTT**

E – Interruzioni del servizio - Dati storici GTT

N progr sivo	DATA	ORA	LUOGO	ZONA	loc (A)	ALIMENTATO DA SSE	INTERVE NTO DIA IGTV PER (-; di<ct>; ecc.)	Motivo presunto	Esiste salvataggio file o altra registrazion e esterna?	Nome dei file dei dati recuperati	MOTRICI PRESENTI
1	13/12/2013	02.01		24		VALDO FUSI		PRESUNTA POSA LUMINARIE	NO	NO	
2	19/03/2014	xxxx	PELTINE SAN PAOLO	52	7285	CAB. TRAPANI	di	AGG. PANT. 2858	SI	19032014	
3	25/03/2014	22.30	CAIO MARIO	37	921	CAIO MARIO	di	di 100A/ms troppo bassa	SI	25032014	
4	26/03/2014	21.40	MONGINEVRO / TRAPANI	20	2702	CAB. TRAPANI	di	Motrice 2851 o 2899 apertura e chiusura	SI	26032014	1
5	26/03/2014	21.40	MONGINEVRO / TRAPANI	52	1000	CAB. TRAPANI	di	Motrice 2851 o 2899 apertura e blocco	SI	26032014	1
6	29/03/2014	15.33	DEP. TRAPANI	52	2785	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	29032014	
7	08/04/2014	xxxx	DEP. TRAPANI	52	9910	CAB. TRAPANI	di	CEDIMENTO RETE INTERNA DEPOSITO	SI	9042014	
8	09/04/2014	xxxx	DEP. TRAPANI	52	1400	CAB. TRAPANI	di	Motrice 2879 con motori i oc	SI	9042014	
9	26/05/2014	11.50	MONGINEVRO / DE SANTIS	20	4880	CAB. TRAPANI	di	AGGANCIAMENTO AUTOCARRO	SI	26052014	
10	09/10/2014	21.01	VIA MONGINEVRO	20	2300	CAB. TRAPANI	di	Probabile guasto motrice 5006	SI	9102014	
11	06/11/2014	00.58	DEP. TRAPANI	52	2746	CAB. TRAPANI	di	Filo a terra cavo aperto e richiuso in automatico	SI	6112014	
12	13/11/2014	circa 17	ORBASSANO	10	XXX	DUC AD'AOSTA	XXXX	NON EMERSE	xxx	xxxx	
13	14/11/2014	01.20	VIA MONGINEVRO	20	2695	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	14112014	
14	XXXX	XXXXX	DEP. TRAPANI	52	7571	CAB. TRAPANI	di	NON SAPPAMO NULLA	SI	15112014	
15	17/01/2015	17.15	DEP. TRAPANI	52	2317	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	17012015	
16	18/01/2015	22.00	SETTEMBRINI	46	5635	CAIO MARIO	DR >	NON EMERSE	SI	18012015	
17	27/01/2015	16.00	VITTORIO	19	2125	VALDO FUSI	di	NON EMERSE	SI	27012015	
18	03/02/2015	21.06	S. PAOLO	20	2420	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	2022015	
19	04/02/2015	7.12	S. PAOLO	20	2567	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	4022015	
20	05/02/2015	13.58	SETTEMBRINI	46	4297	CAIO MARIO	l->	NON EMERSE	SI	5022015	
21	11/02/2015	06.53	S. PAOLO	20	2900	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	11022015	
22	11/02/2015	21.00	VITTORIO	19	2394	VALDO FUSI	di	NON EMERSE	SI	11022015	1
23	16/02/2015	9.04	SETTEMBRINI	46	2349	CAIO MARIO	EXP	NON EMERSE	SI	16022015	
24	17/02/2015	05.41	SETTEMBRINI	46	1339	CAIO MARIO	di	NON EMERSE	SI	17022015	
25	21/02/2015	04.54	S. PAOLO	20	3195	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	61022015	
26	25/02/2015		TAZZOLI	45	2907	CAIO MARIO	l->	NON EMERSE	SI	25022015	
27	28/02/2015	07.32	DEP. TRAPANI	52	9927	CAB. TRAPANI	di	GUASTO INTERRUOTTORE OFFICNA		28022015	
28	28/02/2015	07.32	S. PAOLO	20	1547	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	28022015	1
29	02/05/2015	05.10	S. PAOLO	20	2746	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	2052015	
30	02/05/2015	05.10	DEP. TRAPANI	52	801	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	2052015	1
31	09/05/2015	10.37	VITTORIO	19	1868	VALDO FUSI	di	NON EMERSE	SI	9052015	
	06/05/2015	06.27	ROSSINI	12		GAS STIGE		NON EMERSE			5026-5038-2889- 2883-5018-2894- 2886
	11/05/2015	09.40	S. PAOLO	20	2734	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	11052015	2882-5010-2845- 5012-5002
32	04/06/2015	19.26	MADAMA	24	1587	VALDO FUSI	di	NON EMERSE	SI	4062015	
	05/08/2015	04.12	POTENZA	50		TRABOSCHI		MOTRICE 5017			6030-6031
34	14/08/2015	17.59	MADAMA	24	2279	VALDO FUSI	di	NON EMERSE	SI	14082015	
	05/09/2015	16.22	ROSSINI	12		GAS STIGE		MOTRICE 2877			2877-5008-5040- 6022
35	03/09/2015	matinata	VITTORIO	19	5520	VALDO FUSI	di	ESCAVATORE TOCCA LA RETE	SI	3092015	
	12/09/2015	07.00	CASALE	13		GAS STIGE		NON EMERSE			2877-5088-6039- 6031-2882-5004- 2809-5050-2889- 5007
	16/09/2015	12.56	BORGARO	7		MARTINETTO		NON EMERSE			5047-2872-2882- 5024
36	06/10/2015	03.57	S. PAOLO	20	2489	CAB. TRAPANI	di	MOTRICE 2868 CON MOTORI IN CC	SI	6102015	2868
37	XXXX	xxx		20	2535	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	nad	
38	27/10/2015	23.30	SETTEMBRINI	46	2023	CAIO MARIO	di	NON EMERSE	SI	27102015	
39	28/10/2015	06.15	VITTORIO	19	2522	VALDO FUSI	di	NON EMERSE	SI	28102015	
40	30/10/2015	05.21	S. PAOLO	20	2944	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	30102015	2868-2882-2801
41	09/11/2015	08.13	DEP. TRAPANI	52	3515	CAB. TRAPANI	di	MOTRICE 2824	SI	9112015	2824
42	14/11/2015	20.40	S. PAOLO	20	2721	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE MOTRICE GUASTA	SI	14112015	5013-5048-5015- 2868
	23/11/2015	06.53	S. PAOLO	20	2682	CAB. TRAPANI	di	NON EMERSE	SI	23112015	
43	05/12/2015	23.50	DEP. TRAPANI	52	3951	CAB. TRAPANI	di	MOTRICE 2869	SI	5122015	
44	11/12/2015	06.31	VITTORIO	19	2108	VALDO FUSI	di	NON EMERSE	SI	11122015	N.B. CABINA GTT
47	07/01/2016	xxx	SETTEMBRINI		837	CAIO MARIO	di	RICHIUSURA AVVENUTA	SI	7012016	
	15/01/2016	19.48	CASALE	13		GAS STIGE	maxl	NON EMERSE	SI	21122015	2856-2810-5039- 2857-2852-6018- 6048-6033-5023- 5015-2875
	17/01/2016	14.55	ROSSINI	12	3542	GAS STIGE	di	NON EMERSE	SI	21122015	5023-5015-6035- 2847-2901-2824- 2883-2877
48	17/01/2016	14.55	STIGE	12	4713			RICHIUSURA AVVENUTA	SI	22012016	
49	25/01/2016	15.54	VITTORIO	19		VALDO FUSI		probabile guasto su vettura 2824			2835-2834-2857- 2824-2809-5053- 5041-2810-5014
	25/01/2016	10.01	S. PAOLO	20		TRAPANI		probabile guasto su vettura 2824			2844-28511-5018- 2824
	22/01/2016		VITTORIO	19		VALDO FUSI		vettura guasta			5014-5039-2824- 5051-2819-5025- 2895-2898-2839- 2853
	18/02/2016	10.30	VITTORIO	19		VALDO FUSI		NON EMERSE			2851-5003-5049- 2880-2835-2870- 2802
	15/02/2016	12.46	VITTORIO	19		VALDO FUSI		NON EMERSE			2852-2890-5007- 2835-5045-5048- 2851-2881-2849- 2846
	15/02/2016	10.23	VITTORIO	19		VALDO FUSI		NON EMERSE			5008-2828-2851- 5009-2800-2849- 2889
	14/02/2016	11.47	GIULIO CESARE	4		AURORA		vettura guasta			6036
	12/02/2016	01.40	DEP. TRAPANI	52		TRAPANI		NON EMERSE			2854
	11/02/2016	13.15	DEP. TRAPANI	52		TRAPANI		NON EMERSE			nessuna in movimento nel deposito
	02/02/2016	10.06	SETTEMBRINI	46		CAIO MARIO		incidente-urto di macchina operatrice su linea aerea			5019-5020-5004
	03/02/2016	17.42	VITTORIO	19		VALDO FUSI		NON EMERSE			2893-5047-2855- 2815-2808-5024- 5030-2852-2851- 2853
	18/02/2016	06.44	TOSCANA	49		STADIO		vettura guasta 5030			5030-5027-2850
	22/02/2016	20.07	S. PAOLO	20		TRAPANI		presunta vettura in prova 5003			5003-5014-2848- 2890-5026-5010
	22/02/2016	21.07	VITTORIO	19		VALDO FUSI		NON EMERSE			2826-2848-5023- 5026-2848-2870
	24/02/2016	06.36	VITTORIO	19		VALDO FUSI		NON EMERSE			5032-5047-2890- 2868-2861-2878
	24/02/2016	09.15	S. PAOLO	20		TRAPANI		avaria 2890			5023-5014-2852- 2890-2800
	28/08/2016	11.09	PERCINCHE	10		MUGHETTI		NON EMERSE			2889
	25/08/2016	14.26	S. PAOLO	20		TRAPANI		NON EMERSE			2848-5025-2879

Allegato F

**Regolatori choppers delle motrici
serie 5000**

FIG. 21 - REGOLATORE CHOPPER

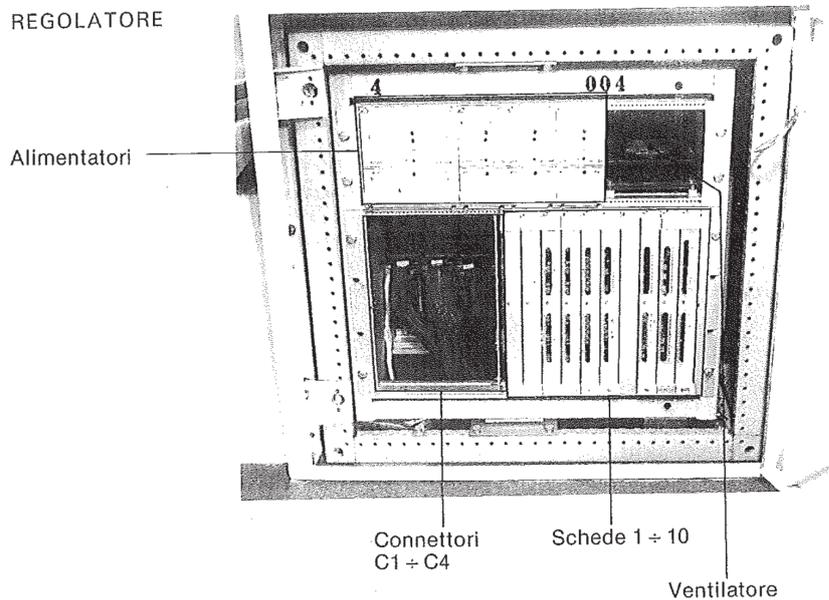
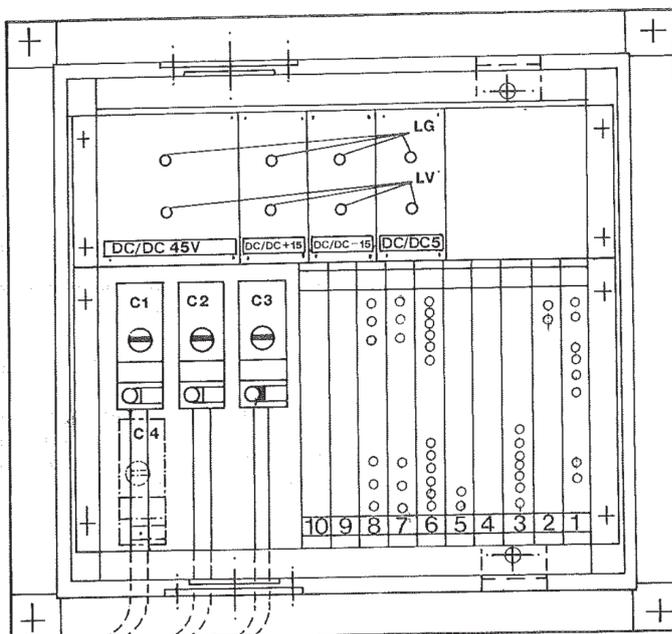


FIG. 22 - DISPOSIZIONE SCHEDE, ALIMENTATORI E CONNETTORI

- 1 SIAPG
- 2 CPU1 01
- 3 DIG
- 4 ***
- 5 TSR
- 6 ID1
- 7 OD1-01
- 8 OD1-02
- 9 ACC-04
- 10 ACC-04
- C1 ÷ C4 - Connettori
- LG - Led gialli
- LV - Led verdi



DISPOSIZIONE SEGNALE (LED) SULLE SCHEDE REGOLAZIONE
(1 → 3 5 + 8 -A FIG. 22)

SCHEDA SIAPG Pos. 1

(*)	DL2
(C)	DL1
O 1	DL2
O 4	DL5
O 13	DL4
O 16	DL3
O 19	DL6
O 22	DL1
O 29	DL7
O 32	DL8

- Tensione minore di 400 V. Accesso (ROSSO)
- Intervento del HOLD GATE GTO. Accesso (ROSSO)
- Tensione d'armatura massima. Accesso (ROSSO)
- Corrente d'armatura massima. Accesso (ROSSO)
- Shuntaggio oltre il 30%. Accesso (ROSSO)
- Tensione di linea maggiore di 720 V. Accesso (ROSSO)
- Intervento di protezione congruenza (MA/MI) Accesso (ROSSO)
- Mancata frenatura elettrica. Accesso (ROSSO)

SCHEDA CPU1-01 Pos. 2

(*)	D2
(C)	D3
O 1	D2
O 4	D3

- Intervento del WATCH-DOG. Accesso (ROSSO)
- Non utilizzato

SCHEDA DIG Pos. 3

(*)	DL2
(C)	DL1
O 29	DL2
O 32	DL1
O 35	DL4
O 38	DL7
O 41	DL5
O 44	DL6
O 47	DL3

NOTA: T1 e T4 vengono accesi per la marcia avanti
T2 e T3 vengono accesi per la marcia indietro
T2 viene acceso per la frenatura in marcia avanti
T1 viene acceso per la frenatura in marcia indietro

(*) Identificazione sul frontaino della scheda
(C) Identificazione sullo schema funzionale della scheda

SCHEDA TRS Pos. 5

(*)	DL1	DL2
(C)	DL1	DL2
O 53	DL1	DL2
O 30	DL2	DL1

Comandi dal manettino di banco
Luci VERDI

CODIFICA

ON	DL1	DL2
OFF	ON	ON
OFF	OFF	OFF

TRAZIONE
COASTING
FRENATURA

Malfunzionamento ricevitore VOV (ROSSA)

SCHEDA ID1 Pos. 6

(*)	DL1S	DL1P	DL1N
(C)	DL1S	DL1P	DL1N
O 7	DL1S	DL1P	DL1N
O 10	DL1S	DL1P	DL1N
O 13	DL1S	DL1P	DL1N
O 17	DL1S	DL1P	DL1N
O 20	DL1M	DL1H	DL1K
O 23	DL1M	DL1H	DL1K
O 29	DL1M	DL1H	DL1K
O 32	DL1E	DL1F	DL1C
O 36	DL1E	DL1F	DL1C
O 39	DL1E	DL1F	DL1C
O 42	DL1B	DL1A	DL1A
O 45	DL1A	DL1A	DL1A

Reserve

- Presenza di scambio accesa (GIALLA)
- Consenso CRM chiuso accesa (GIALLA)
- Intervento limite di velocità 36 Km/h accesa (GIALLA)
- Consenso CPR chiuso accesa (GIALLA)
- Consenso CDM chiuso accesa (GIALLA)
- Consenso CRT chiuso accesa (GIALLA)
- Consenso IR chiuso accesa (GIALLA)
- Consenso CDM chiuso accesa (GIALLA)
- Consenso CRT chiuso accesa (GIALLA)
- Consenso IR chiuso accesa (GIALLA)
- Comando marcia indietro accesa (GIALLA)
- Comando marcia avanti accesa (GIALLA)

SCHEDA OD1-01 Pos. 7

(*)	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG
(C)	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG
O 01	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG
O 13	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG
O 24	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG
O 31	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG
O 42	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG
O 55	DLA	DLB	DLC	DLF	DLG

- Comando chiusura CRM acceso (GIALLA)
- Comando chiusura CDM acceso (GIALLA)
- Consenso apertura porte acceso (GIALLA)
- Non utilizzo
- Comando frenatura pneumatica SPENTO (GIALLA)
- Intervento di comando SABBIA/TURA acceso (GIALLA)

SCHEDA OD1-02 Pos. 8

O 1	DLA
O 13	DLB
O 25	DLC
O 31	DLE
O 42	DLE
O 55	DLG

- Comando chiusura CPR acceso (GIALLA)
- Intervento K₀ Locale acceso (GIALLA)
- Comando chiusura CRT acceso (GIALLA)
- Comando coasting fittizio acceso (GIALLA)
- Comando frenatura pneumatica SPENTO (GIALLA)
- Comando sgancio rapido IR SPENTO (GIALLA)

Ringraziamenti

Ringrazio sinceramente il professor Pons, il professor Colella, l'ingegner Rizzoli e tutti i tecnici di GTT ed InfraTo non solo per il prezioso aiuto fornitomi durante le misure e durante la stesura di quest'elaborato, ma anche per l'enorme disponibilità dimostratami.

Desidero inoltre ringraziare i miei compagni e tutte le persone che mi hanno accompagnato in questi faticosi anni di studio, in particolar modo Serena e Andrea.

Infine un ultimo grazie va alla mia famiglia che mi ha supportato dal primo all'ultimo giorno.

Riccardo