



CALCOLO DELLA CAPACITA DEL SISTEMA DI TRAZIONE

LOCOMOTIVA E401

CODICE: B.20.93.206.00

EDIZIONE: B

Pag. 1 di 26

CONTROLLO EDIZIONE

EDIZIONE	MOTIVO	DATA
-	Edizione	17-07-2015
A	Cambio formato	20-06-2016
B	Aggiornamento	24-01-2017


Eseguito da:

Nome: Itxaso Segues Guridi
Firma: 
Data: 24-01-2017

Approvato da:

Nome: Mikel Xabier Rodrigo
Firma: 
Data: 24-01-2017

Verificato da:

Nome: Arnaud Faget
Firma: 
Data: 24-01-2017

INDICE

1. SISTEMA DI TRAZIONE	3
1.1. ARCHITETTURA DI POTENZA.....	3
1.2. DIMENSIONAMENTO GENERALE DELLA CATENA DI TRAZIONE	4
1.2.1. Requisiti generali.....	4
1.2.2. Motore di trazione.....	4
1.2.3. Caso 3000V.....	5
1.2.4. Caso 1500V.....	8
1.2.5. Sintesi.....	11
2. CONVERTITORE DI TRAZIONE	14
2.1. SCHEMA GENERALE DI POTENZA.....	14
2.2. INVERTER DI TRAZIONE	15
2.3. DC-LINK	16
2.4. DC/DC DI TRAZIONE	17
2.5. CONDENSATORE DI BUS.....	17
2.6. MODULO DI POTENZA.....	17
2.6.1. Requisiti dimensionamento	18
2.6.2. IGBT	18
2.6.3. Driver di porta IGBT.....	19
2.6.4. Busbar	19
2.7. INDUTTANZA DEL DCDC.....	20
2.8. SEZIONATORE DC	20
2.9. CONTATTORE D'INGRESSO	21
2.10. CIRCUITO DI PRECARICA	21
2.10.1. Moduli resistenze precarica.....	22
2.10.1. Contattore di precarica	22
2.11. FILTRO D'INGRESSO	22
2.11.1. Impedenza d'ingresso	22
2.11.2. Induttanza d'ingresso	23
2.11.3. Condensatore di filtro	24
2.12. RESISTENZA DI SCARICA PERMANENTE	24
2.12.1. Modulo resistenze scarica permanente	24
2.13. SENSORIZZAZIONE	25
2.13.1. Sensori di tensione	25
2.13.1. Sensore di corrente	25
2.13.1. Sensore di temperatura	25
3. RIFERIMENTI	26

SISTEMA DI TRAZIONE

1.1. ARCHITETTURA DI POTENZA

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mostra gli elementi fondamentali che definiscono l'architettura di potenza del sistema di trazione.

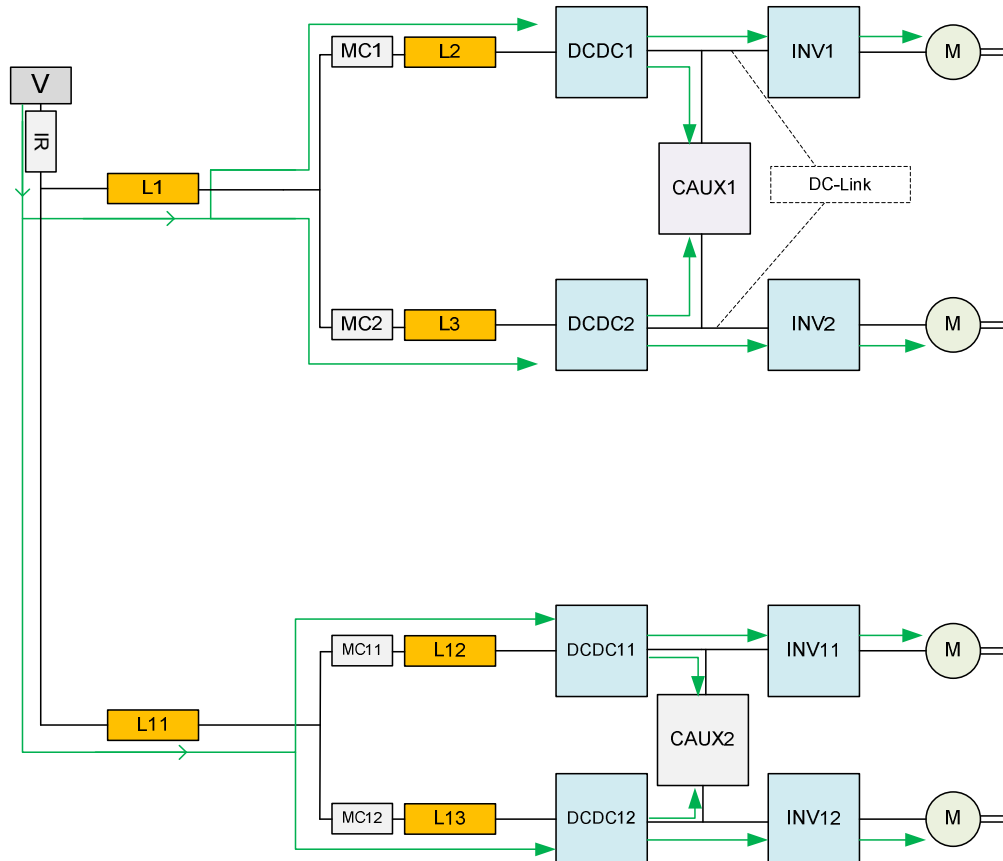


Figura 1. Architettura potenza convertitore trazione

Codice	Descrizione
IR	Sezionatore
L1, L11	Induttanza filtro ingresso
L2, L3, L12, L13	Induttanza DCDC
MC1, MC2, MC11, MC12	Contattore principale
DCDC1, DCDC2, DCDC11, DCDC12	Convertitore DC/DC
INV1, INV2, INV11, INV12	Inverter
M	Motore di trazione
CAUX1, CAUX2	Convertitore ausiliario

Tabella 1. Descrizione elementi schema

1.2. DIMENSIONAMENTO GENERALE DELLA CATENA DI TRAZIONE

1.2.1. Requisiti generali

Secondo i requisiti specifici del progetto:

1. Si dimensiona la catena di trazione in modo tale che gli elementi limitanti dell'intera catena siano i motori di trazione, il che significa che tutti gli altri elementi della catena devono sopportare qualsiasi punto di funzionamento che può sopportare il motore.
2. Un solo CAUX può lavorare a potenza nominale con l'altro CAUX scollegato, senza che ciò influisca sulle prestazioni di trazione stabilite per la catena.
3. L'impianto deve essere in grado di fornire tutta la potenza di trazione con una tensione di linea minima di 3000V.

1.2.2. Motore di trazione

Dato che in questo upgrade si mantengono i motori di trazione, si mantengono anche le loro prestazioni originali:

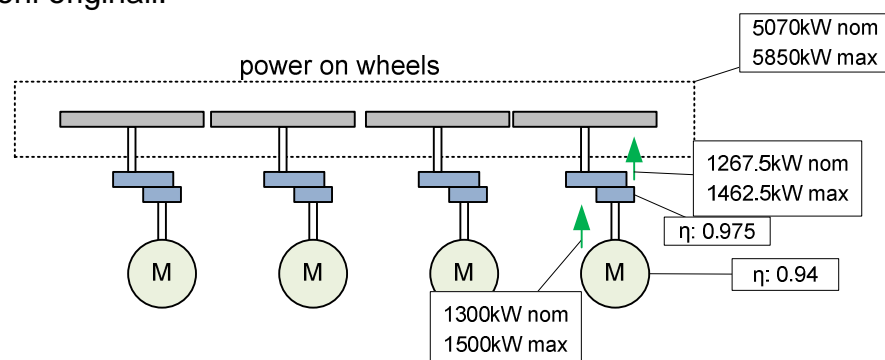


Figura 2. Potenza alle ruote e distribuzione tra i motori

Partendo dai dati esistenti del fabbricante del motore (Ref. 1), la potenza massima su asse a cui è stata provata è di 1500kW. Trattandosi di un motore a raffreddamento forzato le perdite meccaniche del motore saranno minime e si stima che sono di circa il 3% della potenza massima.

Secondo la specifica del motore (Ref. 2) le sue caratteristiche generali sono le seguenti:

Caratteristiche generali	
N° poli	4
Connessione	Stella
Tensione linea a onda quadra	3240V
Frequenza di passaggio a onda quadra	72Hz
Frequenza massima di alimentazione	di 115Hz

Curva prestazione continua

Tensione di linea	2610V
Frequenza	58Hz
Potenza massima	1250kW
Corrente massima	333A
Velocità	1740rpm
Cos ϕ	0.87

Curva di prestazioni avviamento

Tensione linea	3240V
Frequenza	72Hz
Potenza massima	1333kW
Corrente massima	283A
Velocità	2160rpm
Cos ϕ	0.87

Curva di prestazioni sovraccarico (20 minuti)

Tensione di linea	3240V
Frequenza	72Hz – 115Hz
Potenza massima	1538kW

Tabella 2. Caratteristiche del motore di trazione.

1.2.3. Caso 3000V

1.2.3.1 *Tutti i dispositivi in funzionamento*

Tutti i dispositivi del sistema sono attivi e i consumi sono equamente distribuiti.

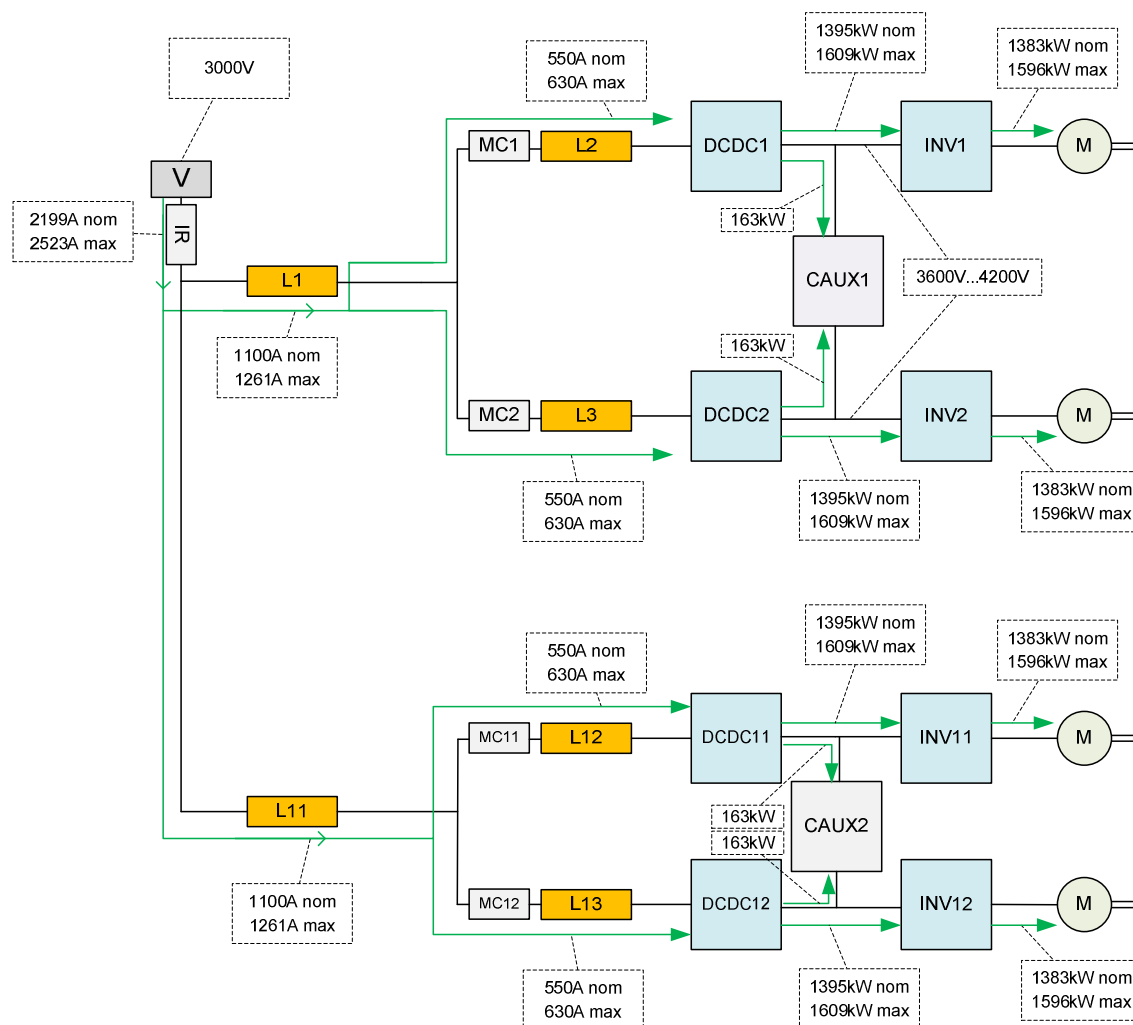


Figura 3. Tutti i dispositivi OK a 3000V

1.2.3.2 *Modalità degradata A: guasto 1 CAUX*

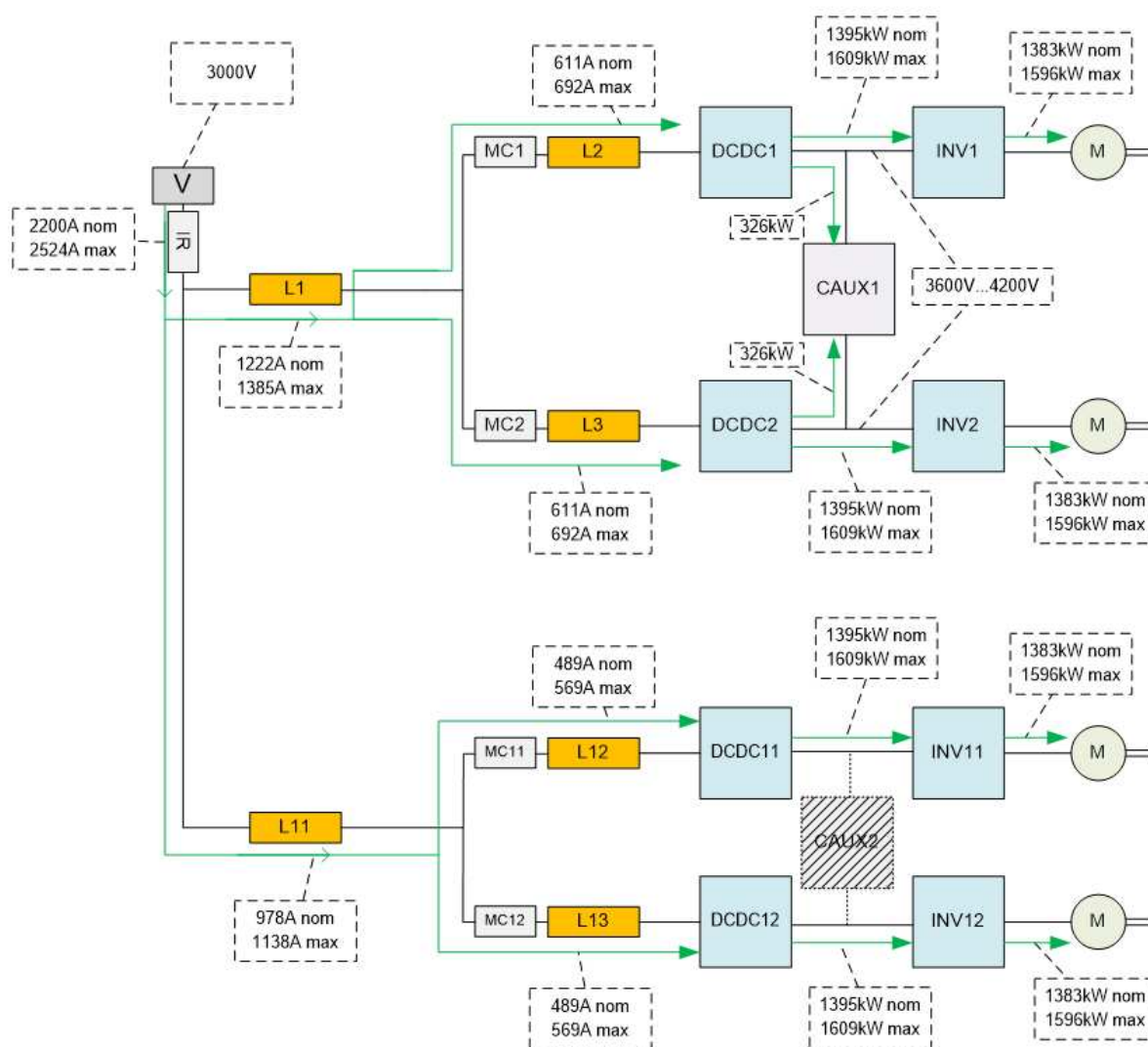


Figura 4. Guasto CAUX2 a 3000V

1.2.3.3 *Modalità degradata B: guasto 1 CAUX + 1 catena di trazione*

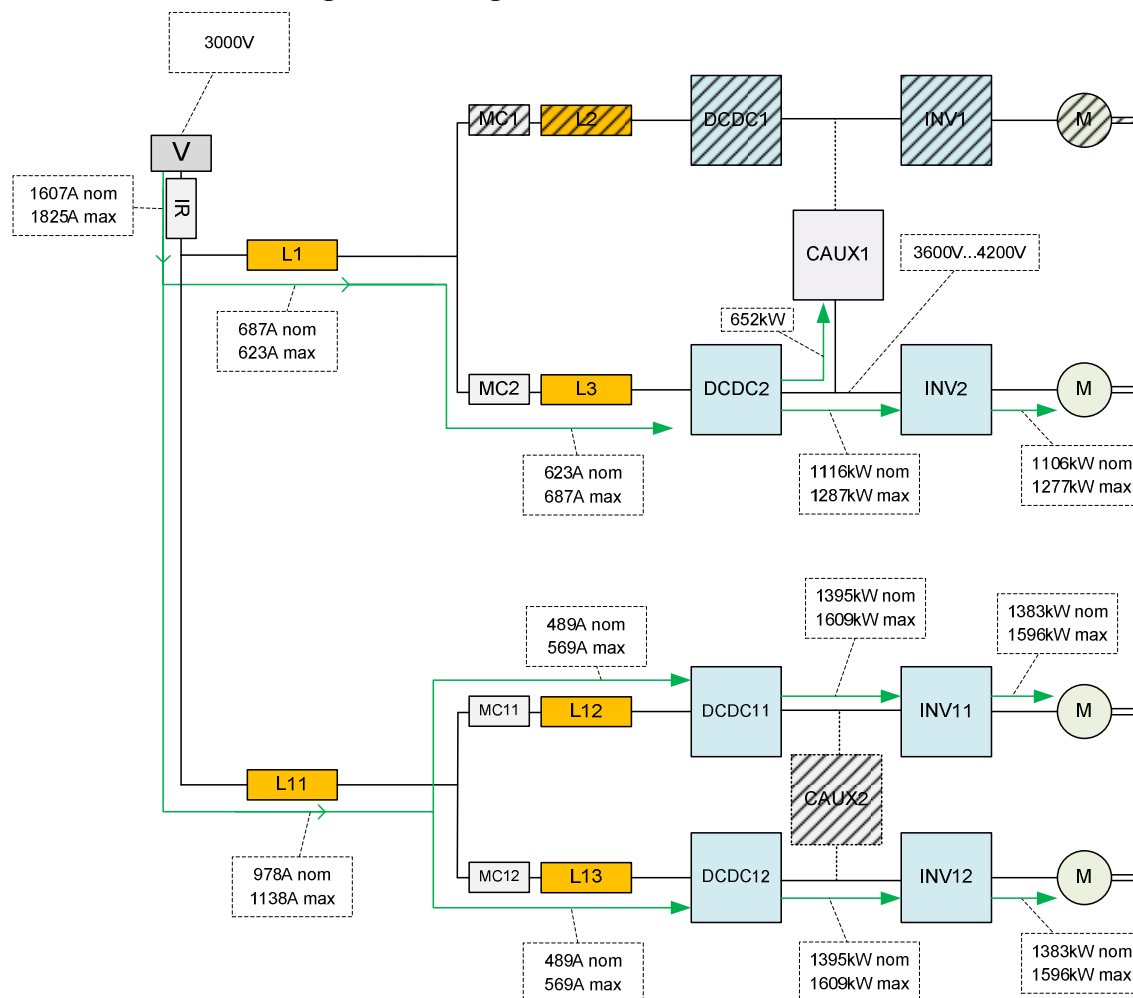
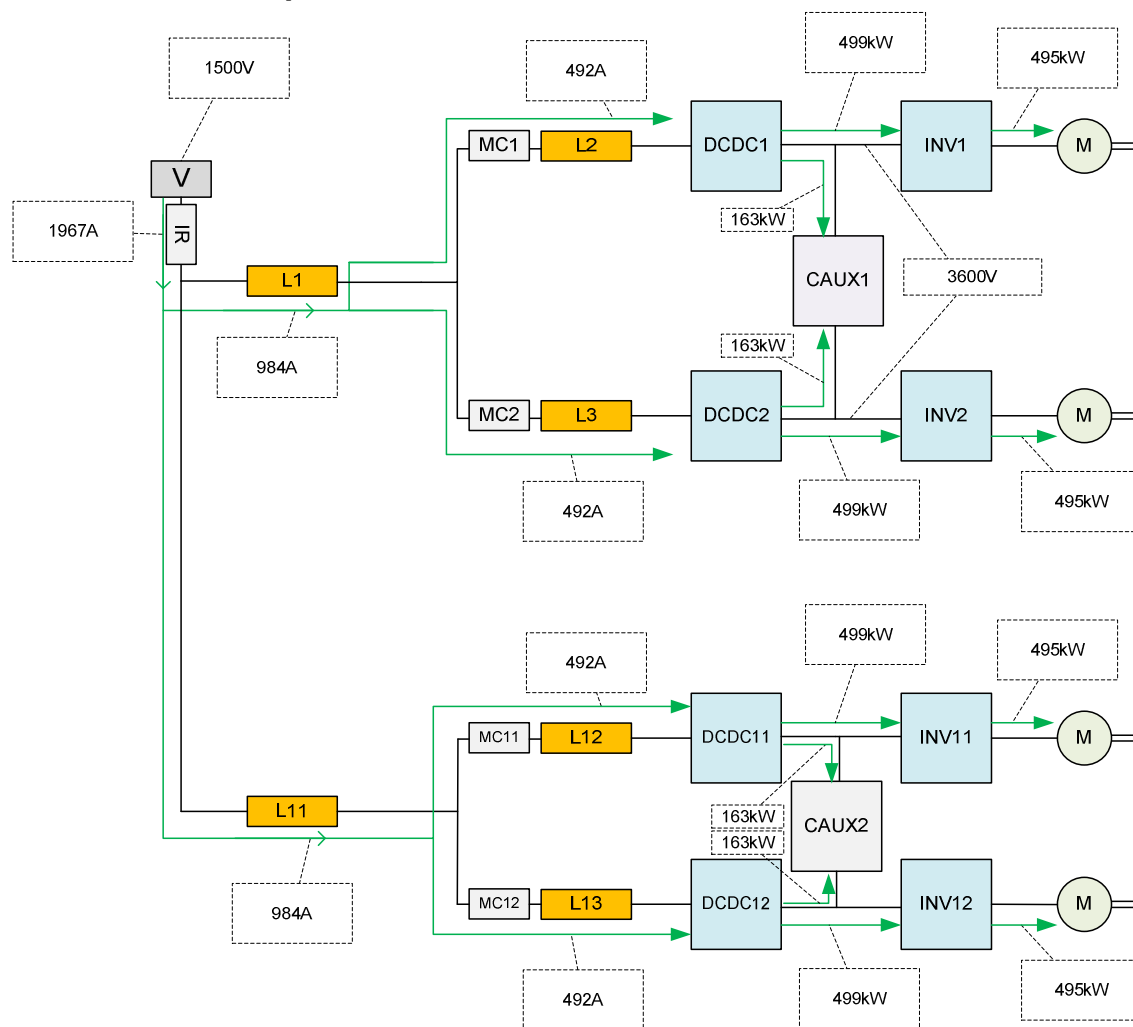


Figura 5. Guasto totale catena 1 + guasto CAUX2 a 3000V

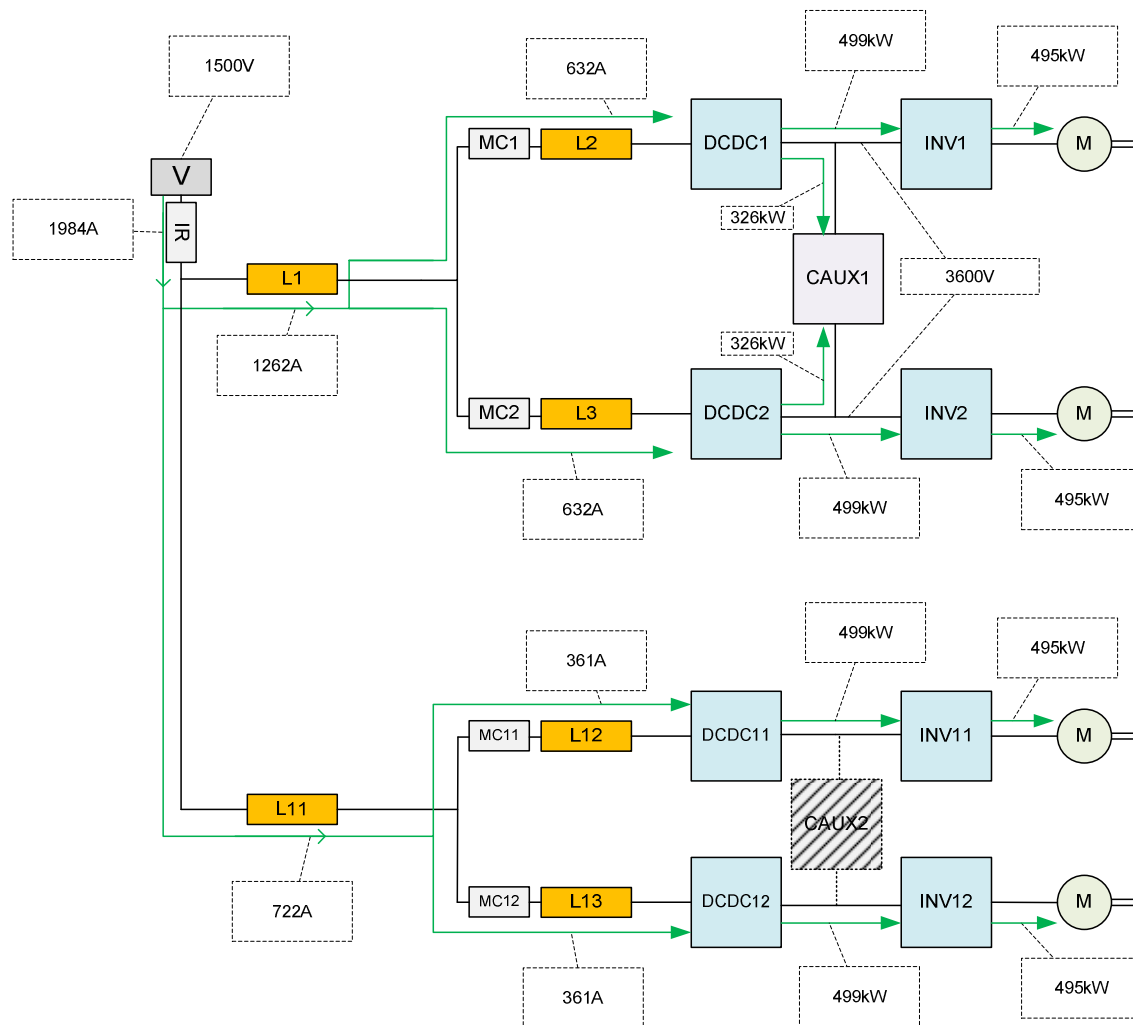
1.2.4. Caso 1500V

Nel caso della linea aerea di contatto a 1500V, non ci sono requisiti definiti pertanto si prende come limitante per la definizione dei requisiti i livelli di corrente delle induttanze in ingresso ($1222A_{nom}$) e DCDC ($630A_{nom}$), di tutti i casi in linee aeree di contatto a 3000V.

1.2.4.1

Tutti i dispositivi in funzionamento**Figura 6. Tutti i dispositivi OK a 1500V**

1.2.4.2

Modalità degradata A: guasto 1 CAUX**Figura 7. Guasto CAUX2 a 1500V**

1.2.4.3 *Modalità degradata B: guasto 1 CAUX + 1 catena di trazione*

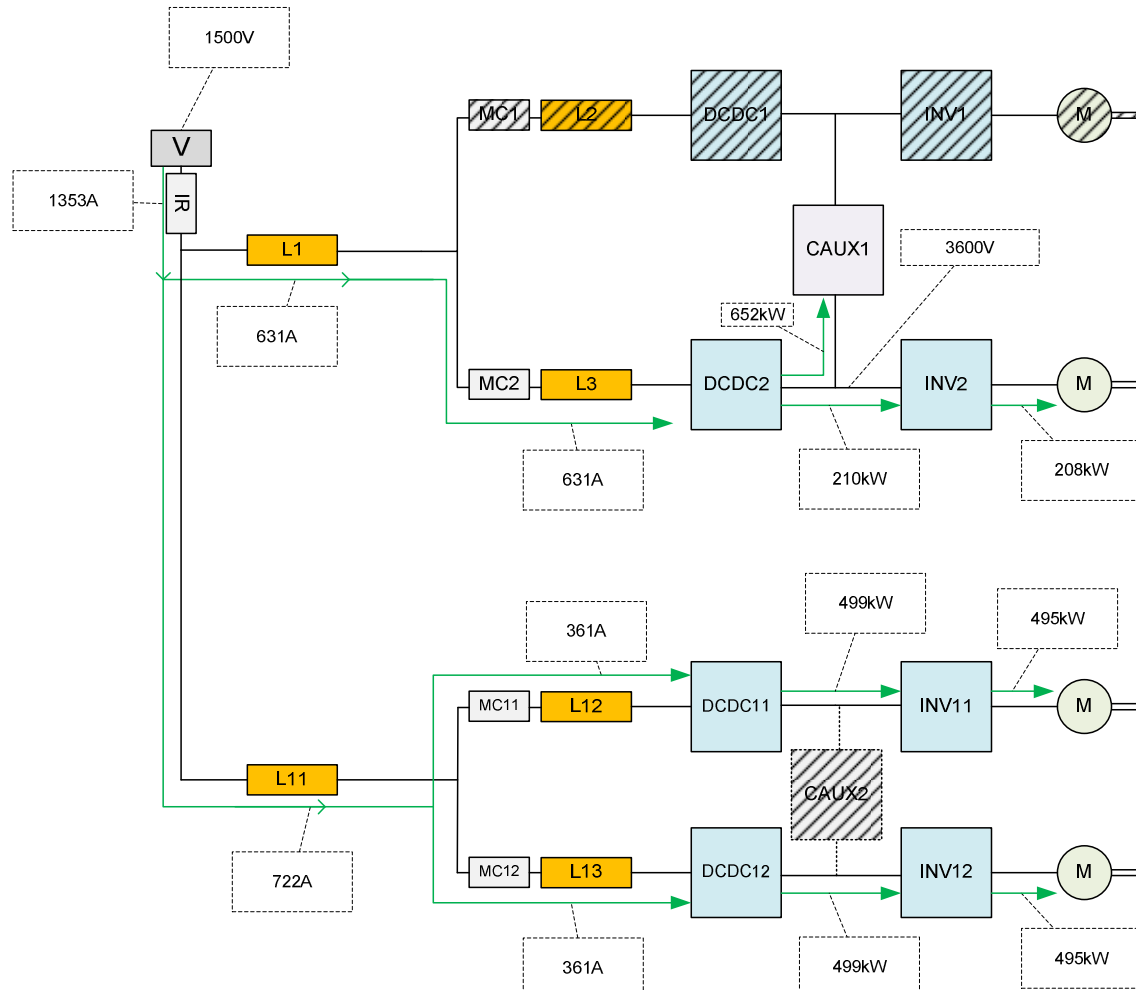


Figura 8. Guasto totale catena 1 + guasto CAUX2 a 1500V

1.2.5. Sintesi

1.2.5.1 *Tabella riassuntiva delle modalità di funzionamento*

MODALITÀ	ID	DESCRIZIONE
1	¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.	100% TRACTION + 100% AUX @ 3000V
2	1.2.3.2	100% TRACTION + 50% AUX @ 3000V
3	1.2.3.3	75% TRACTION + 50% AUX @ 3000V

MODALITÀ	ID	DESCRIZIONE
4	¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.	100% TRACTION + 100% AUX @ 1500V
5	1.2.4.2	100% TRACTION + 50% AUX @ 1500V
6	1.2.4.3	75% TRACTION + 50% AUX @ 1500V

1.2.5.2 *Tabella riassuntiva dimensionamento punto di funzionamento continuo*

MODALITÀ PARAM	1	2	3	4	5	6
VCAT	3000V	3000V	3000V	1500V	1500V	1500V
ICAT	2199A	2200A	1601A	1968A	1984A	1353A
IL1	1100A	1222A	623A	984A	1262A	631A
IL2	550A	611A	0A	492A	631A	0A
IL3	550A	611A	623A	492A	631A	631A
IL11	1100A	979A	979A	984A	722A	722A
IL12	550A	490A	490A	492A	361A	361A
IL13	550A	490A	490A	492A	361A	361A
PINV1	1394kW	1394kW	0kW	499kW	499kW	0kW
PINV2	1394kW	1394kW	1116kW	499kW	499kW	210kW
PINV3	1394kW	1394kW	1394kW	499kW	499kW	499kW
PINV4	1394kW	1394kW	1394kW	499kW	499kW	499kW
PCAUX1	326kW	652kW	652kW	326kW	652kW	652kW
PCAUX2	326kW	0kW	0kW	326kW	0kW	0kW
PDCDC1	1563kW	1726kW	0kW	668kW	832kW	0kW
PDCDC2	1563kW	1726kW	1778kW	668kW	832kW	869kW
PDCDC3	1563kW	1399kW	1399kW	668kW	504kW	504kW
PDCDC4	1563kW	1399kW	1399kW	668kW	504kW	504kW

Tabella 3. Funzionamento continuo

1.2.5.3 *Tabella riassuntiva dimensionamento punto di funzionamento massimo*

	1	2	3
VCAT	3000V	3000V	3000V
ICAT	2522A	2523A	1816
IL1	1261A	1385A	678A

	1	2	3
IL2	630A	692A	0A
IL3	630A	692A	678A
IL11	1261A	1138A	1138A
IL12	630A	569A	569A
IL13	630A	569A	569A
PINV1	1771kW	1934kW	0kW
PINV2	1771kW	1934kW	1937kW
PINV3	1771kW	1608kW	1608kW
PINV4	1771kW	1608kW	1608kW
PCAUX1	326kW	652kW	652kW
PCAUX2	326kW	0kW	0kW
PDCDC1	1777kW	1941kW	0kW
PDCDC2	1777kW	1941kW	1945kW
PDCDC3	1777kW	1614kW	1614kW
PDCDC4	1777kW	1614kW	1614kW

Tabella 4. Sovraccarico massimo durante 20 minuti

1.2.5.4 **Input per dimensionamento impianto di potenza**

Nel caso della linea aerea di contatto a 3000V, gli impianti di potenza si dimensionano per mantenere le prestazioni della vecchia locomotiva, perciò il caso più limitante è quello presentato in 1.2.3.2.

Nel caso della linea aerea di contatto a 1500V, l'elemento limitante è l'induttanza secondo il caso presentato in 1.2.4.2, ragion per cui si stabiliscono le prestazioni di questo tipo di linea aerea di contatto per questo caso.

2. Convertitore di trazione

2.1. SCHEMA GENERALE DI POTENZA

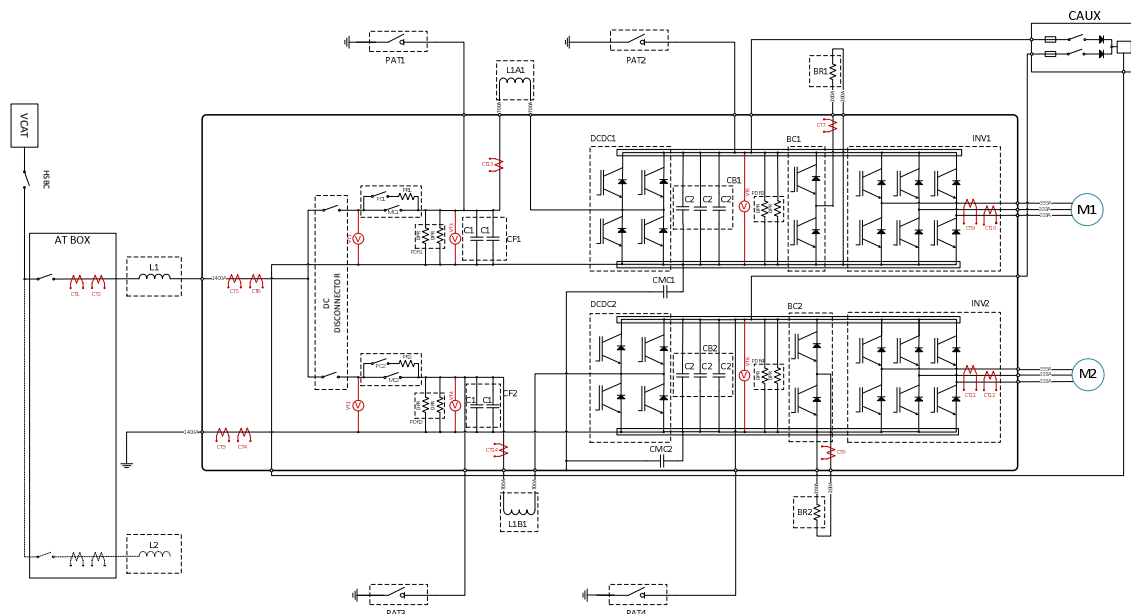
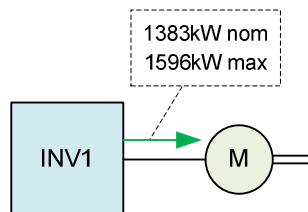


Figura 9. Schema generale potenza del convertitore di trazione

2.2. INVERTER DI TRAZIONE

Un inverter di trazione alimenta un motore di trazione, come viene mostrato nella



. Ogni inverter si collega al suo corrispondente DC-Link (si veda **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

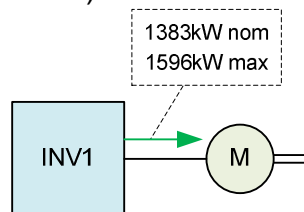


Figura 10. Inverter + motore di trazione

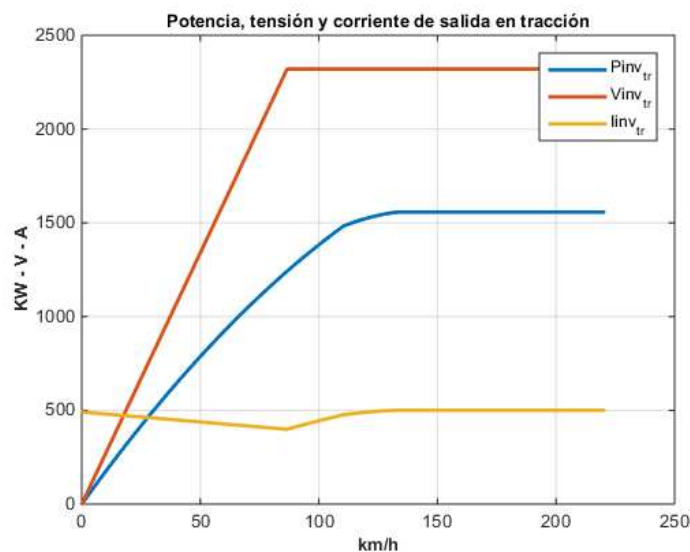


Figura 11. Potenza, tensione e corrente all'uscita dell'inverter

Tensione DC-Link: 3600V...4200V

Potenza massima: 1596kW

Potenza nominale: 1383kW

Corrente nominale uscita inverter: 333A

Corrente massima uscita inverter: 500A

Topologia: bilivello

2.3. DC-LINK

Il DC-Link da un lato collega il DCDC con l'inverter e dall'altro alimenta il convertitore ausiliario.

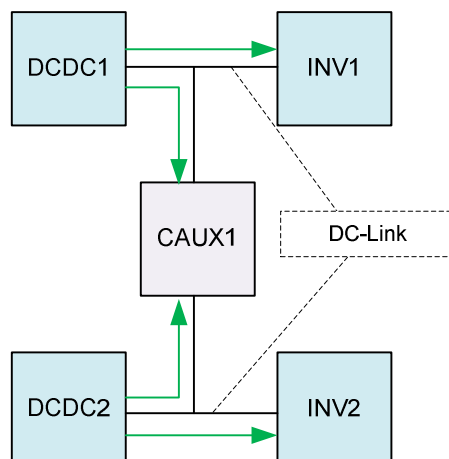


Figura 12. DC-LINK

È composto da un busbar laminato (si veda **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), dove si collegano sia i moduli di potenza sia i condensatori del DC-Link. Per il collegamento tra il backplane e i moduli di potenza si usa un busbar a L.

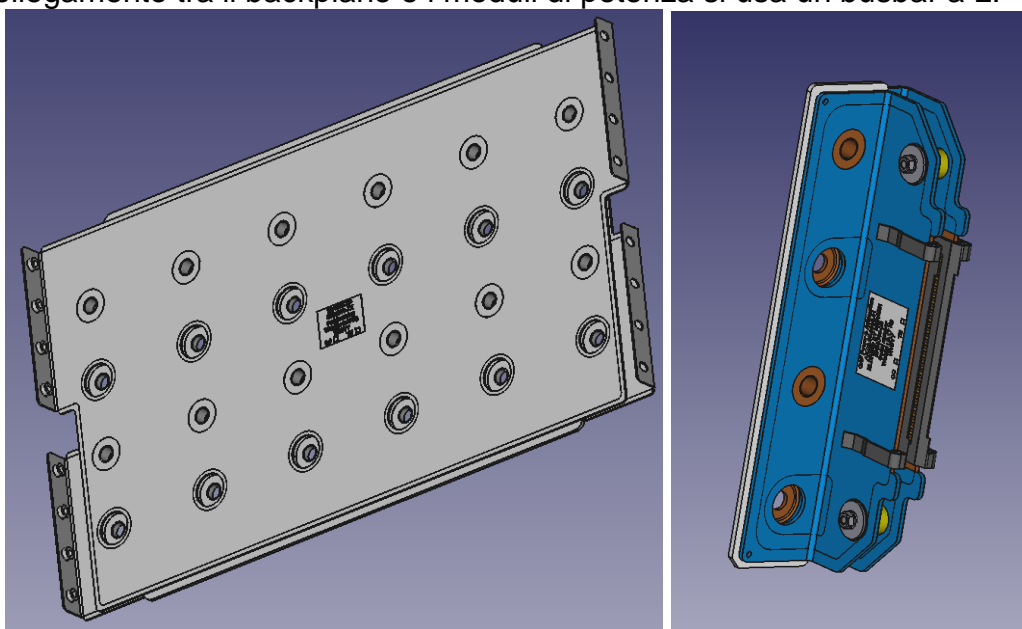


Figura 13. Backplane del busbar (sx) e busbar L (dx).

Per il dimensionamento dell'impianto di trazione si stabilisce che nel peggiore dei casi (1 dei 2 convertitori ausiliari della locomotiva in funzionamento a piena potenza) si consumeranno 326kW aggiuntivi per ogni DC-Link all'uscita del DCDC, oltre a quanto consuma l'inverter di trazione.

Fabbricante: ELDRE

Tensione nominale: 4200V

2.4. DC/DC DI TRAZIONE

L'obiettivo del DC/DC è adattare la tensione della linea aerea di contatto in modo che la tensione del DC-Link sia compresa tra 3600V e 4200V durante il funzionamento del convertitore.

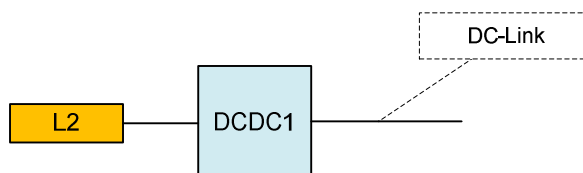


Figura 14. Convertitore DCDC

Deve fornire tutta l'energia necessaria per alimentare i carichi collegati al DC-Link (inverter + convertitore ausiliario)

Tensione massima ingresso: 4200V

Tensione uscita: 3600V...4200V

Corrente nominale ingresso: 630A (Tabella 3)

Corrente massima ingresso: 692A (Tabella 4)

Topologia: Boost

2.5. CONDENSATORE DI BUS

Questo condensatore è parte del filtro di ingresso del convertitore.

Fabbricante: EPCOS

Tensione nominale di funzionamento: 4000V

Tensione massima di funzionamento: 4400V

Corrente nominale: 100A

Corrente massima: 120A

Capacità nominale: 1000 μ F \pm 5%

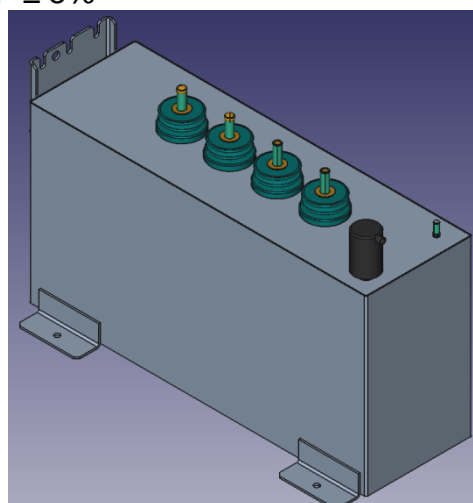


Figura 15. Condensatore di bus

2.6. MODULO DI POTENZA

Sia il DCDC che l'inverter di trazione si fabbricano usando moduli di potenza plug-in. Si montano 4 moduli IGBT con i loro rispettivi driver di porta su un coldplate raffreddato ad

acqua. I collegamenti elettrici interni al modulo, così come i collegamenti verso l'esterno, si realizzano attraverso un busbar laminato che si monta sui moduli IGBT.

Nel caso dell'inverter + chopper di frenatura i 2 rami del modulo si usano in modo indipendente. Sono quindi necessari 2 moduli di potenza per formare le 3 fasi dell'inverter + 1 ramo di chopper di frenatura.

Nel caso del DCDC si parallelizzano i 2 rami di un modulo di potenza per formare un ramo unico che si collega a ciascun DC-Link.

2.6.1. Requisiti dimensionamento

I moduli di potenza sono stati dimensionati per il peggior caso termico/elettrico.

Potenza massima: 1596kW

Potenza nominale: 1383kW

Tipo di raffreddamento: Liquido

Tensione in ingresso DCDC: 1000V – 4200V

Tensione in ingresso inverter: 3600V – 4200V

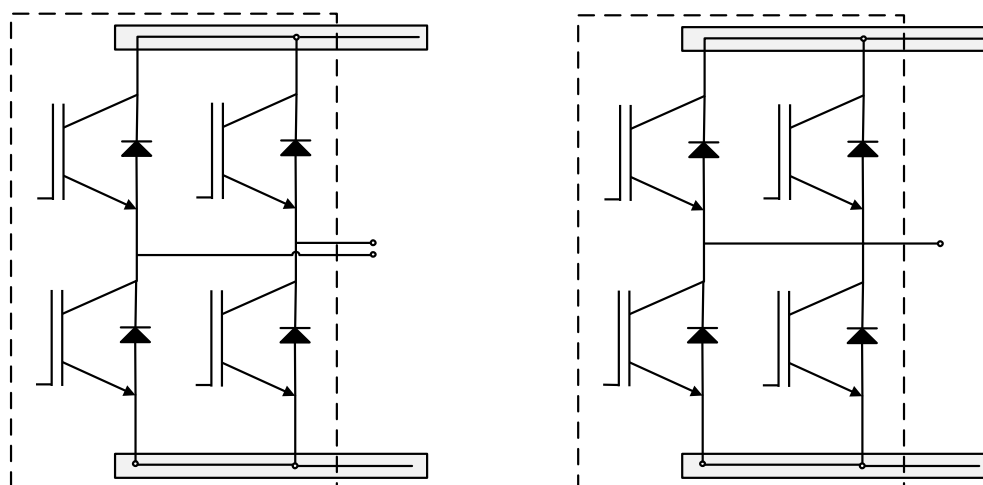


Figura 16. Moduli di potenza (sinistra: 2 rami indipendenti; destra: 2 rami parallelizzati)

2.6.2. IGBT

Fabbricante: ABB

Tensione di blocco V_{ce} : 6500V

Corrente nominale I_n : 750A



Figura 17. IGBT 5SNA 0750G650300 (ABB)

2.6.3. Driver di porta IGBT

Fabbricante: Power Integrations

Driver master: 1SP0335V2M1-5SNA0750G650300

Driver slave: 1SP0335D2S1-5SNA0750G650300

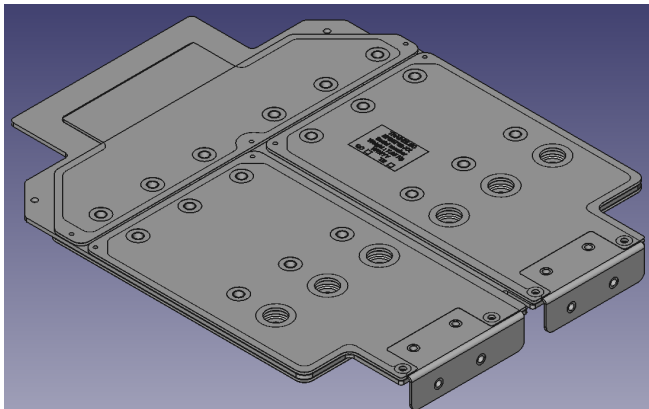
Isolamento DC/DC: ISO5125I-65



Figura 18. Da sinistra a destra: isolamento DC/DC, Driver Slave e Driver Master

2.6.4. Busbar

Gli IGBT sono collegati attraverso questo busbar al backplane e quindi ai condensatori di bus. Il busbar garantisce che il collegamento tra semiconduttori e bus abbia un'induttanza parassita minima.

**Figura 19. Busbar IGBT**

Fabbricante: ELDRE

Tensione nominale: 4200V

2.7. INDUTTANZA DEL DCDC

La funzione dell'induttanza montata all'ingresso di ogni convertitore DCDC è di filtrare la corrente choppata dallo stesso convertitore, per far sì che la corrente in ingresso sia accettabile.

In questo progetto si riutilizza l'induttanza precedentemente montata sul treno.

Corrente nominale: 630A

Corrente massima: 730A

Corrente di ripple massima: 110App¹

Frequenza ripple: 400Hz

Valore induttivo: 24mH + 10%

2.8. SEZIONATORE DC

La funzione di questo elemento è di isolare e scollegare l'impianto di potenza.

Fabbricante: Secheron

Modello: XMS 40 08

Corrente nominale: 800A

Tensione nominale: 4000V

¹ Valore da confermare nella fase di prove.



Figura 20. Sezionatore DC.

2.9. CONTATTORE D'INGRESSO

La funzione del contattore d'ingresso è di isolare la parte del circuito di potenza che si trova a valle di tale elemento. Si dimensiona affinché possa sopportare i livelli di corrente stabiliti per l'applicazione e interrompere la circolazione di tale corrente in caso di necessità.

Fabbricante: Schaltbau

Modello: CT1130/08

Corrente nominale: 800A

Tensione nominale di isolamento: 4800V



Figura 21. Contattore d'ingresso.

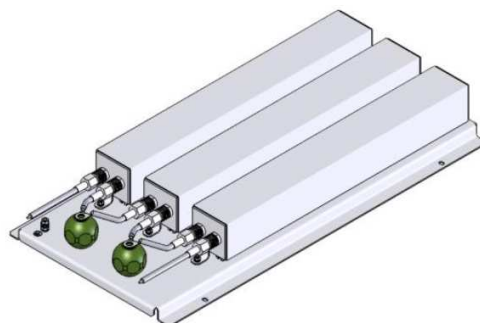
2.10. CIRCUITO DI PRECARICA

Secondo i requisiti specifici del progetto (MANUALE PARTE 1, PAGINA 3-47), il dispositivo deve essere in grado di effettuare 8 precariche consecutive con una tensione di linea di 4000V (tempo tra precariche 5s). Il ciclo si ripete ogni 300s, continuamente.

2.10.1. Moduli resistenze precaricaValore Ohmico: 80Ω

Potenza nominale: 1500W

Tensione nominale di isolamento: 4000V

**Figura 22. Modulo di resistenza di precarica****2.10.1. Contattore di precarica**

Fabbricante: Schaltbau

Modello: CH1130/02

Corrente nominale: 200A

Tensione nominale di isolamento: 4800V

**Figura 23. Contattore di precarica****2.11. FILTRO D'INGRESSO**

La funzione del filtro d'ingresso è di minimizzare le armoniche di corrente inserite nella linea di alimentazione e adattare l'impedenza d'ingresso della locomotiva per soddisfare i requisiti specifici di compatibilità del progetto.

2.11.1. Impedenza d'ingresso

Secondo i requisiti specifici del progetto, l'impedenza d'ingresso del treno deve essere induttiva per frequenze superiori a 32Hz.

Dipendendo dallo stato dei contattori d'ingresso di ogni catena di trazione, l'impedenza d'ingresso del veicolo varierà.

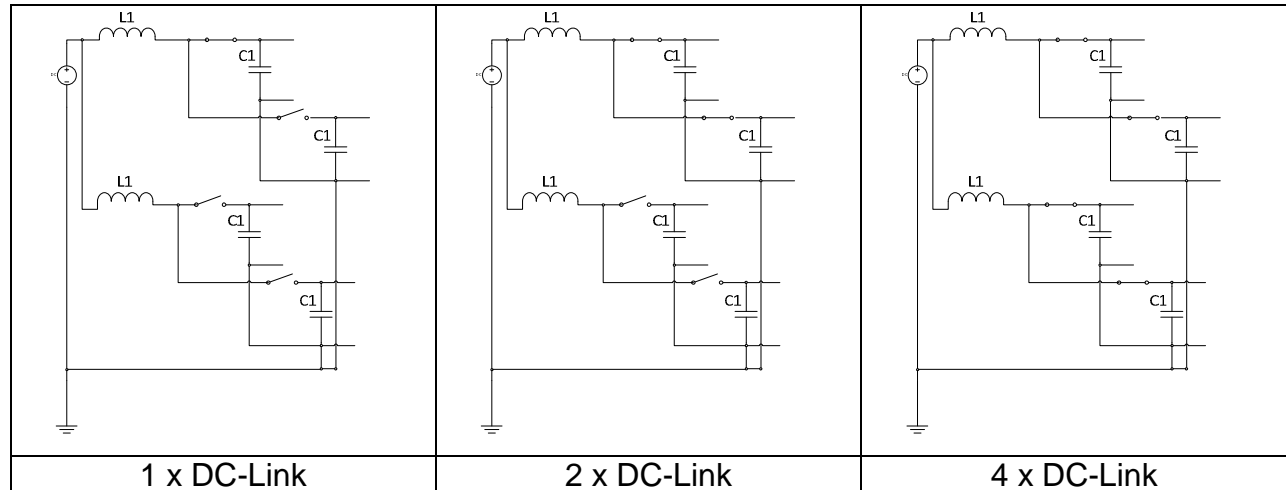


Tabella 5. Possibili configurazioni di impedenza d'ingresso

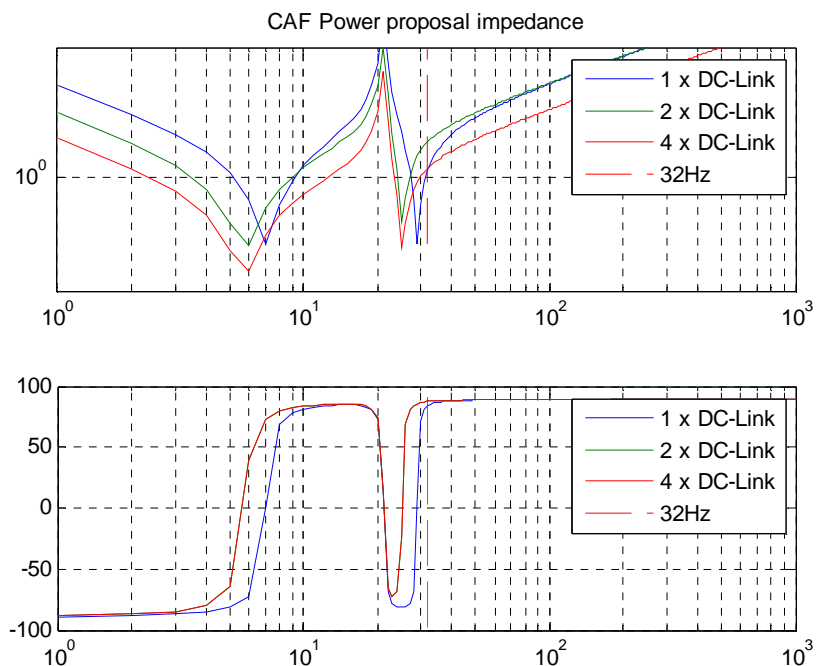


Figura 24. Diagramma di Bode dell'impedenza d'ingresso della locomotiva per diverse configurazioni

Dato che l'induttanza d'ingresso si riutilizza, l'unica possibilità di modificare lo spettro dell'impedenza è regolare il valore capacitivo del condensatore d'ingresso, il quale è stato dimensionato per soddisfare questo requisito.

2.11.2. Induttanza d'ingresso

In questo progetto si riutilizza l'induttanza precedentemente montata sul treno.

Corrente nominale: 1260A

Corrente massima: 1460A

Ripple massimo corrente: 10App

Frequenza ripple: 1600Hz

Valore induttivo: 16mH +10% -5%

Valore induttivo a 50Hz: >19mH

2.11.3. Condensatore di filtro

Fabbricante: EPCOS

Tensione nominale di funzionamento: 4000V

Tensione massima di funzionamento: 4400V

Corrente nominale: 20A

Corrente massima: 40A

Capacità nominale: 1500 μ F \pm 5%

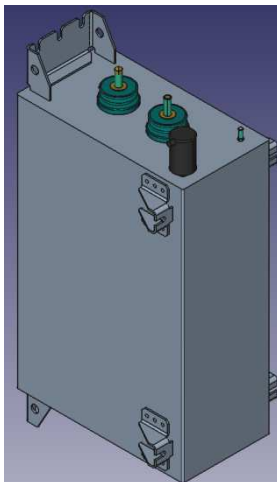


Figura 25. Condensatore di bus

2.12. RESISTENZA DI SCARICA PERMANENTE

Nel caso in cui il convertitore si fermi senza ordinare una scarica di bus, i condensatori si devono scaricare attraverso le loro resistenze di scarica permanente in meno di 5 minuti.

In totale si montano 4 moduli di resistenze per scarica permanente; ogni modulo è composto da 2 resistenze tubolari.

2.12.1. Modulo resistenze scarica permanente

Valore Ohmico: 22k Ω

Potenza nominale: 800W

Tensione nominale di isolamento: 4000V

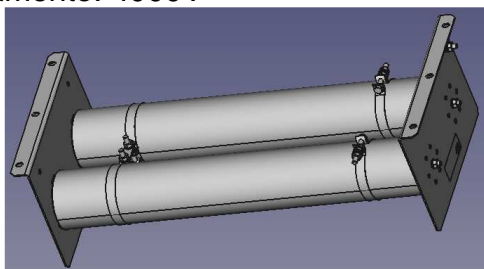


Figura 26. Modulo resistenza scarica permanente

2.13. SENSORIZZAZIONE

I sensori sono necessari per il controllo del convertitore e per la sua protezione. Esistono tre tipi di sensori nel convertitore, quelli di tensione, quelli di corrente e quelli di temperatura.

2.13.1. Sensori di tensione

Con questo sensore si misurano le tensioni della linea aerea di contatto e dei due bus.

Fabbricante: LEM

Modello: LV 100-4000

Tensione nominale primaria: 4000V

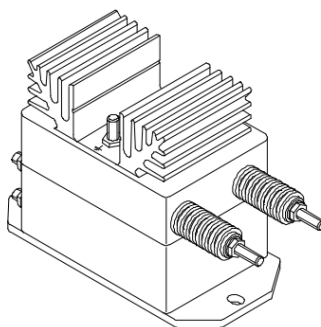


Figura 27. Sensori di tensione LEM.

2.13.1. Sensore di corrente

Ci sono due modelli di sensori diversi nell'impianto.

Fabbricante: LEM

Modello: LTC 1000 - SF

Corrente nominale primario: 1000A

Fabbricante: LEM

Modello: LTC 1000 – SF/SP8

Corrente nominale primario: 1300A

2.13.1. Sensore di temperatura

Ciascun modulo di potenza ha due sensori di temperatura PT100 posizionati sul coldplate per misurarne costantemente la temperatura e poter in questo modo controllare la temperatura dei semiconduttori.



CALCOLO DELLA CAPACITA DEL SISTEMA DI TRAZIONE

LOCOMOTIVA E401



CODICE: B.20.93.206.00

EDIZIONE: B

Pag. 26 di 26

3. Riferimenti

- Ref. 1** 0001 376088 1 00 Relazione di colladu dei motori di trazione tipo MTA-F4-1250V in opera sulle locomotive E 402A
- Ref. 2** 0030 371ME01901B 1 00 Specifica generale di prodotto motore tipo MTA-F4-1250V Loco E402.006-035