

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Modellizzazione di celle Na-Beta per l'accumulo elettrochimico stazionario

Laureando:

Riccardo Benetti

Relatore:

Ch.mo Prof. Roberto Benato

Anno Accademico 2013-2014

Indice

1. Introduzione	1
2. Celle Na-Beta.....	17
2.1 Celle Sodio-Zolfo (NaS)	18
2.1.1 Tensione a circuito aperto	20
2.1.2 Resistenza interna	20
2.1.3 Effetto della temperatura.....	22
2.1.4 Pulse factor.....	22
2.1.5 Modulo batterie da 30kW	24
2.1.6 Modulo batterie da 50kW	24
2.2 Celle Sodio-Cloruro di Nickel (Zebra)	25
2.2.1 Tensione a circuito aperto	27
2.2.2 Resistenza interna	28
3. Modellizzazione delle celle Na-Beta tramite software EMTP-RV	35
3.1 Modellizzazione delle celle Sodio-Zolfo (NaS).....	39
3.2 Modellizzazione delle celle Sodio-Cloruro di Nickel (Zebra).....	47
4. Calcolo delle correnti di cortocircuito	55
4.1 La norma CEI EN 61660-1	61
4.2 Cortocircuito ai morsetti dell'unità di celle Sodio-Zolfo (NaS)	75
4.3 Cortocircuito ai morsetti dell'unità di celle Sodio-Cloruro di Nickel (zebra)	77
5. Sistemi di conversione statica	79
5.1 Convertitore bidirezionale DC/DC	80
5.1.1 Modalità di funzionamento da elevatore (boost)	82
5.1.2 Modalità di funzionamento da abbassatore (buck)	84
5.2 Modellizzazione del convertitore DC/DC tramite software EMTP-RV	86
5.2.1 Funzionamento da elevatore del modello di convertitore DC/DC	87
5.2.2 Funzionamento da abbassatore del modello di convertitore DC/DC	89
5.3 Convertitore DC/AC trifase a commutazione	91
5.4 Modellizzazione del convertitore DC/AC trifase tramite software EMTP-RV	94
6. Conclusioni	101
Appendice A: Guida all'uso di EMTP-RV	103
A.1 Modello di cella	103
A.2 Modello dei convertitori.....	109

A.3	Modello di PWM.....	113
	Ringraziamenti	119
	Bibliografia.....	121

Indice delle figure

Figura 1.1: Applicazioni dei sistemi di accumulo in relazione a frequenza e durata di utilizzo.....	2
Figura 1.2: Accumulatori al piombo acido.....	5
Figura 1.3: Tensione a circuito aperto batterie VRLA in funzione dello stato di carica	6
Figura 1.4: Tensione delle celle Ni-Cd in funzione della capacità rimasta e della corrente di scarica[4].....	7
Figura 1.5: vista sezionata di una batteria al Ni-Cd [4]	8
Figura 1.6: vista sezionata di una cella Ni-MH [4].....	9
Figura 1.7: Vista sezionata di una batteria Li-ion cilindrica [4]	11
Figura 1.8: Tensione di una cella agli ioni di litio in funzione della profondità di scarica [4]	12
Figura 1.9: Immagine della reazione interna alle batterie ioni litio	13
Figura 1.10: Schema di una batteria a flusso redox [4]	14
Figura 2.1: Rappresentazione sezionata di una cella sodio-zolfo	18
Figura 2.2: Tensione a circuito aperto celle sodio-zolfo in funzione del DOD	20
Figura 2.3: Resistenza interna di carica e scarica cella sodio-zolfo[3]	21
Figura 2.4: Pulse factor celle sodio-zolfo.....	23
Figura 2.5: Sezione di una cella sodio-cloruro di nickel.....	25
Figura 2.6: Vista della reazione chimica interna alla cella durante la fase di scarica[9]	26
Figura 2.7: Andamento tensione a circuito aperto in funzione della temperatura operativa	27
Figura 2.8: Tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica celle Zebra	28
Figura 2.9: Resistenza interna di scarica celle Zebra	29
Figura 2.10: Confronto tra le sezioni trasversali della beta-allumina realizzate [5].....	30
Figura 2.11: Confronto tra resistenza interna per sezione cilindrica e sezione quadriloboidale [5]..	30
Figura 2.12: Immagine modulo celle sodio-cloruro di nickel da 23.5 kWh.....	31
Figura 2.13: Immagine unità 1.5 MWh celle Zebra.....	32
Figura 3.1: Modello dinamico semplificato accumulatore elettrochimico	38
Figura 3.2: Modello finale cella sodio-zolfo.....	40
Figura 3.3: Tensione a circuito aperto delle celle sodio-zolfo in funzione del DOD	41
Figura 3.4: Resistenza di carica modello cella sodio-zolfo in funzione del DOD	42
Figura 3.5: Resistenza di scarica modello cella sodio-zolfo in funzione del DOD.....	42
Figura 3.6: Layout modulo da 30 kW celle sodio-zolfo	43
Figura 3.7: Modello equivalente modulo da 7.5 kW celle sodio-zolfo.....	44
Figura 3.8: Modello modulo da 30 kW celle sodio-zolfo con l'utilizzo del circuito equivalente	45
Figura 3.9: Modello in EMTP-RV dell'unità da 1.2 MW di celle sodio-zolfo.....	45
Figura 3.10: Modello finale cella sodio-cloruro di nickel.....	48
Figura 3.11: Tensione a circuito aperto di una cella sodio-cloruro di nickel in funzione del DOD ...	49
Figura 3.12 : Resistenza interna di carica celle sodio-cloruro di nickel.....	49
Figura 3.13: Resistenza interna di scarica cella sodio-cloruro di nickel	50
Figura 3.14: Rappresentazione modulo celle Zebra da 23.4 kWh	51
Figura 3.15: Modello equivalente modulo 23.4 kWh celle sodio-cloruro di nickel.....	52

Figura 3.16: Parte dell'unità da 1.5 MWh di celle Zebra	53
Figura 4.1: Circuito elementare in corrente continua da interrompere	55
Figura 4.2: Rete isolata da terra	57
Figura 4.3: Rete connessa a terra con una polarità	58
Figura 4.4: Rete connessa a terra nel punto medio dell'alimentazione	59
Figura 4.5: Funzione di approssimazione normale	63
Figura 4.6: Circuito equivalente batteria al piombo e andamento caratteristico corrente di cortocircuito.....	64
Figura 4.7: Tempo e costante di tempo di salita [18]	65
Figura 4.8: Circuito equivalente raddrizzatore e andamento tipico corrente di cortocircuito	65
Figura 4.9: Parametro λ_D per il calcolo della corrente in regime quasi-stazionario [18]	66
Figura 4.10: Parametro k_D per il calcolo del valore di picco della corrente di cortocircuito [18]	67
Figura 4.11: Circuito equivalente condensatore livellatore e andamento tipico corrente di cortocircuito.....	68
Figura 4.12: Parametro k_c per il calcolo del valore di picco della corrente di cortocircuito [18]	68
Figura 4.13: Tempo per il raggiungimento del valore di picco in funzione di ω_0 e $1/\delta$	69
Figura 4.14: Parametro k_{1C} in funzione di ω_0 e $1/\delta$ per il calcolo della costante di tempo τ_{1C} [18]....	69
Figura 4.15: Parametro k_{2C} in funzione di ω_0 e $1/\delta$ per il calcolo della costante di tempo τ_{2C} [18]....	70
Figura 4.16: Circuito equivalente motore in corrente continua ad eccitazione indipendente e relativo andamento tipico della corrente di cortocircuito.....	70
Figura 4.17: Parametro k_M per il calcolo del valore di picco della corrente di cortocircuito [18]	71
Figura 4.18: Tempo per raggiungere il valore di picco t_{pM} nel caso di $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ [18]	72
Figura 4.19: Parametro per il calcolo della costante di tempo [18]	72
Figura 4.20: Parametro per il calcolo della costante di tempo di salita [18]	73
Figura 4.21: Parametro per il calcolo della costante di tempo di salita [18]	73
Figura 4.22: Parametro per il calcolo della costante di tempo di discesa [18]	73
Figura 4.23: Modello costruito in EMTP-RV per la simulazione di cortocircuito ai morsetti dell'unità da 1.2 MW di celle sodio-zolfo.....	76
Figura 4.24: Corrente di cortocircuito unità 1.2 MW celle sodio-zolfo	76
Figura 4.25: Modello in EMTP-RV dell'unità di celle Zebra in cortocircuito	78
Figura 4.26: Corrente di cortocircuito unità 0.5 MW celle Zebra	78
Figura 5.1: Layout tradizionale sistema di accumulo elettrochimico.....	79
Figura 5.2: Struttura elementare convertitore DC/DC bidirezionale.....	80
Figura 5.3: Tecnica di modulazione degli impulsi PWM.....	81
Figura 5.4: Convertitore DC/DC a commutazione in modalità da elevatore.....	82
Figura 5.5: Andamenti di tensione e corrente sull'induttanza e tensione lato carico in modalità elevatore.....	82
Figura 5.6: Convertitore DC/DC a commutazione in modalità da abbassatore	84
Figura 5.7: Andamenti di tensione e corrente nell'induttanza nel convertitore in modalità abbassatore	84
Figura 5.8: Modello convertitore DC/DC a commutazione bidirezionale.....	86
Figura 5.9: Modello del funzionamento in modalità boost del convertitore DC/DC.....	87

Figura 5.10: Corrente dell'induttanza del modello di convertitore DC/DC in modalità elevatore	88
Figura 5.11: Tensione ai capi dell'induttanza del modello di convertitore DC/DC in modalità elevatore.....	88
Figura 5.12: Modello del funzionamento buck del convertitore DC/DC	89
Figura 5.13: Corrente dell'induttanza del modello di convertitore nel funzionamento da abbassatore	90
Figura 5.14: Tensione ai capi dell'induttanza del modello nel funzionamento da abbassatore	90
Figura 5.15: Convertitore trifase DC/AC a commutazione	91
Figura 5.16: Forme d'onda nel convertitore trifase DC/AC [21]	92
Figura 5.17: Modello convertitore DC/AC a commutazione trifase	94
Figura 5.18: modello PWM convertitore DC/AC trifase a commutazione	95
Figura 5.19: Risultato PWM convertitore DC/AC trifase a commutazione.....	96
Figura 5.20: Modello in EMTP-RV per la validazione del modello del convertitore DC/AC	96
Figura 5.21: Tensione v_{an} in uscita dal modello del convertitore DC/AC	97
Figura 5.22: Tensione v_{aN} in uscita dal modello del convertitore DC/AC	97
Figura 5.23: Tensione concatenata in uscita dal modello del convertitore DC/AC	98
Figura 5.24: Layout sistema di accumulo con unità di celle sodio-zolfo.....	99
Figura 5.25: Layout sistema di accumulo con unità di celle sodio-cloruro di nickel	100
Figura A.1: Modello di una cella con blocchi particolari in evidenza	103
Figura A.2: Schermata definizione valori del blocco 1.....	105
Figura A.3: Schermata del Blocco 2.....	107
Figura A.4: Modello sistema di accumulo e sotto-circuiti modelli convertitori	109
Figura A.5: Impostazioni da definire sul dispositivo controllato in accensione e spegnimento	110
Figura A.6: Impostazioni del blocco dell'induttanza in EMTP-RV	112
Figura A.7: Modello creato in EMTP-RV della PWM con blocchi in evidenza.....	113
Figura A.8: Impostazioni da definire nel generatore di segnale.....	115
Figura A.9: Impostazioni da definire blocco PWM	116

Capitolo 1

Introduzione

Il mondo dei sistemi elettrici sta attraversando una fase di profondo rinnovamento e, di anno in anno, si presta alla considerazione di soluzioni tecnologiche che permettano di migliorare e rendere più sicuri i servizi offerti e/o richiesti. Questo periodo di cambiamento, iniziato molto tempo addietro con l'introduzione della liberalizzazione del settore elettrico e del mercato ad esso collegato, ha visto un importante aumento della quantità di potenza generata da impianti a fonte rinnovabile, in risposta ad una crescente attenzione alle tematiche ambientali e alla sostenibilità della produzione dell'energia elettrica. Quest'ultima, infatti, rappresenta uno dei maggiori fattori di spinta e di influenza del settore industriale. Tuttavia, la non prevedibilità e programmabilità di grossa parte delle fonti rinnovabili, quali fotovoltaico ed eolico, e la loro sparsa distribuzione lungo tutto il territorio nazionale hanno spinto ad una serie di valutazioni e ripensamenti sui criteri utilizzati per l'esercizio dei sistemi elettrici in generale.

Se da un lato le fonti rinnovabili rappresentano una necessità, dall'altro queste hanno portato, ad esempio, ad un peggioramento della sicurezza sulla rete di trasmissione e ad un aumento del numero delle congestionate. In parallelo al forte incremento delle fonti rinnovabili si è vista una rapida evoluzione delle tecnologie legate ai sistemi di accumulo elettrochimico di energia elettrica. Pur mantenendosi basati su tecnologie piuttosto diffuse e mature, essi hanno saputo rispondere in modo deciso alle esigenze nate col passare degli anni, in particolare quella di rendere i sistemi di produzione da fonte rinnovabile totalmente integrabili all'interno della rete caratterizzata da una grande fetta da apparati basati su tecnologie tradizionali, quali gli impianti termoelettrici.

Tuttavia, la continua evoluzione del sistema elettrico e il continuo modificarsi delle caratteristiche della curva di domanda fa crescere la convinzione che quanto fatto fino ad ora non sia sufficiente per assicurare il totale soddisfacimento delle esigenze future, portando una continua spinta alla ricerca e sviluppo di sistemi di accumulo maggiormente evoluti mirando ad un aumento dell'efficienza e dell'affidabilità. In questo senso, in Italia, l'Autorità per l'energia elettrica e il gas (AEEG) ha approvato la costruzione di progetti pilota, vedi delibere AEEG288-2012, 43-2013, 66-2013.

La forte penetrazione degli impianti di produzione a fonte rinnovabile, come già detto sopra, e la contemporanea contrazione dei consumi elettrici (legata al periodo di recessione del settore industriale) ha portato ad una modifica della gestione del sistema elettrico nel suo insieme. Mentre in passato i grossi impianti termoelettrici di produzione venivano impiegati come impianti base lavorando a potenza pressoché costante, oggi vengono eserciti con maggiore flessibilità e modularità. La variabilità introdotta mal si sposa con quelle che sono le caratteristiche ottimali di funzionamento di tali impianti, portando ad un maggior stress delle apparecchiature e ad una perdita di efficienza del sistema. I sistemi di accumulo, ac-

coppiati a codesti impianti di produzione, permetterebbero il disaccoppiamento parziale dalle esigenze imposte dalla rete e, quindi, un miglioramento del fattore di utilizzazione. Ovviamente, l'applicazione dei sistemi di accumulo ad impianti a fonte rinnovabile risulta di più naturale comprensione. Essi possono, in primis, ridurre gli sbilanciamenti tra produzione programmata e produzione reale, riducendo l'utilizzo da parte del gestore della rete del mercato dei servizi di dispacciamento e, in secondo luogo, offrire servizi utili alla rete. Inoltre, i sistemi accumulo possono svolgere un ruolo fondamentale per evitare il "load shedding", permettendo l'accumulo di energia retribuita inutilizzabile nell'istante di produzione a causa di possibili linee congestionate. In Figura 1.1 si possono vedere diversi impieghi dei sistemi di accumulo in relazione alla frequenza e alla durata di utilizzo [1].

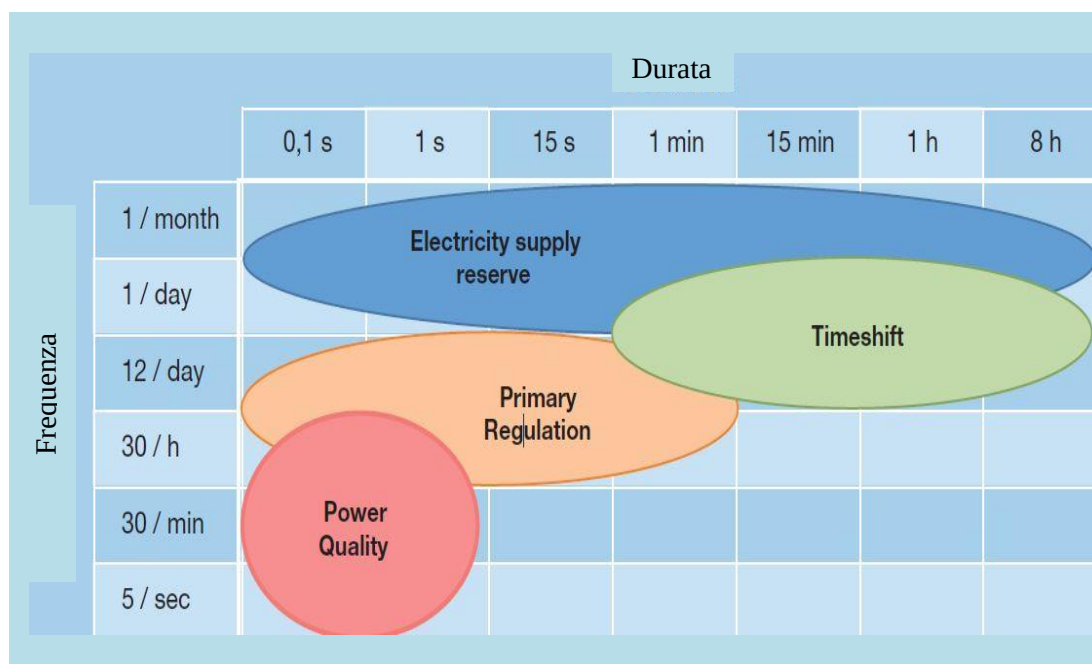


Figura 1.1: Applicazioni dei sistemi di accumulo in relazione a frequenza e durata di utilizzo

Guardando in particolar modo alla rete di trasmissione dell'energia elettrica [2], l'uso dei sistemi di accumulo elettrochimico e la loro installazione in punti strategici della rete stessa viene vista come una soluzione di breve/medio termine in previsione di un futuro potenziamento della rete che naturalmente richiede tempi molto lunghi. Nella maggior parte dei casi gli impianti di produzione a fonte rinnovabile, in particolar modo le centrali eoliche, sono situate in zone dove la rete è poco sviluppata, mostrando poca predisposizione all'accoglienza di grandi quantità di energia prodotta nei periodi di alta disponibilità della fonte. Tuttavia, essendo questi limitati durante l'arco dell'anno ad un basso numero non si giustificerebbe la costruzione di nuove linee che verrebbero sfruttate con un basso fattore di utilizzazione.

Rimanendo all'interno dell'ambito trasmissione, ma guardando maggiormente alla questione sicurezza del sistema elettrico si possono elencare altri benefici che accompagnano l'inserimento dei sistemi di accumulo elettrochimico stazionario nella rete. Mentre in passato i generatori delle grosse centrali erano obbligate a mettere a disposizione una certa banda di potenza producibile ai fini della regolazione di frequenza, con lo sviluppo delle fonti rinnovabili e la legislazione ad esse legata, che prevede la loro priorità al dispacciamento, si è vista la diminuzione dell'energia regolante. Questo aspetto comporta un'amplificazione degli

effetti, sulla instabilità della rete, di un eventuale perdita di carico o di generazione. Infatti, agli impianti di generazione da fonte rinnovabile non è richiesto alcun contributo in termini di potenza di regolazione. Diviene, quindi, necessario l'approvvigionamento di capacità di regolazione attraverso l'uso di nuove soluzioni, quali appunto i sistemi di accumulo.

Quest'ultimi, eventualmente accoppiati ad impianti generazione o installati appositamente allo scopo, possono garantire una ampia banda di potenza che può essere immessa in rete in tempi relativamente brevi, aumentando, di conseguenza, anche la reattività del sistema ad una eventuale potenza di disturbo.

Analizzati ed elencati alcuni degli effetti positivi e delle possibili applicazioni dei sistemi di accumulo si deve far notare il fatto che con tale termine non si intendono esclusivamente gli accumulatori stessi ma un insieme di dispositivi, specificatamente progettati per le proprie funzionalità, e connessi tra loro ai fini dell'inserimento delle batterie in rete. In generale, i principali componenti sono i seguenti:

- Le batterie, cuore del sistema di accumulo di cui, in seguito, si elencheranno le varie tipologie
- Le apparecchiature elettromeccaniche per la connessione dei vari elementi tra di loro e alla rete, quali cavi di potenza e di segnale, protezioni, quadri elettrici ecc.
- I sistemi di conversione statica dell'energia elettrica, ossia convertitori DC/AC e DC/DC con le rispettive logiche di controllo per ottimizzare il loro funzionamento e sfruttare al massimo le batterie
- I sistemi per il controllo delle batterie, inseriti allo scopo di mantenere monitorate le principali grandezze caratteristiche delle batterie per evidenziare possibili malfunzionamenti o stati di guasto; come si vedrà in seguito, uno dei principali parametri è la temperatura che deve essere mantenuta all'interno di un certo range per evitare surriscaldamenti delle parti e danni alle strutture. Questi sistemi, denominati BMS (battery management system), hanno totale controllo della batteria ed agiscono autonomamente secondo indicazioni prestabilite al fine di riportare l'accumulatore nello stato di normale funzionamento.
- Le apparecchiature per il controllo del sistema nel suo complesso, comprendendo tutte le apparecchiature informatiche per il monitoraggio, gli strumenti di misura e gli algoritmi di gestione.

Le varie tipologie di tecnologie di accumulo elettrochimico offrono solitamente buone prestazioni dal punto di vista dell'autonomia e del tempo di risposta. In particolare, essi mostrano ottime caratteristiche di modularità e di flessibilità. Ogni tipo di accumulatore presenta diverse configurazioni chimiche degli elettrodi e diversi tipi di elettrolita, con una influenza molto forte di questi sulle prestazioni funzionali degli accumulatori stessi. Volendo fare un confronto tra le varie tipologie di batterie commercializzate, questo si deve basare su alcuni importanti parametri che caratterizzano il funzionamento ed il ciclo di vita degli accumulatori. I principali elementi di confronto sono i seguenti:

- Energia specifica, misurata in Wh/kg, data dal rapporto tra l'energia ottenibile durante un processo di scarica ad una determinata potenza e il peso dell'accumulatore stesso; essa non ha un valore costante ma varia a seconda del

regime di funzionamento. Solitamente, viene presa come riferimento l'energia estraibile in condizioni di scarica a potenza nominale.

- Potenza specifica, misurata in W/kg, definita dal rapporto tra la potenza della batteria ed il suo peso; non è un valore univoco ma varia in funzione del carico applicato. Solitamente, si fa riferimento alla potenza nominale del sistema di accumulo, ossia la potenza per cui è stata pensata la batteria.
- Rendimento energetico, definito dal rapporto tra l'energia ottenuta in uscita dall'accumulatore ad una determinata potenza durante la scarica e l'energia necessaria per riportare il sistema alle condizioni iniziali.
- Tempo di vita, solitamente espresso in anni, definito come il tempo totale di funzionamento della batteria fino al decadimento delle prestazioni. Ad esempio, quando si ha la riduzione della capacità oltre una certa tolleranza prefissata. Tuttavia, la durata di vita totale è dipendente dalle modalità di funzionamento (profondità di scarica dei vari cicli) e viene fortemente ridotta se la batteria lavora in condizioni non ottimali. In alternativa, il tempo di vita può essere espresso in numero di cicli; in questo caso, vengono presi in considerazione i cicli totali di scarica (riferiti alla stessa profondità di scarica) e carica completa che la batteria è in grado di assicurare mentendo le proprie prestazioni entro ben determinati limiti. La profondità di scarica dei vari cicli ha la maggiore influenza sul numero di cicli attuabili.
- Temperatura di funzionamento, definito solitamente da un intervallo entro cui la batteria deve lavorare per evitare malfunzionamenti o danni.
- Livello di sicurezza, parametro che definisce la probabilità che durante l'intero ciclo di vita di una batteria si verifichino situazioni che portino a condizioni pericolose; soprattutto in applicazioni, quali l'accumulo stazionario, dove le potenze in gioco sono molto alte la questione sicurezza assume una sempre maggiore importanza.
- Costo per ciclo, definito come il rapporto tra il costo d'installazione e il numero di cicli di vita dell'accumulatore considerato.

Le tecnologie utilizzate per l'accumulo elettrochimico stazionario appartengono alla famiglia delle batterie secondarie, ossia di quelle che possono essere ricaricate. Questa tipologia di batterie, infatti, ha come caratteristiche principali la completa reversibilità del processo di carica e scarica, elevata efficienza e il minimo cambiamento fisico durante il ciclo di vita. Inoltre, l'azione chimica di deterioramento delle prestazioni, perdita di durata di vita o di energia estraibile risulta praticamente assente e rispondono alle richieste di elevata densità di energia, bassa resistenza e buon funzionamento su un ampio intervallo di temperature. Queste caratteristiche limitano il numero di materiali utilizzabili per la costruzione di celle ricaricabili.

Si analizzano, ora, in modo generalizzato le principali tecnologie utilizzabili per l'accumulo elettrochimico stazionario [3].

Accumulatori al piombo acido

Le batterie al piombo acido rappresentano una delle prime tipologie di accumulatori utilizzati in praticamente tutti i settori industriali, dalle telecomunicazioni ai dispositivi elettronici portatili fino ai primi impianti di accumulo. Grazie al loro basso costo, alla grande disponibilità di piombo, alla elevata efficienza elettrochimica, alla buona affidabilità, alla elevata tensione della cella (2 V) e alla loro elevata durata di vita, le batterie al piombo acido hanno avuto fin da subito una buona applicabilità ai sistemi di accumulo, sebbene esse abbiano come caratteristiche bassa energia e potenza specifica, elevata manutenzione richiesta ed un elevato impatto ambientale associato alla presenza di elementi acidi al proprio interno. Con il passare degli anni il loro sviluppo dal punto di vista chimico, meccanico ed elettrico ha portato ad una diminuzione di questi svantaggi, permettendo alle batterie al piombo acido di rimanere tra le tipologie più utilizzate su applicazioni di larga scala [4].

La composizione delle batterie al piombo acido è funzione del tipo di uso. Solitamente, sono costituite da più celle connesse in serie. La reazione chimica che caratterizza le batterie al piombo acido durante la scarica è la seguente:



durante la carica la reazione chimica, invece, sarà l'inversa.

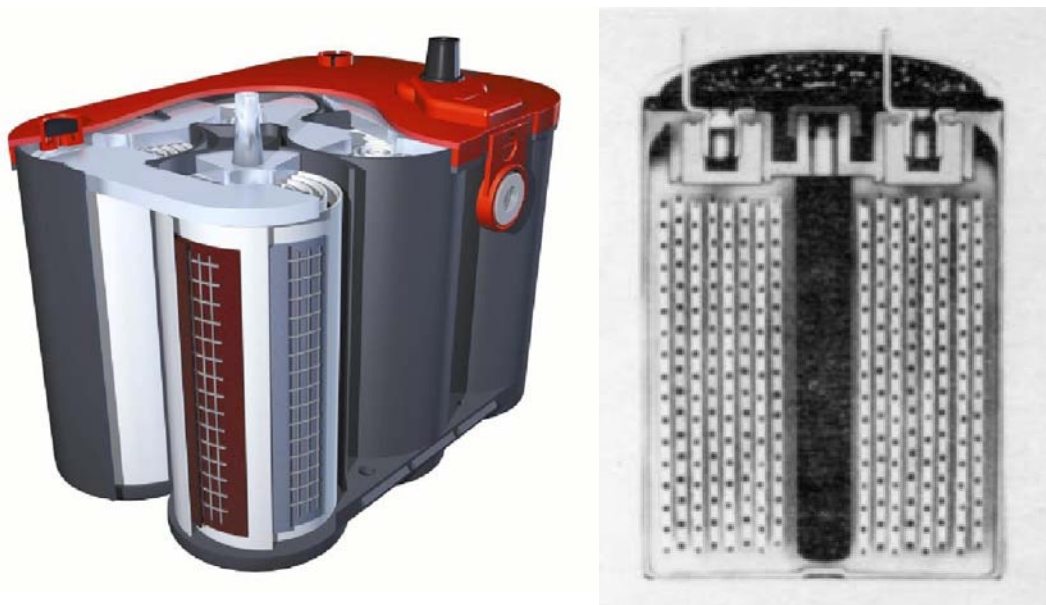


Figura 1.2: Accumulatori al piombo acido

Gli accumulatori possono essere, essenzialmente, diviso in due tipologie: batterie convenzionali e VRLA (valve-regulated lead-acid). Originariamente, le batterie lavoravano con le lastre, contenute all'interno della carcassa, immerse nell'elettrolita liquido e l'idrogeno e l'ossigeno prodotti durante la scarica venivano rilasciati nell'atmosfera. La perdita di gas comportava una diminuzione dell'acqua contenuta richiedendo, quindi, un continuo rabbocco durante le operazioni di manutenzione. Per tale ragione si è sviluppata la seconda tipologia di batterie al piombo acido, le VRLA.

Le batterie “valve-regulated lead-acid” sono state ideate per produrre al proprio interno un proprio ciclo dell’ossigeno. Durante le operazioni di carica l’ossigeno liberato dall’elettrodo positivo passa attraverso un separatore in direzione dell’elettrodo negativo dove viene successivamente trasformato in acqua. Il ciclo dell’ossigeno modifica il potenziale dell’elettrodo negativo in un valore inferiore e, di conseguenza, si ha una diminuzione dell’idrogeno prodotto. La piccola quantità di idrogeno viene, successivamente, rilasciata attraverso una valvola di pressione.

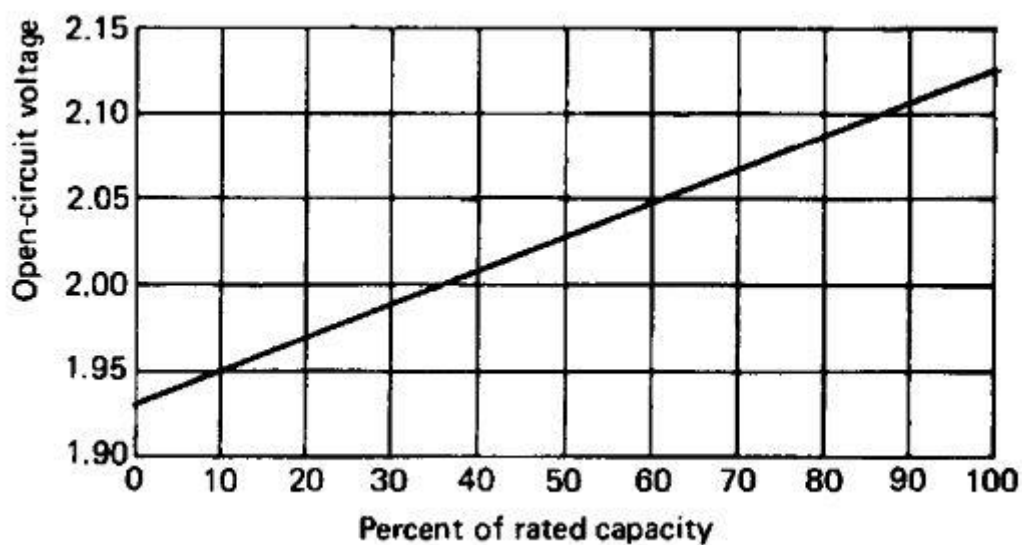
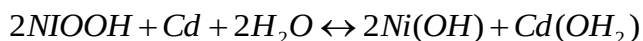


Figura 1.3: Tensione a circuito aperto batterie VRLA in funzione dello stato di carica

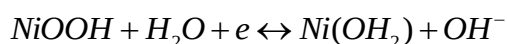
Accumulatori al Nichel-Cadmio (NiCd)

Negli accumulatori al Nichel-Cadmio l'elettrolita è costituito da acqua, l'elettrodo positivo da idrossido superiore di nichel, mentre l'elettrodo negativo da Cadmio. In questo caso, l'elettrolita non partecipa alla reazione ma serve solo ad assicurare la conducibilità ionica.

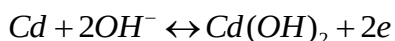
La reazione chimica che avviene nelle celle al Ni-Cd è la seguente[3]:



A questa reazione è associata una differenza di potenziale ai morsetti della cella di 1.299V. durante la scarica sul catodo si ha la formazione di idrossido di nichel, $Ni(OH)_2$, e sull'anodo idrossido di Cadmio, $Cd(OH)_2$. All'elettrodo positivo corrisponde la seguente reazione, a cui corrisponde un potenziale di 0.49 V:



All'elettrodo negativo, invece:



Corrispondente ad un potenziale di -0.809 V.

Nei moderni accumulatori al Ni-Cd l'acqua come l'elettrolita è stato sostituito da idrossido di potassio KOH. La tensione media di scarica è di 1.2 V.

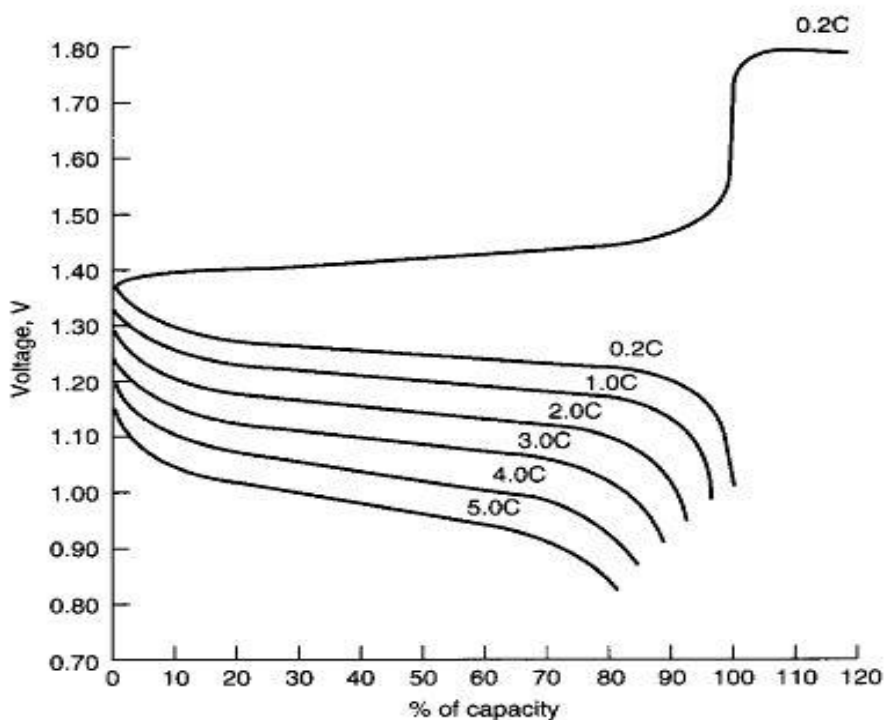


Figura 1.4: Tensione delle celle Ni-Cd in funzione della capacità rimasta e della corrente di scarica[4]

Vengono prodotte per un largo campo di applicazioni in quanto richiedono poca manutenzione, con capacità che vanno dai 10 mAh alle migliaia di Ah per applicazioni a grande potenza.

Sono caratterizzate da una lunga durata di vita, dalla capacità di essere sovra-caricabili, elevati tassi di carica e scarica, tensione a circuito aperto praticamente costante e possibilità di operare a basse temperature. Tuttavia, il costo del Cadmio è molto più alto di quello del piombo e i costi di costruzione di questa tipologia di celle è molto più elevato di quello delle piombo acido.

Inoltre, a causa della tossicità del Cadmio si hanno problemi di manipolazione. In generale, comunque, la bassa manutenzione richiesta e una buona affidabilità hanno fatto sì che le celle al nichel-cadmio risultino ideali per applicazioni particolari, quali ad esempio luci di emergenza, sistemi di accensione, ricevitori per televisioni portatili, rasoi elettrici e per i sistemi di potenza dei satelliti.

In relazione a come vengono costruite, le celle al nichel-cadmio hanno una densità di energia compresa tra i 40 e i 60 Wh/kg, mentre la durata di vita varia tra le centinaia e le migliaia di cicli di vita.

Nelle celle che usano l'idrossido di potassio come elettrolita, questo ha una concentrazione del 20-28% del peso totale; viene aggiunto 1-2% di LiOH all'elettrolita per minimizzare la coagulazione dell'elettrodo positivo durante i vari cicli di carica/scarica. Per le applicazioni a bassa temperatura di funzionamento, viene solitamente usata una soluzione di idrossido di potassio maggiormente concentrata. Per le applicazioni, invece, ad alta temperatura è preferibile usare l'elettrolita acquoso NaOH.



Figura 1.5: vista sezionata di una batteria al Ni-Cd [4]

Accumulatori Ni-MH

Questa tipologia di accumulatori ha come elemento costituente l'elettrodo negativo idrogeno assorbito da una lega metallica. Questo porta ad un aumento della densità di energia rispetto alle Ni-Cd e ad una maggiore compatibilità ambientale. Tuttavia, esse sono caratterizzate da una elevata auto-scarica e da una minore tolleranza alla sovra-carica rispetto sempre alle Ni-Cd.

L'elettrodo positivo è, ancora una volta, costituito da NiOOH e la lega metallica di cui è formato l'elettrodo negativo è, solitamente, costituito da 2 metalli. Il primo assorbe l'idrogeno esotermicamente, il secondo endotermicamente. Essi servono come catalizzatori per l'assorbimento dissociativo degli atomi di idrogeno all'interno del reticolo della lega metallica. Usualmente, vengono utilizzati piombo, nichel, cromo, ferro, cobalto.

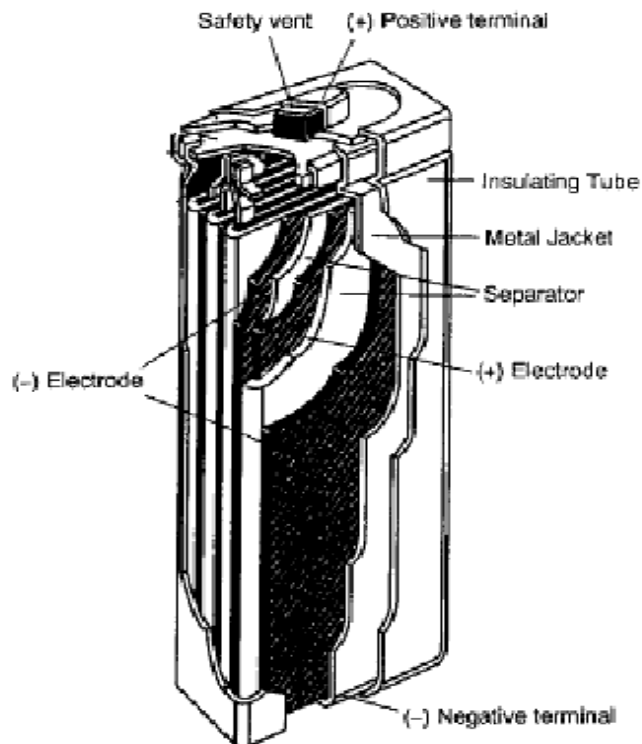
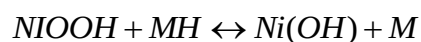


Figura 1.6: vista sezionata di una cella Ni-MH [4]

La reazione che caratterizza questo tipo di celle è la seguente[3]:



L'elettrolita è costituito da idrossido di potassio e la tensione ai morsetti è di 1.32-1.35 V, a seconda della tipologia di lega utilizzata. Anche in questo caso, l'acqua non partecipa alla reazione.

In generale, esse hanno una densità di energia 25% più alta di quella delle Ni-Cd, quantificabile in 80 Wh/kg, densità di potenza intorno ai 200W/kg e durata di vita oltre i 1000 cicli.

L'auto-scarica è circa del 4-5% al giorno ed è causata soprattutto dall'idrogeno disciolto nell'elettrolita che reagisce con l'elettrodo positivo.

Questa tipologia di accumulatori vengono, solitamente, usati per i veicoli elettrici ibridi, rasoi elettrici, spazzolini da denti, videocamere, cellulari, strumenti medici e altre applicazioni che richiedono una buona durata di vita.

Un altro aspetto negativo di queste celle, come anche per le celle al nichel-cadmio, è che esse soffrono particolarmente dell'effetto memoria. Ossia, la batteria si ricorda la più frequente profondità di scarica e con il passare del tempo si ha una riduzione delle prestazioni nel momento in cui si supera l'usuale profondità di scarica. Nelle celle Ni-MH l'effetto memoria comporta una momentanea riduzione della capacità disponibile ed è causata, appunto, dai poco profondi cicli di carica/scarica.

Dopo alcuni cicli di scarica e carica a bassa profondità si ha un gradino di tensione durante la scarica. La riduzione di tensione dipende dal numero di precedenti poco profondi cicli e dalla corrente di scarica, mentre non si ha riduzione della capacità totale se la cella viene totalmente scaricata (0.9 V) e successivamente ricaricata completamente.

Va fatta attenzione, però, a non confondere l'inevitabile e irreversibile perdita di carica durante il ciclo di vita delle celle con l'effetto memoria, che invece è reversibile. Infatti, la riduzione della capacità durante i vari cicli di vita è causata da cortocircuiti o alla riduzione del volume dell'elettrolita causata dall'evaporazione alla alte temperature o a prolungate sovra-scariche.

Accumulatori Li-ion

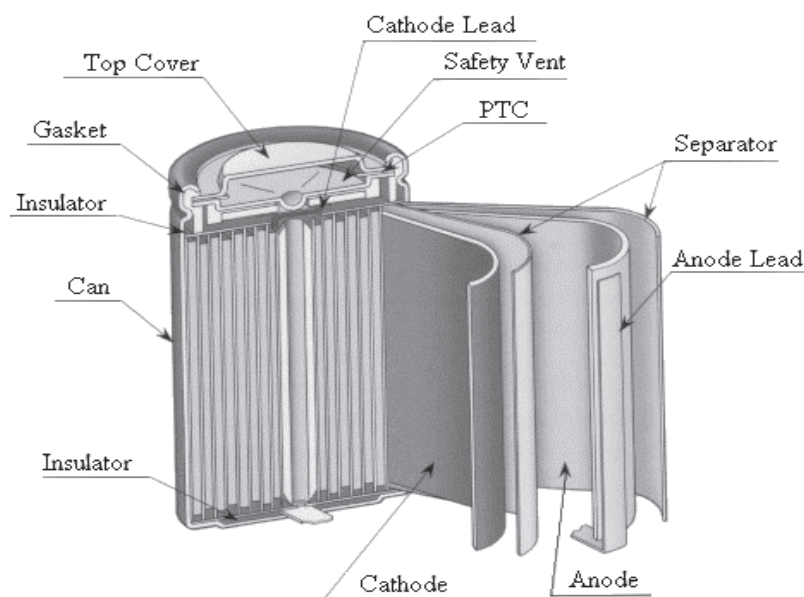


Figura 1.7: Vista sezionata di una batteria Li-ion cilindrica [4]

Gli accumulatori agli ioni di litio sono caratterizzati dai seguenti vantaggi:

- Elevate densità di energia, 150 Wh/kg, 400 Wh/l
- Elevata tensione a circuito aperto della cella, 4 V
- Elevata conservazione della carica, tra i 5 e i 10 anni

Questi vantaggi sono principalmente dovuti all'uso di litio come elemento costituente l'elettrodo negativo. Inoltre, l'utilizzo di litio ha come risultato un peso ridotto e una bassa resistenza [3].

Per quanto riguarda il comportamento interno di questa tipologia di celle, gli ioni litio passano tra un elettrodo e l'altro durante la carica e la scarica. Le batterie, maggiormente prodotte a livello commerciale, utilizzano ossido di cobalto come elettrodo positivo.

L'elettrodo negativo è fatto di carbonio, sotto forma di grafite o di materiale amorfo con una elevata superficie. Il carbonio è un materiale facilmente reperibile, poco costoso, poco pesante e, inoltre, è in grado di assorbire una grande quantità di litio. Quando questo viene associato ad un elettrodo positivo costituito da ossido di metallo, esso dà luogo ad una differenza di potenziale elevata, circa 4 V come detto sopra. La tensione di fine scarica può essere assunta pari a 3 V.

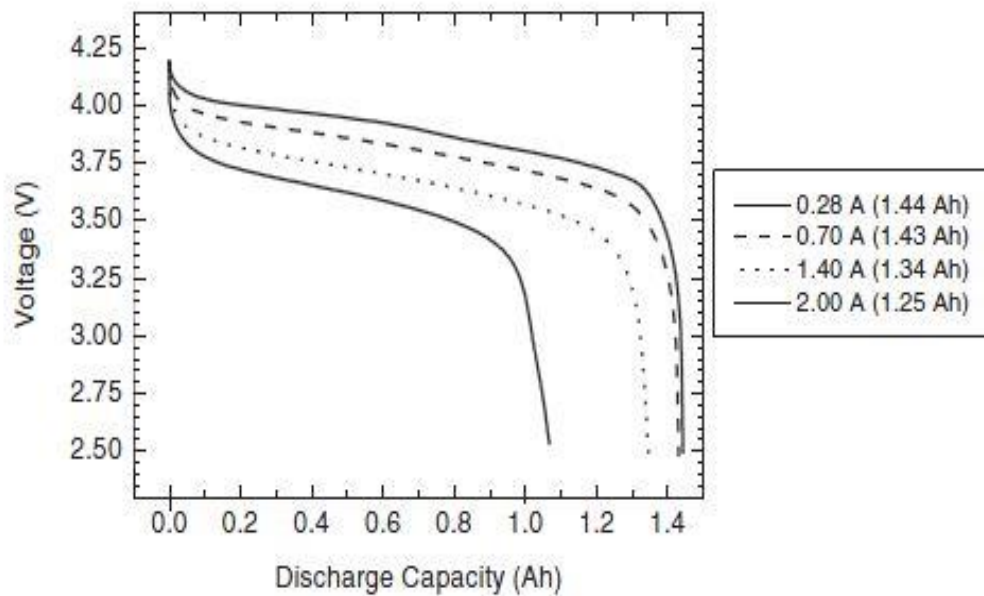


Figura 1.8: Tensione di una cella agli ioni di litio in funzione della profondità di scarica [4]

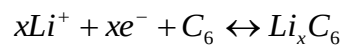
L'elettrolita è composto da un liquido organico (etere) e da sali disciolti, e viene utilizzato un separatore tra i due elettrodi composto da materiale polimerico poroso.

Solitamente, le batterie agli ioni di litio vengono prodotte in forma di moneta, come anche in forma cilindrica e prismatica.

La reazione che caratterizza l'elettrodo positivo è la seguente [3]:



Mentre quella dell'elettrodo negativo:



Dove x varia tra zero e uno per l'elettrodo negativo, tra 0 e 0.45 per l'elettrodo positivo.

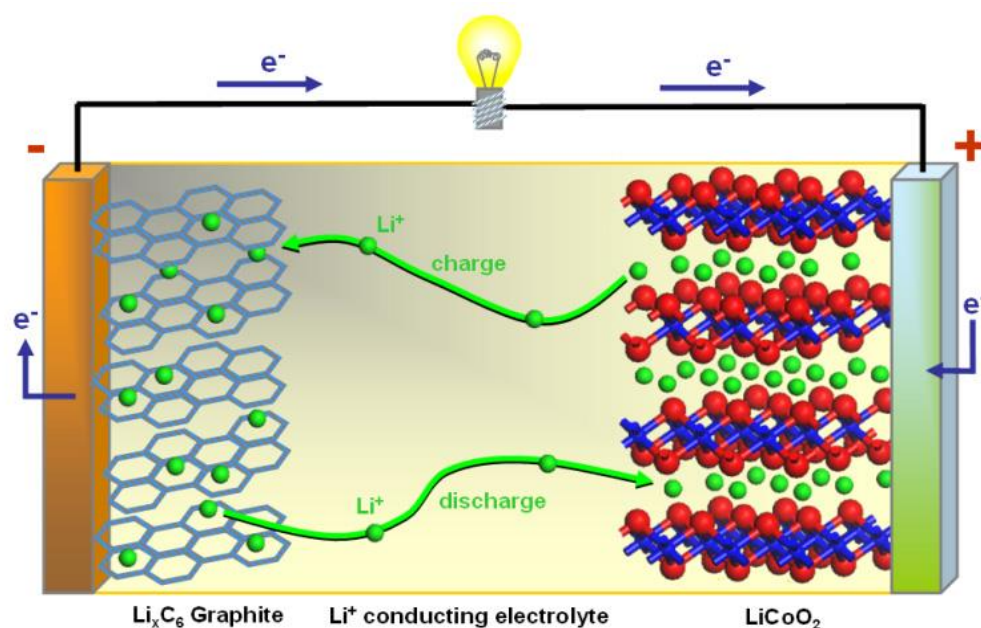


Figura 1.9: Immagine della reazione interna alle batterie ioni litio

Le celle agli ioni di litio sono, oltre ad avere elevata densità di energia e tensione ai morsetti, hanno una buona caratteristica di carica-scarica, con oltre 5000 cicli possibili, una accettabile bassa auto-scarica, assenza dell'effetto memoria, maggiormente sicure rispetto ad altre di simile tipologia e la possibilità carica rapida.

Tuttavia, queste batterie hanno un elevato costo e necessitano del controllo del processo di carica, specialmente quando si arriva a carica con una tensione di 4.2 V. infatti, la sovracarica o il surriscaldamento delle celle può portare alla decomposizione dell'elettrodo positivo con liberazione di gas.

Accumulatori a flusso

Questa tipologia di batterie immagazzina e rilascia energia elettrica grazie alla reversibilità della reazione elettrochimica che avviene tra due diversi liquidi elettrolitici.

Gli accumulatori a flusso sono costituiti, essenzialmente, da due distinti cicli fisici separati da una membrana. I materiali costituenti i due elettroliti fluiscono attraverso la cella in due separati cicli e subiscono la reazione chimica che avviene all'interno della cella stessa, con lo scambio di ioni o protoni attraverso la membrana, e con lo scambio di elettroni nel circuito elettrico esterno.

Queste tipologie di batterie sono caratterizzate dai seguenti vantaggi: la capacità totale può essere modificata aumentando la quantità di soluzione presente nei serbatoi, la batteria può essere completamente scaricata e si hanno basse perdite di elettrolita durante i vari cicli, poiché si hanno liquidi separati non hanno auto-scarica. Il principale svantaggio è costituito da bassi valori di densità di energia e di energia specifica.

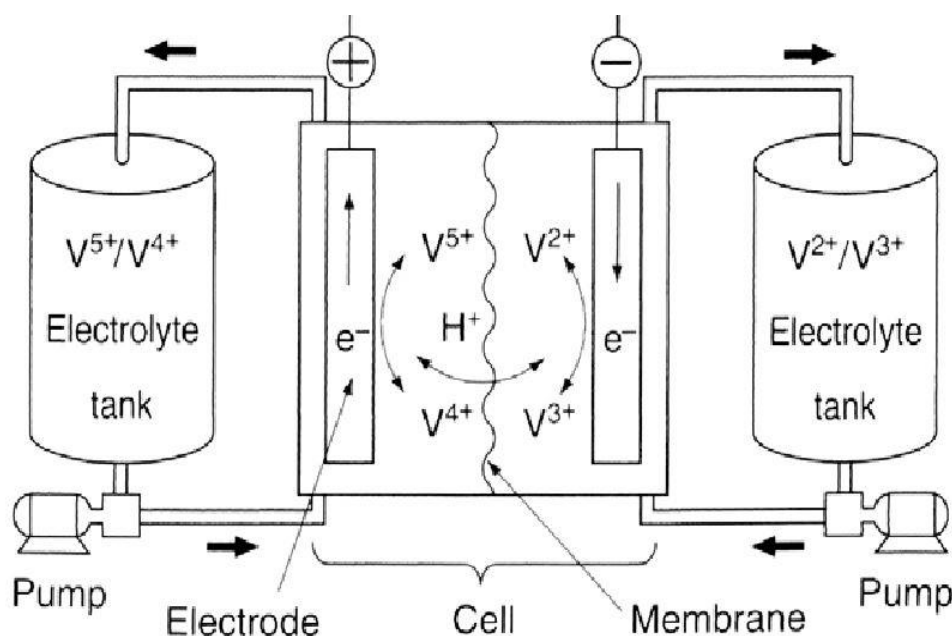
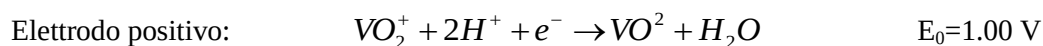
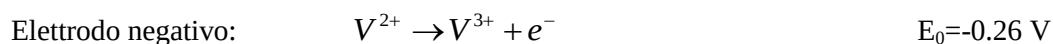


Figura 1.10: Schema di una batteria a flusso redox [4]

Con riferimento alle batterie a flusso di tipo redox, visibile in figura 1.10, all'interno delle celle, nei due elettrodi, si hanno le seguenti reazioni.



In generale, le batterie redox sono caratterizzate da una tensione a circuito aperto di 1.6 V quando è completamente carica, di 1.0 V quando completamente scarica. Inoltre, al 50% del suo stato di carica esse presentano una tensione di 1.4 V.

La loro peculiarità di avere una capacità modificabile in ampi range fa sì che le batterie a flusso di tipo redox siano impiegate per applicazioni di grande potenza, come, ad esempio, la modulazione della potenza in uscita da sorgenti molto variabili.

Inoltre, il basso tempo di risposta rende questa tipologia di accumulatori utilizzabile anche per gli UPS, al posto delle batterie al piombo acido. Tuttavia, le batterie redox sono caratterizzate da una bassa efficienza e da un elevato costo.

Accumulatori ad alta temperatura

Questa categoria di accumulatori comprende le celle sodio-zolfo e le celle sodio-cloruro di nickel. Esse verranno trattate e approfondite nel capitolo successivo, dove verranno analizzate ed elencate le peculiarità che caratterizzano questa tipologia di batterie.

Come si vedrà in seguito, esse risultano particolarmente predisposte per l'utilizzo in molti campi di applicazioni ed in particolare per l'accumulo elettrochimico stazionario, dove si richiedono elevate densità di energia e potenza ed un comportamento stabile al variare delle condizioni di funzionamento.

Capitolo 2

Celle Na-Beta

Negli ultimi decenni sono state sviluppate delle tipologie di batterie che si basano sull'uso di sodio liquido come componente chimico costituente l'elettrodo negativo. Esse vengono spesso definite anche “batterie ad alta temperatura”, in ragion del fatto che queste si differenziano dalle altre tipologie di celle per le loro elevate temperature di funzionamento. Come si vedrà anche in seguito, esse lavorano in un range di temperatura ottimale che va dai 280°C ai 360°C, con la conseguenza della necessità di avere sistemi ausiliari di riscaldamento che permettano di mantenere la temperatura entro tale intervallo; motivo per cui vengono attualmente utilizzate per applicazioni di potenza abbastanza consistente, trovando impiego in sistemi di generazione, distribuzione e trasmissione dell'energia elettrica, e quindi in applicazione stazionarie. Tuttavia esse vengono utilizzate anche per applicazioni non stazionarie, ad esempio, nei veicoli elettrici.

Altra caratteristica di differenziazione rispetto alle altre tipologie è l'utilizzo di beta-allumina come elettrolita ceramico solido [5]. La sua struttura permette agli ioni di sodio di muoversi liberamente lungo il piano di conduzione, ed esibisce una alta conduttività ionica che risulta essere comparabile con quella dell'elettrolita di altre tipologie di batterie, rimanendo elettronicamente isolati. La produzione dei tubi di beta-allumina porta alla fine ad avere un prodotto a elevata densità, bassa resistività elettrica, buona robustezza meccanica e dimensioni piuttosto ridotte. La formazione dipende dalla tipologia di materiale di partenza e dal tipo di processo utilizzato. Infatti, materiali di partenza diversi richiedono differenti cicli di trasformazione. Tuttavia, la produzione è vincolata da alcuni importanti prerequisiti:

- Totale controllo della composizione chimica e della purezza del materiale
- Omogeneità nel quantitativo dei materiali costituenti
- Estrema attenzione al processo di formazione
- Accurato controllo del processo di sinterizzazione
- Sviluppo di procedure per il controllo della qualità

Appartengono alla famiglia delle Na-Beta, abbondantemente trattate in questo capitolo, le celle sodio-zolfo e le celle sodio-cloruro di nickel. Entrambe, inoltre sono batterie secondarie (quindi ricaricabili) e le loro peculiarità verranno discusse nei capitoli successivi a questa breve introduzione.

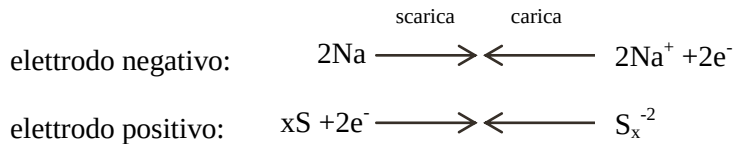
2.1 Celle Sodio-Zolfo (NaS)

In questa categoria di celle, solitamente di struttura tubolare, la beta alumina svolge doppia funzione di conduzione degli ioni di sodio (di isolamento per gli elettroni) e di separazione fisica tra quest'ultimo e lo zolfo [6]. Infatti, il sodio, costituente l'elettrodo negativo della cella, è contenuto all'interno di un involucro tubolare costituito dall'elettrolita. Per ragioni di sicurezza, all'interno di tale elemento tubolare è presente un rivestimento metallico che permette di evitare sovracorrenti e temperature elevate in caso di danneggiamento allo strato di beta-alumina. Lo zolfo, che forma l'elettrodo positivo, completa la struttura chimica della cella. Anch'esso si presenta nel normale funzionamento nello stato liquido e va a riempire la zona compresa tra il contenitore metallico esterno della cella stessa e il tubo formato dall'elettrolita. Come si può notare, la Figura 2.1 riporta una rappresentazione schematica sezionata di una classica cella NaS.

Analizzando il comportamento elettrochimico [7], durante la scarica gli ioni di sodio Na^+ migrano attraverso la beta-alumina e si combinano con lo zolfo portando alla formazione di solfuro di sodio. Durante la carica le reazioni chimiche sono invertite. La reazione chimica di base risulta, infatti, essere la seguente:



Rispettivamente per i due elettrodi:



dove $3 \leq x \leq 5$. La reazione si può assumere avvenga in 2 fasi: la prima consiste nella reazione che porta alla produzione di Na_2S_5 immiscibile con il restante zolfo fuso; nella seconda fase l' Na_2S_5 viene progressivamente convertito in polisolfuro di zolfo ad alto contenuto di quest'ultimo.

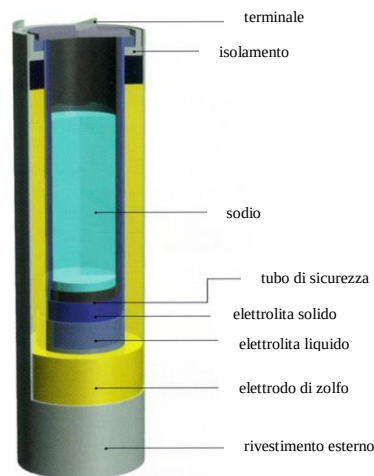


Figura 2.1: Rappresentazione sezionata di una cella sodio-zolfo

Poiché queste tipologie di batterie, usualmente, lavorano a temperature comprese tra i 300°C e i 350°C, la reazione avviene in forma liquida permettendo una buona reattività da parte di entrambi gli elettrodi. Questo consente di avere elevata densità di potenza e di energia, circa tre volte quelle delle batterie al piombo acido. Grazie alla struttura metallica e alle altre peculiarità costruttive, che garantiscono l'integrità della cella durante il suo ciclo di vita, le sodio-zolfo hanno un bassissimo impatto ambientale; inoltre, il 99% dei materiali con cui vengono costruite le celle possono essere riciclati, portando benefici in termini di life cost assessment.

Da un punto di vista operativo, si hanno elevate efficienze di carica e di scarica e durata di vita di 15 anni, ben più elevata di quella di altre categorie di celle quali per esempio, agli ioni di litio. Presentano, in genere, elevata efficienza (c.a.89%) e assenza quasi totale di aut scarica. La Tabella 2.1 mostra alcuni valori tipici nominali delle celle NaS [6].

Tabella 2.1: Valori nominali di alcuni parametri caratteristici delle celle sodio-zolfo

Energia specifica	100 Wh/kg
Densità di energia	375 Wh/l
Potenza specifica	200 Wh/kg
Tensione nominale di cella	2 V
Capacità nominale	1220 Wh
Efficienza	89 %
Efficienza coulombiana	Molto buona
Temperature di funzionamento	300-350°C
Auto-scarica	Molto bassa
Numero di cicli di vita	c.a.2500 al 100% DOD
Tempo di ricarica	8 h
Tempo di scarica nominale	7.2 h
Dimensioni	Diametro: 91 mm Lunghezza: 516 mm
Peso	5.5 kg

Come evidenziato nella tabella precedente il numero di cicli di vita con una scarica totale si aggira intorno ai 2500. Allo stesso modo di altre tipologie di celle, anche per le sodio-zolfo tale limite di vita si allunga al diminuire della profondità di scarica nei vari cicli di funzionamento. Risulta, infatti, che con cicli di scarica al 90% il limite di durata arriva a 4500 cicli, al 65% si raggiungono i 6500 cicli, fino a raggiungere i 40000 cicli per profondità di scarica non superiori al 20%. Tuttavia, solitamente, si cerca di evitare di raggiungere la scarica totale delle celle anche per motivi legati alla alta corrosività del polisolfuri di sodio (Na_2S_3) e per evitare possibili sovra-scariche locali dovute a disuniformità all'interno dei moduli contenenti le celle.

Per quanto riguarda il comportamento elettrico delle celle sodio-zolfo è importante mettere in risalto alcune caratteristiche che vanno a condizionare, e rappresentano parte rilevante, nella modellizzazione delle celle stesse.

2.1.1 Tensione a circuito aperto

La tensione a circuito aperto (OCV) in funzione dello stato di scarica di ogni cella ha andamento caratteristico mostrato nella seguente Figura 2.2 [6].

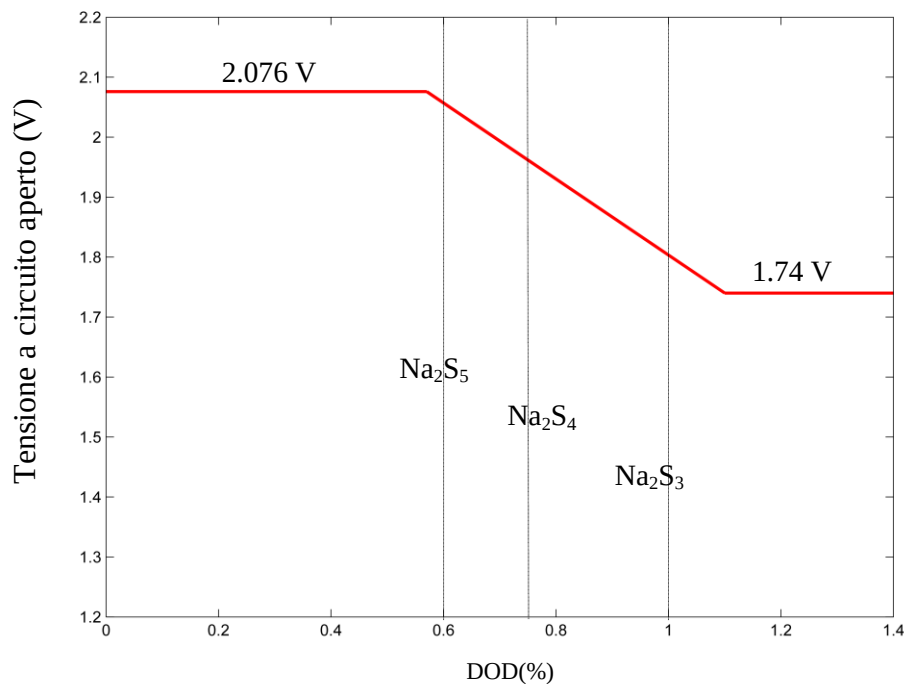


Figura 2.2: Tensione a circuito aperto delle celle sodio-zolfo in funzione del DOD

A cella completamente carica (DOD=0, SOC=1) la tensione a vuoto ai capi della stessa è di 2,076 V, valore che si mantiene costante al diminuire dello stato di carica fino al valore di DOD poco inferiore al 60%. Successivamente si ha una lineare discesa del valore di tensione fino a raggiunge il valore di fine scarica, che viene assunto pari a 1,78V. Come già detto sopra, nelle applicazioni pratiche si evita di scaricare ogni cella oltre l'85-90% della capacità disponibile. Questo fa sì che in termini realistici non si andrà mai al di sotto di tensioni finali di 1,82 V per cella.

2.1.2 Resistenza interna

La resistenza interna delle celle NaS è data dalla sovrapposizione delle resistenze dei vari elementi che compongono la cella stessa [6]. La resistenza dell'elettrolita solido, che ricordiamo essere la beta-allumina, quella associata agli elettrodi liquidi e quella dovuta all'effetto di polarizzazione portano alla definizione della resistenza totale. Durante la fase di carica e di scarica la resistenza interna della cella varia in modo non trascurabile in funzione dello stato di scarica della cella stessa, a conferma della natura fortemente non lineare del comportamento delle batterie nel loro ciclo di vita. Va notato, inoltre, che la resistenza di carica e quella di scarica differiscono tra loro, mostrando valori diversi al medesimo stato di carica, come mostra la Figura 2.3.

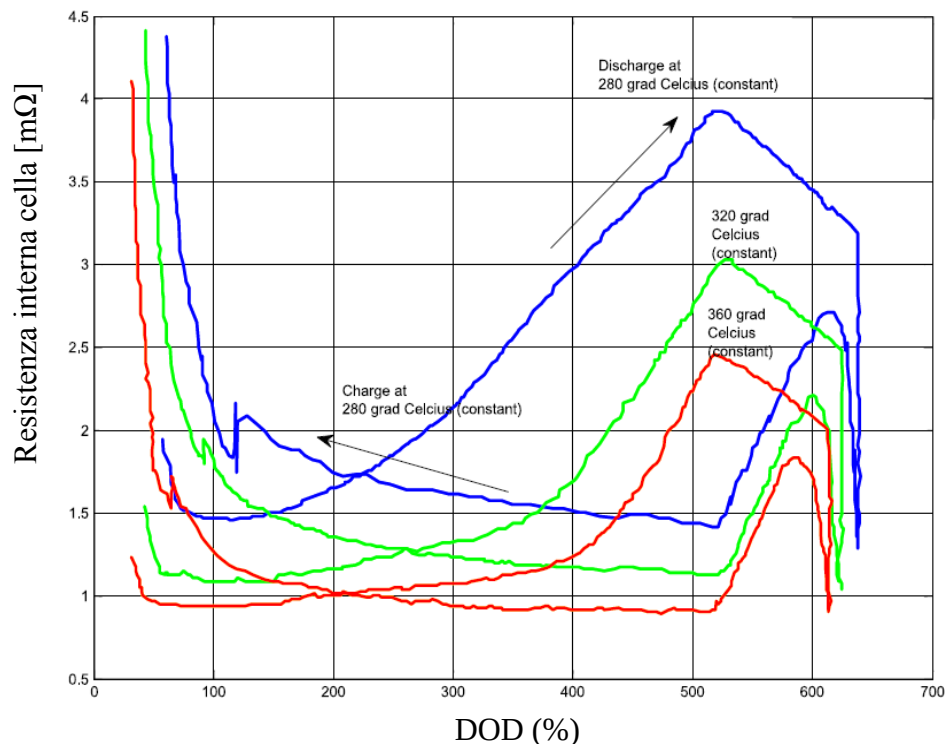


Figura 2.3: Resistenza interna di carica e scarica cella sodio-zolfo[3]

La figura 2.3 è composta da due gruppi di curve, uno per la fase di carica e l'altro per quella di scarica. Essa mette in evidenza anche la dipendenza della resistenza interna dalla temperatura di funzionamento della cella, considerando valori compresi nell'intervallo tra i 280°C e i 360°C. Tale intervallo rappresenta il range di temperatura in cui le celle sodio-zolfo presentano comportamento ottimale, con la conseguenza dello sviluppo di sistemi ausiliari di riscaldamento per il mantenimento in temperatura delle celle. Si può notare come la resistenza diminuisca, in termini relativi, in modo consistente all'aumentare della temperatura sia per quanto riguarda la carica sia per la scarica. Inoltre, si noti il fatto che alla fine della carica e della scarica si ha l'aumento della resistenza interna; questo comportamento è dovuto all'effetto di polarizzazione. In ogni caso come risulta essere evidente dalla figura precedente l'ordine di grandezza della resistenza interna di ogni cella NaS è di qualche mΩ, con valori mai superiori ai 5 mΩ.

La resistenza interna, in aggiunta, varia anche in relazione al numero di cicli carica/scarica effettuati assumendo valori crescenti all'aumentare del numero di cicli. Questo aspetto risulta essere molto importante e non può essere trascurato nelle varie analisi sulla vita delle celle in quanto va ad influenzare le prestazioni delle celle stesse in termini di pulse power e di tensione ottenibile ai morsetti. La caratteristica crescente, infatti, rappresenta il progressivo invecchiamento e decadimento prestazionale delle batterie.

2.1.3 Effetto della temperatura

Come già più volte detto in precedenza, le celle sodio-zolfo lavorano a temperature tra i 300 e i 360°C . Tuttavia, la temperatura di funzionamento varia durante le varie fasi di scarica, carica e di standby. Durante la scarica, il calore generato dalla resistenza interna e il consistente isolamento verso l'esterno portano ad un continuo aumento della temperatura interna, con conseguente diminuzione della resistenza interna e rendendo non necessari i dispositivi di riscaldamento ausiliari. Viceversa, durante la fase di carica si può assumere che la quantità di calore generata per dissipazione dalla resistenza interna di carica (che va ricordata essere diversa da quella di scarica) è all'incirca uguale al calore ceduto all'ambiente esterno, cosicché si otterrà una diminuzione di temperatura. Diversamente, nella situazione di standby si ha esclusivamente dissipazione di calore verso l'esterno; di conseguenza, se tale fase dovesse durare per tempi sufficientemente lunghi si avrebbe un eccessivo decremento della temperatura interna tale da rendere necessario l'intervento dei sistemi ausiliari di riscaldamento che vengono azionati dal battery management system (BMS). A seguito della messa in funzione di tali apparati si avrà il ripristino della temperatura nominale di funzionamento.

La reazione in termini di variazione della resistenza interna, al variare della temperatura di funzionamento, assume notevole importanza andando ad analizzare la potenza di picco ottenibile in uscita della cella. Questo porta ad imporre delle limitazioni nelle caratteristiche di funzionamento delle celle stesse. Infatti, una eventuale richiesta di funzionamento della batteria a pulse power pari a 4-5 volte la potenza nominale (per 30 secondi al massimo) porta all'assorbimento di elevati valori di corrente con conseguente notevole effetto joule che causa il naturale aumento di temperatura interno. Durante queste tipologie di operazioni la temperatura deve essere mantenuta all'interno del normale range operativo per evitare indesiderati effetti di disuniformità di temperatura all'interno di gruppi di celle che vanno a formare i vari moduli.

2.1.4 Pulse factor

Un'altra caratteristica molto importante delle celle sodio-zolfo è data dalla capacità di fornire potenza anche di molto superiore rispetto alla potenza nominale per tempi decrescenti all'aumentare del rapporto tra queste [7]. Le celle NaS, infatti, sono in grado di fornire potenze fino a 5 volte quella nominale per un periodo di tempo della durata di 30 secondi. Questa peculiarità può essere sfruttata per rendere partecipi codeste tipologie di batterie alla regolazione di frequenza primaria nelle reti di trasmissione, portando grandi benefici in termini di energia regolante e di tempi di intervento.

Con pulse factor si intende il rapporto tra la potenza in uscita alla cella (o al modulo) e la potenza nominale, ossia la potenza a cui corrisponde un tempo di scarica di 7.2 h; esso viene espresso in termini percentuali. La figura 2.4 mostra il pulse factor ottenibile dalle celle sodio-zolfo in relazione alla durata dell'azione della batteria. È comprensibile l'andamento ad esponenziale che parte dal 500% sfruttabile per 30 secondi fino al funzionamento a potenza nominale (pulse factor 100%) con tempo di 7.2h . Tale tempistica rappresenta infatti il tempo di scarica nominale delle celle sodio-zolfo che, quindi, presentano buona predisposizione all'installazione per sistemi energy intensive.

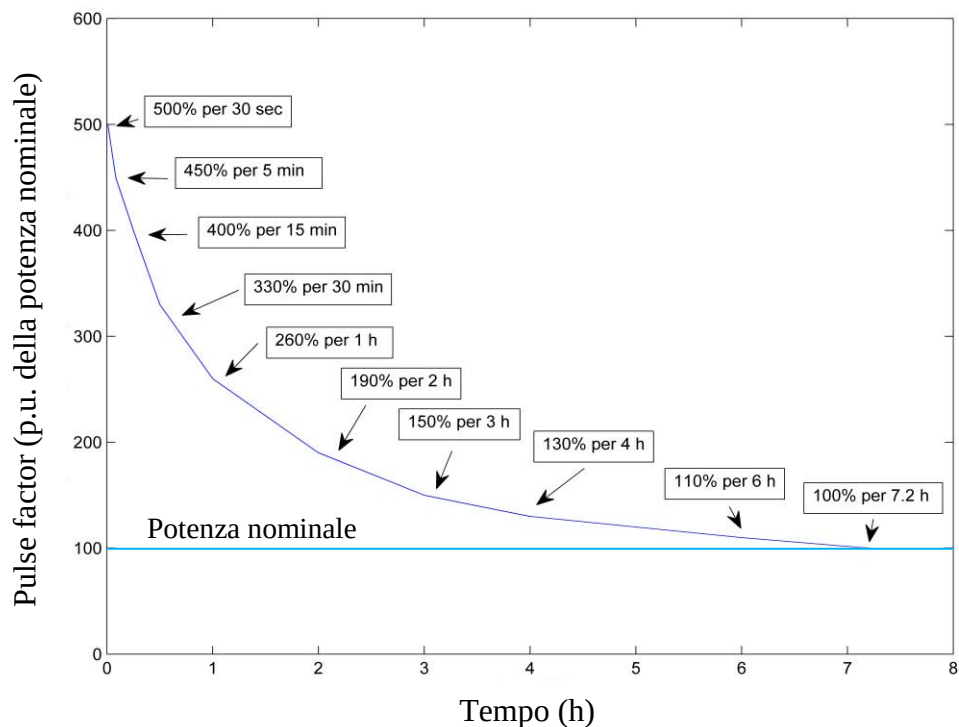


Figura 2.4: Pulse factor celle sodio-zolfo

Nelle applicazioni tecniche reali le varie celle vengono poi combinate tra loro tramite connessioni serie-parallelo andando a formare i vari moduli dei sistemi di accumulo. A loro volta i moduli verranno collegati in serie-parallelo al fine di costituire le unità vere e proprie che verranno collegate ai sistemi di conversione per l'interfacciamento alle reti in cui devono essere installate. Le varie combinazioni serie-parallelo cambiano a seconda dei valori di tensione e di corrente richiesti in uscita alle unità operative, permettendo una buona vastità di possibili configurazioni. Tuttavia, tra tutte prevalgono alcune in particolare che, come si vedrà in seguito, hanno dimostrato un buon equilibrio tra tensione e corrente generabili. Ogni modulo è, come già detto, dotato di riscaldatori che permettono il controllo della temperatura interna mantenendola all'interno del range di normale funzionamento.

Le varie celle componenti il modulo sono posizionate verticalmente e l'interspazio presente riempito di sabbia per prevenire ed, eventualmente, estinguere possibili incendi causati da sovratemperature o gravi malfunzionamenti e guasti. Per aumentare la sicurezza, all'interno dell'elettrodo negativo, costituito da sodio, è stato inserito un "tubo di sicurezza" metallico con lo scopo di rendere minima la quantità di sodio che entrerebbe in contatto con lo zolfo in caso di danneggiamento alla beta-allumina. Esso è dotato di un foro nella sua parte inferiore che, in caso di reazioni violente che provocano un aumento brusco della temperatura, si restringe, isolando parte del sodio presente all'interno della cella dal zolfo. Con questo accorgimento la sicurezza è stata notevolmente aumentata.

2.1.5 Modulo batterie da 30kW

I moduli di celle sodio-zolfo da 30 kW sono composti da 224 celle connesse tra loro secondo la configurazione (4s x 14p) x 4s, distanziate tra loro maggiormente rispetto alla classica configurazione compatta e con interstizio riempito, anche in questo caso, di sabbia inerte ad alto potere autoestinguente, come riportato in [8].

Per limitare la dispersione verso l'esterno il modulo è dotato di un doppio rivestimento in acciaio inossidabile e sono state predisposti ulteriori accorgimenti nella parte superiore ed inferiore del modulo al fine di incrementare ulteriormente la resistenza al calore e alla combustione. Sono presenti anche in questo caso i riscaldatori per il mantenimento della temperatura interna.

I moduli vengono, successivamente, collegati tra loro a formare due stringhe da 20 elementi connesse in parallelo a formare una unità da 1,2 MW. Ogni unità viene raccolta in armadi a sviluppo prevalentemente verticale.

2.1.6 Modulo batterie da 50kW

Una delle soluzioni tecniche maggiormente usate nelle installazioni già effettuate a livello mondiale è rappresentata dal modulo da 50 kW, i cui parametri caratteristici sono riportati in Tabella 2.2 dove vengono proposte le due classiche configurazioni caratterizzate da diversi valori di tensione e corrente [7].

Tabella 2.2: Dati caratteristici di vari moduli da 50kW

Tensione nominale	64	128	640
Composizione celle	(8s x 6p) x 8s	(8s x 12p) x 4s	320s
Capacità di dimensionamento	430 kWh	430 kWh	360 kWh
Potenza massima	60 kW per 3h	60 kW per 3h	250 kW per 30 sec
Pulse factor	1.2	1.2	5
Efficienza	85	85	85
Durata di vita	15 anni; 2500 cicli al 100% DOD	15 anni; 2500 cicli al 100% DOD	15 anni; 2500 cicli al 100% DOD
Perdite termiche in standby	3.4 kW	3.4 kW	2.2 kW
Dimensioni	2,270W x 1,740D x 720H	2,270W x 1,740D x 720H	2,270W x 1,740D x 720H
Peso	3500 kg	3500 kg	3500 kg

2.2 Celle Sodio-Cloruro di Nickel (Zebra)

Le celle a sodio-cloruro di nickel, dette anche Zebra (zero emission battery research activity), in modo simile alle sodio-zolfo, sono composte da sodio fuso, che rappresenta l'elettrodo negativo, e da beta-allumina come elettrolita solido che permette la conduzione degli ioni di sodio. A differenza dell'altra tipologia di celle Na-Beta, queste si distinguono per il composto chimico che va a costituire l'elettrodo positivo. In questo caso, infatti, si ha cloruro di nickel allo stato solido. Altro carattere distintivo è la presenza di un secondo elettrolita, allo stato liquido, composto da sodio cloro-alluminato necessario per permettere il rapido passaggio degli ioni di sodio dall'elettrodo positivo e attraverso la beta-allumina [5]. La struttura della cella è visibile in Figura 2.5. La minima temperatura operativa della cella è determinata dal punto di fusione del sale, ossia 157°C; tuttavia, essendo il range di temperatura di normale di funzionamento compresa tra i 280 e i 360°C non si dovrebbero mai avere problemi di solidificazione dell'elettrodo negativo. Inoltre a tali temperature, come si vedrà in seguito, il contributo alla resistenza elettrica della beta-allumina è da considerarsi abbastanza piccola, anche se non trascurabile.

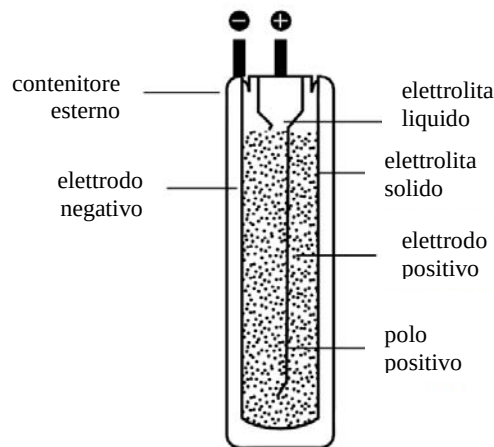
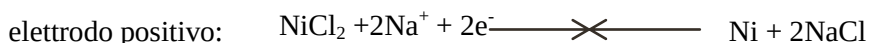
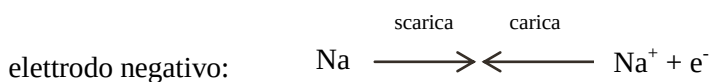


Figura 2.5: Sezione di una cella sodio-cloruro di nickel

Analizzando il comportamento di queste celle da un punto di vista elettrochimico, esse possono essere descritte dalla seguente reazione reversibile (vedi Figura 2.6):



Rispettivamente per i due elettrodi:



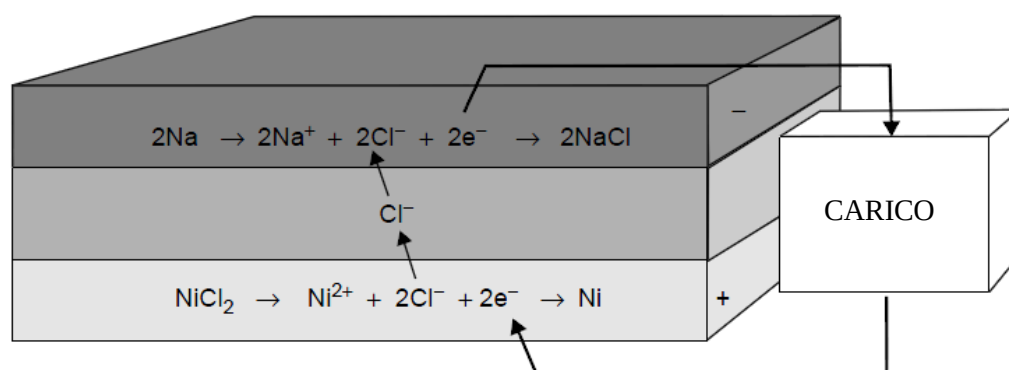


Figura 2.6: Vista della reazione chimica interna alla cella durante la fase di scarica[9]

Sia il cloruro di nickel sia il sodio sono per loro natura difficili da maneggiare e trattare durante la fase di produzione delle cella come pure durante il trasporto e l'installazione. Tuttavia, la ricerca ha portato alla scoperta che è possibile, e conveniente, partire da una situazione di cella completamente scarica, ossia con nickel in polvere e cloruro di sodio. Risulta sufficiente, poi, una prima carica completa per portare alla formazione di sodio e cloruro di nickel.

Nella seguente Tabella 2.3 vengono riportati i dati caratteristici di una tipica cella a sodio-cloruro di nickel [10].

Tabella 2.3: Dati caratteristici celle Zebra

Tensione a circuito aperto	2.58 V
Capacità	38 Ah
Energia specifica	140 Wh/kg; 280 Wh/l
Potenza specifica	150 W/kg
Efficienza coulombiana	Molto alta
Temperature di funzionamento	300-350 °C
Auto-scarica	10 % al giorno in standby
Tempo di ricarica	8 h
Tempo di scarica nominale	3 h
Dimensioni	36 x 36 x 220 mm
Peso	695 g

2.2.1 Tensione a circuito aperto

Le celle a sodio-cloruro di nickel hanno un'elevata tensione a circuito aperto, 2.58 V a 300°C[5], che cala all'aumentare della temperature come evidenziato in Figura 2.7.

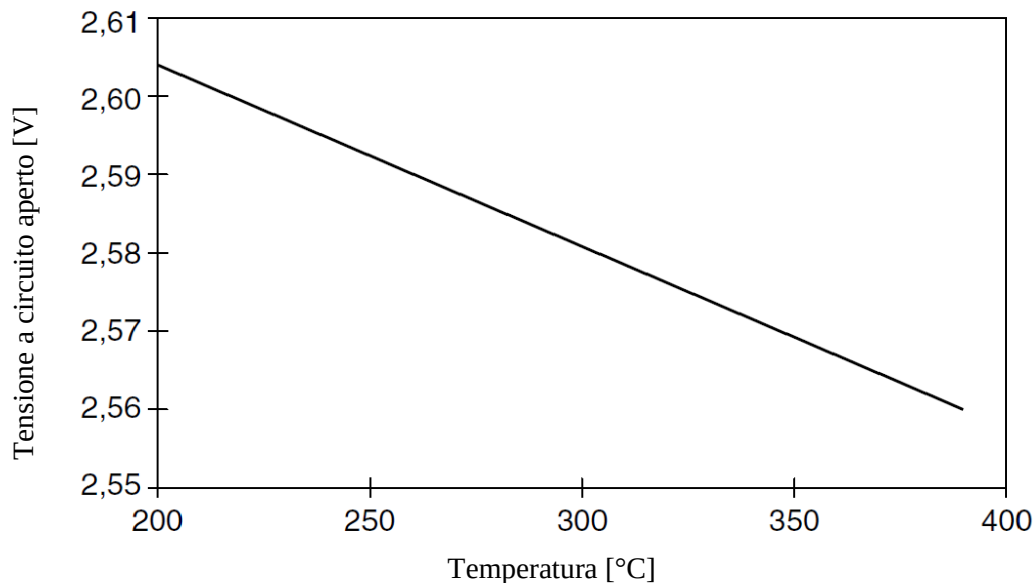


Figura 2.7: Andamento tensione a circuito aperto in funzione della temperatura operativa

Poiché il potenziale termo-neutrale è di 2.72 V, durante la fase di carica ad una tensione inferiore a questa la cella Zebra si raffredderà termodinamicamente. La densità di energia teorica delle celle Zebra è di 796 Wh/kg, ma nella realtà pratica tale densità, seppur nettamente superiore rispetto a quella delle altre tipologie di celle, risulta inferiore a tale valore assestandosi a 100 Wh/kg.

La presenza del secondo elettrolita comporta un'ulteriore aspetto positivo delle celle Zebra; infatti, esso rendere la cella resistente alla sovra-carica e sovra-scarica. Durante la reazione che caratterizza la sovra-carica il catolita (NaAlCl_4) reagisce con il nickel formando sodio, cloruro di nickel e AlCl_3 . Questa reazione ha luogo dopo il totale consumo di sale all'interno della cella. La tensione a circuito aperto, in questo caso, raggiunge i 3.05 V. quando invece tutto il cloruro di nickel risulta essere consumato si ha la reazione di sovra-scarica, dove il rimanente sodio reagisce con il catolita a formare cloruro di sodio e alluminio. Tale reazione continuerà a proseguire fino a che non sarà totalmente consumato anche il sodio. L'andamento della tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica [11] è visibile in Figura 2.8.

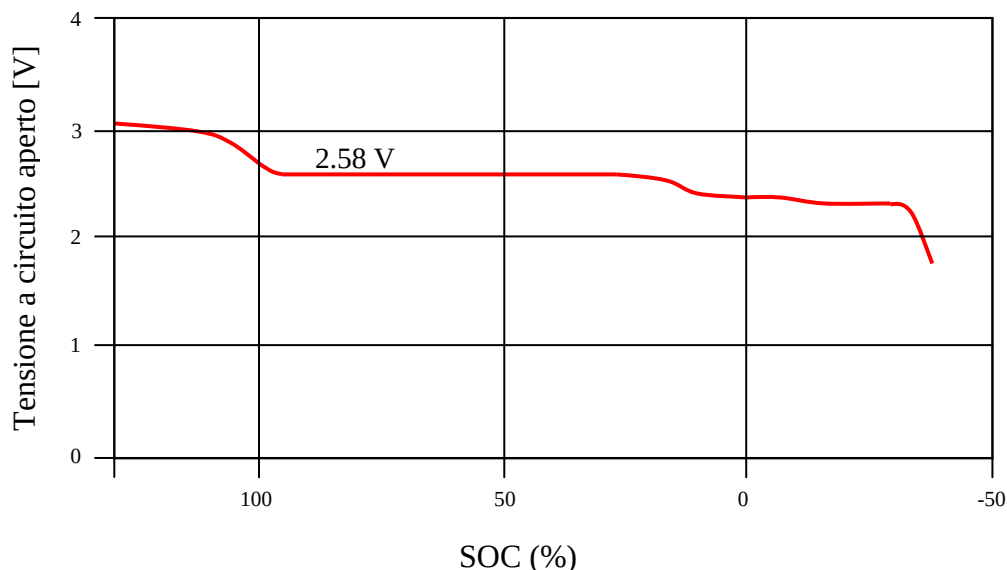


Figura 2.8: Tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica celle Zebra

Inoltre, l'elettrolita ceramico solido costituito dalla beta-allumina risulta essere molto sensibile ad eventuali elevate correnti locali. Il secondo elettrolita, che ricopre la superficie interna del tubo di beta-allumina, permette di avere una uniforme distribuzione di corrente lungo tutta la superficie ceramica. Tale uniformità nella distribuzione delle correnti rappresenta una delle principali ragioni dei lunghi tempi di vita caratteristici delle celle Zebra.

Ulteriormente, l'elettrolita costituito da sali fusi contribuisce al miglioramento del comportamento dal punto di vista della sicurezza delle celle Zebra [12]. Infatti, in caso di danno strutturale alla cella il sodio andrà a reagire principalmente con l'elettrolita liquido formando alluminio e cloruro di sodio. La diffusione di NaAlCl_4 fuso nella zona dove ha luogo la reazione è determinante ai fini del controllo del calore rilasciato.

2.2.2 Resistenza interna

La resistenza interna, che ad esempio influenza la potenza in uscita durante la scarica, ha andamento in relazione alla profondità di scarica maggiormente lineare rispetto al caso delle sodio-zolfo, come si può vedere in Figura 2.9, tratta da [5]. Essa cresce all'aumentare del DOD (depth of discharge) ed il valore punto per punto è dato dal contributo dei vari elementi presenti all'interno della cella. La figura 2.9 mette in risalto l'apporto di ogni componente al valore finale. Come si può notare vi è un contributo costante dato dai componenti metallici e dall'elettrolita solido, mentre la parte variabile è dovuta principalmente all'elettrodo negativo e a quello positivo. In ogni caso prevale nettamente l'effetto dell'elettrodo positivo che va a provocare un notevole aumento del valore della resistenza durante la scarica.

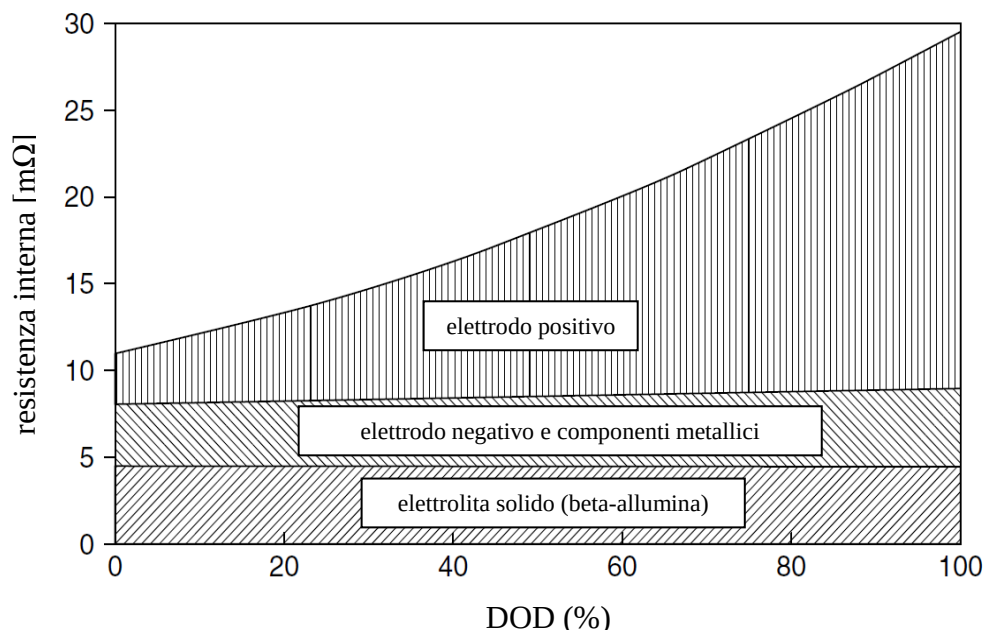


Figura 2.9: Resistenza interna di scarica celle Zebra

La ragione della crescita della resistenza, con andamento quasi esponenziale, può essere trovata in relazione alle modalità in cui opera l'elettrodo positivo. Durante la scarica, come pure durante la carica, la reazione inizia da un punto che presenta il minimo valore di resistenza. Questa situazione si verifica nella superficie interna al tubo di beta-allumina e, il fronte della reazione si muove verso l'elettrodo positivo. Durante la scarica il cloruro di nickel viene convertito in nickel e cloruro di sodio. Dietro il fronte della reazione si ha il flusso di corrente accompagnato dagli ioni di sodio che migrano all'interno della cella. Nel mezzo della cella stessa il flusso di corrente è favorito dalla conduttività elettronica del nickel che, essendo superiore a quella dell'elettrolita liquido, all'aumentare della distanza tra superficie della beta-allumina e il fronte della reazione provoca un aumento della resistenza dell'elettrodo positivo. La cella presenta comportamento simile anche durante la carica, quando si ha la conversione del nickel in cloruro di nickel.

Nel corso degli anni, tuttavia, sono state studiate alcune soluzioni costruttive che permettessero la riduzione della resistenza interna. In particolar modo, una diminuzione del valore di resistenza può essere raggiunta con i seguenti accorgimenti:

- aumento della superficie della beta-allumina
- riduzione dello spessore dell'elettrodo positivo

Entrambe queste accortezze sono state realizzate, mantenendo inalterata la massa dell'elettrodo, cambiando la forma della sezione dell'elettrolita solido passando da una configurazione circolare ad una quadriloboidale che prende il nome di "monolith tube", la cui differenza si può notare in Figura 2.10.

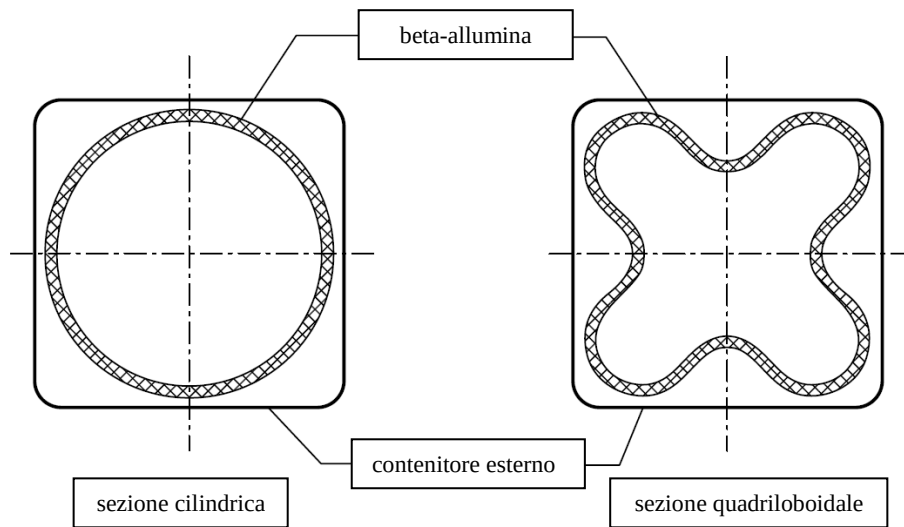


Figura 2.10: Confronto tra le sezioni trasversali della beta-allumina realizzate [5]

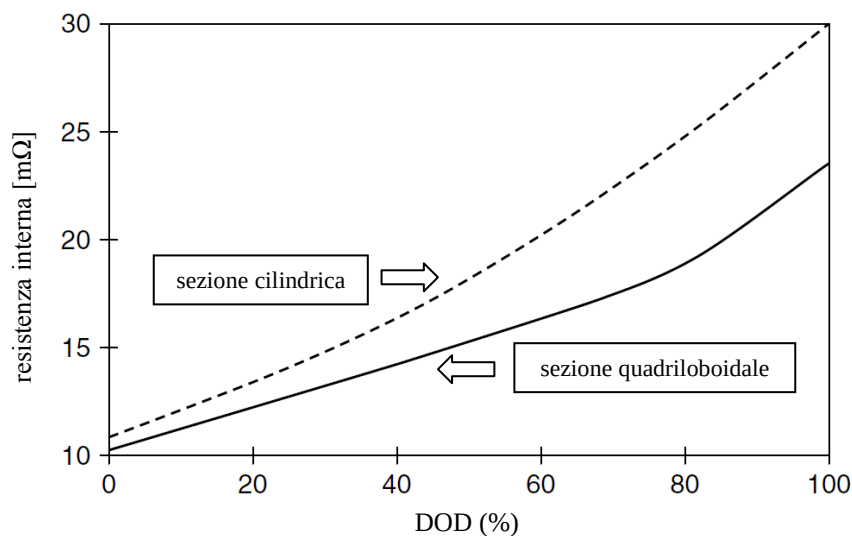


Figura 2.11: Confronto tra resistenza interna per sezione cilindrica e sezione quadriloboidale [5]

Il risultato finale è un elettrodo positivo di spessore 10 mm e una superficie dell'elettrolita solido 50% più grande rispetto all'altro caso con notevoli benefici in termini di riduzione della resistenza sia per i contributi fissi sia per i contributi variabili dei componenti della cella. La differenza si può notare bene in Figura 2.11.

Le celle Zebra vengono connesse secondo una configurazione serie/parallelo a seconda dei valori desiderati di tensione e capacità. Una delle soluzioni tecniche disponibili e sviluppate nel corso degli anni (vedi [13]) prevede la connessione in serie di 240 celle a formare un modulo da 23.5 kWh, i cui parametri caratteristici sono evidenziati in Tabella 2.4 e visibile in Figura 2.12.

Tabella 2.4: Dati caratteristici modulo 23.5 kWh celle Zebra

Numero totale di celle	240 in serie
Capacità nominale	38 Ah ; 23.5 kWh
Tensione minima	450 V
Tensione nominale	620 V
Tensione massima	641 V
Massima tensione di carica	700 V
Minima tensione di scarica	450 V
Temperature ambiente operative	Da -20°C a 60°C
Peso	256 kg



Figura 2.12: Immagine modulo celle sodio-cloruro di nickel da 23.5 kWh

Va notato che, per aver un buon isolamento termico e una buona resistenza meccanica agli urti, il modulo è dotato di un doppio strato di isolamento sotto vuoto tipicamente di spessore 25 mm. Ogni elemento modulare è dotato un proprio sistema di controllo (BMS) che mantiene controllate le principali grandezze di funzionamento delle celle ed, eventualmente, interviene per ritornare entro i range ammessi.

I moduli, inseriti all'interno di armadi o container, vanno a comporre le unità che successivamente vengono accoppiate ai sistemi di conversione statica . Tali unità, viste le imponenti dimensioni, sono solitamente posizionate all'esterno di qualsiasi struttura, in virtù del fatto che le celle e i moduli opportunamente controllati in temperatura lavorano molto bene in ampi intervalli di temperatura ambiente. La Tabella 2.5 mostra i principali parametri di una unità di celle Zebra da 0.5 MW di potenza (1.5 MWh) in cui i 64 moduli contenuti sono connessi tra loro in parallelo [14].

Tabella 1.5: Dati caratteristici unità da 1.5 MWh

Numero totale di moduli	64 in parallelo
Tensione nominale	620 V
Capacità nominale	2432 Ah
Tensione massima	700 V
Durata di vita	4500 cicli all'80% DOD
Consumo termico	< 9 kW
Dimensioni	6058 x 2896 x 2438 mm
Tempo di carica standard	8 h
Tempo di scarica nominale	3 h



Figura 2.13: Immagine unità 1.5 MWh celle Zebra

In conclusione, le celle a sodio-cloruro di nickel presentano i seguenti vantaggi rispetto alle celle sodio-zolfo:

- Maggiore tensione a circuito aperto (2.58 vs 2.076 V)
- Vengono assemblate e installate completamente scariche, favorendo le operazioni di montaggio, mentre le celle sodio-zolfo vengono costruite nella conformazione di cella carica, con la necessità di particolari attenzioni quando devono essere maneggiate
- Da un punto di vista della sicurezza, in caso di danneggiamento al tubo di beta-allumina l'elettrolita fuso porta alla formazione di materiale solido; inoltre, l'alluminio che rimane depositato provvede al cortocircuito della cella bypassando elettricamente in modo autonomo la cella danneggiata.
- Possono essere sovra-caricate e sovra-scaricate
- Subiscono una minore attività corrosiva da parte degli elementi chimici presenti all'interno

In generale, le celle Na-Beta sono state spesso oggetto di critica a causa della necessità di dover ricorrere a sistemi di controllo termico. Tuttavia, grazie al fatto di essere termicamente controllate hanno dimostrato di operare estremamente bene ad elevata efficienza in caso di ambienti di installazione sia molto caldi sia molto freddi.

Capitolo 3

Modellizzazione delle celle Na-Beta tramite software EMTP-RV

EMTP-RV (Electro-Magnetic Transient Program Restructure Version) è un software professionale a visualizzazione grafica per la simulazione ed analisi dei fenomeni transitori nei sistemi di potenza e nelle reti elettriche in generale. Esso permette lo studio e l'approfondimento di una vasta gamma di possibili realizzazioni tecniche anticipando o verificando i risultati attesi sperimentalmente, attraverso la costruzione di schemi di progetto basati sull'utilizzo di blocchi preformati e/o sottocircuiti costruiti dall'operatore stesso tramite la combinazione di quelli già disponibili nella libreria.

La presenza dell'interfaccia grafica lo rende abbastanza intuitivo e comprensibile, potendolo paragonare a software di simulazione simili molto più noto a livello accademico, quali PSpice e Simulink.

È, inoltre, possibile creare delle proprie “cartelle di memoria” che consentono il salvataggio dei sotto-circuiti creati, visibili, successivamente, come semplici blocchi applicabili ad altri design.

Codesto software, molto utilizzato a livello mondiale, permette essenzialmente di effettuare quattro tipologie di simulazione (EMTP > Simulation Options):

- Load-flow solution;
- Steady-state solution;
- Time domain solution;
- Frequency scans;

Va notato che è permesso scegliere contemporaneamente tutte e quattro le tipologie di simulazioni, con la conseguenza comprensibile di avere elevati tempi di simulazione.

La prima tipologia di simulazione permette lo studio dei flussi di potenza all'interno della rete realizzata, tramite la risoluzione delle equazioni con l'uso dei fasori complessi. La soluzione finale, basata su di un' unica frequenza (Default Power Frequency), è dipendente dalla topologia con cui vengono collegati all'interno dello schema circuitale i dispositivi attivi (ossia le sorgenti, che prendono il nome di LF-Devices) e i blocchi corrispondenti ai carichi che impongono condizioni di vincolo per la risoluzione delle equazioni caratteristiche. Una volta ultimata la simulazione, il software crea un file di risultati (Load-Flow solution data file) che

può essere utilizzato successivamente per l'inizializzazione di altri flussi di potenza sulla medesima rete.

La soluzione a regime permanente (Steady-state solution) si basa, ancora una volta, sui fasori complessi per la risoluzione delle equazioni e, tutti i blocchi presenti all'interno della rete su cui si effettua lo studio in regime permanente sono rappresentati da modello a parametri concentrati. Oltre che utile all'effettivo studio in regime permanente questa tipologia di simulazione permette di inizializzare una successiva soluzione nel dominio del tempo. In questo caso, però, i dispositivi di controllo non partecipano alla risoluzione mentre dispositivi non lineari vengono linearizzati o per di più scollegati. Per la buona riuscita delle simulazioni è necessaria la presenza di almeno una sorgente con tempo di avvio minore di zero; in questo modo, infatti, si ha l'imposizione di una condizione di partenza.

Con la terza tipologia (Time-domain solution) si possono effettuare analisi del comportamento nel dominio del tempo della rete ideata, ottenendo in uscita lo sviluppo nel tempo delle grandezze caratteristiche di ogni singolo elemento. La rete e le equazioni caratteristiche vengono risolte per integrazione numerica, ed eventuali elementi non lineari non vengono linearizzati o scollegati ma partecipano attivamente alla risoluzione delle equazioni. Molto utile allo scopo finale è la possibilità di inizializzare manualmente i parametri caratteristici dei vari elementi della rete (ad esempio corrente iniziale di un'induttanza o tensione iniziale di un condensatore) od, in caso, partire dai risultati di una precedente soluzione di regime permanente.

Infine, con la Frequency Scans si realizzano analisi armoniche della rete da simulare; l'operatore deve indicare il range di frequenza in cui effettuare la caratterizzazione del comportamento, ed il passo tra una frequenza e quella successiva. Il calcolatore andrà, quindi, ad eseguire uno studio in regime permanente per ogni singola frequenza.

Ai fini della visualizzazione dei risultati è necessario selezionare, antecedentemente l'avvio della simulazione, per ogni dispositivo, alla sezione scopes, cosa si desidera poter stampare a video pena l'obbligo di effettuare una nuova simulazione dopo aver selezionato la grandezza da visualizzare. Soprattutto se la simulazione risulta essere piuttosto onerosa dal punto di vista temporale una simile dimenticanza può comportare una notevole perdita di tempo. Una volta completata la simulazione attraverso la funzione MPLLOT si possono plottare gli andamenti delle varie grandezze, sia in funzione del tempo sia in relazione ad altre grandezze, ottenendo grafici 2D o 3D e diagrammi di varia natura selezionando altre opzioni possibili presenti nell'interfaccia grafica in MPLLOT, quali ad esempio ABSBAR, ABSDIFF, MAXBAR, ecc. Tutti gli andamenti sono, poi, trasferibili e salvabili in formato .fig e, successivamente modificabili attraverso il software MatLab al fine di renderli più comprensibili e piacevoli alla vista.

Con lo scopo di arrivare alla definizione del modello finale si è resa necessaria una prima fase sufficientemente lunga per la comprensione della metodologia usata dal software e per avere una panoramica generale delle possibilità offerte dai blocchi precostruiti presenti nella libreria.

Il modello dinamico di un elemento di accumulo elettrochimico [3] ha come caratteristiche preponderanti la tensione a circuito aperto, la capacità nominale (ossia la corrente che la cella riesce a fornire per un determinato tempo misurata in Ah), la costante di tempo e la resistenza interna. La rappresentazione modellizzata avrà, naturalmente, i due morsetti, positivo e negativo, ben visibili e rappresenteranno gli elementi di collegamento con le altre celle

o con altri dispositivi circuitali. La forza elettromotrice a vuoto (od a circuito aperto) E_0 è data dalla differenza tra il potenziale al morsetto positivo e quello al morsetto negativo, come espresso dalla seguente relazione:

$$E_0 = E_p - E_n$$

Durante il suo funzionamento la cella è caratterizzata da una certa caduta di tensione sulla resistenza interna dovuta alla circolazione di corrente verso il carico. La tensione ai morsetti è, quindi, data dalla relazione:

$$V_0 = E_0 - R_{int} I$$

dove R_{int} è la resistenza di carica o scarica a seconda dei casi, e I è la corrente che fluisce nel circuito. Sia V_0 che R_{int} hanno valori variabili a seconda dello stato di carica della cella mentre solo la resistenza interna è influenzata dalla temperatura di funzionamento. Di conseguenza esse necessitano di particolare attenzione nella modellizzazione e nella caratterizzazione del loro comportamento. Trascurando l'effetto della temperatura sulla resistenza e considerando esclusivamente l'influenza dello stato di carica è necessario che il modello sia dotato di uno strumento di misura della tensione o della corrente a seconda della tipologia di metodo prevista per la stima del SOC. La Figura 3.1 riporta il modello schematico semplificato proposto per la modellizzazione delle celle Na-Beta considerate in questa tesi.

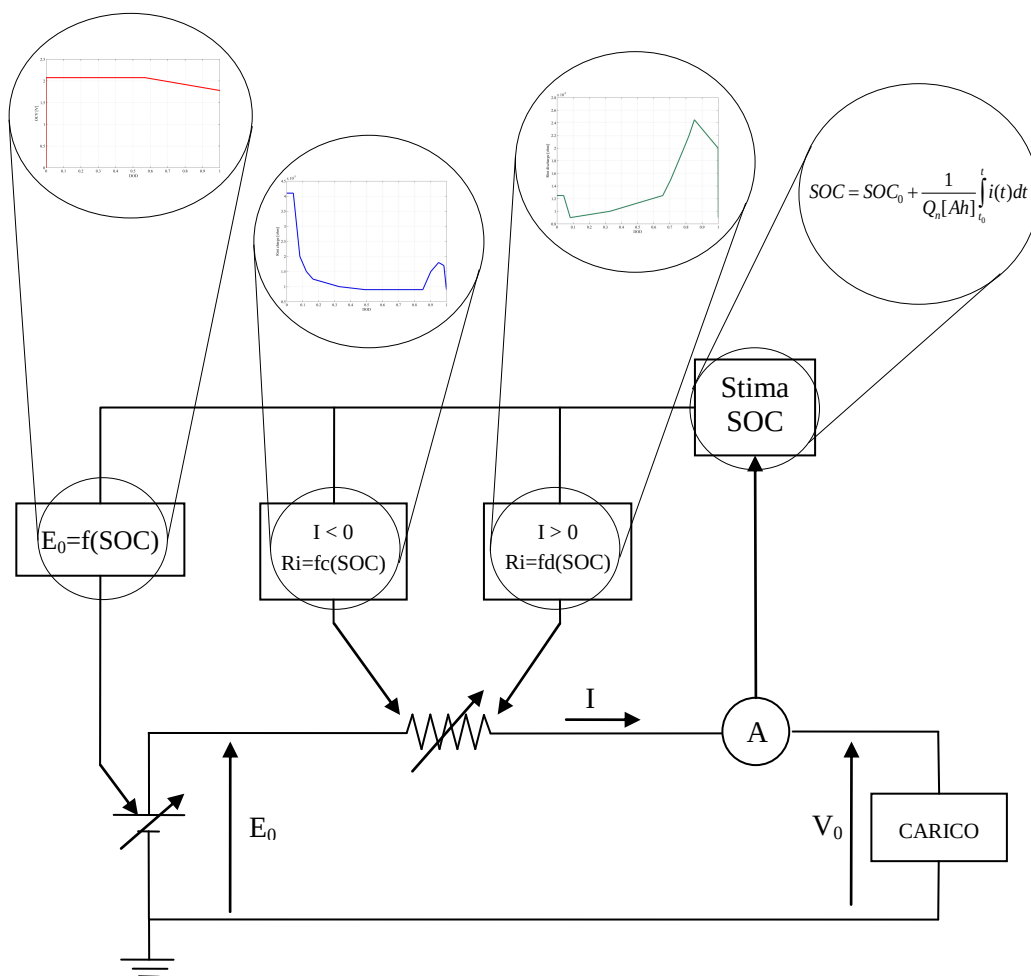


Figura 3.1: Modello dinamico semplificato accumulatore elettrochimico

3.1 Modellizzazione delle celle Sodio-Zolfo (NaS)

La costruzione del modello di una cella sodio-zolfo, le cui caratteristiche sono state descritte nel capitolo precedente, parte da dati ricavati in letteratura. Essendo quella delle NaS una tecnologia abbastanza matura tali dati caratteristici sono stati recuperati con sufficiente facilità e con una certa uniformità in termini di valori numerici che, quindi, hanno permesso di ottenere un modello che possa rappresentare sufficientemente bene la realtà.

Tabella 3.1: Dati caratteristici di una cella sodio-zolfo utilizzata per il modello [6]

Tensione nominale	2 V
Capacità	1220 Wh
Dimensioni	Diametro: 91 mm Altezza: 516 mm
Efficienza	89%
Densità di energia	367 Wh/l
Peso	5.5 kg

Con riferimento ai dati presenti in Tabella 3.1 e tenendo conto degli andamenti di tensione a circuito aperto, resistenza interna di carica e scarica ed utilizzando, di base, il modello proposto precedentemente si è via via definita e caratterizzata la modellizzazione della cella.

Un aspetto importante, e non trascurabile, riguarda il metodo per la stima dello stato di carica (SOC) della cella durante il suo funzionamento in quanto esso va direttamente ad influenzare i valori di tensione e resistenza, come già discusso nel capitolo 2. In questo caso si è utilizzato la metodologia che si basa sulla misura nella corrente (e quindi della quantità di carica) fluiva nel tempo in entrata od in uscita dalla cella stessa. Questo metodo risulta, nella realtà, meno preciso e affidabile rispetto a quello che utilizza la tensione come parametro di riferimento, in virtù del fatto che la misura di corrente potrebbe essere affetta da errore. Essa infatti non tiene conto dell'usura e invecchiamento della cella stessa che porta ad una diminuzione delle capacità prestazionali e ad una modifica dei valori delle resistenze.

Tuttavia, nella definizione del modello finale qui proposto è stata trascurata la variabilità dei parametri al passare dei cicli di vita e al cambiamento della temperatura, di conseguenza, le misure non dovrebbero essere soggette ad errore e il metodo diviene quindi affidabile. A livello di implementazione, nel software, della stima dello stato di carica sono stati utilizzati una sonda di corrente ed un integratore che, in uscita, definisce la quantità di carica, positiva o negativa, fluiva dalla o verso la cella. Rapportata questa rispetto alla capacità nominale della cella si ha SOC e DOD ricordando che queste sono legate tra loro dalla relazione:

$$\text{SOC}=1\text{-DOD}$$

Il DOD rappresenta, nel modello, elemento fondamentale in quanto ingresso degli elementi di comando delle resistenze interne e del generatore di tensione variabile. Soprattutto, per le resistenze interne sono stati utilizzati blocchi che permettessero di imporre i valori in funzione dell'ingresso (DOD) e che utilizzassero un' interpolazione lineare tra i punti in cui è stato fatto il campionamento dei valori di resistenza. Per il generatore di tensione, invece,

si è ricorsi ad un metodo più semplice basato sulla discesa lineare della tensione a circuito aperto una volta superato circa il 60% della scarica.

Il risultato di tante attente valutazioni e analisi circuitali è dato dalla Figura 3.2 che, appunto rappresenta il modello finale.

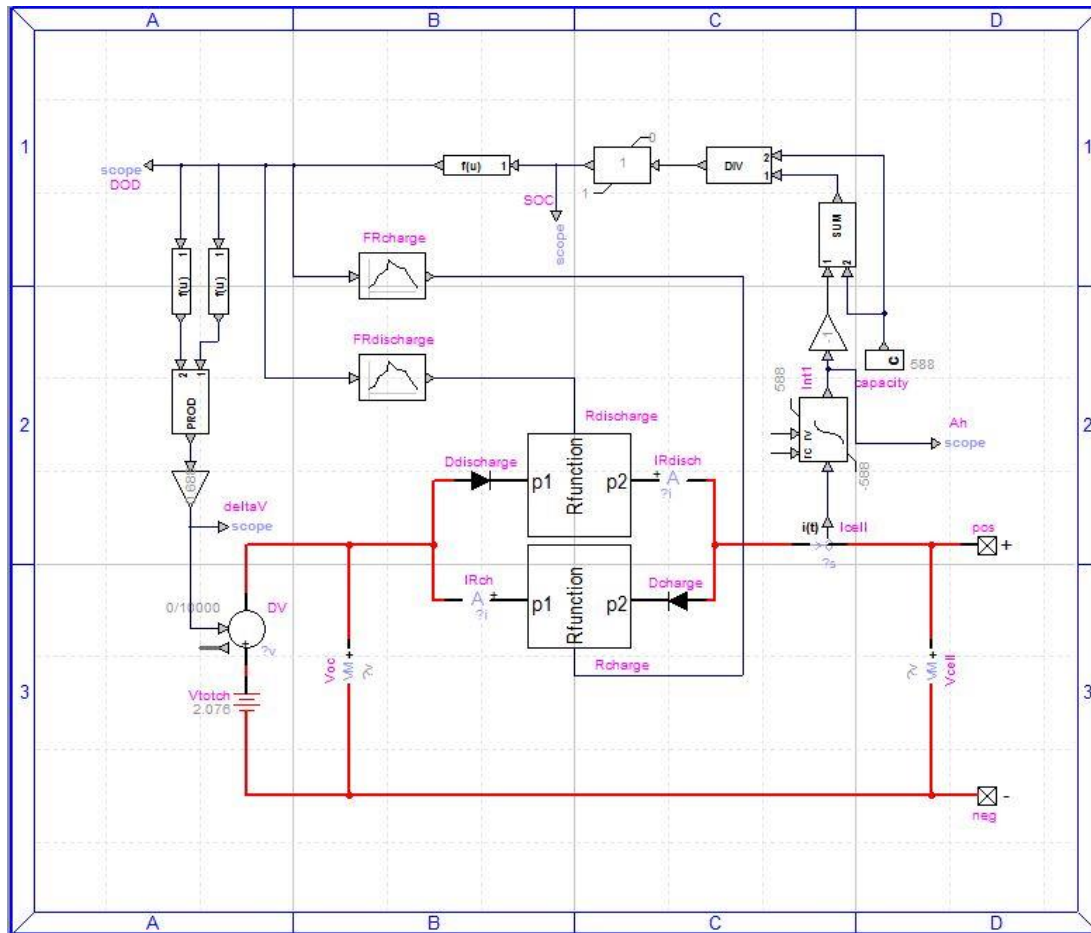


Figura 3.2: Modello finale cella sodio-zolfo

Su tale modello sono state eseguite, poi, varie prove di scarica e carica per verificare l'effettivo corretto funzionamento e l'andamento dei parametri caratteristici tensione e resistenza durante il funzionamento. I risultati delle simulazioni hanno dimostrato, appunto, la solidità del modello e permesso alcune semplici considerazioni.

In Figura 3.3 viene mostrato l'andamento della tensione in funzione della profondità di scarica, misurata che può esser facilmente confrontata con quella di Figura 2.2.

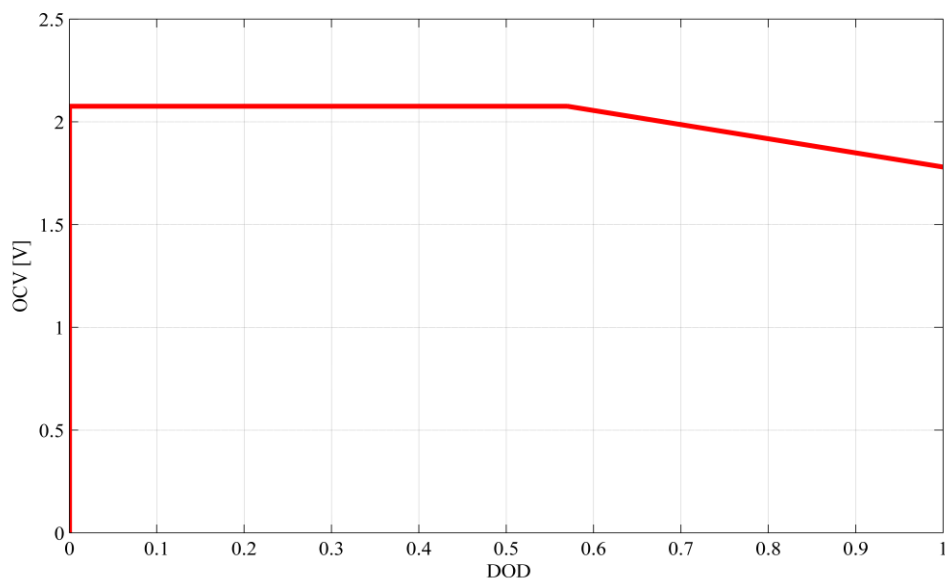
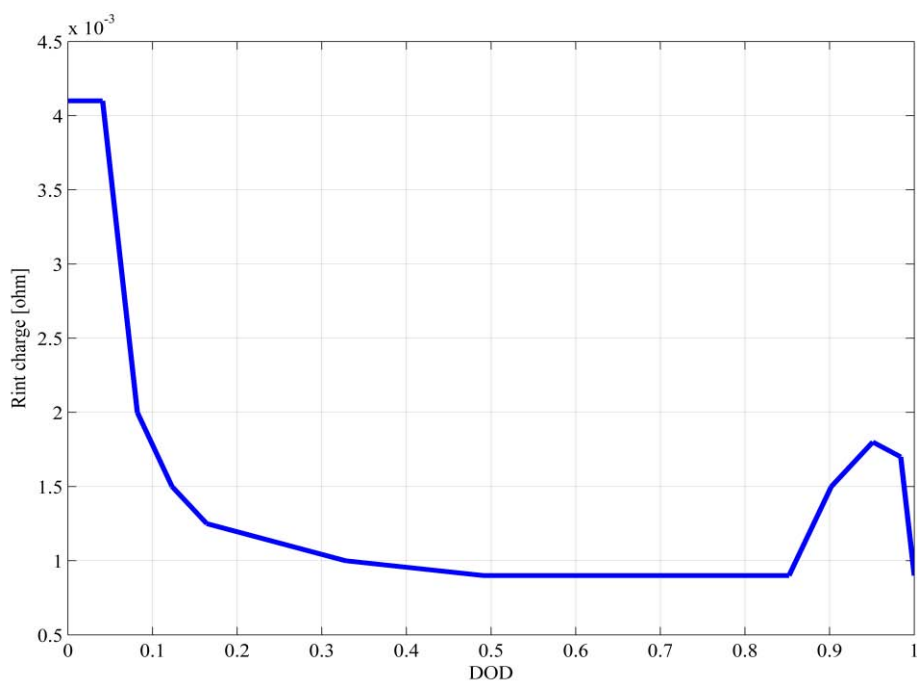


Figura 3.3: Tensione a circuito aperto delle celle sodio-zolfo in funzione del DOD

Analogamente, in Figura 3.4 e Figura 3.5 si riportano rispettivamente resistenza di carica e di scarica in funzione della profondità di scarica.



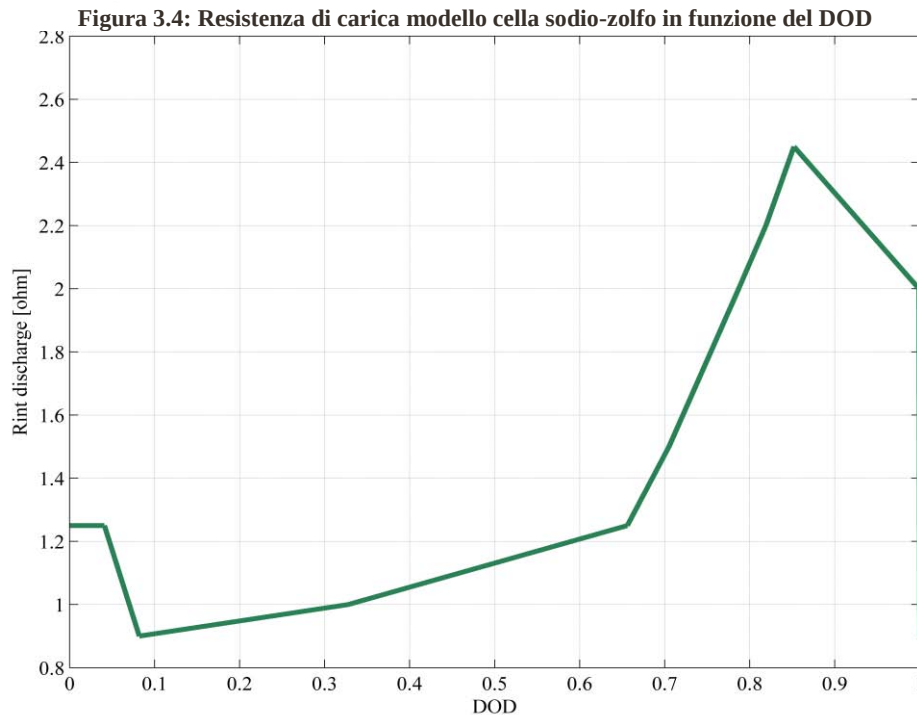


Figura 3.5: Resistenza di scarica modello cella sodio-zolfo in funzione del DOD

Il modello rappresentante la cella sodio-zolfo, come già discusso nel capitolo precedente, assemblato assieme ad un certo numero di medesime celle va a formare un modulo con una certa potenza nominale, il cui valore dipende dal numero di celle e dalla topologia della loro combinazione.

Il piano di sviluppo 2011 presentato da Terna s.p.a. prevede la costruzioni di impianti pilota ognuno dei quali caratterizzati da una potenza di 12 MW, costituiti dall'unione di 10 unità da 1,2MW . Ogni unità è costituito dal parallelo di 2 stringhe, in cui ogni stringa è formata da 20 moduli da 30 kW connessi in serie. Il singolo modulo da 30 kW è caratterizzato dalla seguente formazione di celle : $(4s \times 14p) \times 4s$.

Attraverso le funzioni messe a disposizione da EMTP-RV il modello di cella sodio-zolfo è stato trasformato in un semplice blocco, simile a quelli predefiniti, con ben visibili e accessibili i due morsetti (positivo e negativo della cella). Combinando i vari blocchi delle celle secondo la configurazione definita nel paragrafo precedente è stato possibile ricreare il layout del modulo da 30 kW, come visibile in Figura 3.6.

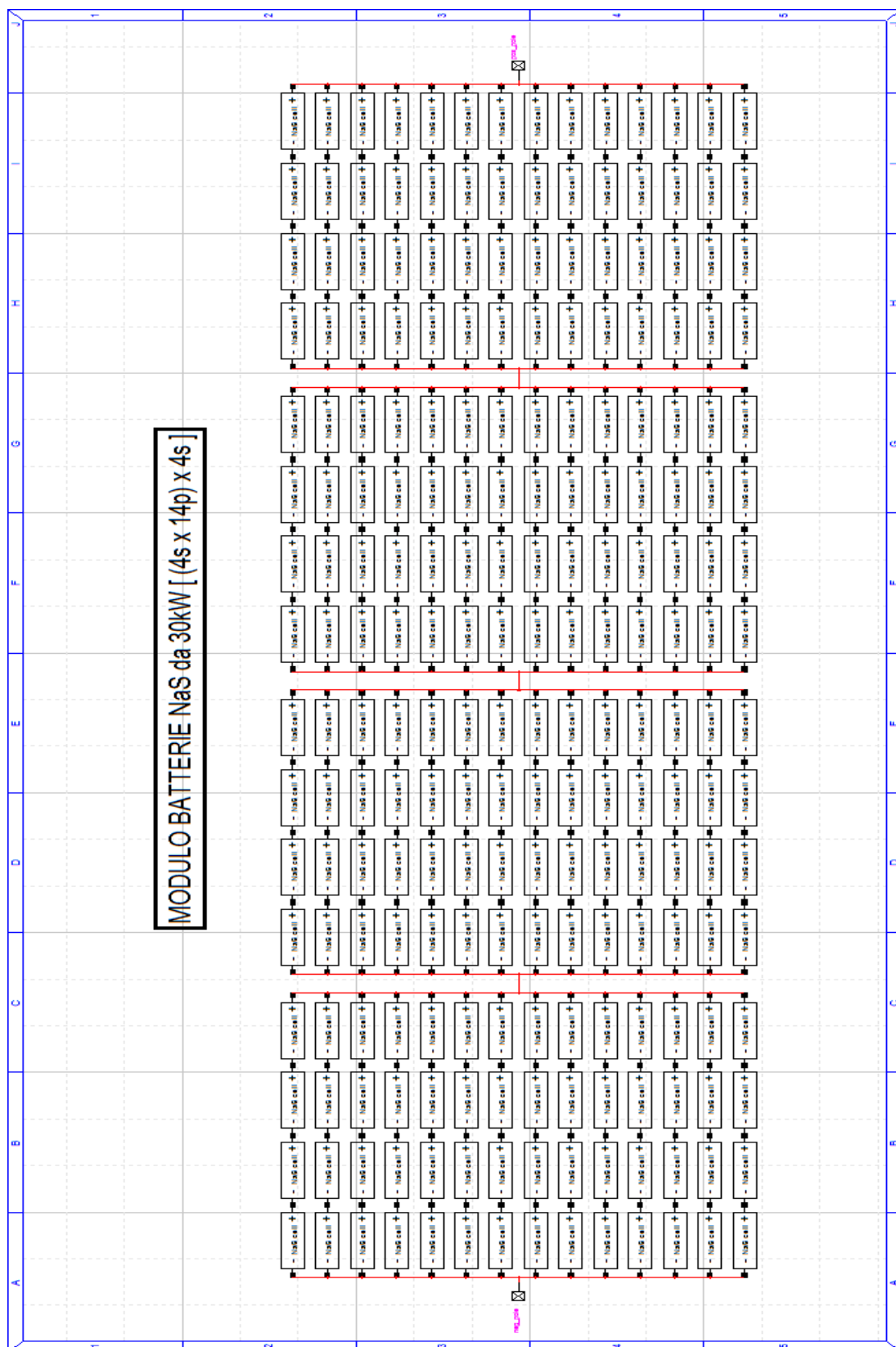


Figura 3.6: Layout modulo da 30 kW celle sodio-zolfo

Tuttavia, la versione utilizzata al calcolatore è dotata della licenza per istituti accademici che prevede una limitazione degli elementi fino ad un massimo di 5000. Già con il modulo da 30 kW si superava tale limitazione e si è, quindi, dovuti ricorrere alla costruzione di un modello equivalente che modellizzasse il comportamento del blocco di celle costituito dal parallelo di 14 stringhe, in cui ogni stringa è formata dalla serie di 4 celle. In conclusione si è creato il modello equivalente di un modulo da 7,5 kW, riportato in Figura 3.7. come si può notare tale modello è del tutto simile a quello della singola cella; chiaramente sono stati modificati il valore della capacità e gli andamenti della tensione a circuito aperto e delle resistenze di carica e scarica in funzione del DOD, ricorrendo al teorema di Thévenin.

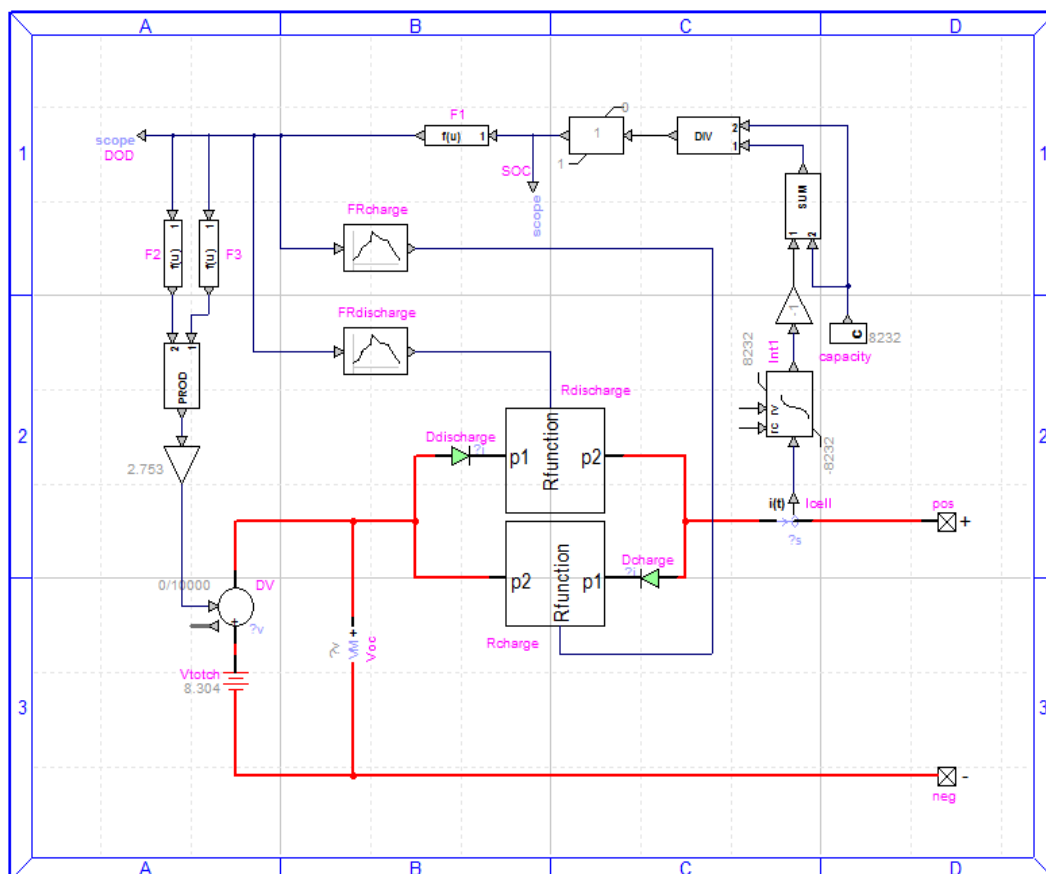


Figura 3.7: Modello equivalente modulo da 7,5 kW celle sodio-zolfo

Il modulo da 30 kW, ora, risulta formato dalla serie di quattro di questi moduli da 7,5 kW, come riportato in Figura 3.8. Ovviamente, la dinamica operativa del modulo così modellizzato è la medesima di quella che caratterizza il modello “originale” costituito dalla combinazione delle 224 celle.

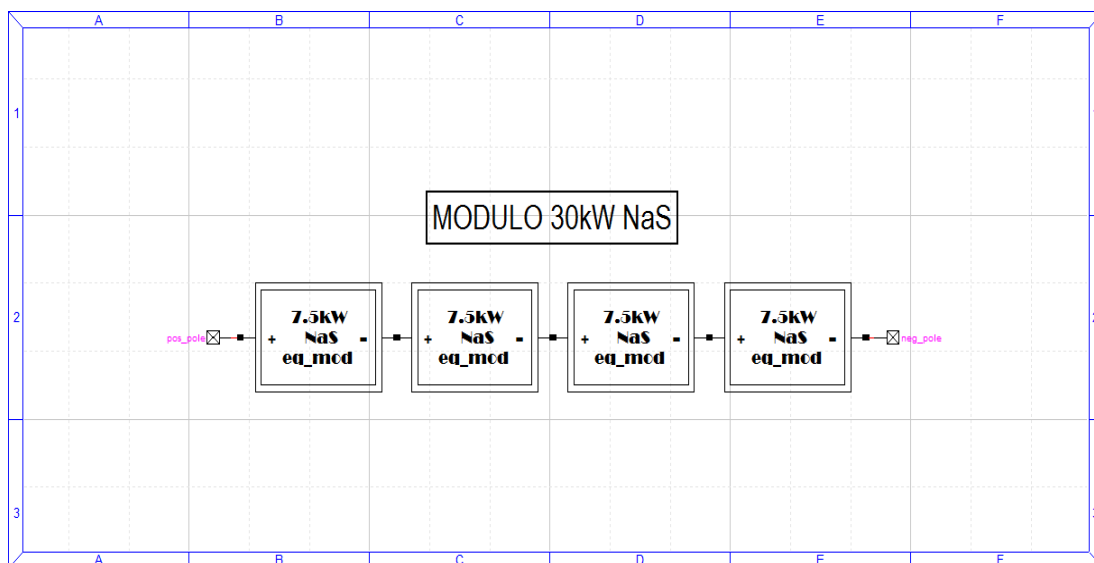


Figura 3.8: Modello modulo da 30 kW celle sodio-zolfo con l'utilizzo del circuito equivalente

Come già indicato precedentemente, il parallelo di due stringhe di venti moduli da 30 kW, così definiti, connessi in serie costituisce il layout di una unità da 1,2 MW di potenza nominale. Il modello creato in EMTP-RV è riportato nella seguente Figura 3.9 .

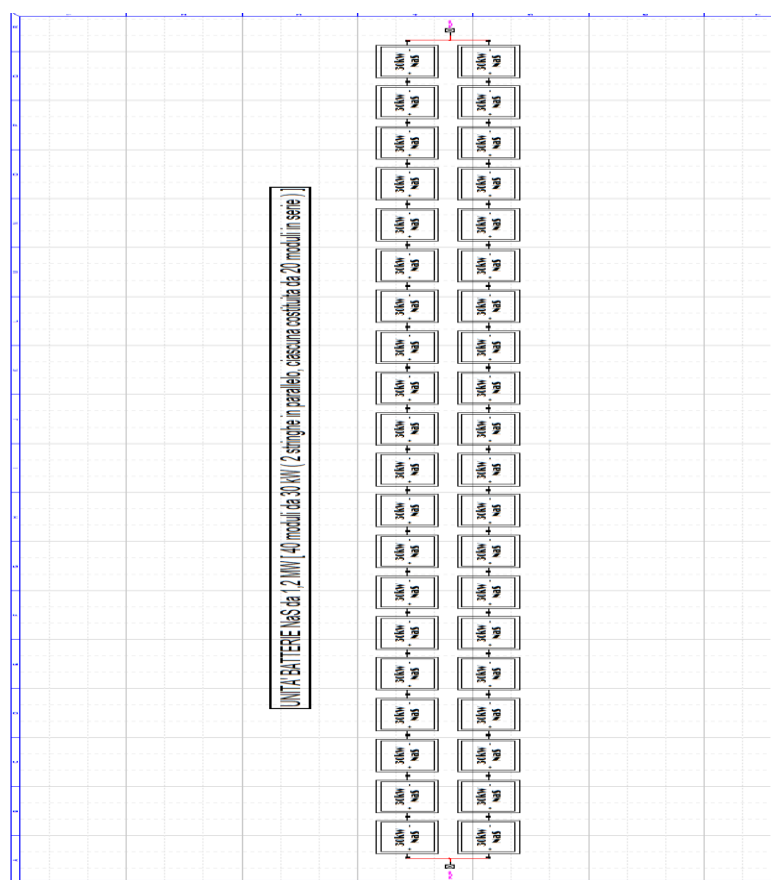


Figura 3.9: Modello in EMTP-RV dell'unità da 1.2 MW di celle sodio-zolfo

Ogni impianto per l'accumulo elettrochimico stazionario viene formato dall'insieme di più unità di batterie a seconda della potenza totale desiderata. Un impianto da 12 MW sarà, ad esempio, formato da 10 unità da 1,2 MW, ognuna delle quali, od in alternativa a coppie, sarà accoppiata al sistema di conversione che permette l'interfacciamento del sistema di accumulo con la rete di trasmissione stessa.

La soluzione proposta da Terna s.p.a. nel piano di sviluppo 2011[8] prevede che ogni impianto di accumulo stazionario sia costituito da 2 impianti pilota, ciascuno di taglia 6 MW, e nel complesso così pensati:

- 10 unità di batterie di taglia 1,2 MW
- 10 PCS (power converter system) da 1,2 MVA od, in alternative, 5 PCS di taglia 2,4 MVA
- 2 shelter (armadi) per i quadri di MT
- 2 shelter per i quadri di BT
- 2 shelter per i gruppi di continuità di emergenza
- 1 shelter per il sistema di controllo e monitoraggio

Ogni impianto sarà, comprensibilmente, dotato di un doppio stadio di trasformazione, il primo BT/MT (380 V/20 kV) ed un secondo stadio 20/132 kV, che completano la connessione del sistema di accumulo elettrochimico alla rete di trasmissione (AT).

3.2 Modellizzazione delle celle Sodio-Cloruro di Nickel (Zebra)

Analogamente per quanto fatto con le celle sodio-zolfo, la costruzione del modello di celle Zebra è basato sui dati caratteristici trovati e disponibili in letteratura, anche se in questo caso la quantità di materiale a disposizione risulta nettamente inferiore rispetto alle NaS. La fase di modellizzazione è stata, quindi, preceduta da una attenta analisi di tali dati per essere certi che il risultato finale fosse coerente con la realtà. Un eventuale modello poco vicino alle realistiche prestazioni sarebbe poco utile allo scopo e all'utilizzo per lo studio delle applicazioni in ambito tecnico.

Tabella 3.2: Dati caratteristici cella sodio-cloruro di nickel [10]

Tensione nominale	2,20-2,70 V
Tensione a circuito aperto (100% SOC)	2,58 V
Capacità	38 Ah
Dimensioni	36 x 36 x 220 mm
Peso	695 g
Energia specifica	140 Wh/kg
Energia specifica	280 Wh/l

La struttura di base del modello è la medesima proposta precedentemente, nonché quella utilizzata per la modellizzazione delle celle sodio-zolfo. Ancora una volta, la variazione della tensione in funzione della profondità di scarica viene rappresentata da un generatore di tensione variabile e, la resistenza di carica e scarica modellizzate dallo stesso blocco utilizzato nelle celle NaS. Diversamente, però, dal caso precedente, essendo la variazione della tensione a circuito aperto meno lineare è stato utilizzato un blocco precostruito che permettesse maggiore libertà. L'elemento messo a disposizione dal software, infatti, permette di definire, in funzione della grandezza di ingresso, dei precisi valori della grandezza di uscita che verranno imposti al generatore variabile di tensione. Il modello finale è riportato in Figura 3.10.

Anche in questo caso il metodo utilizzato per la stima dello stato di carica della cella Zebra è quello che si basa sulla corrente fluiva dalla e verso la cella, misurata attraverso la sonda di corrente definita nel disegno dal nome "Icell". L'integratore successivo quantifica gli Ah di capacità "consumati" (nel caso di corrente uscente dalla cella) o "ricaricati" (se il verso di corrente è entrante nella cella). Rapportando gli Ah stimati con la capacità nominale si ottiene istante per istante lo stato di carica e, di conseguenza, la profondità di scarica.

Sempre in riferimento alla Figura 3.10 si può evidenziare che in colore blu scuro vengono identificati i collegamenti appartenenti al circuito di controllo mentre sono in colore rosso i collegamenti del circuito di potenza. La differenziazione dei colori ha esclusiva finalità di rendere più chiaro e comprensibile il disegno del modello che, altrimenti, rischierebbe di essere di difficile lettura con il rischio di creare incomprensioni. Tuttavia, va notato che gli elementi circuitali denominati Voc e Vcell rappresentano strumenti di misura della tensione

(voltmetri) e, seppur identificati da collegamenti di colore rosso, non partecipano in alcun modo alla dinamica del sistema. Essi, infatti, hanno il solo scopo di rendere disponibili al termine delle simulazioni i valori di tensione a circuito aperto e ai morsetti della cella altrimenti non ricavabili.

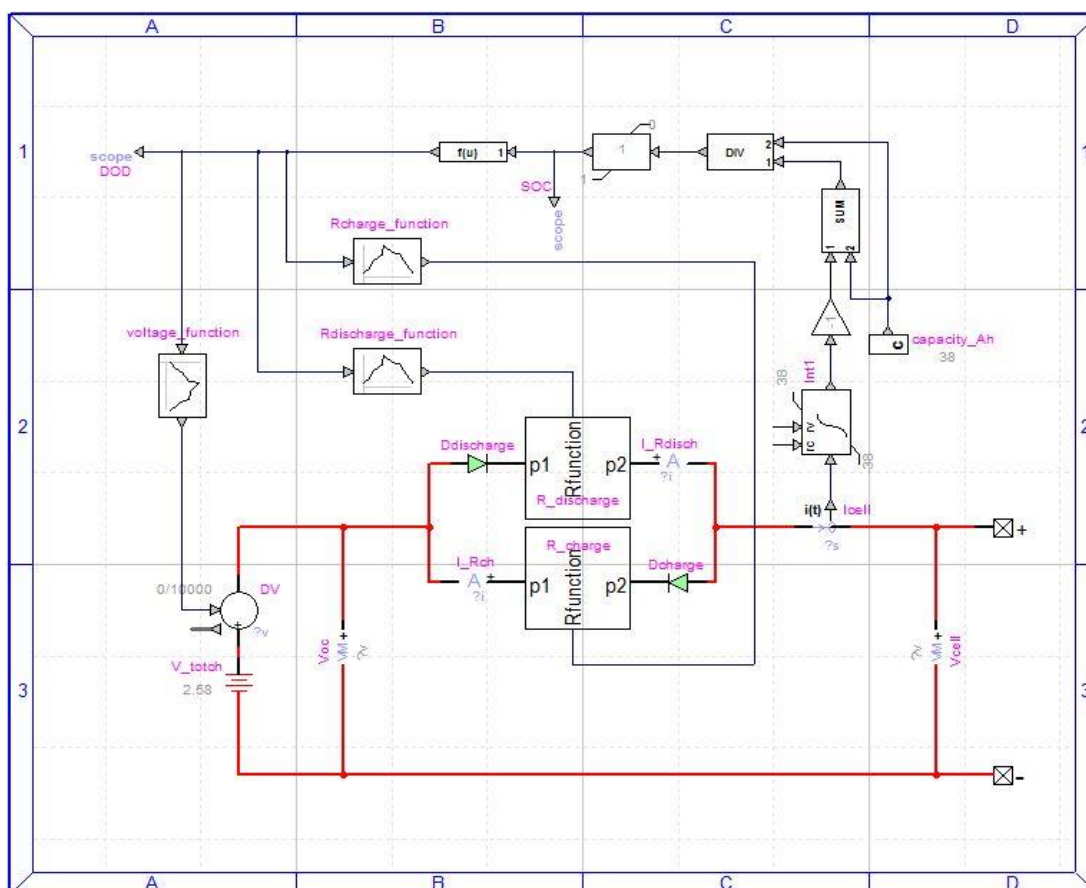


Figura 3.10: Modello finale cella sodio-cloruro di nickel

Il disegno in figura va a costituire il sotto-circuito del blocco creato in EMTP-RV rappresentante la cella di sodio-cloruro di nickel. Le successive simulazioni di scarica e carica della cella hanno permesso la verifica della correttezza del comportamento dinamico della cella. In seguito, infatti vengono riportate in Figura 3.11, 3.12, 3.13 rispettivamente la tensione a circuito aperto, la resistenza interna di carica e quella di scarica in funzione della profondità di scarica.

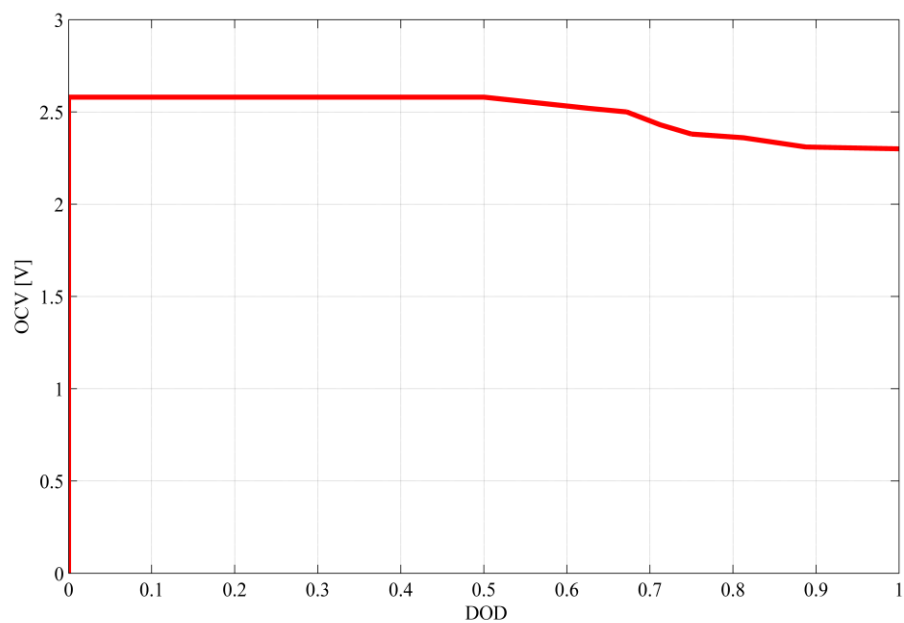


Figura 3.11: Tensione a circuito aperto di una cella sodio-cloruro di nickel in funzione del DOD

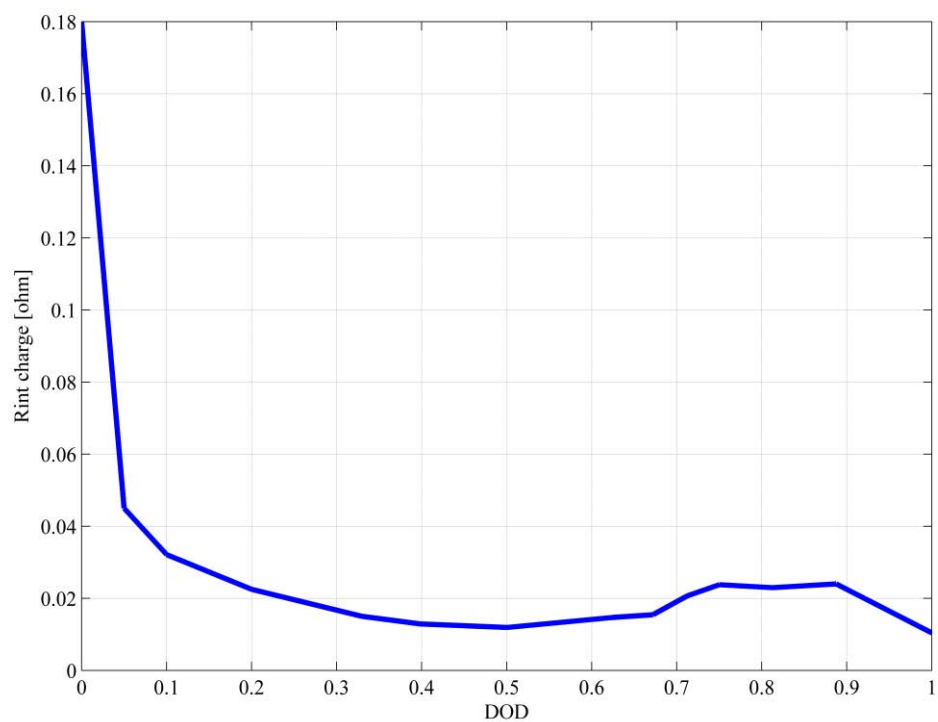


Figura 3.12 : Resistenza interna di carica celle sodio-cloruro di nickel

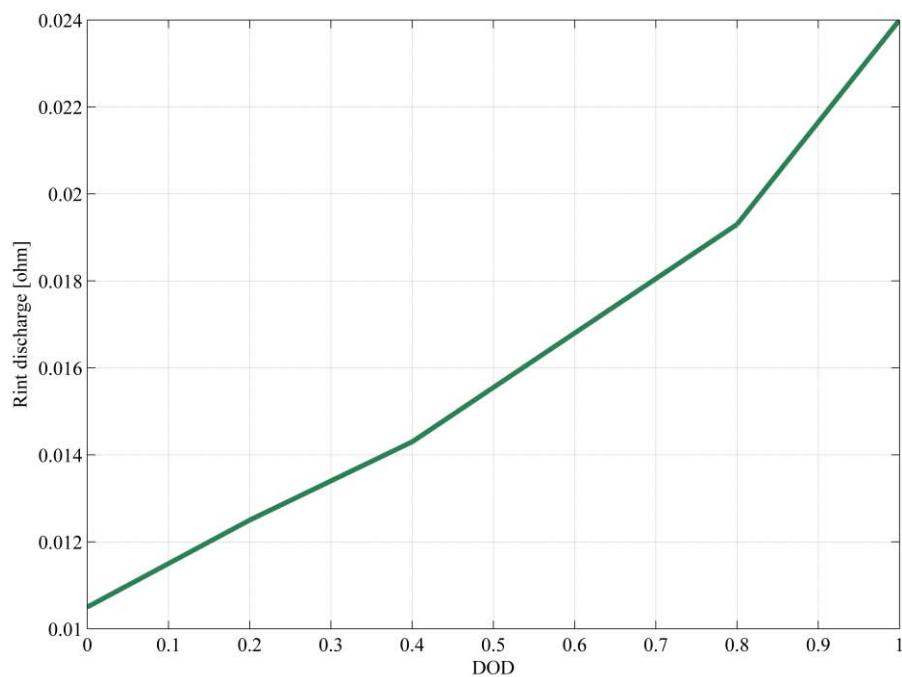


Figura 3.13: Resistenza interna di scarica cella sodio-cloruro di nickel

Tali andamenti posso essere confrontati con quelli di riferimento trattati all'interno del capitolo 2.

Come per le NaS, le varie celle combinate tra loro in collegamenti serie/parallelo vanno a formare il modulo principale, i cui dati sono riportati in tabella 3.3.

Tabella 3.3: Dati caratteristici modulo elementare celle sodio-cloruro di nickel [13]

Numero totale di celle	240
Capacità nominale	38 Ah , 23.4 kWh
Tensione minima	450 V
Tensione nominale	620 V
Tensione massima	641 V
Massima tensione di carica	700 V
Minima tensione di scarica	450 V
Temperatura ambiente operativa	Da -20°C a 60°C
Peso	256 kg
Impianto di raffreddamento	Non necessario

MODULO BATTERIE ZEBRA 7.8kW (23.4 kWh), 620 V [240 celle in serie]

Analogamente a quanto fatto per il caso delle sodio-zolfo, a causa della limitazione imposta dalla tipologia di licenza sul numero di elementi ammessi all'interno di un foglio di disegno, si è resa necessaria la costruzione di un modello equivalente del modulo da 23,5 kWh basato, sempre, sulla medesima struttura di quella della singola cella. Chiaramente, sono stati adattati i valori di tensione a circuito aperto, delle resistenze di carica e scarica e della capacità nominale.

51

aspetto è l'impossibilità di andare a verificare ciò che succede cella per cella, non rendendo più possibile la verifica di eventuali discontinuità o malfunzionamenti locali in caso di particolari condizioni di carico. Tuttavia, la cosa si è resa necessaria per il raggiungimento dello scopo di codesta tesi. La Figura 3.15 ne riporta la struttura e il disegno sviluppato in EMTP-RV.

Una differenza, però, rispetto al modello equivalente costruito nel caso delle celle sodio-zolfo è data dal generatore di tensione variabile. Mentre nel caso delle NaS si ricorreva al doppio generatore, uno di valore costante l'altro variabile in funzione della profondità di scarica, in questo si ha la sola presenza del generatore variabile.

Questa scelta è stata fatta dopo aver effettuato alcune simulazioni di scarica e carica che hanno messo in luce la presenza di alcuni errori negli istanti iniziali del valore di tensione a circuito aperto, dovuti alla salita non perfettamente istantanea del valore di tensione. Questa soluzione, invece, ha mostrato un minore errore comportando la modifica del modello.

Di conseguenza è stato modificato anche il blocco denominato "voltage function" che, in questo modo, andrà ad imporre direttamente il valore di tensione, e non più una caduta di tensione come nei casi precedenti. L'interpolazione tra i vari punti in cui sono stati fissati i valori di tensione è ancora di tipo lineare (linear fitting), avendo dimostrato una migliore approssimazione della realtà.

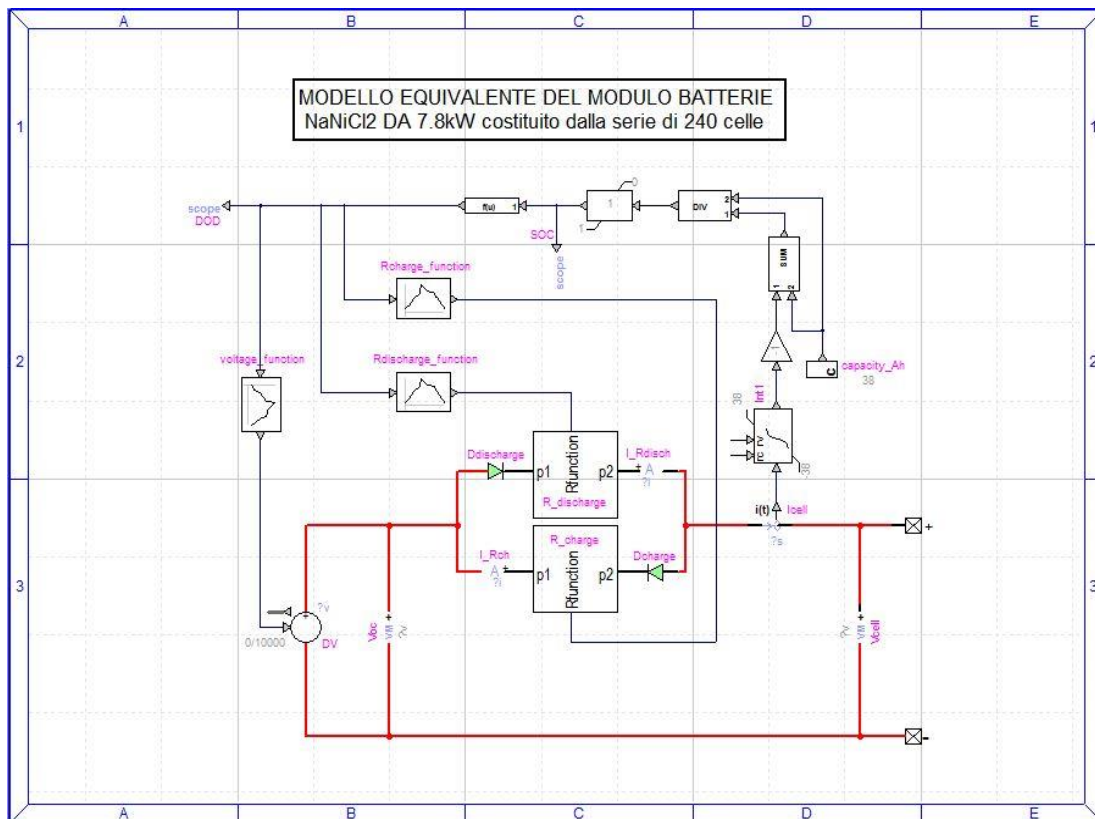


Figura 3.15: Modello equivalente modulo 23.4 kWh celle sodio-cloruro di nickel

Nelle attuali e future applicazioni per l'accumulo elettrochimico stazionario il modulo sopra citato viene inserito all'interno di veri e propri armadi e collegato assieme ad altri del

medesimo tipo a formare l'unità di accumulo che viene connessa ai sistemi di conversione statica dell'energia elettrica (PCS). In particolare, la Tabella 3.4 identifica le caratteristiche maggiormente importanti dell'unità da 0,5 MW (1,5 kWh) di celle sodio-cloruro di nickel, proposta da Fiamm s.p.a .

Tabella 2.4: Dati caratteristici unità 0.5 MW celle sodio-cloruro di nickel [14]

Configurazione unità batterie	64 moduli da 23,4 kWh in parallelo
Capacità nominale dell'unità	2432 Ah
Energia immagazzinabile nominale	1,5 MWh (100% DOD)
Tensione minima	420 V
Tensione nominale	620 V
Tensione massima	648 V
Massima tensione di carica	700 V
Minima tensione di scarica	420 V
Massima corrente di scarica	1920 A
Temperature ambiente di funzionamento	da -20°C a 45 °C
Potenza sistemi ausiliari	15 kW

Basandosi su tali dati, successivamente alla costruzione del blocco in EMTP-RV rappresentante il modulo da 23,4 kWh contenente come sotto-circuito il modello equivalente mostrato in Figura 3.15, si è arrivati alla costruzione del modello dell'unità di batterie da 0.5 MW, di cui in Figura 3.16 si riporta una piccola parte.

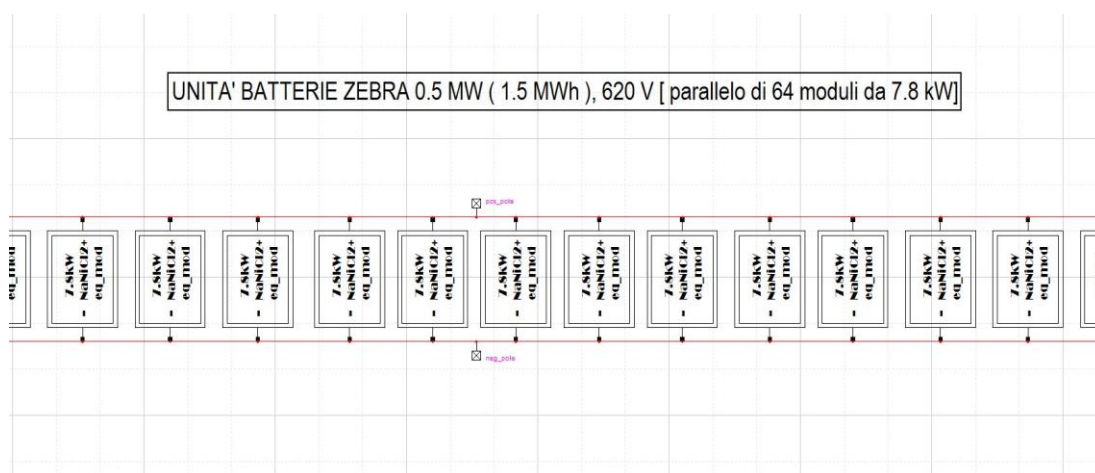


Figura 3.16: Parte dell'unità da 1.5 MWh di celle Zebra

Capitolo 4

Calcolo delle correnti di cortocircuito

Nei sistemi elettrici la dinamica in regime di guasto rappresenta uno degli elementi di studio fondamentali per la caratterizzazione del sistema stesso, e per la scelta dei criteri da utilizzare al fine di aumentare la sicurezza ed evitare che un eventuale malfunzionamento provochi danni anche ad altri apparati con ripercussioni anche dal punto di vista economico. Il calcolo delle correnti di cortocircuito diventa, quindi, fondamentale per il coordinamento delle protezioni da inserire all'interno del sistema stesso[24].

In particolar modo, la corrente continua presenta delle problematiche di diversa natura rispetto a quelle che accompagnano la corrente alternata dal punto di vista dell'interruzione di una corrente di elevata intensità [15]; l'estinzione dell'arco risulta essere, infatti, molto difficile. Mentre in corrente alternata si ha il passaggio naturale della corrente per lo zero ad ogni semiperiodo, in corrente continua tale situazione non si verifica. Risulta, quindi, necessario fare in modo che la corrente cali fino ad annullarsi. A questo punto risulta possibile estinguere l'arco. Va detto che l'annullamento risulta essere forzato essendo, altrimenti, impossibile.

Per meglio comprendere questo importante aspetto, si consideri un circuito composto da un generatore di tensione continua ideale, un'induttanza, una resistenza ed un sistema di interruzione, secondo la disposizione mostrata in Figura 4.1.

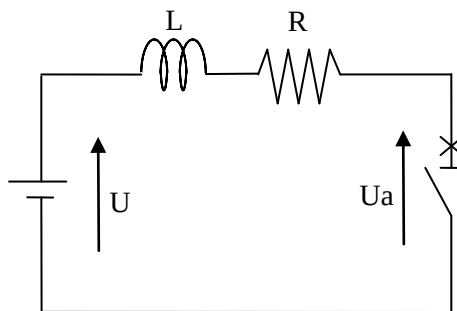


Figura 4.1: Circuito elementare in corrente continua da interrompere

Dove U è la tensione nominale del generatore ideale di tensione, L ed R sono rispettivamente induttanza e resistenza del circuito, U_a la tensione d'arco. L'equazione che descrive il circuito è la seguente:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + U_a$$

Ai fini dell'estinzione dell'arco dovrà essere:

$$\frac{di}{dt} < 0$$

questa condizione sarà verificata quando la tensione d'arco risulta essere molto grande.

Al verificarsi di un cortocircuito, la corrente comincia a crescere secondo la costante di tempo caratteristica del circuito. Nel momento in cui inizia ad aprirsi l'interruttore si ha la formazione dell'arco tra i contatti. La corrente, anziché diminuire istantaneamente, continua ad aumentare per un breve periodo di tempo per poi calare, in risposta al valore sempre più elevato della resistenza d'arco. Durante questa fase di discesa, la tensione U_a risulta essere maggiore della tensione di alimentazione fino alla totale estinzione dell'arco.

In generale, quindi, è necessario allungare e raffreddare l'arco con lo scopo, appunto, di far aumentare il valore di resistenza. All'apertura dell'interruttore corrispondono fenomeni energetici di entità che è funzione della tensione nominale dell'impianto. A tal fine, solitamente, vengono inseriti sistemi di protezione caratterizzati da più poli in serie, in modo tale da avere un potere d'interruzione elevato. Quest'ultimo, infatti, è tanto più grande quanto maggiore è il numero di poli presenti nell'interruttore, portando ad un miglioramento del comportamento in regime di cortocircuito.

In definitiva, le caratteristiche di cui un interruttore deve essere dotato per assicurare una corretta e tempestiva interruzione di una corrente di cortocircuito in corrente continua sono:

- Elevata capacità di limitazione della corrente di guasto;
- Rapido intervento con appropriato potere d'interruzione;
- Buon contenimento delle sovratensioni all'apertura, dovute agli elementi induttivi del circuito.

È necessario, comunque, fare distinzione tra le varie tipologie di rete, in quanto a seconda del tipo si possono verificare diversi guasti. Di conseguenza, cambiano anche i criteri di scelta dei sistemi di interruzione, in particolar modo tipologia e modalità di connessione ([15],[16]). In linea generale si può fare riferimento alle seguenti tipologie di rete:

- Rete isolata da terra;
- Rete connessa a terra con una polarità;
- Rete connessa a terra con il punto medio dell'alimentazione.

Si analizzano ora le varie possibili casistiche, con le relative espressioni per il calcolo semplificato delle correnti di cortocircuito. I guasti considerati si assume siano dovuti a cortocircuiti franchi al termine della linea di alimentazione. Di conseguenza, si avranno le cor-

renti di cortocircuito minime utilizzate come riferimento per la scelta dell'interruttore di protezione.

Rete isolata da terra

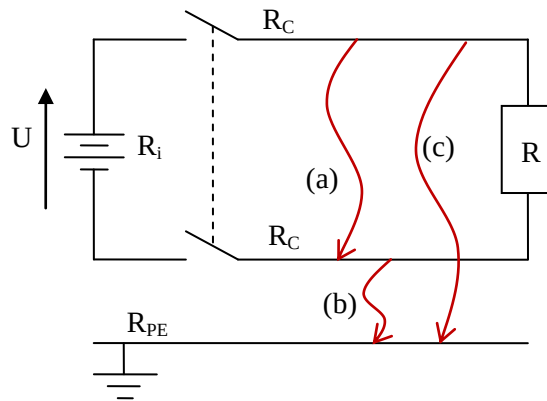


Figura 4.2: Rete isolata da terra

In riferimento alla Figura 4.2 si considerino i seguenti guasti:

- (a) Guasto tra le due polarità: entrambe le due polarità vengono coinvolte nel cortocircuito e, quindi, la corrente circolante è alimentata dalla piena tensione di alimentazione U e limitata dalle sole resistenze dei conduttori R_c :

$$I_{CC} = \frac{U}{R_i + 2R_c}$$

- (b) o (c) Guasto a terra di una polarità: questa tipologia di guasto non ha conseguenze sul funzionamento della rete in quanto la corrente non ha vie di richiusura e non può, di conseguenza, circolare. Per quanto concerne la protezione contro i contatti indiretti, la corrente che caratterizza questo tipo di guasto non assume valori significativi e, di conseguenza, la tensione di guasto non raggiunge valori pericolosi. Inoltre, in questo caso non è necessario interrompere l'alimentazione sul primo guasto ma dovrà, comunque, essere segnalato mediante i dispositivi di controllo dell'isolamento in modo tale da permettere la sua eliminazione, evitando che questo porti ad un secondo guasto a terra.
- (b)+(c) Doppio guasto a terra: nel caso in cui entrambe le polarità subiscano un guasto a terra (ipotesi molto remota) la corrente può circolare. Se il primo guasto a terra non è stato ancora risolto e si verifica un secondo guasto a terra si ha la formazione di una via di richiusura della corrente. La corrente di guasto è calcolabile secondo la seguente relazione:

$$I_g = \frac{U}{R_i + 2R_s}$$

con R_s resistenza dell'anello di richiusura del guasto, comprendente quella dei conduttori e quella del conduttore di protezione. In questo caso il guasto dovrà essere, in breve tempo, risolto tramite l'intervento dei dispositivi di protezione. Verrà, quindi, opportunamente inserito un dispositivo in grado di segnalare il guasto e/o la diminuzione dell'isolamento della polarità.

In conclusione, in questa tipologia di rete è il guasto di tipo a) che condiziona maggiormente la scelta del criterio di protezione, in termini di tipo e modalità di connessione dei poli.

Rete connessa a terra con una polarità

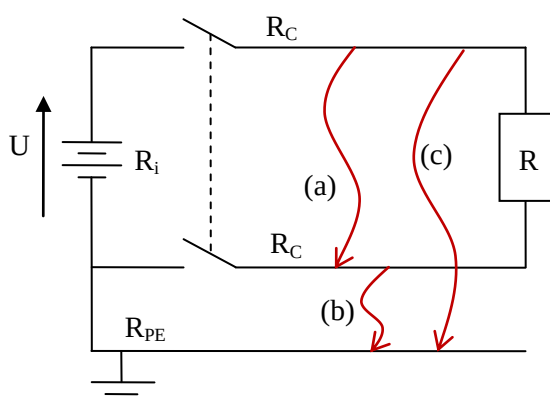


Figura 4.3: Rete connessa a terra con una polarità

In riferimento alla Figura 4.3 si considerino i seguenti guasti:

- (a) Guasto tra le due polarità: ancora una volta la corrente di cortocircuito è alimentata a piena tensione U e limitata dalle sole resistenze dei conduttori, ed esprimibile dalla relazione:

$$I_{CC} = \frac{U}{R_i + 2R_C}$$

L'interruttore dovrà proteggere sia dai contatti indiretti sia dai cortocircuiti e, quindi, il suo intervento dovrà essere assicurato sia per la corrente di cortocircuito sia per la corrente di guasto tra una polarità e terra.

- (c) Guasto a terra della polarità non connessa a terra: in questo caso, la corrente di guasto è limitata dalla resistenza del conduttore della polarità interessata e quella del conduttore di protezione o del terreno, e calcolabile dalla seguente relazione:

$$I_{CC} = \frac{U}{R_i + (R_C + R_{PE})}$$

- (b) Guasto a terra della polarità connessa a terra: il guasto stabilirà una corrente, che interessa i dispositivi di protezione, di valore molto basso in quanto dipendente dalla resistenza del terreno o del conduttore di protezione e la tensione di alimentazione è diminuita dalla caduta di tensione sul carico.

In conclusione, anche in questa tipologia di rete, è il guasto a) ad avere una maggiore influenza sulla scelta dell'interruttore, ma va considerata presa in considerazione anche la corrente relativa al guasto di tipo b) in quanto alimentata dalla piena tensione. Per questo motivo, i poli dell'interruttore necessari alla protezione devono essere necessariamente tutti in serie tra loro.

Rete connessa a terra con il punto medio dell'alimentazione

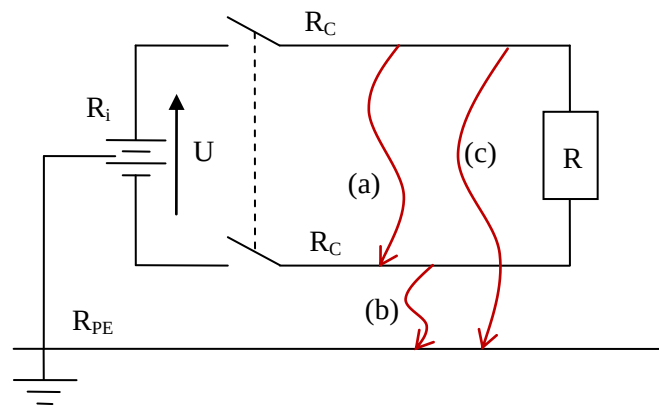


Figura 4.4: Rete connessa a terra nel punto medio dell'alimentazione

In riferimento alla Figura 4.4 si considerino i seguenti guasti:

- (a) Guasto tra le due polarità: la corrente di guasto è alimentata, sempre, dalla piena tensione e limitata dalle resistenze dei conduttori. La corrente è calcolabile, ancora una volta, dalla relazione:

$$I_{CC} = \frac{U}{R_i + 2R_C}$$

- (c) Guasto tra la polarità positiva e terra: in questo caso, la tensione di alimentazione del guasto è pari a $U/2$. La corrente, di conseguenza, sarà inferiore a quella che si verifica nel tipo di guasto precedente e dipende dalla resistenza del terreno o del conduttore di protezione.
- (b) Guasto tra la polarità negativa e terra: valgono le stesse considerazioni del caso precedente con unica differenza rappresentata dalla polarità interessata.

In conclusione, ancora una volta è il guasto a) a condizionare la scelta dell'interruttore anche se va considerata anche la corrente di guasto tra una polarità e terra, essendo causata da una tensione inferiore. Inoltre, in questo caso l'interruttore deve essere presente in entrambe le polarità.

Come si può facilmente intuire, la protezione e la sicurezza di un sistema elettrico, in generale, si basa sul corretto dimensionamento dell'interruttore di protezione da inserire. A tal fine devono essere valutati alcuni parametri fondamentali che andranno a distinguere il dispositivo di protezione stesso. Tali parametri sono, essenzialmente, i seguenti:

- Tensione nominale di impiego U_e : valore di tensione che rappresenta il limite di utilizzo dell'apparecchiatura e il valore di riferimento per tutti gli altri parametri;
- Corrente nominale I_n : valore di corrente di riferimento del relè di protezione utilizzato che determina la caratteristica di intervento dell'interruttore stesso. solitamente è riferita alla corrente nominale dell'elemento protetto;
- Corrente ininterrotta nominale I_u : valore di corrente che il dispositivo è in grado di sopportare per un tempo indefinito. Viene usato per la scelta della taglia dell'interruttore;
- Corrente nominale di breve durata ammissibile I_{cw} : valore di corrente che l'interruttore è in grado di sopportare per un determinato tempo in condizioni predeterminate di funzionamento. In particolar modo, l'interruttore dovrà essere in grado di portare questa corrente durante il ritardo associato alla necessità selettività tra interruttori inseriti in serie;
- Potere di interruzione nominale estremo in cortocircuito I_{cu} : valore della massima corrente di cortocircuito che l'interruttore è in grado di interrompere per due volte alla tensione nominale d'impiego;
- Potere di interruzione nominale di servizio in cortocircuito I_{cs} : massimo valore di corrente di cortocircuito che l'interruttore è in grado di interrompere tre volte in accordo con una certa sequenza di aperture e chiusure alla tensione nominale d'impiego e secondo una predefinita costante di tempo.

Questo aspetto richiede grande attenzione e conoscenza, e meriterebbe una più ampia trattazione, ma non essendo utile allo scopo di codesta tesi è stato qui analizzato in modo generale e riassuntivo.

4.1 La norma CEI EN 61660-1

La norma italiana CEI EN 61660-1 [17] tratta il calcolo delle correnti di cortocircuito negli impianti ausiliari in corrente continua nelle centrali e nelle stazioni elettriche. In particolare, essa considera i seguenti elementi contribuenti alla corrente di cortocircuito:

- Raddrizzatori trifase a ponte (50 Hz)
- Batterie stazionarie al piombo
- Condensatori livellatori
- Motori a corrente continua ad eccitazione indipendente

Lo scopo della norma è quello di fornire un metodo sufficientemente preciso e generalizzato per il calcolo delle correnti di cortocircuito. I valori ricavati possono, poi, essere verificate attraverso opportune misure sul punto in cui si ipotizza avvenga il cortocircuito. Inoltre, la norma non tiene conto, per il calcolo finale, della corrente di carico.

Ogni apparato appartenente al sistema in corrente continua porta un contributo alla corrente di cortocircuito totale che varia a seconda dei componenti ohmici, capacitivi e induttivi presenti all'interno, ma con costanti di tempo caratteristiche differenti da elemento ad elemento. La corrente di cortocircuito totale sarà, come spiegato in seguito, data dalla somma dei singoli contributi.

Da un punto di vista normativo, si deve fare distinzione tra due tipologie di corrente:

- Corrente di cortocircuito massima, utilizzata come riferimento per la scelta dei dispositivi elettrici da usare;
- Corrente di cortocircuito minima, parametro fondamentale per la determinazione dei sistemi di protezione.

Per il calcolo delle correnti di cortocircuito massime la norma definisce delle condizioni commutative e di funzionamento da considerare al fine di avere la corrente massima, elencate qui di seguito:

- Le resistenze dei conduttori vanno riferite ad una temperatura di 20°C;
- Le resistenze dei giunti e dei collegamenti possono essere trascurate;
- Il comando per la limitazione della corrente nel raddrizzatore deve essere considerato poco efficiente;
- Vanno trascurati tutti i possibili diodi di disaccoppiamento tra unità;
- Batteria totalmente carica;

- Deve essere considerata la capacità di fusibili e altri dispositivi protettivi di limitare la corrente circolante.

Ai fini del calcolo delle correnti minime, invece, normativamente si devono considerare le seguenti condizioni di operatività:

- Le resistenze dei conduttori vanno riferite alla massima temperatura operativa;
- Le resistenze dei giunti e dei collegamenti devono essere presi in considerazione;
- La corrente di cortocircuito nominale del raddrizzatore rappresenta il suo contributo;
- La batteria va considerata a fine scarica, con tensione indicata dal costruttore;
- Devono essere considerati i diodi di disaccoppiamento;
- Va considerata la capacità dei fusibili e di altri dispositivi di limitare la corrente.

In entrambi i casi, tuttavia, si possono trascurare i resistori di carico e si può considerare nulla l'impedenza tra i due punti a potenziale diverso in cui si ha il cortocircuito.

La norma fa riferimento ad una curva definita “funzione di approssimazione normale”, che ricopre i diversi andamenti delle correnti per i vari elementi [18], descritta dalle seguenti relazioni e visibile in Figura 4.5.

$$i_1(t) = i_p * \frac{1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}}}{1 - e^{\frac{-t_p}{\tau_1}}}$$

$$i_2(t) = i_p \left(\left(1 - \frac{I_k}{i_p} \right) * e^{\frac{-(t-t_p)}{\tau_2}} + \frac{I_k}{i_p} \right)$$

Il metodo utilizzato per il calcolo di i_p , I_k , il tempo di picco t_p e le costanti di tempo τ_1 e τ_2 è il seguente:

- Si calcolano i parametri per ogni ramo del circuito, ossia per ogni componente che contribuisce alla corrente di cortocircuito;
- In caso di diversi componenti si deve utilizzare la sovrapposizione degli effetti, ovvero: si calcola la corrente di cortocircuito di ogni ramo considerando anche quello comune in cui si ha il cortocircuito, utilizzando, poi, un fattore di correzione che tiene conto delle diverse resistenze; successivamente, si valutano le costanti di tempo caratteristiche di ogni dispositivo ed in seguito si sovrappongono le funzioni della corrente dei vari componenti ottenendo quella totale.

Una volta determinata la corrente di cortocircuito tale si possono andare a valutare gli effetti elettromagnetici, termici e meccanici relativi al cortocircuito considerato.

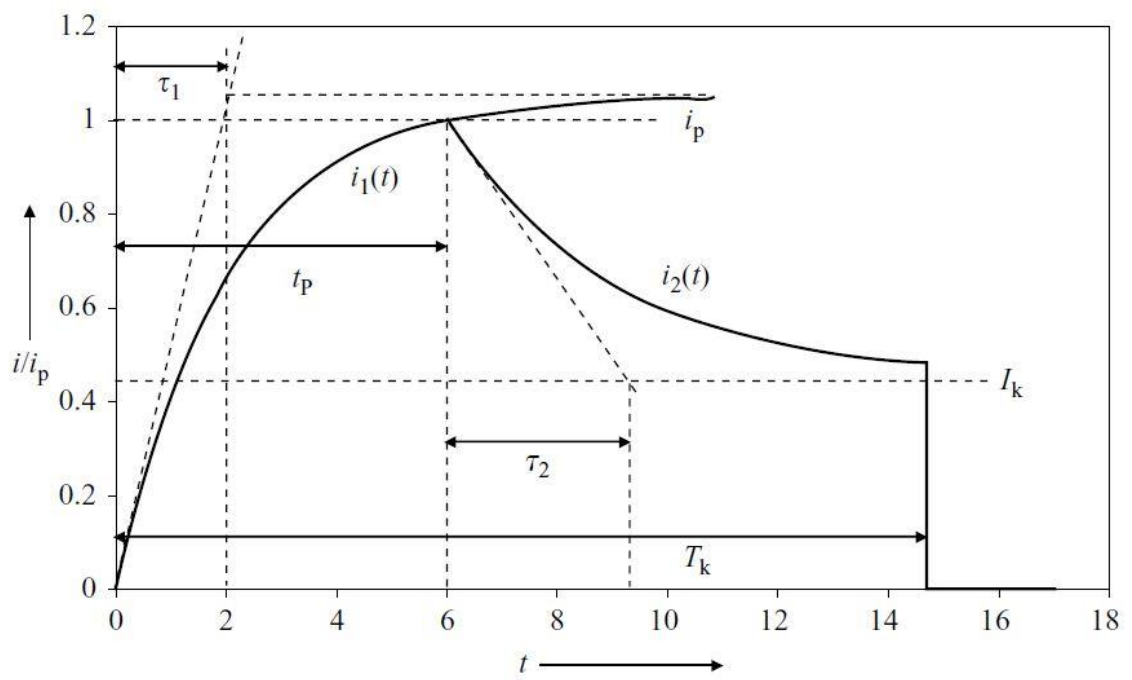


Figura 4.5: Funzione di approssimazione normale

Per i vari elementi si mostrano di seguito le formule analitiche per il calcolo dei vari parametri.

Batteria

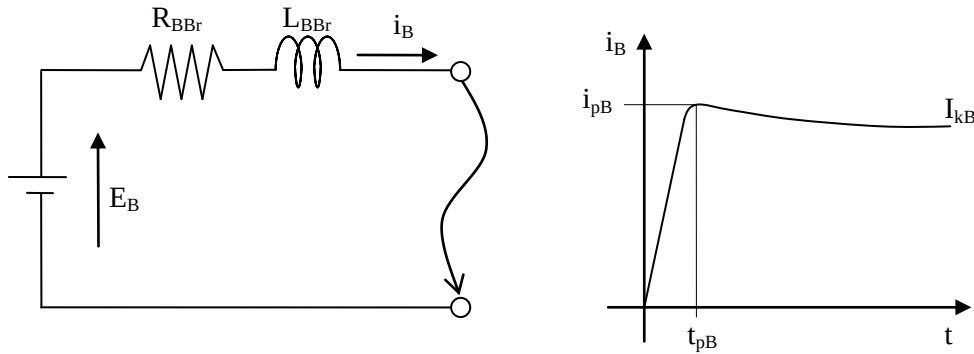


Figura 4.6: Circuito equivalente batteria al piombo e andamento caratteristico corrente di cortocircuito

La norma, che fa riferimento a batterie al piombo acido, assume che la costante di tempo di salita della corrente sia sempre inferiore ai 100 ms. Se la tensione a circuito aperto della batteria non è nota si deve usare $E_B = 1.05 \cdot U_{nB}$ ed $E_B = 0.9 \cdot U_{nB}$, rispettivamente, per batteria carica e batteria scarica. Inoltre, si definiscono:

- R_B ed L_B : resistenza ed induttanza in cortocircuito della batteria carica, solitamente specificata dal costruttore. Se l'induttanza non è nota, essa si può porre pari a $0,2 \mu H$; mentre, se non risulta conosciuta R_B in condizioni di batteria scarica essa può essere calcolata moltiplicando quella in condizioni di batteria carica moltiplicata per 1,7.
- R_{BL} ed L_{BL} : resistenza ed induttanza del conduttore a cui è connesso la batteria;
- R_Y ed L_Y : resistenza ed induttanza della derivazione comune.

La resistenza e l'induttanza totale possono, quindi, essere calcolate come segue:

$$R_{BB r} = 0.9 R_B + R_{BL} + R_Y$$

$$L_{BB r} = L_B + L_{BL} + L_Y$$

La corrente di cortocircuito quasi-stazionaria, calcolata dopo un secondo dall'inizio del cortocircuito, è data da:

$$I_{kB} = \frac{0.95 E_B}{R_{BB r} + 0.1 R_B}$$

mentre il valore di picco è definito dalla seguente relazione:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BB r}}$$

Il tempo di salita fino al valore di picco t_{pB} e la costante di tempo di salita τ_{IB} , funzione del parametro $1/\delta$, sono ricavabili dalla Figura 4.7.

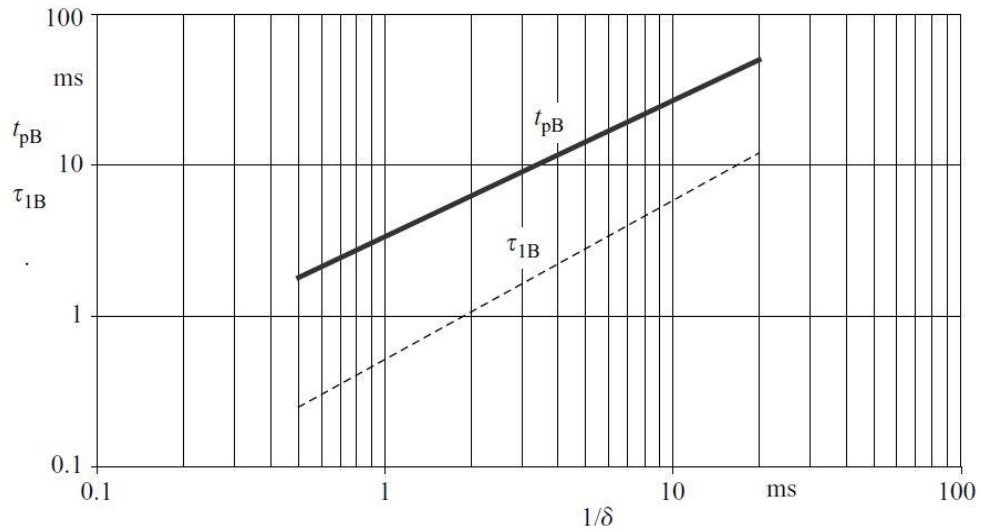


Figura 4.7: Tempo e costante di tempo di salita [18]

Con:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{1}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}}$$

T_B viene assunta pari a 30 ms. La costante di tempo di discesa τ_{2B} , invece, è di 100 ms.

Raddrizzatore trifase

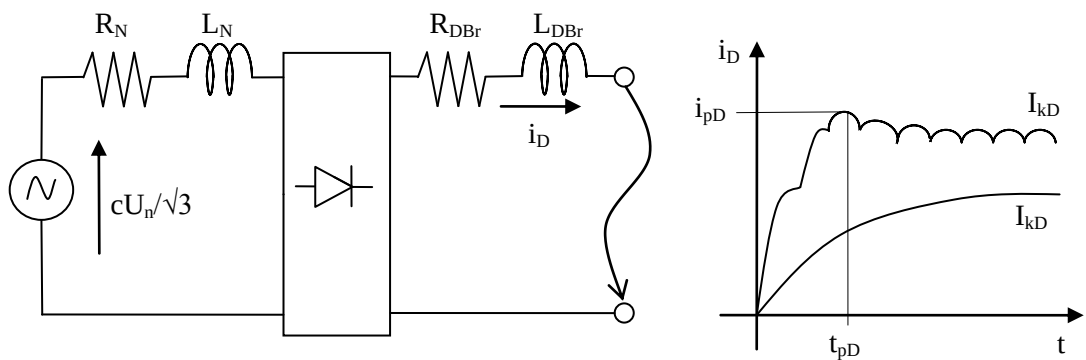


Figura 4.8: Circuito equivalente raddrizzatore e andamento tipico corrente di cortocircuito

R_N ed X_N sono composte dalla resistenza e reattanza di cortocircuito dell'alimentazione secondo la norma IEC 60909, dalla resistenza e reattanza del cavo di alimentazione, dalla resistenza e reattanza di cortocircuito del trasformatore, tutte riferite al secondario del trasformatore, e dalla resistenza e reattanza di cortocircuito del reattore di commutazione, qualora sia previsto.

La relativa corrente di cortocircuito quasi stazionaria è definita dalla relazione:

$$I_{kD} = \lambda_D \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_n} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}}$$

dove λ_D è funzione di R_N/X_N e di R_{DBr}/R_N come visibile in Figura 4.9.

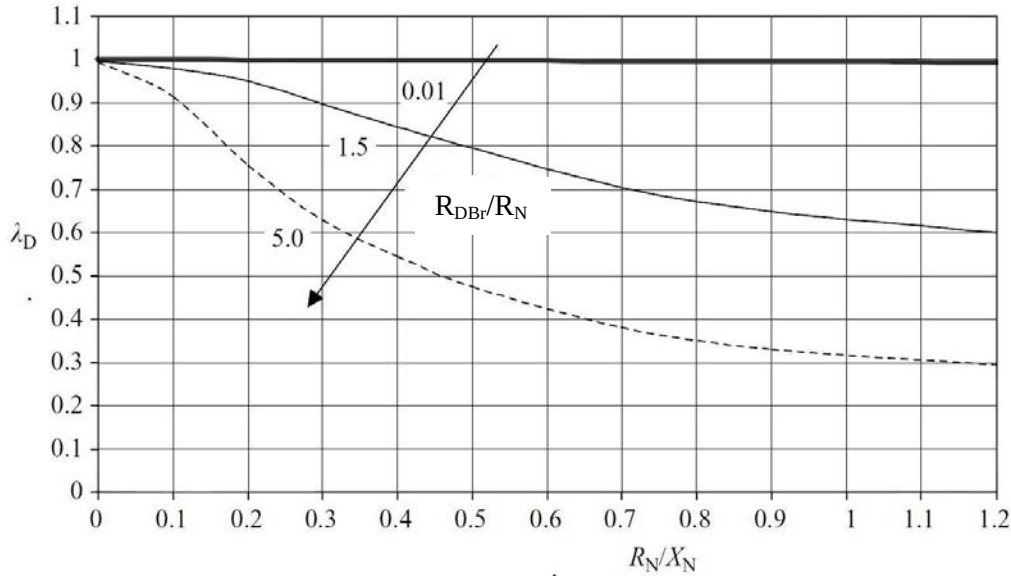


Figura 4.9: Parametro λ_D per il calcolo della corrente in regime quasi-stazionario [18]

Essa, quindi, è funzione della tensione nominale del sistema lato alternata U_n , dell'impedenza lato alternata Z_N , delle tensioni di dimensionamento del trasformatore U_{rTLV} (lato bassa tensione) e U_{rTHV} (lato alta tensione).

Il valore di cresta della corrente di cortocircuito è definita dalla relazione:

$$i_{pD} = k_D I_{kD}$$

k_D è funzione di altri parametri, come mostrato in Figura 4.10.

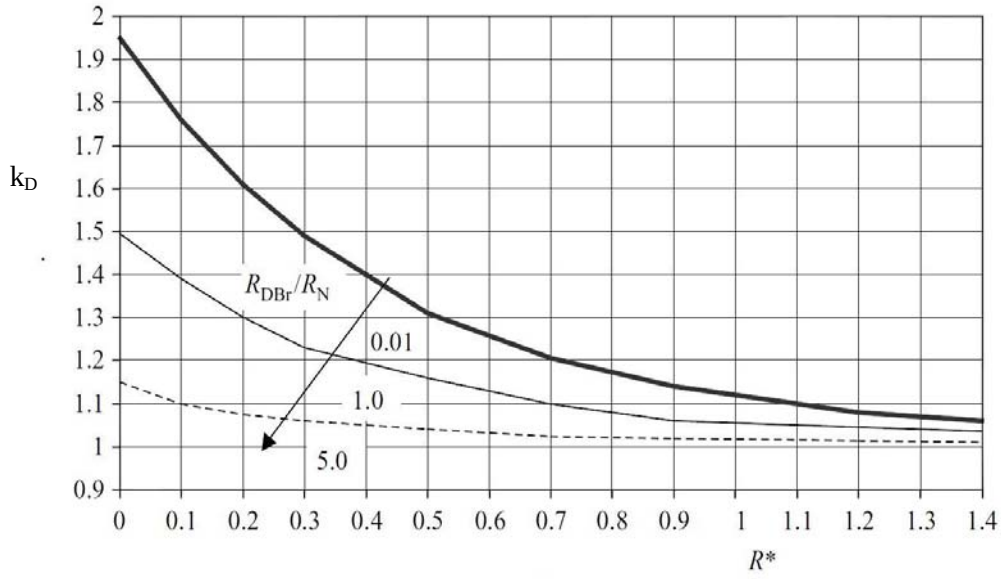


Figura 4.10: Parametro k_D per il calcolo del valore di picco della corrente di cortocircuito [18]

In particolare, R^* è definito come:
$$R^* = \frac{R_N}{X_N} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)$$

Se $k_D < 1.05$ si può assumere che il valore di picco corrisponda al valore quasi-stazionario e, di conseguenza, $t_{pD} = T_k$. Se, invece, $k_D > 1.05$ il tempo per arrivare al valore di picco è definito come:

$$\text{per } \frac{L_{DBr}}{L_N} \leq 1 \quad t_{pD} = (3k_D + 6) \quad [\text{ms}]$$

$$\text{per } \frac{L_{DBr}}{L_N} > 1 \quad t_{pD} = \left((3k_D + 6) + 4 * \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right) \quad [\text{ms}]$$

Per quando riguarda le costanti di tempo di salita e di discesa, rispettivamente, a 50 Hz:

$$\text{per } k_D \geq 1.05 \quad \tau_{1D} = \left(2 + (k_D - 0.9) * \left(2.5 + 9 * \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right) \quad [\text{ms}]$$

$$\text{per } k_D < 1.05 \quad \tau_{1D} = \left(0.7 + \left(7 - \frac{R_N}{X_N} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right) \right) * \left(0.1 + 0.2 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \quad [\text{ms}]$$

$$\tau_{2D} = \frac{2}{\frac{R_N}{X_N} \left(0.6 + 0.9 \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} \quad [\text{ms}]$$

Condensatore livellatore

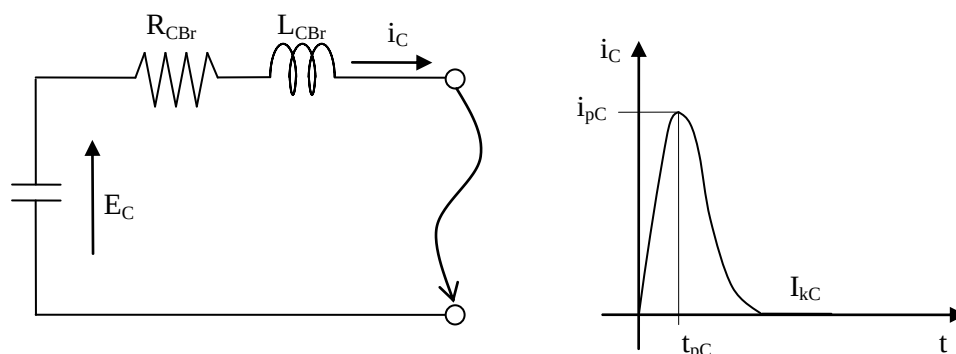


Figura 4.11: Circuito equivalente condensatore livellatore e andamento tipico corrente di cortocircuito

R_{CBr} è formata dalla somma della resistenza equivalente di cortocircuito del condensatore definita dal costruttore, dalla resistenza del cavo di collegamento e dalla resistenza della derivazione comune. L_{CBr} è costituita dall'induttanza del cavo di collegamento e da quella della derivazione comune. Come si può notare dalla Figura 4.11 la corrente di cortocircuito in regime quasi-stazionario è nulla ($I_{kC} = 0$), mentre il valore di picco è definito dalla relazione:

$$i_{pC} = k_c \frac{E_C}{R_{CBr}}$$

dove E_C è la tensione del condensatore nell'istante in cui avviene il cortocircuito. Il parametro k_c è funzione di ω_0 e $1/\delta$, definiti nei seguenti modi, e ricavabile in Figura 4.12 in relazione ad essi:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr} * C}} \quad \frac{1}{\delta} = 2 \frac{L_{CBr}}{R_{CBr}}$$

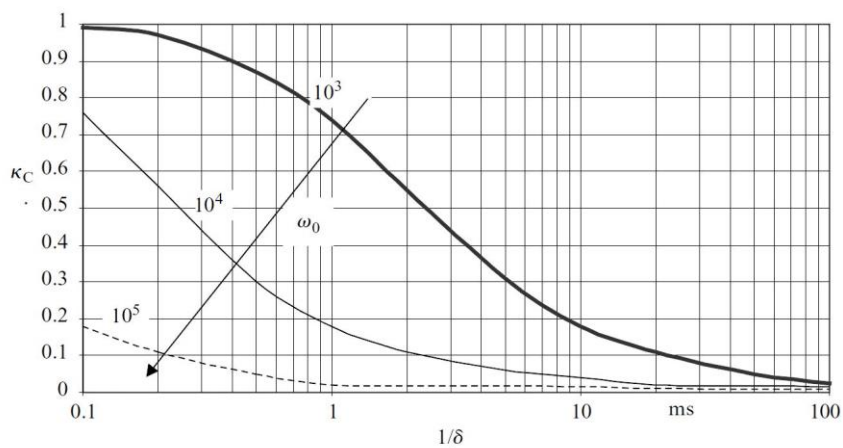


Figura 4.12: Parametro k_c per il calcolo del valore di picco della corrente di cortocircuito [18]

Anche il tempo per raggiungere il valore di picco è dipendente da ω_0 e $1/\delta$, come mostrato in Figura 4.13. Va notato che se L_{CBr} è nulla allora $k_c=1$ e $t_{pC}=0$.

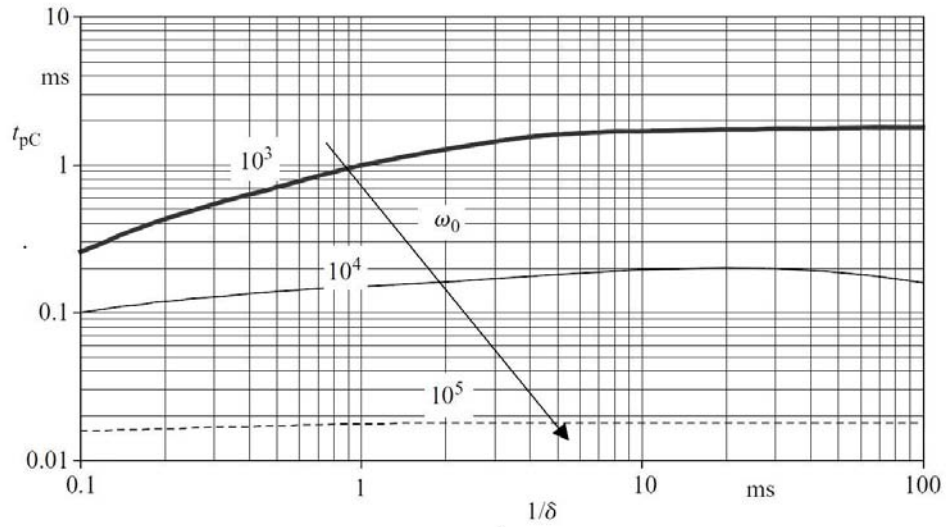


Figura 4.13: Tempo per il raggiungimento del valore di picco in funzione di ω_0 e $1/\delta$

Le costanti di tempo di salita e discesa sono definite dalle relazioni:

$$\tau_{1C} = k_{1C} * t_{pC}$$

$$\tau_{2C} = k_{2C} * R_{CBr} * C$$

dove k_{1C} e k_{2C} sono funzione di ω_0 e $1/\delta$, e ricavabili, rispettivamente in Figura 4.14 e 4.15.

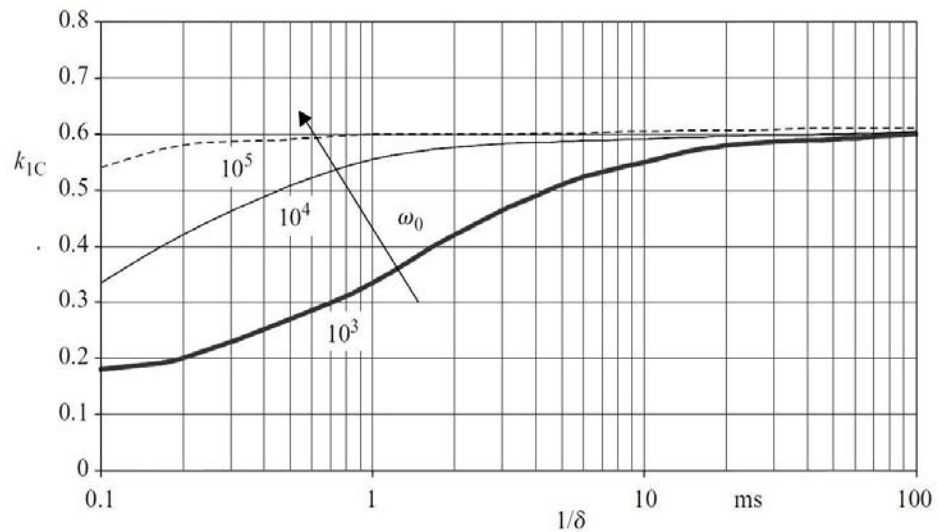


Figura 4.14: Parametro k_{1C} in funzione di ω_0 e $1/\delta$ per il calcolo della costante di tempo τ_{1C} [18]

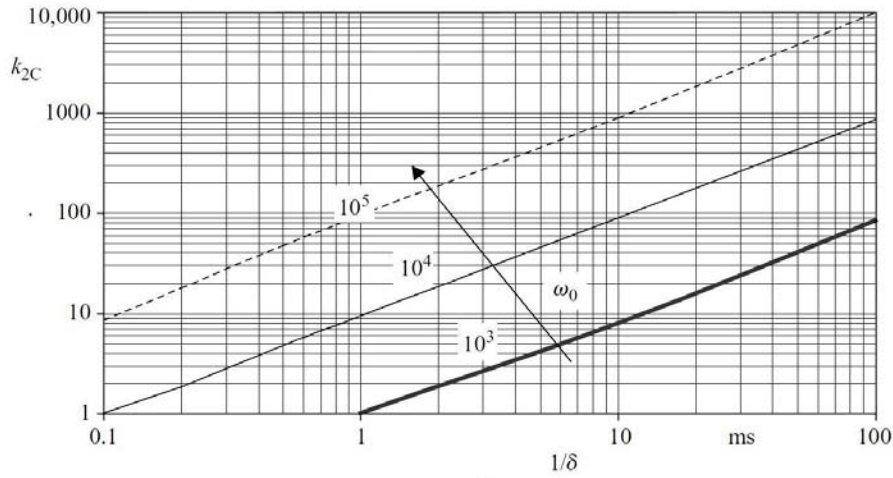


Figura 4.15: Parametro k_{2C} in funzione di ω_0 e $1/\delta$ per il calcolo della costante di tempo τ_{2C} [18]

Motore in corrente continua ad eccitazione indipendente

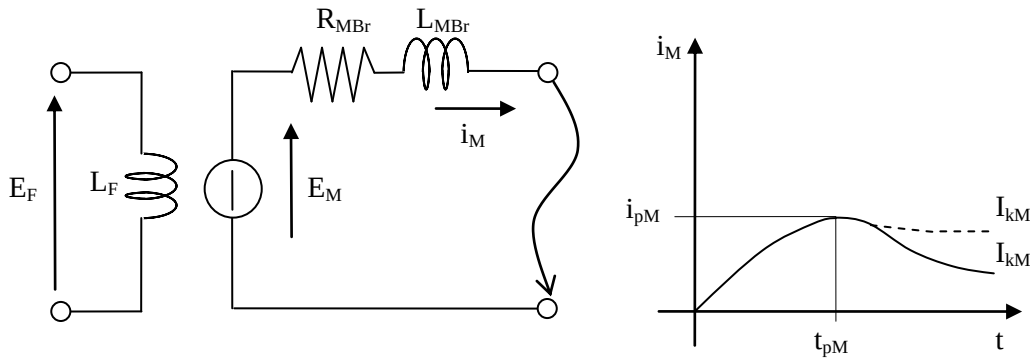


Figura 4.16: Circuito equivalente motore in corrente continua ad eccitazione indipendente e relativo andamento tipico della corrente di cortocircuito

R_{MBr} e L_{MBr} sono formate dalle rispettive componenti relative al circuito di indotto comprese le spazzole, al collegamento di derivazione e alla derivazione comune. Il loro rapporto definisce la costante di tempo del circuito d'indotto fino al punto del cortocircuito.

La corrente di cortocircuito a regime quasi-stazionario può essere calcolata secondo la relazione:

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{OF}} \left(\frac{U_{rM} - I_{rM} * R_M}{R_{MBr}} \right)$$

dove U_{rM} è la tensione nominale del motore, I_{rM} la corrente nominale del motore, L_F l'induttanza equivalente satura del circuito di campo nel punto di cortocircuito, L_{OF}

l'induttanza equivalente non satura del circuito di campo a vuoto. Questa relazione vale quando la velocità del motore è quella nominale e rimane costante durante il cortocircuito. Se la velocità tende a zero, allora tenderà ad annullarsi anche la I_{kM} .

Il valore di picco della corrente di cortocircuito è definita nel seguente modo:

$$i_{pM} = k_M \frac{U_{rM} - I_{rM} * R_M}{R_{MBr}}$$

$k_M=1$ alla velocità nominale o a velocità decrescente con $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$. In tutti gli altri casi esso è funzione di ω_0 e $1/\delta$, definiti dalle seguenti relazioni, e ricavabile dalla Figura 4.17:

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_{mec} * \tau_M} \left(1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right) \right)} \quad \frac{1}{\delta} = 2 * \tau_M$$

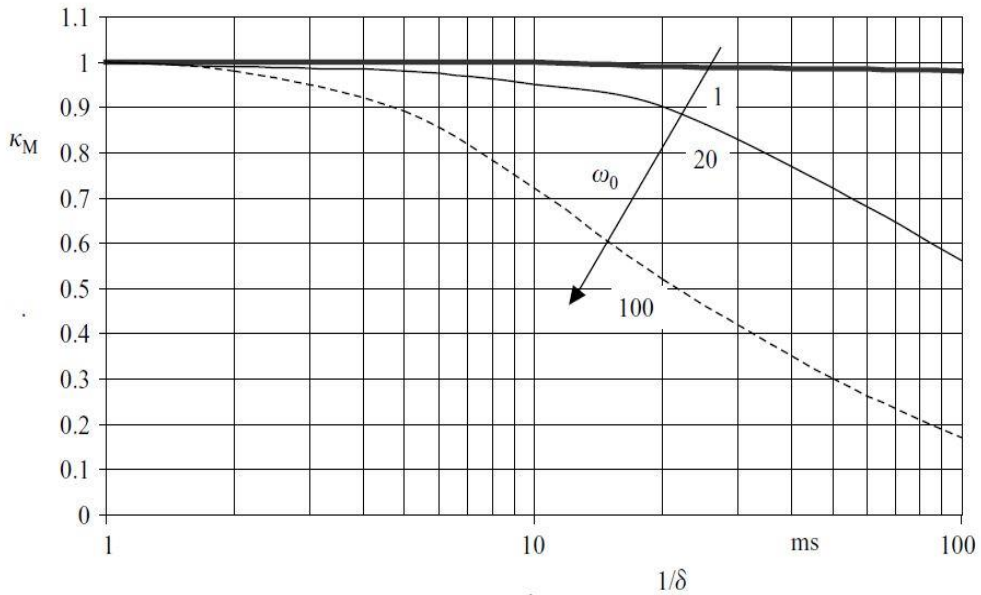


Figura 4.17: Parametro k_M per il calcolo del valore di picco della corrente di cortocircuito [18]

Quando $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$, il tempo per raggiungere il valore di cresta e le costanti di tempo sono definite nei seguenti modi:

$$t_{pM} = k_{1M} * \tau_M$$

$$\tau_{1M} = k_{2M} * \tau_M$$

$$\tau_{2M} = \tau_F$$

per $n = n_n = \text{costante}$

$$\tau_{2M} = k_{4M} * \tau_{mec} * \frac{L_{OF}}{L_F}$$

per n che tende a 0

Quando $\tau_{mec} < 10 \tau_F$, invece, il tempo t_{pM} è ricavabile dalla Figura 4.18 e le costanti di tempo definite dalle relazioni seguenti:

$$\tau_{1M} = k_{3M} * \tau_M$$

$$\tau_{2M} = k_{4M} * \tau_{mec}$$

I parametri k_{1M} , k_{2M} , k_{3M} e k_{4M} sono desumibili dalle Figure 4.19, 4.20, 4.21, 4.22.

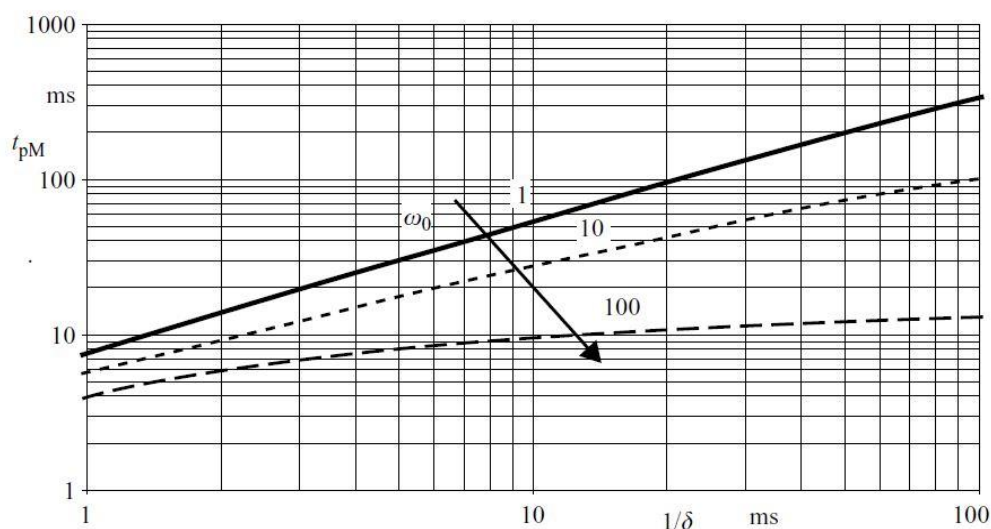


Figura 4.18: Tempo per raggiungere il valore di picco t_{pM} nel caso di $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ [18]

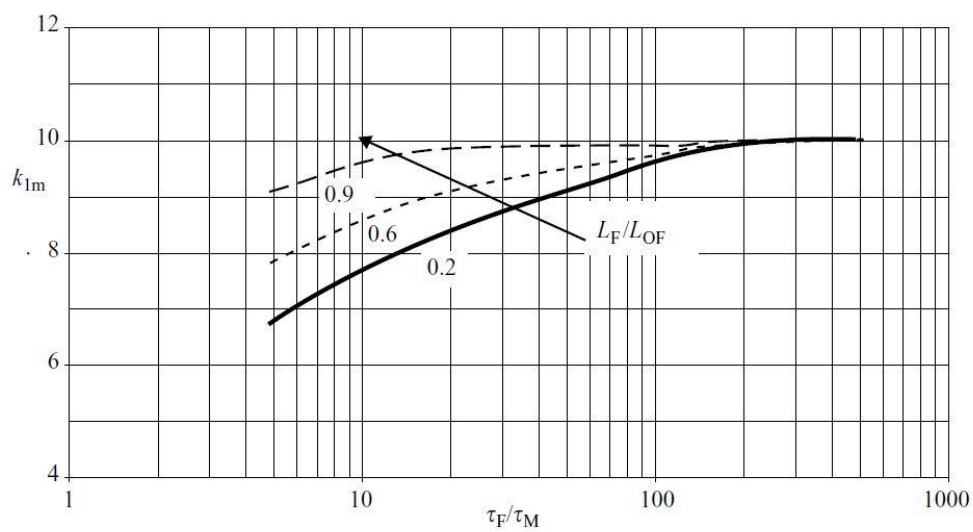


Figura 4.19: Parametro per il calcolo della costante di tempo [18]

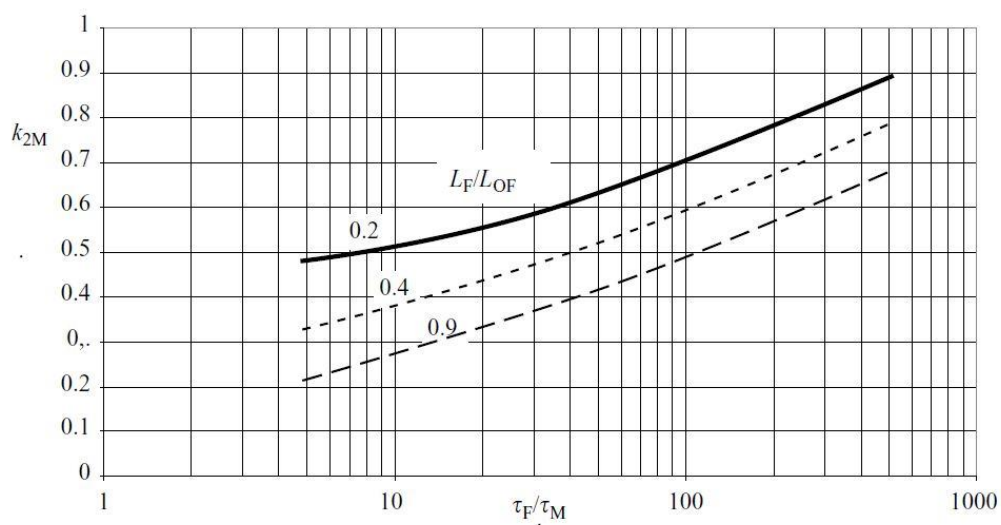


Figura 4.20: Parametro per il calcolo della costante di tempo di salita [18]

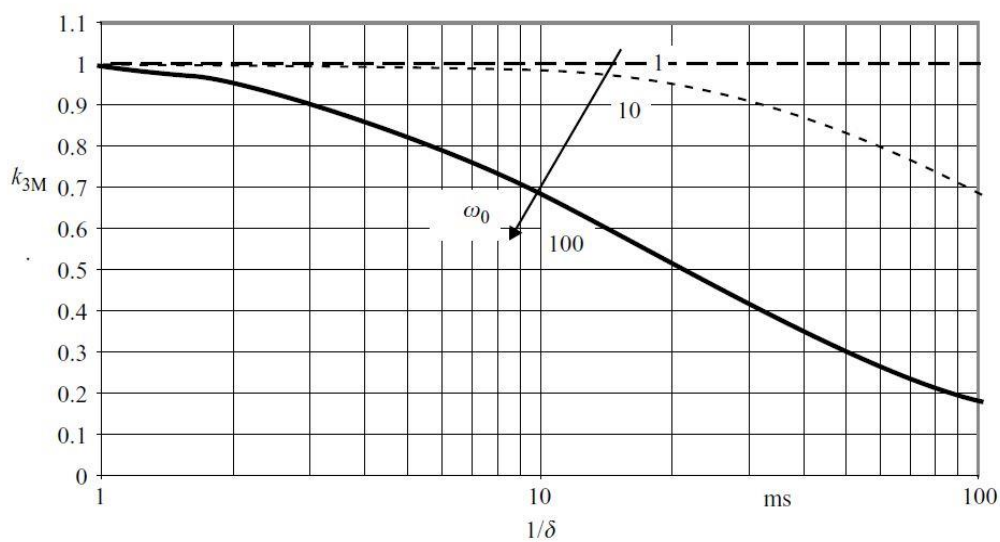


Figura 4.21: Parametro per il calcolo della costante di tempo di salita [18]

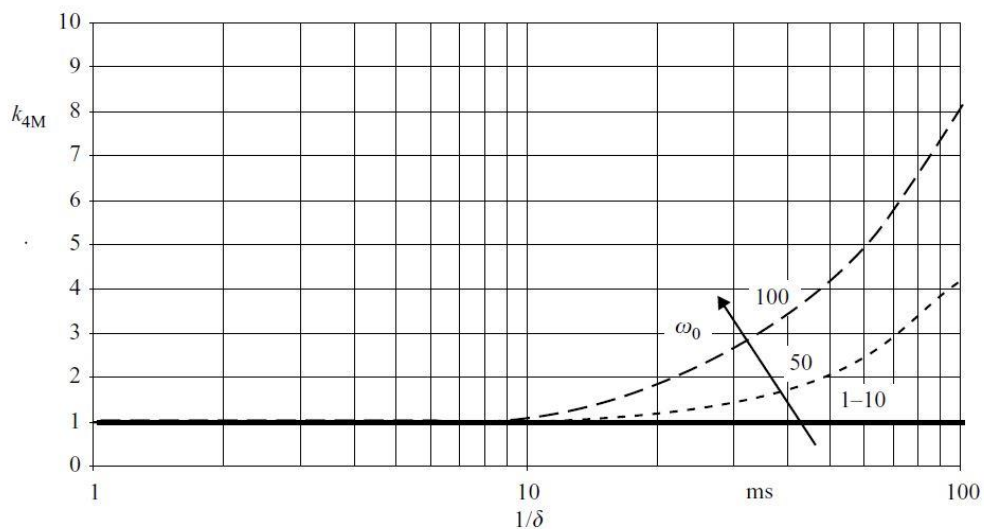


Figura 4.22: Parametro per il calcolo della costante di tempo di discesa [18]

Calcolo della corrente di cortocircuito totale

La corrente di cortocircuito totale è data dalla somma corretta delle correnti calcolate per i vari elementi componenti il sistema in corrente continua, tenendo conto, se presente, anche del ramo di derivazione comune. Se questo non è presente, la corrente totale è data dalla semplice somma, mentre se presente, si devono usare dei fattori di correzione che tengono conto delle diverse resistenze che entrano in gioco. Per un j -esimo elemento circuitale la corrente a regime quasi-stazionario ed il valore di picco sono, quindi, definiti nei seguenti modi:

$$I_{k\text{kor}j} = \sigma_j * I_{kj}$$

$$i_{p\text{kor}j} = \sigma_j * i_{pj}$$

dove il fattore di correzione per ogni singola sorgente è definito dalla seguente relazione:

$$\sigma_j = \frac{R_{\text{res}j} * (R_{ij} + R_y)}{R_{\text{res}j} * R_{ij} + R_{ij} * R_y + R_{\text{res}j} * R_y}$$

R_y è la resistenza della derivazione comune, R_{ij} è la resistenza fino alla derivazione comune di una sorgente, $R_{\text{res}j}$ è la resistenza equivalente data dal parallelo fino alla derivazione comune delle altre derivazioni della sorgente presa in considerazione che contribuiscono alla corrente di cortocircuito in regime quasi-stazionario attraverso la derivazione comune. Solitamente, le resistenze dei condensatori fino alla derivazione comune R_{iC} non sono considerate mentre quelle dei motori R_{iM} vengono considerate fino a che le correnti di cortocircuito parziali non sono uguali a zero.

In definitiva, le equazioni che descrivono la funzione di approssimazione normale totale sono le seguenti:

$$i_1(t) = \sum_{j=1}^n i_{p\text{kor}j} \times \frac{1 - e^{\frac{-t}{\tau_{1j}}}}{1 - e^{\frac{-t_{pj}}{\tau_{1j}}}} \quad 0 \leq t \leq t_{pj}$$

$$i_2(t) = \sum_{j=1}^n i_{p\text{kor}j} \left(\left(1 - \frac{I_{k\text{kor}j}}{i_{p\text{kor}j}} \right) e^{\frac{-(t-t_{pj})}{\tau_{2j}}} + \frac{I_{k\text{kor}j}}{i_{p\text{kor}j}} \right) \quad t_{pj} \leq t \leq T_k$$

Il valore di corrente a regime quasi-stazionario, il valore di cresta, il tempo per arrivare a tale valore e la costante di tempo di discesa possono essere ricavati direttamente per via grafica dall'andamento della funzione di approssimazione normale della corrente di cortocircuito totale. Invece, per la costante di tempo di salita si può porre:

$$\tau_1 = \frac{t_p}{3}$$

Oppure in alcuni casi: $\tau_1 = \min\{\tau_{1C}, \tau_{1B}, \tau_{1D}, \tau_{1M}\}$

4.2 Cortocircuito ai morsetti dell'unità di celle Sodio-Zolfo (NaS)

Prendendo in considerazione il modello dell'unità di celle sodio-zolfo da 1.2 MW, descritto nei capitoli precedenti, si analizzi il suo comportamento nel caso di cortocircuito direttamente ai morsetti. Tale situazione è stata ricostruita e simulata tramite l'utilizzo del software EMTP-RV che, contrariamente ad altri software simili, permette di inserire all'interno del circuito una resistenza nulla. È, quindi, possibile portarsi allo studio del caso peggiore in cui si ha la massima corrente.

In codesta situazione, per la verifica analitica del valore di picco della corrente di cortocircuito si dovrà tenere conto della sola resistenza interna del modulo di celle sodio-zolfo, tralasciando eventuali altri elementi resistivi considerati all'interno della norma CEI EN 61660-1.

Va notato che, conoscendo la resistenza interna della singola cella, risulta molto semplice ricavare il valore di resistenza dell'intera unità applicando il teorema di Thévenin.

Va posta attenzione al fatto che, però, il comportamento delle batterie sodio-zolfo, in termini di variazione della resistenza interna e della tensione a circuito aperto al variare dello stato di scarica, è differente rispetto a quello delle batterie al piombo considerate dalla norma CEI EN 61660-1. Di conseguenza, è prevedibile che l'andamento di corrente non coincida con quello di riferimento dettato dalla norma, ma sarà influenzato dalle caratteristiche di tensione e di resistenza al passare del tempo (e, quindi, al diminuire dello stato di carica).

Il modello costruito in EMTP-RV è visibile in Figura 4.23. Come si può vedere in Figura 4.23, come indicato dalla norma CEI EN 61660-1 è stata inserita all'interno del circuito un'induttanza da 0.2μH, non essendo nota a priori alcuna induttanza. L'andamento della corrente di cortocircuito per le celle NaS, ottenuto dalle simulazioni, è visibile in Figura 4.24.

Il valore di picco calcolato analiticamente, e verificato graficamente è dato da:

$$i_p = \frac{U}{R_{i\min}} = \frac{664}{10.286 * 10^{-3}} \approx 64555A$$

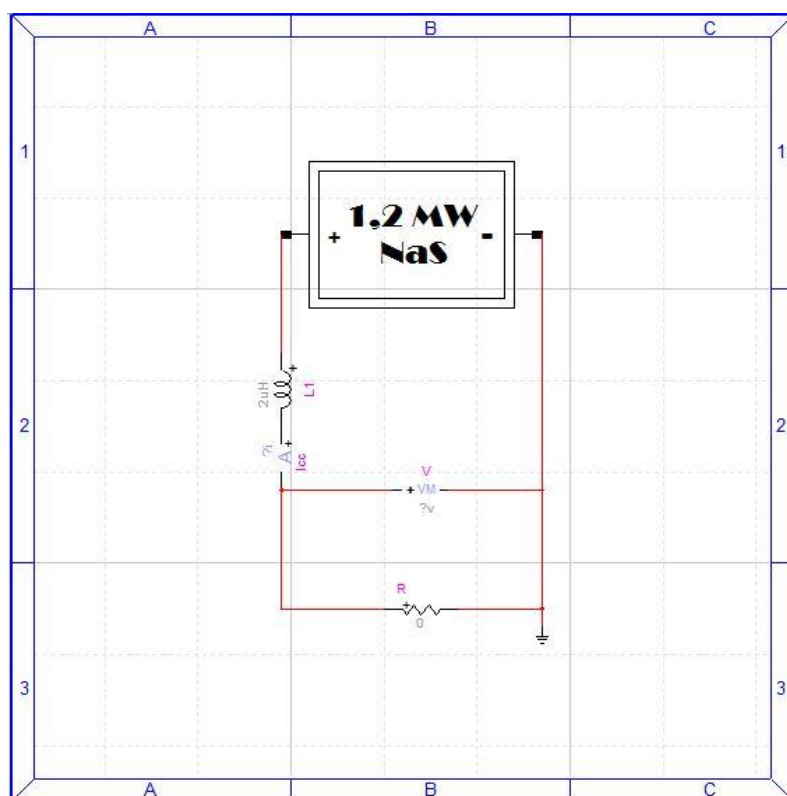


Figura 4.23: Modello costruito in EMTP-RV per la simulazione di cortocircuito ai morsetti dell'unità da 1.2 MW di celle sodio-zolfo

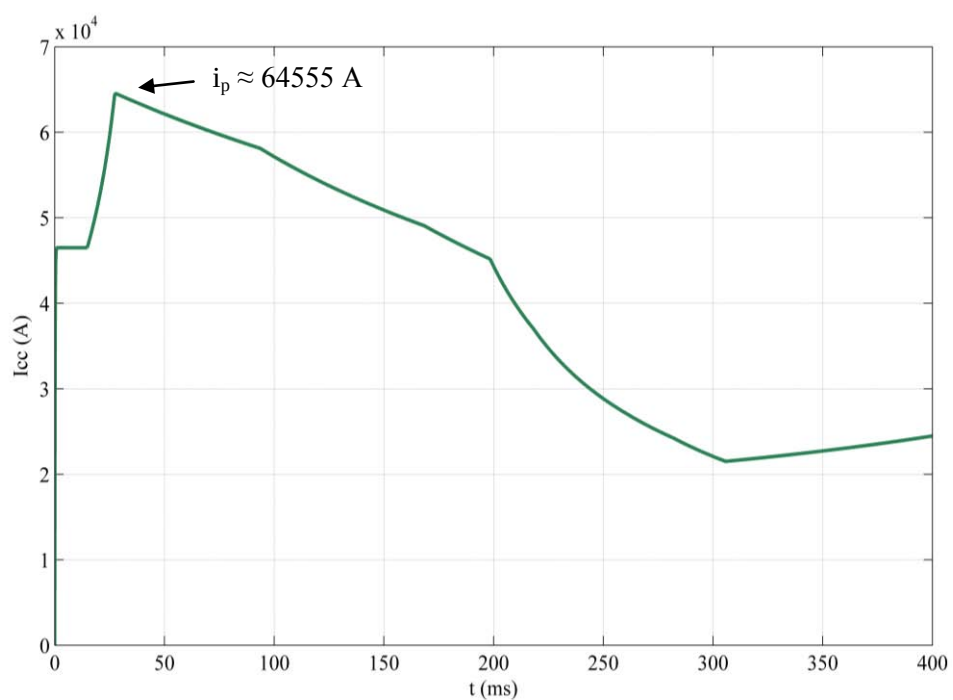


Figura 4.24: Corrente di cortocircuito unità 1.2 MW celle sodio-zolfo

4.3 Cortocircuito ai morsetti dell'unità di celle Sodio-Cloruro di Nickel (zebra)

Prendendo in considerazione il modello dell'unità di celle sodio-cloruro di nickel da 0.5MW, descritto nei capitoli precedenti, si vuole analizzare il suo comportamento in regime di cortocircuito, come precedentemente fatto per l'unità di celle sodio-zolfo. Analogamente, tale regime di funzionamento è stato ricostruito tramite l'uso del software in EMTP-RV.

Ancora una volta, essendo il cortocircuito considerato direttamente ai morsetti dell'unità l'unica resistenza che contribuisce alla corrente di cortocircuito è la resistenza interna dell'unità stessa ricavabile, facilmente, una volta nota quella della singola cella tramite il teorema di Thévenin. Le altre tipologie di resistenze, prese in considerazione nella norma CEI EN 61660-1, non devono essere qui prese in esame.

Inoltre, anche il comportamento delle celle Zebra, dal punto di vista di variazione della resistenza interna e tensione a circuito aperto al cambiare della profondità di scarica, è diverso da quello delle batterie al piombo considerato dalla norma. Di conseguenza, l'andamento della corrente di cortocircuito sarà non molto simile a quella indicato dalla norma.

Il modello costruito in EMTP-RV è visibile in Figura 4.25.

Come indicato dalla norma CEI EN 61660-1, non essendo nota alcuna induttanza, ne è stata inserita una del valore di 0.2μH, come visibile in Figura 4.25. Il risultato delle simulazioni, ossia l'andamento della corrente di cortocircuito è mostrata in Figura 4.26.

Il valore di picco calcolato per via analitica, e verificabile graficamente è pari a:

$$i_p = \frac{U}{R_{i\min}} = \frac{620}{39.375 \cdot 10^{-3}} \approx 15746 A$$

È necessaria la presenza di sistemi in grado di rilevare prontamente il cortocircuito e di intervenire opportunamente, al fine di evitare rapide scariche delle unità.

Tuttavia, va fatto notare che la probabilità che avvenga un cortocircuito netto direttamente ai morsetti delle unità è molto bassa, in quanto questi sono sicuramente ben distanziati ed isolati tra loro.

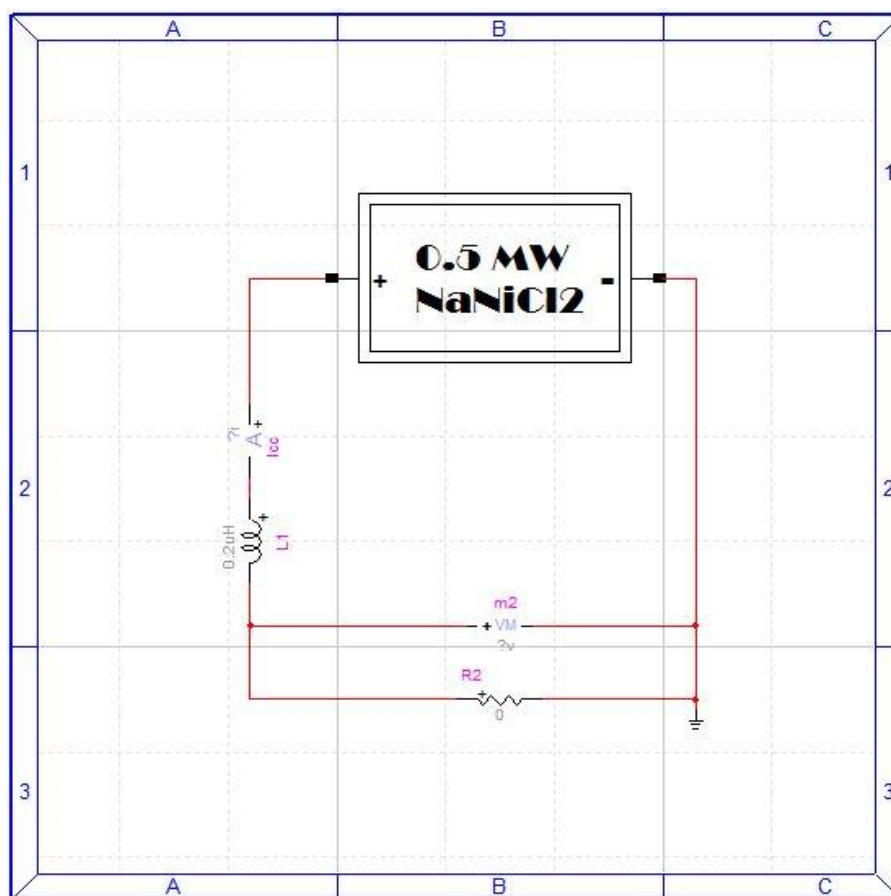


Figura 4.25: Modello in EMTP-RV dell'unità di celle Zebra in cortocircuito

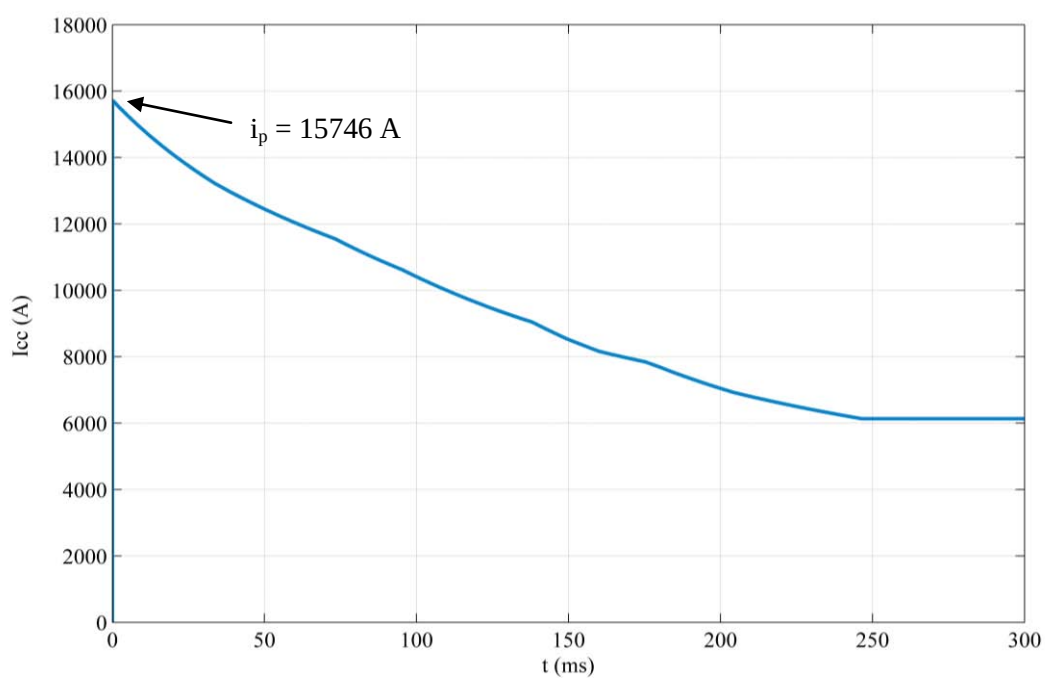


Figura 4.26: Corrente di cortocircuito unità 0.5 MW celle Zebra

Capitolo 5

Sistemi di conversione statica

I sistemi di conversione statica dell'energia elettrica, nel corso degli anni, hanno visto una loro esponenziale crescita e uno sviluppo verso soluzioni tecniche ad alta efficienza. Questi svolgono all'interno dei sistemi di accumulo elettrochimico un ruolo fondamentale essendo, essenzialmente, necessari per lo scambio di energia tra un sistema in corrente continua (unità di celle Na-Beta) e un sistema in corrente alternata (rete di trasmissione). Essi devono permettere, inoltre, la bidirezionalità del flusso di potenza al fine di assicurare la possibilità di utilizzo delle batterie per le funzioni (già introdotte nei capitoli precedenti), quali regolazione di frequenza primaria e risoluzione delle congestioni. In sostanza, si deve permettere la carica e la scarica dell'unità interfacciata alla rete.

La struttura generalizzata tipicamente utilizzata nelle applicazioni già esistenti [19], e riscontrabile in letteratura, prevede l'utilizzo di un convertitore DC/DC bidirezionale in modalità di funzionamento da stabilizzatore e un convertitore DC/AC bidirezionale, come visibile in Figura 5.1.

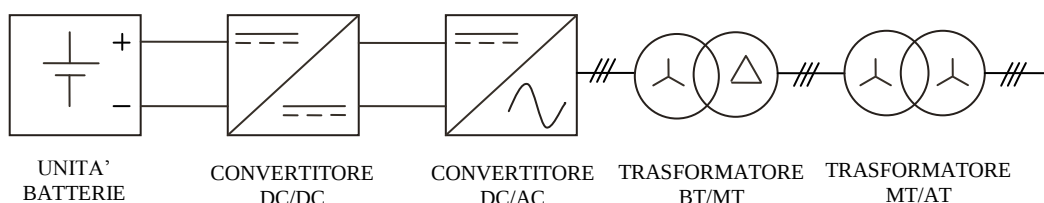


Figura 5.1: Layout tradizionale sistema di accumulo elettrochimico

Inoltre, la Figura 5.1 mostra che per completare l'impianto di accumulo stazionario sono necessari due stadi di trasformazione: il primo per il passaggio dalla bassa tensione, ottenuta in uscita dal convertitore DC/AC, alla media tensione (tipicamente 20 kV), il secondo per la trasformazione da media tensione ad alta tensione (150 kV). Si ottiene così il sistema di accumulo nel suo complesso. Anche se in Figura 5.1 non sono illustrati, saranno presenti anche tutti i sistemi di controllo e pilotaggio dei convertitori, i dispositivi di protezione dai guasti di varia natura, i sistemi di controllo della temperatura di funzionamento delle unità di celle Na-Beta e i sistemi di comunicazione delle grandezze elettriche di riferimento.

Le soluzioni tecniche proposte in seguito, e la loro modellizzazione, non sono, tuttavia, le uniche utilizzabili in sistemi come questi, ma hanno lo scopo di creare una struttura generalizzata in modo tale da permettere lo studio dei benefici dei sistemi di accumulo sulla rete di trasmissione o in altri campi di applicazione.

5.1 Convertitore bidirezionale DC/DC

Le unità di accumulo composte da cella Na-Beta ha una tensione ai morsetti di uscita che varia in funzione del suo stato di carica, come già visto nei capitoli precedenti. Di conseguenza, viene inserito un convertitore DC/DC connesso ad ogni singola unità di batterie con lo scopo di mantenere il più possibile costante la tensione nel bus DC, ossia nel collegamento tra il convertitore DC/DC e il convertitore DC/AC. la necessità di avere una tensione in ingresso al convertitore DC/AC costante (in termini di valore medio) è giustificata da due aspetti molto importanti:

- Far funzionare il convertitore DC/AC direttamente alla tensione di batteria nel lato continua significherebbe lavorare con un notevole range di tensioni, che comporterebbero un sovradimensionamento del convertitore stesso ed un peggioramento del contenuto armonico della tensione in uscita nel lato alternata.
- Senza convertitore DC/DC si avrebbe il collegamento diretto in parallelo delle varie unità costituenti l'impianto. In caso di squilibrio tra le grandezze di riferimento tra le varie unità si avrebbe un non ottimale funzionamento in termini di efficienza e di durata di vita, con flussi di potenze tra le varie unità stesse.

Questi aspetti hanno, quindi, portato all'introduzione all'interno del sistema di accumulo di questo tipo di convertitori che possono presentare varie tipologie di struttura. Ogni topologia presenta delle caratteristiche peculiari diverse che, a seconda delle necessità, influenzeranno la scelta della struttura migliore. In ogni caso, è imprescindibile la condizione di bidirezionalità del flusso di potenza tra i due lati del convertitore.

Nella maggior parte dei casi, la tensione in uscita dalle unità delle batterie è inferiore rispetto alla tensione lato continua del convertitore DC/AC. di conseguenza, durante la scarica il convertitore DC/DC deve funzionare da elevatore di tensione (boost), mentre durante la carica deve funzionare da abbassatore di tensione (buck).

La soluzione qui proposta, e utilizzata realisticamente come verificato in letteratura [20], è visibile in Figura 5.2.

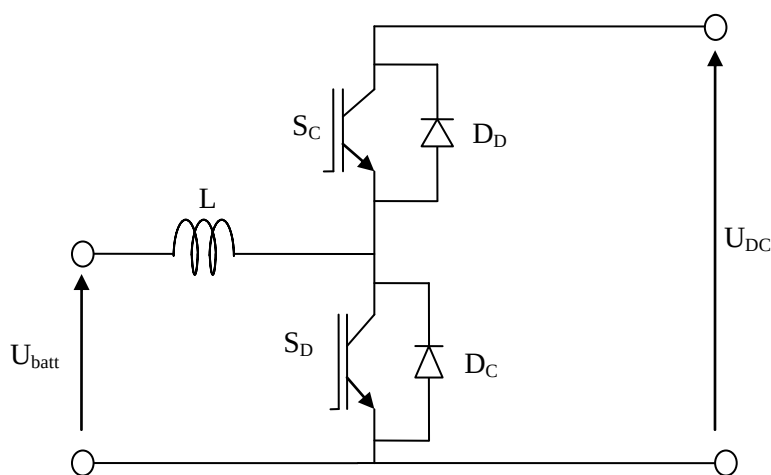


Figura 5.2: Struttura elementare convertitore DC/DC bidirezionale

In riferimento alla Figura 5.2 si ha che, quando è azionato il componente S_D (D_D) il convertitore è in modalità elevatore con flusso di potenza che va dall'unità di batterie al convertitore DC/AC (scarica); mentre, quando viene comandato il componente S_C (D_C) il convertitore funziona da abbassatore con flusso di potenza che va dal convertitore DC/AC all'unità di batterie (carica).

La commutazione degli interruttori statici, S_D e S_C , viene fatta ad certa una frequenza f_s , detta "frequenza di commutazione", che rapportata al tempo di conduzione, definito dalla logica di controllo, definisce il "duty cycle", secondo la relazione:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s}$$

dove T_s è il periodo di commutazione, pari a $1/f_s$. Il comando degli interruttori statici viene realizzato attraverso la tecnica di modulazione dell'ampiezza dell'impulso (PWM), in cui il segnale d'errore amplificato, definito $v_{controllo}$, viene confrontato con una forma d'onda ripetitiva a dente di sega v_{st} [21]. La frequenza del segnale ripetitivo definisce la frequenza di commutazione f_s ; di conseguenza, se la forma d'onda ripetitiva viene mantenuta a frequenza costante, anche la PWM sarà a frequenza costante. Quando la $v_{controllo}$ è maggiore di v_{st} viene inviato il segnale di accensione al componente che si aprirà quando $v_{controllo}$ sarà minore di v_{st} , come mostrato in Figura 5.3.

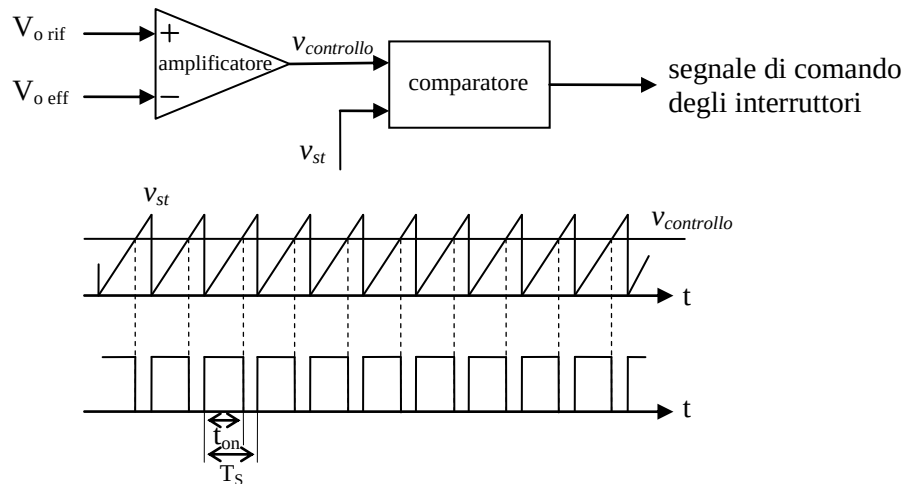


Figura 5.3: Tecnica di modulazione degli impulsi PWM

Come si potrà meglio capire in seguito, maggiore è la frequenza di commutazione, minore sarà l'oscillazione della corrente sull'induttanza e della tensione lato batteria a parità di induttanza e di condensatore di filtro. Le fluttuazioni di tensione e corrente impongono la presenza di elementi di filtraggio per la riduzione del contenuto armonico. Da questo punto di vista, un effetto benefico si può ottenere connettendo l'unità di celle a più convertitori operanti in modalità "interlacciata", ossia con commutazioni sfasate di T_s/n , dove n è il numero di convertitori inseriti in parallelo; in questo modo, la tensione lato batteria ha un'oscillazione di frequenza $n f_s$, a cui corrisponde armoniche di alta frequenza, filtrabili con maggiore facilità.

Si analizzano, di seguito, le due modalità di funzionamento del convertitore DC/DC.

5.1.1 Modalità di funzionamento da elevatore (boost)

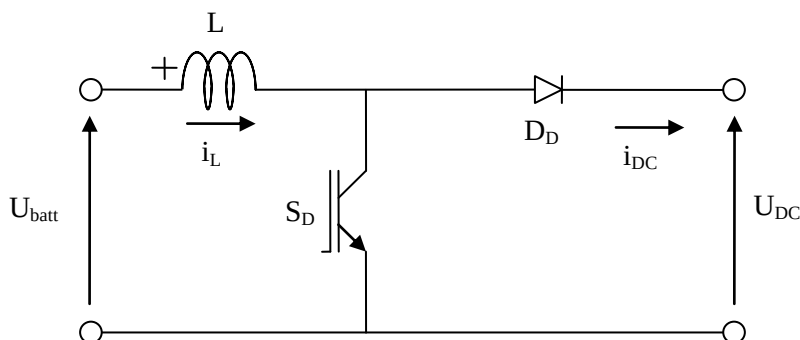


Figura 5.4: Convertitore DC/DC a commutazione in modalità da elevatore

In questa modalità operativa il convertitore assicura un valor medio della tensione in uscita U_{DC} maggiore di quello in ingresso U_{batt} , dato dall'unità di batterie. Quando S_D è chiuso, il diodo è contropolarizzato e, quindi, non conduce; di conseguenza, il carico rimane isolato mentre l'induttanza si carica linearmente essendo alimentata alla tensione della batteria. Quando invece S_D è aperto, il diodo è polarizzato direttamente e, quindi, lascia passare la corrente che fluisce verso il carico, con l'induttanza che si scarica sottoposta ad una tensione negativa ($U_{batt} - U_{DC}$), come si può vedere in Figura 5.5.

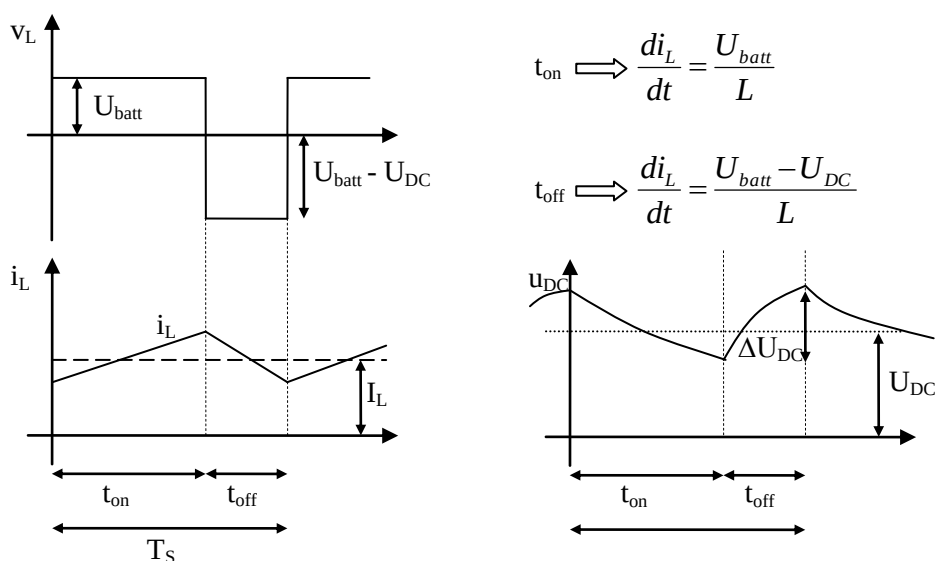


Figura 5.5: Andamenti di tensione e corrente sull'induttanza e tensione lato carico in modalità elevatore

Per la conservazione del flusso ai capi dell'induttanza si può scrivere:

$$U_{batt}t_{on} + (U_{batt} - U_{DC})t_{off} = 0$$

Si ricava, quindi:

$$\frac{U_{DC}}{U_{batt}} = \frac{1}{1-D}$$

Poiché D è sempre minore di uno, risulterà che $U_{DC} > U_{batt}$. Inoltre, per quanto riguarda le correnti, supponendo assenza di perdite all'interno del convertitore, si può porre:

$$U_{batt} I_{batt} = U_{DC} I_{DC}$$

da cui risulta:

$$\frac{I_{DC}}{I_{batt}} = \frac{U_{batt}}{U_{DC}} = 1 - D$$

Va fatto notare che in questo caso $I_{batt} = I_L$ ed, inoltre, questo vale solo nel caso di conduzione continua, ossia quando la corrente che attraversa l'induttanza non si annulla mai. La scarica totale dell'induttanza, e di conseguenza l'annullamento della corrente i_L all'interno del periodo di commutazione, può accadere qualora il valore medio della corrente assorbita dal carico risulti al di sotto di un valore limite che è funzione del valore dell'induttanza, del valore medio della tensione di uscita desiderata e della frequenza di commutazione f_s .

La tensione di uscita del convertitore U_{DC} non risulta perfettamente costante ma è caratterizzata da un certo ripple ΔV_{DC} , come visibile in Figura 5.5. durante il tempo di chiusura di S_D il condensatore di filtro presente nel lato carico del convertitore, rimanendo isolato dall'unità di batterie si scarica alimentando il carico, con una costante di tempo che risulta funzione del carico stesso; mentre, quando S_D è aperto il condensatore viene caricato fino a che non si ha il nuovo intervento dell'interruttore statico. La variazione di tensione, supponendo che la corrente assorbita dal carico rimanga costante, è esprimibile nel seguente modo:

$$\Delta U_{DC} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_{DC} DT_s}{C} = \frac{U_{DC}}{R} \frac{DT_s}{C}$$

da cui risulta:
$$\frac{\Delta U_{DC}}{U_{DC}} = \frac{DT_s}{RC}$$

Come si può notare, il ripple di tensione è funzione della frequenza di commutazione, del duty cycle e del carico.

5.1.2 Modalità di funzionamento da abbassatore (buck)

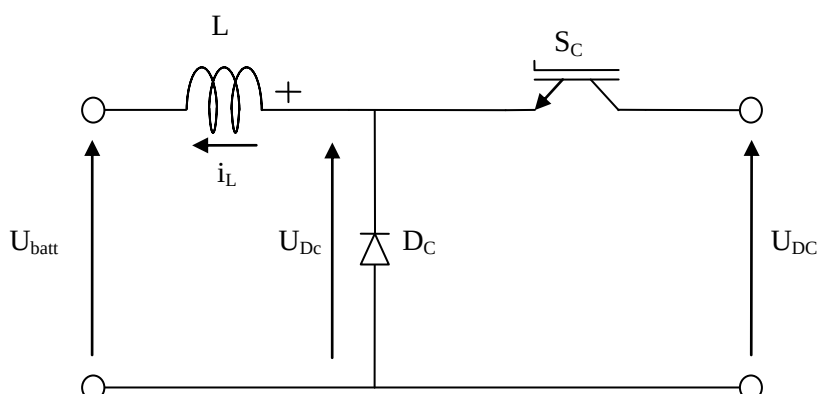


Figura 5.6: Convertitore DC/DC a commutazione in modalità da abbassatore

Con questa modalità di funzionamento si permette la carica dell'unità di batterie sempre nell'ipotesi che la tensione U_{DC} sia maggiore della tensione U_{batt} . Quando S_C viene chiuso, il diodo D_C non conduce essendo contropolarizzato e, quindi, la corrente fluisce dal lato convertitore DC/AC all'unità di batterie, caricando l'induttanza. Viceversa, quando S_C risulta aperto l'induttanza caricata durante il tempo t_{on} si scarica sulla batteria imponendo la circolazione di corrente. In questo caso, il diodo è polarizzato direttamente e permette la chiusura del circuito, mentre l'alimentazione risulta essere isolata dalla batteria. In Figura 5.7 vengono mostrati gli andamenti di tensione e corrente nell'induttanza.

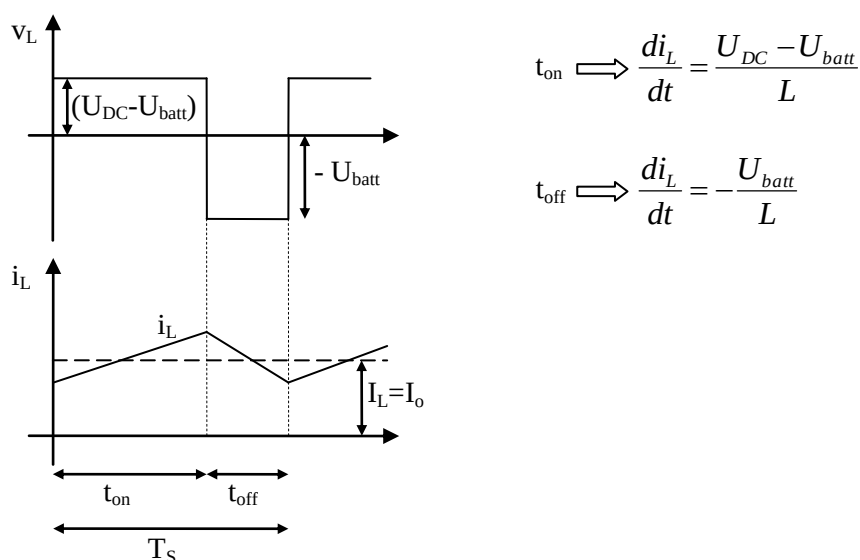


Figura 5.7: Andamenti di tensione e corrente nell'induttanza nel convertitore in modalità abbassatore

Per la conservazione del flusso nell'induttanza si può scrivere:

$$(U_{DC} - U_{batt})t_{on} + (-U_{batt})t_{off} = 0$$

da cui si ricava:
$$\frac{U_{batt}}{U_{DC}} = D$$

essendo sempre $D < 1$ risulterà sempre verificata $U_{batt} < U_{DC}$. Per quanto riguarda le correnti, supponendo assenza di perdite nel convertitore e, quindi, conservazione della potenza tra ingresso e uscita, risulta:

$$U_{batt} I_{batt} = U_{DC} I_{DC}$$

da cui risulta:

$$\frac{I_{batt}}{I_{DC}} = \frac{U_{DC}}{U_{batt}} = \frac{1}{D}$$

Anche in questo caso, la corrente dell'induttanza è la stessa che interessa l'unità di accumulo elettrochimico e le relazioni viste precedentemente valgono in caso di conduzione continua, ossia di non annullamento della corrente dell'induttanza. L'annullamento si può verificare nel caso di basso carico e, ragionando sul sistema di accumulo, questo può accadere nella fase finale di carica dell'unità di batterie quando la corrente che entra nelle batterie cala. Di conseguenza, per evitare di far funzionare il convertitore in modalità discontinua si deve rimanere al di sopra di un determinato limite di corrente che risulta essere funzione della tensione di uscita, del periodo di commutazione e del valore dell'induttanza. Quest'ultima dovrà, quindi, avere un valore sufficientemente grande da comportare una di/dt non troppo elevata.

5.2 Modellizzazione del convertitore DC/DC tramite software EMTP-RV

Per la costruzione di un modello del convertitore DC/DC a commutazione bidirezionale, descritto precedentemente, come già fatto per le celle Na-Beta e i relativi moduli, si è usato il software EMTP-RV. Il modello finale è visibile in Figura 5.8.

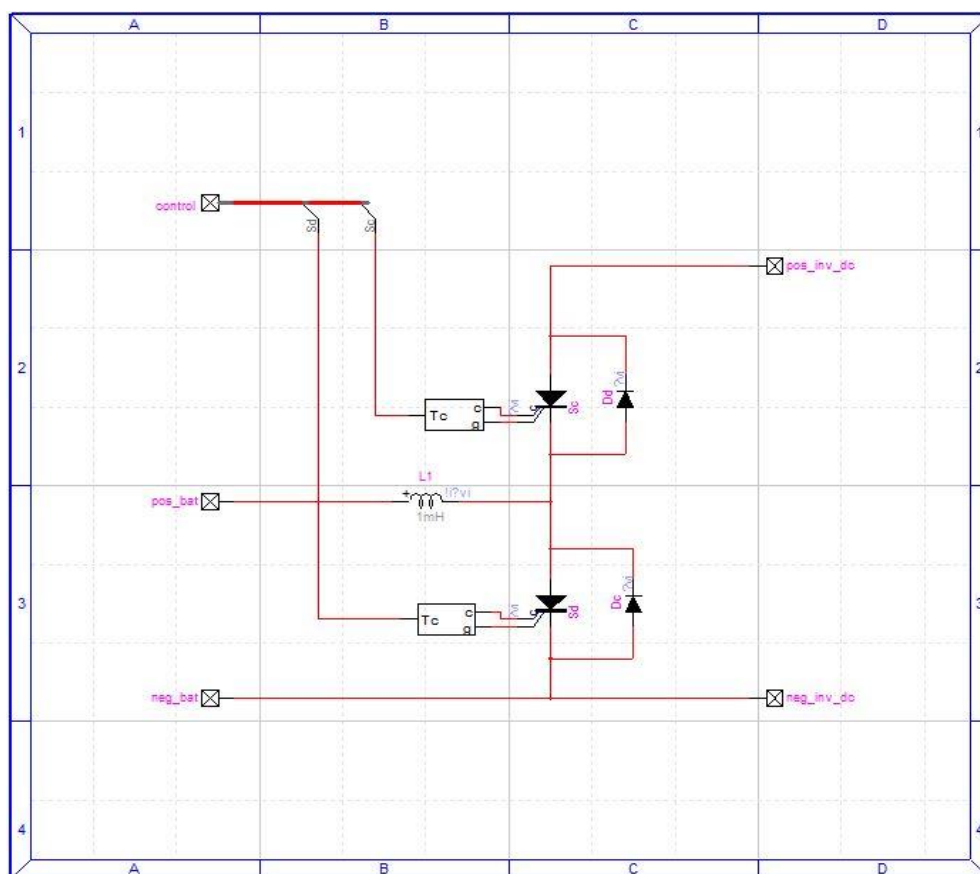


Figura 5.8: Modello convertitore DC/DC a commutazione bidirezionale

Va notato che, gli elementi presenti all'interno del modello sono disponibili all'interno della libreria, con la particolarità che gli interruttori statici S_D ed S_C permettono la conduzione della corrente in entrambi i versi, contrariamente alla teoria dei componenti. Questo, quindi, richiede attenzione nel momento in cui si inserisce il modello all'interno di un circuito in quanto può portare a poco chiari errori nei risultati. Tuttavia, un buon sistema di comando degli interruttori permette di sopperire a questo aspetto. Inoltre, come da teoria il componente è dato di due ingressi: uno corrisponde al gate e l'altro è l'ingresso per il comando di accensione e spegnimento. Il blocco connesso ai due pin serve, appunto, a comandare opportunamente l'interruttore: quando l'interruttore deve essere aperto viene inviato un segnale di valore negativo all'ingresso di comando che impone l'apertura dell'interruttore, quando il componente deve essere chiuso il blocco di comando invia un segnale di valore positivo al pin di comando che impone la chiusura del componente. Il gate, in questo caso, interviene solamente qualora l'ingresso di controllo riceva un segnale nullo; di conseguenza, il componente, che è idealizzato, si comporta da tiristore.

Il valore dell'induttanza presente nel modello risulta essere, esclusivamente un valore di riferimento che può essere facilmente modificato, in base alle esigenze e sulla base di un opportuno dimensionamento.

In ingresso alla “porta” denominata “control” si avrà il segnale di comando proveniente dalla PWM, modellizzata in un altro blocco esterno al modello del convertitore. Questa scelta è stata fatta per rendere il modello del convertitore utilizzabile in modo generale, prescindendo dal sistema di controllo utilizzato.

Ai morsetti pos_bat e neg_bat verrà connessa l'unità di batterie, mentre ai morsetti pos_inv_dc e neg_inv_dc sarà collegato il lato in continua del convertitore DC/AC.

Una volta nota la teoria che caratterizza il convertitore, trattata nei capitoli precedenti, il modello deve essere validato, verificando che gli andamenti di tensione e corrente nei vari elementi del modello corrispondano con quelli teorici.

5.2.1 Funzionamento da elevatore del modello di convertitore DC/DC

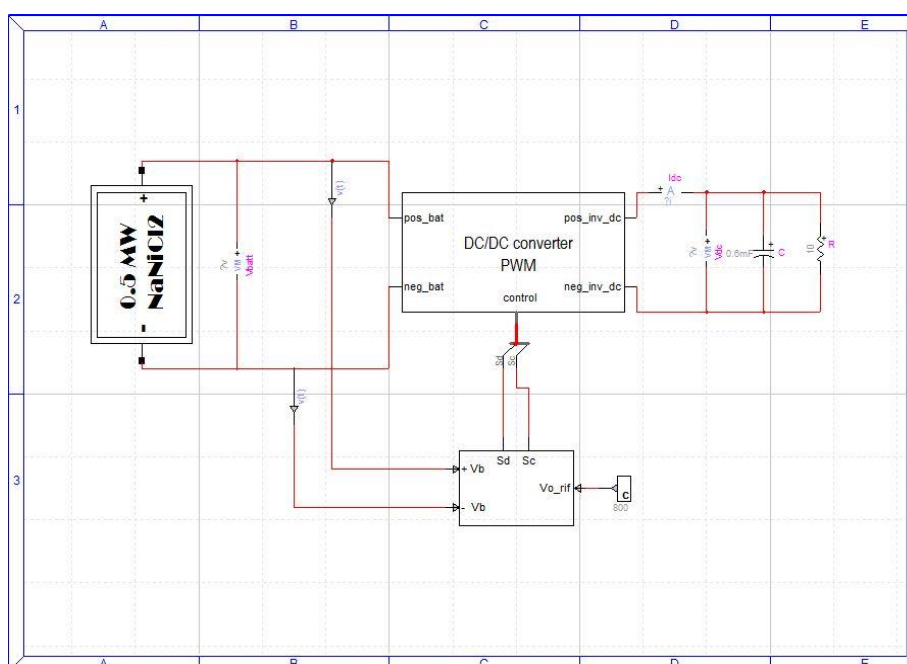


Figura 5.9: Modello del funzionamento in modalità boost del convertitore DC/DC

La figura 5.9 mostra il modello utilizzato per la simulazione del funzionamento da elevatore (boost) del modello del convertitore DC/DC a commutazione bidirezionale. Come unità di batterie è stata scelta il modello dell'unità di celle sodio-cloruro di nickel da 0.5MW, descritto nei capitoli precedenti. Va fatto notare, che induttanza e capacità sono stati dimensionati secondo quanto descritto in [22]. Dalla procedura indicata sono risultati i seguenti valori: $L=130\text{mH}$, $C=6\text{mF}$. Inoltre, nel bus DC è stato scelto di avere un valore medio di tensione di 800 V, indicata come tensione di riferimento nel blocco che modella la PWM, fatta a frequenza di commutazione pari a 1 kHz.

Gli andamenti di corrente e tensione nell'induttanza, risultanti dalle simulazioni, sono visibili in figura 5.10 e 5.11.

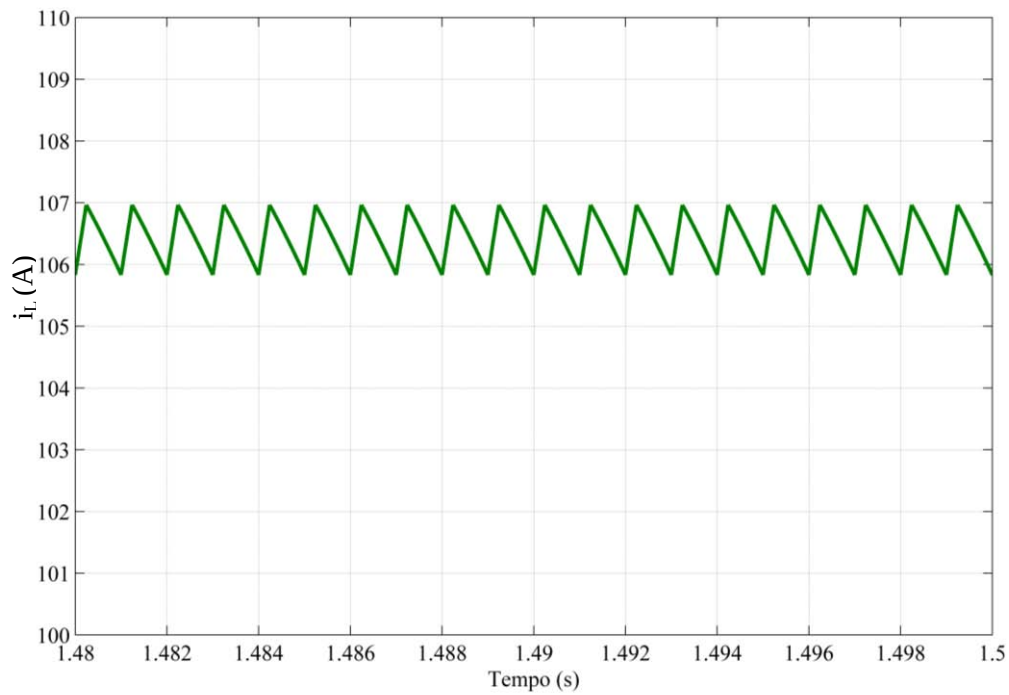


Figura 5.10: Corrente dell'induttanza del modello di convertitore DC/DC in modalità elevatore

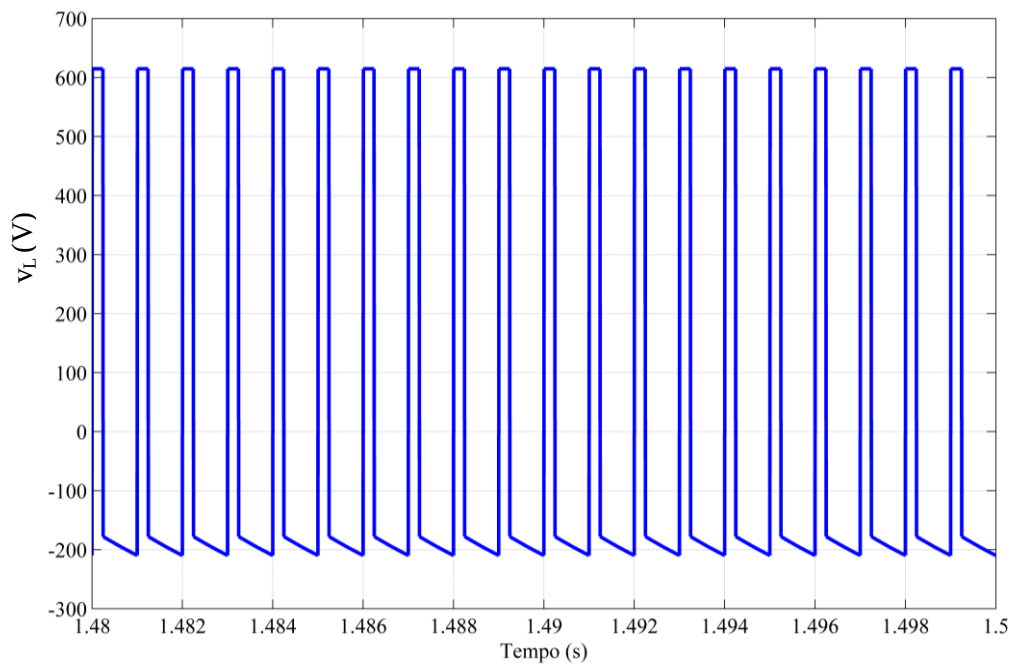


Figura 5.11: Tensione ai capi dell'induttanza del modello di convertitore DC/DC in modalità elevatore

Come si può notare gli andamenti nel modello sono simili a quelli mostrati nei capitoli precedenti. Si può quindi concludere che il modello, anche se sicuramente migliorabile, ha un comportamento che si avvicina a quello teorico.

5.2.2 Funzionamento da abbassatore del modello di convertitore DC/DC

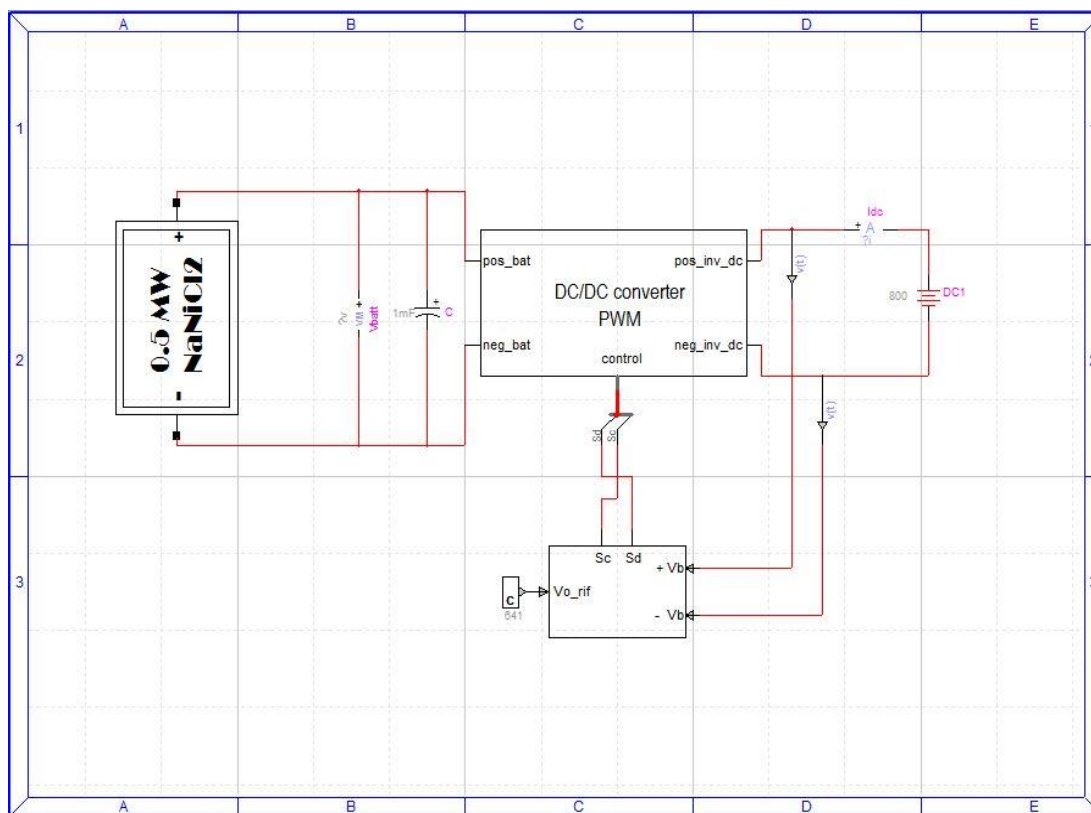


Figura 5.12: Modello del funzionamento buck del convertitore DC/DC

La Figura 5.12 mostra il modello costruito in EMTP-RV per simulare il funzionamento da abbassatore del convertitore DC/DC. Come carico è stata utilizzata l'unità di celle sodio-cloruro di nickel da 0.5MW da ricaricare. In questo caso, i valori dei parametri caratteristici del circuito sono i seguenti: $L=130$ mH, $C=1$ mF [22]. La frequenza di commutazione della PWM è, ancora una volta, di 1 kHz.

L'alimentazione del convertitore è costituita da un generatore di tensione costante, per semplicità, e il duty cycle è determinato sulla base della tensione di ricarica desiderata. Nel modello tale tensione è impostata a 641 V, corrispondenti ad una ricarica di 2.67 V/cella. tuttavia, in ingresso al blocco che modella la PWM si può avere una tensione di riferimento funzione del tempo o di altri parametri, a seconda delle esigenze. Questo permette, per esempio, di poter eseguire una carica inizialmente a corrente costante e, successivamente, a tensione costante; questa tecnica, infatti, rappresenta la classica modalità di ricarica delle batterie. Inoltre, la polarità dell'induttanza all'interno del convertitore è stata invertita, per permettere la validità delle equazioni di funzionamento.

Gli andamenti di corrente e tensione nell'induttanza, risultanti dalle simulazioni effettuate sono riportati in Figura 5.13 e 5.14.

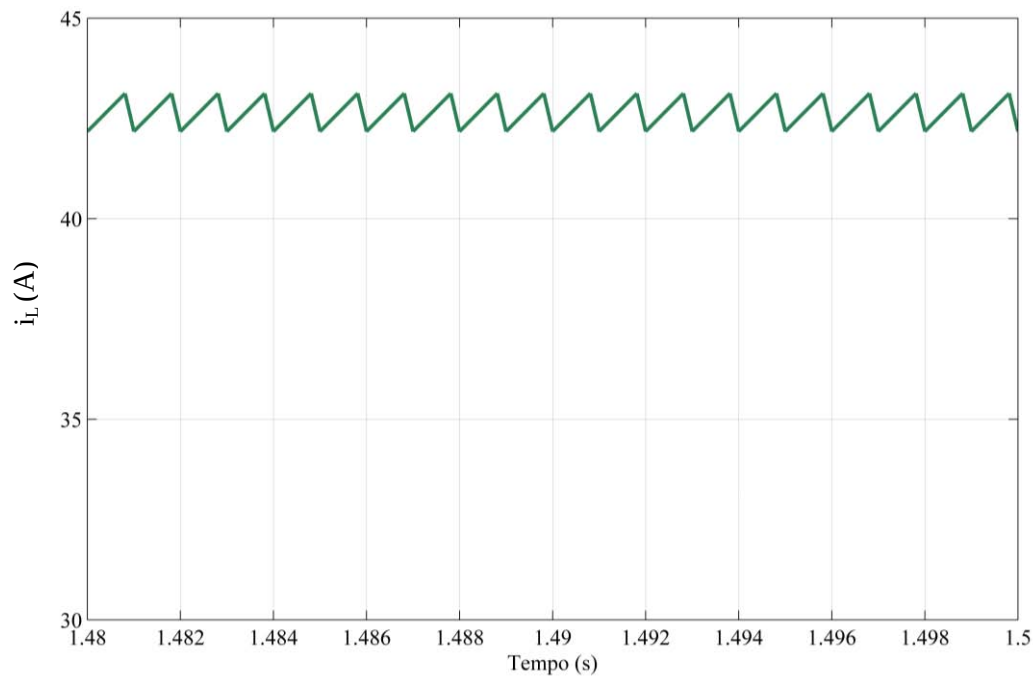


Figura 5.13: Corrente dell'induttanza del modello di convertitore nel funzionamento da abbassatore

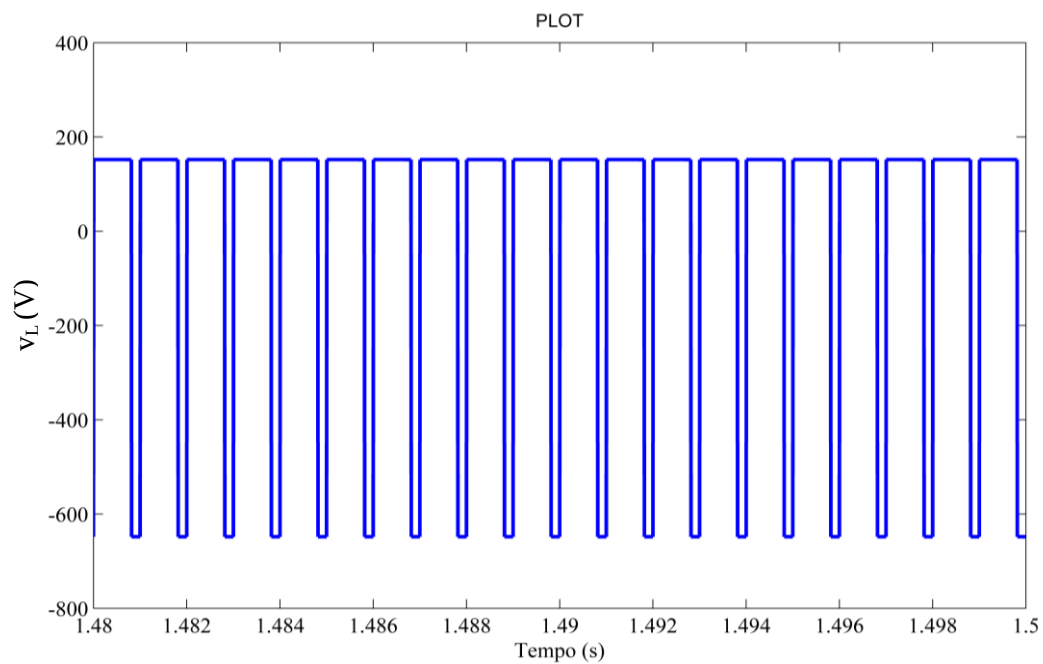


Figura 5.14: Tensione ai capi dell'induttanza del modello nel funzionamento da abbassatore

Anche in questo caso, come si può notare gli andamenti nel modello sono simili a quelli mostrati nei capitoli precedenti. Si può quindi concludere che il modello, anche se sicuramente migliorabile, ha un comportamento che si avvicina a quello teorico.

5.3 Convertitore DC/AC trifase a commutazione

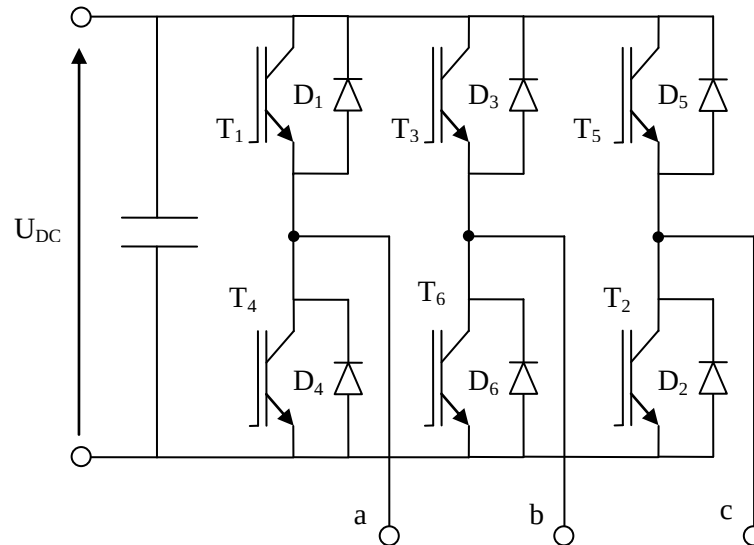


Figura 5.15: Convertitore trifase DC/AC a commutazione

Il convertitore DC/AC trifase a commutazione, mostrato in Figura 5.15, attua la conversione dalla tensione continua alla tensione alternata nel suo funzionamento da inverter [21]; viceversa nel funzionamento da raddrizzatore converte la tensione alternata in tensione continua. La potenza può fluire in entrambi i versi grazie alla commutazione ad elevata frequenza degli interruttori comandabili sia in apertura sia in chiusura, come per il convertitore DC/DC. La struttura solitamente utilizzata è quella a ponte, in cui i componenti comandabili sono disposti su rami in parallelo all'alimentazione in continua. Nel punto medio di ogni ramo viene estratto il morsetto per la fase corrispondente al fine di ottenere una tensione alternata all'altro lato.

Il comando di accensione e spegnimento di ogni interruttore comandabile viene gestito da una logica di controllo PWM che, analogamente a quanto detto per il convertitore DC/DC, permette di sintetizzare la tensione alternata a partire da una tensione continua. Essendo elevata la frequenza di commutazione dei dispositivi comandabili imposta dalla PWM le armoniche di tensione presenti nel lato alternata saranno di ordine elevato, essendo attorno alla frequenza di commutazione e ai suoi multipli. Questo aspetto va a vantaggio dei sistemi di filtraggio che sono maggiormente efficienti quando devono filtrare componenti ad alta frequenza. Di conseguenza, la soluzione migliore è quella di utilizzare i componenti che riescono a lavorare alla frequenza di commutazione più elevata possibile, tenendo conto però che ciò porta ad un aumento delle perdite per commutazione.

Per attuare una sintesi di una forma d'onda sinusoidale mediante la PWM si devono definire due parametri fondamentali:

- Rapporto di modulazione d'ampiezza: $m_a = \frac{V_{controllo}^{\wedge}}{V_{tri}^{\wedge}}$
- Rapporto di modulazione di frequenza: $m_f = \frac{f_s}{f_1} = \frac{T_1}{T_s}$

dove $V_{\text{controllo}}^{\wedge}$ è il valore di picco del segnale sinusoidale di riferimento, $V_{\text{tri}}^{\wedge}$ è il valore di picco dell'onda triangolare costituente la portante, e che definisce la frequenza di commutazione, f_s è la frequenza dell'onda triangolare, nonché la frequenza di commutazione, f_1 è la frequenza della componente fondamentale della tensione che si desidera avere in uscita, nonché quella della $v_{\text{controllo}}$.

W

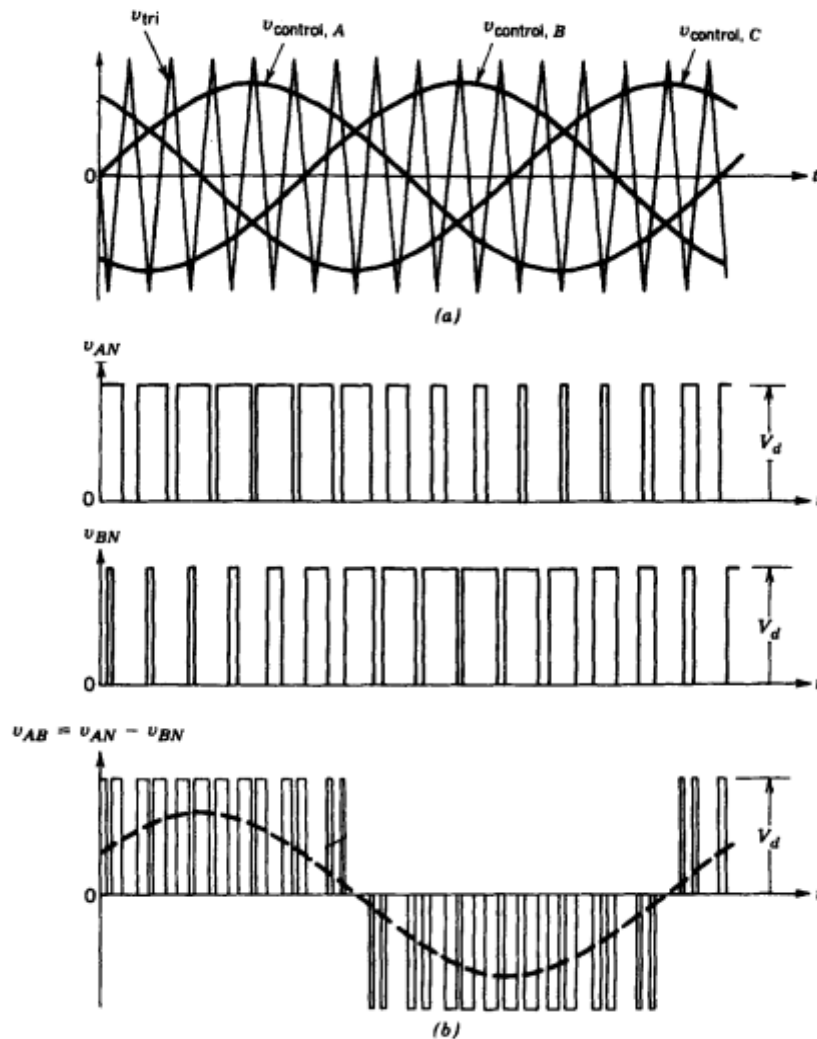


Figura 5.16: Forme d'onda nel convertitore trifase DC/AC [21]

Nei convertitori trifase si attua la logica di controllo a PWM unipolare, in cui ogni ramo è comandato da un corrispondente segnale diverso da quello degli altri rami. Come si può vedere in Figura 5.16, i segnali di controllo di ogni ramo $v_{\text{controllo}}$ sono tra di loro sfasate di 120° , al fine di ottenere nel lato continua tensioni sfasate di 120° . Il rapporto di modulazione della frequenza deve essere dispari e multiplo di 3. In questo modo le armoniche presenti sulla tensione concatenata in uscita dal convertitore saranno tutte dispari ad esclusione di quelle multiple di 3; utilizzando questo accorgimento si evita la presenza di sub-armoniche ed armoniche pari che portano a problemi di saturazione del circuito magnetico del trasfor-

matore. Inoltre, sul carico sembrerà di avere una frequenza di commutazione doppia rispetto a quella dei singoli rami.

La principale peculiarità del convertitore DC/AC è la grande modularità del suo funzionamento. Esso, infatti, permette di variare sia la frequenza sia l'ampiezza della tensione in uscita risultando, così, utile per un ampio campo di applicazioni. Variando ampiezza e fase del segnale modulante si va a variare anche l'ampiezza e la fase delle fondamentali delle tensioni sviluppate e, di conseguenza, si attua un controllo della potenza attiva e reattiva scambiate con la rete. È ben nota, infatti, l'influenza che queste hanno sulle grandezze caratteristiche di funzionamento della rete, quali frequenza (legata alla potenza attiva) e tensione (legata alla potenza reattiva).

La tensione ottenibile in uscita dal convertitore è funzione della modalità di funzionamento del convertitore stesso. Quando lavora in modalità lineare, ossia con $m_a < 1$, si ha:

$$V_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_{DC}$$

quando, invece, il convertitore lavora in sovramodulazione, $m_a \geq 1$:

$$\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} V_{DC} \leq V_{ab} \leq \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{DC}$$

In ogni caso, a meno di particolari situazioni, è sempre preferibile far lavorare l'inverter in modulazione lineare, in quanto il contenuto armonico è inferiore e le armoniche hanno ordine maggiore.

Nel lato DC la corrente assorbita presenterà armoniche attorno alla frequenza di commutazione e sarà assente la 2^a armonica. Per evitare cortocircuiti netti, dovuti alla contemporanea accensione sullo stesso ramo dei dispositivi comandabili, solitamente, si introduce un ritardo all'accensione che prende il nome di "tempo morto". Durante questo ritardo entrambi i componenti del ramo sono risultano aperti; il principale effetto si avrà sulla tensione ottenibile dal ramo, che sarà influenzata dalla durata del tempo morto e dal verso di corrente nel ramo. Se la corrente nel ramo è uscente (positiva), si ha una diminuzione del valore medio della tensione; mentre, se la corrente è entrante (negativa), si ha un aumento del valore medio della tensione. In generale, questo porta ad un aumento, e quindi peggioramento, del contenuto armonico e la fondamentale della tensione in uscita risulterà sfasata rispetto al caso di assenza di tempo morto.

I diodi inseriti in antiparallelo, come mostrato in Figura 5.15, servono per evitare sovratensioni ai capi degli interruttori comandabili dovute all'apertura di questi, permettendo la circolazione della corrente imposta dalle induttanze presenti nel lato alternata del convertitore.

5.4 Modellizzazione del convertitore DC/AC trifase tramite software EMTP-RV

Il modello costruito in EMTP-RV, visibile in Figura 5.17, è basato sulla classica struttura presentata precedentemente, i cui componenti fondamentali sono i diodi e i dispositivi comandabili in apertura e chiusura.

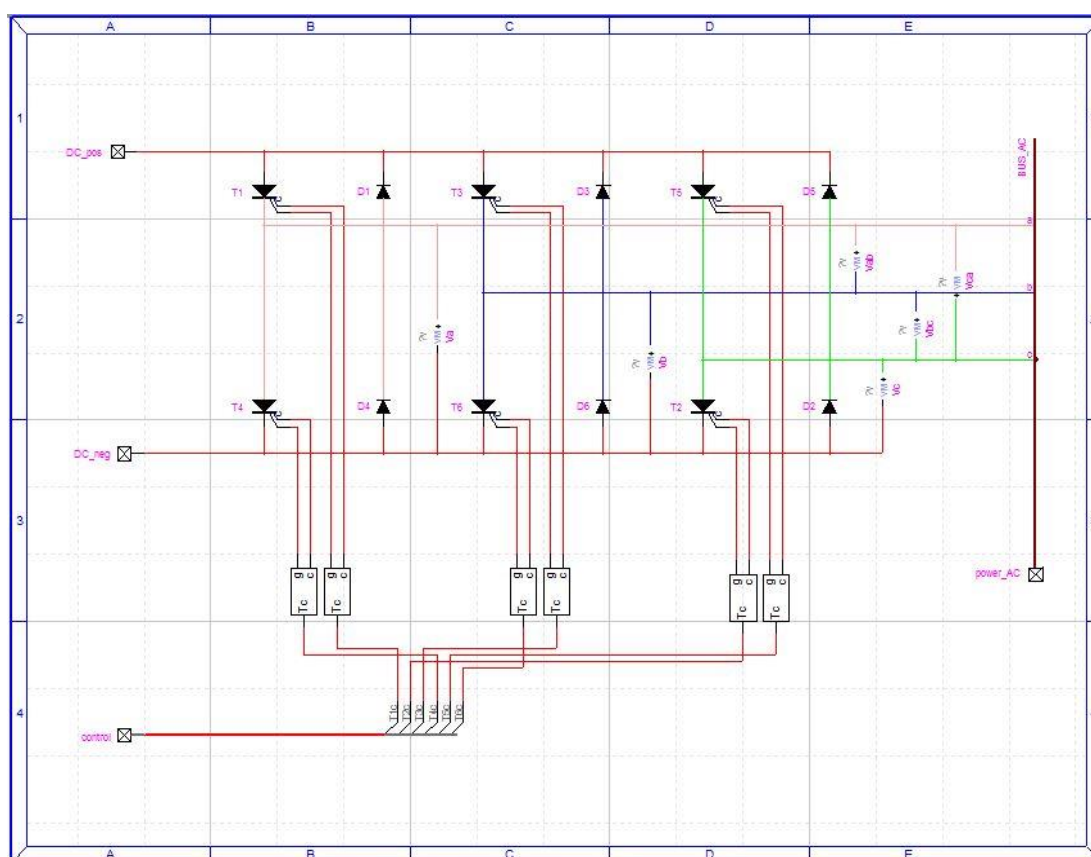


Figura 5.17: Modello convertitore DC/AC a commutazione trifase

Come si può notare, i componenti comandabili e il blocco di comando sono gli stessi usati nel convertitore DC/DC. Tutti i segnali di comando sono raggruppati in unico segnale, denominato nel modello “control”, e riceveranno in ingresso il segnale uscente dal blocco che modella la PWM. Mentre, le tre fasi di uscita del convertitore sono raccolte in un unico collegamento denominato BUS AC, a cui verranno collegate, nel rispettivo pin presente nel blocco di rappresentazione del convertitore, le tre fasi della rete che starà a valle.

La tecnica di pilotaggio del convertitore DC/AC è, come già precedentemente detto, la PWM, in cui tramite il confronto di una tensione sinusoidale di riferimento con una forma d’onda ripetitiva triangolare si definiscono gli istanti di apertura e di chiusura dei vari dispositivi comandabili.

La Figura 5.18 mostra il modello creato in EMTP-RV per la costruzione della PWM. Sono stati utilizzati tre generatori di segnale, rappresentanti le tre $v_{controllo}$, il cui segnale di uscita viene moltiplicato per il rapporto di modulazione dell’ampiezza m_a , che viene imposto da un segnale esterno. Il risultato del prodotto entra nel blocco che modella la forma d’onda ri-

petitiva triangolare (presenta nella libreria di EMTP-RV) e che da come uscita la PWM. L'operatore può impostare, secondo la propria necessità, il valore desiderato della frequenza di commutazione, ricordandosi di impostarlo uguale per tutti i blocchi della PWM(triang). È, inoltre, possibile impostare il valore di picco dell'onda triangolare e la tipologia di interpolazione desiderata, potendo scegliere tra interpolazione lineare e interpolazione a gradini.

Poiché, agli interruttori comandabili T4,T6,T2 devono arrivare segnali inversi rispetto a quelli, rispettivamente, di T1,T3,T5, è stato inserito per questi un blocco che esegua questa funzione. Tale funzione, impostata come $1-u[1]$ (forma di scrittura richiesta dal software per l'interpretazione corretta) permette, ad esempio, di inviare un segnale 0 (spegnimento) a T4 quando T1 è nello stato 1 (accensione), e viceversa.

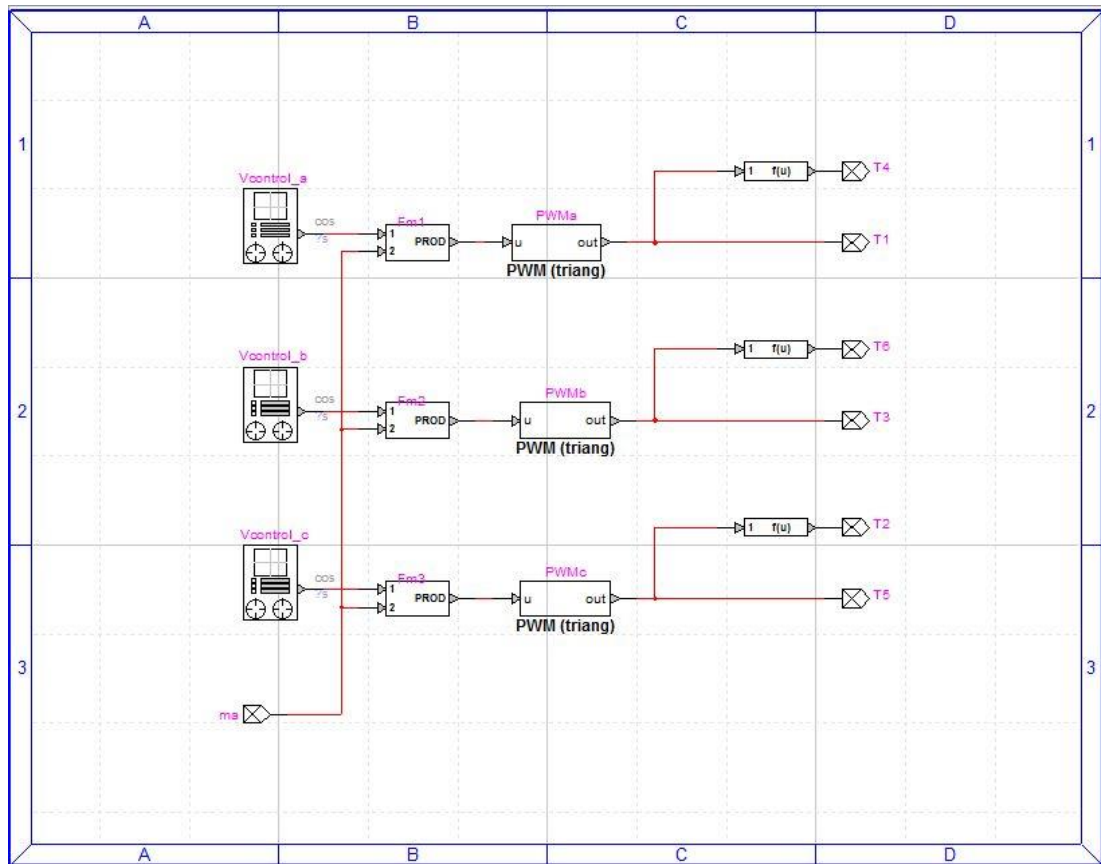


Figura 5.18: modello PWM convertitore DC/AC trifase a commutazione

Un esempio di quanto ottenuto durante una simulazione del funzionamento del modello del convertitore DC/AC, con $m_a=1$ e le tre fasi individuabili in tre colori diversi, è mostrato in Figura 5.19. La frequenza dell'onda ripetitiva triangolare è di 1050 Hz ($m_f=21$) e il suo valore di picco impostato pari a uno.

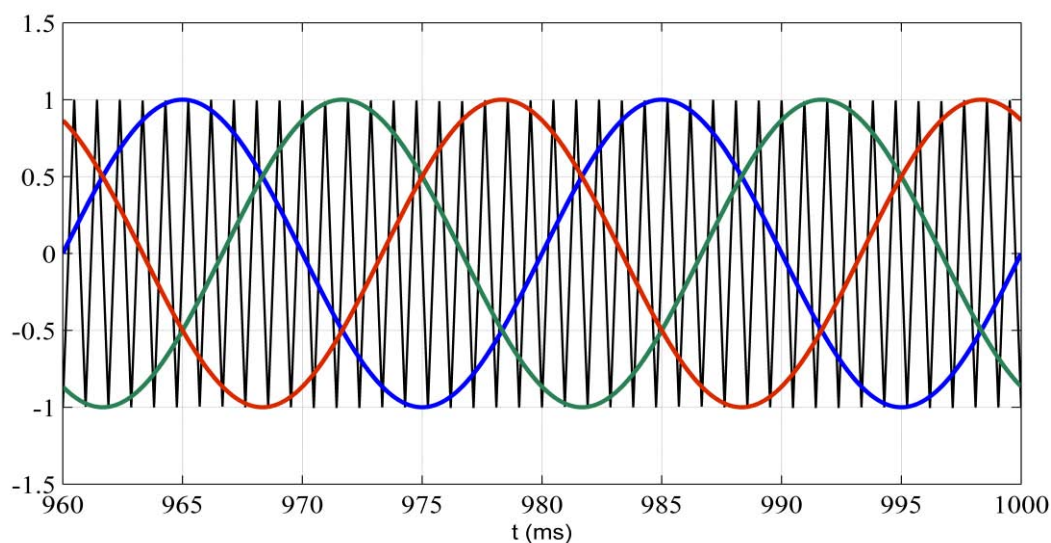


Figura 5.19: Risultato PWM convertitore DC/AC trifase a commutazione

I modelli creati, ai fini della loro validazione, necessitano di prove di simulazione nelle varie casistiche di funzionamento. Un esempio è riportato in Figura 5.20; essa mostra il modello costruito in EMTP-RV, in cui l'alimentazione è costituita da un generatore di tensione continua, di ampiezza 800 V, ed il carico è costituito da una rete trifase equivalente. Inoltre, come si può vedere, è presente il condensatore di filtro, ipotizzato di capacità $1\mu\text{F}$.

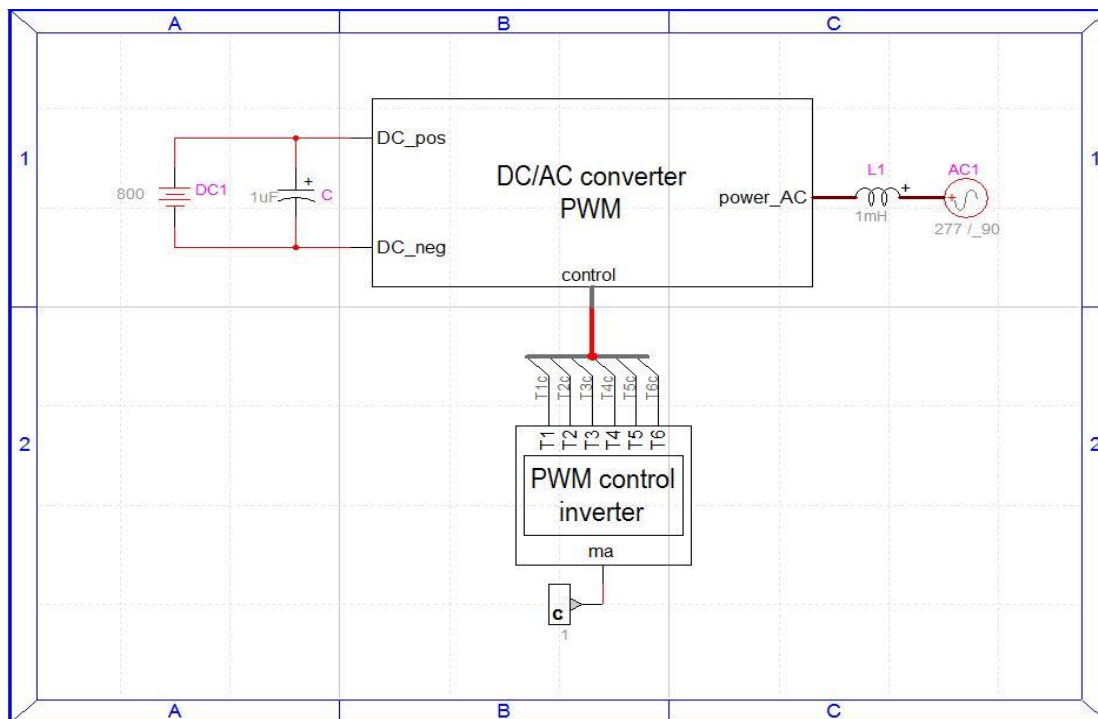


Figura 5.20: Modello in EMTP-RV per la validazione del modello del convertitore DC/AC

I risultati delle simulazioni effettuate sul modello di Figura 5.20 sono visibili in Figura 5.21,5.22,5.23 che mostrano rispettivamente la tensione di fase v_{an} , la tensione v_{aN} e la tensione concatenata v_{ab} .

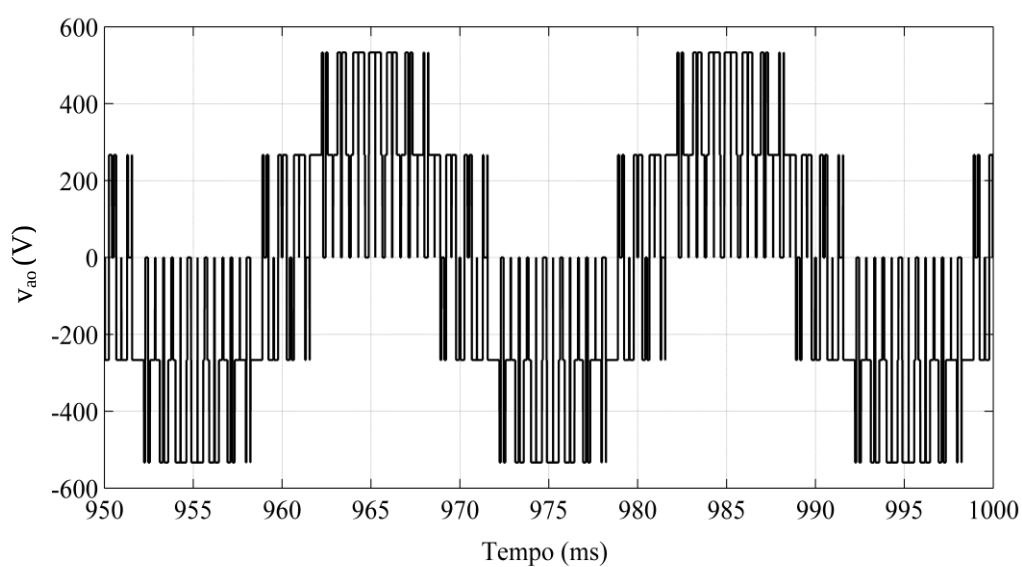


Figura 5.21: Tensione v_{an} in uscita dal modello del convertitore DC/AC

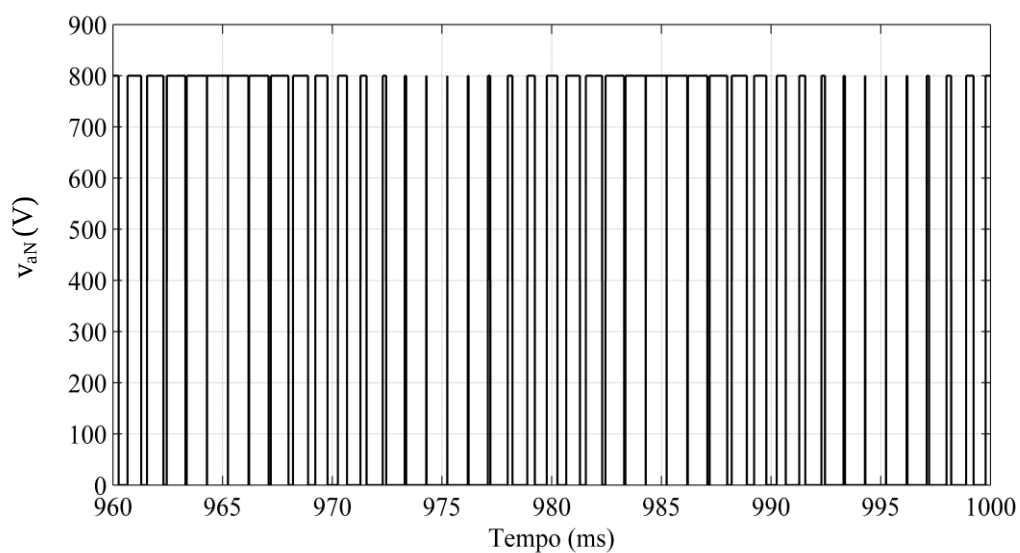


Figura 5.22: Tensione v_{aN} in uscita dal modello del convertitore DC/AC

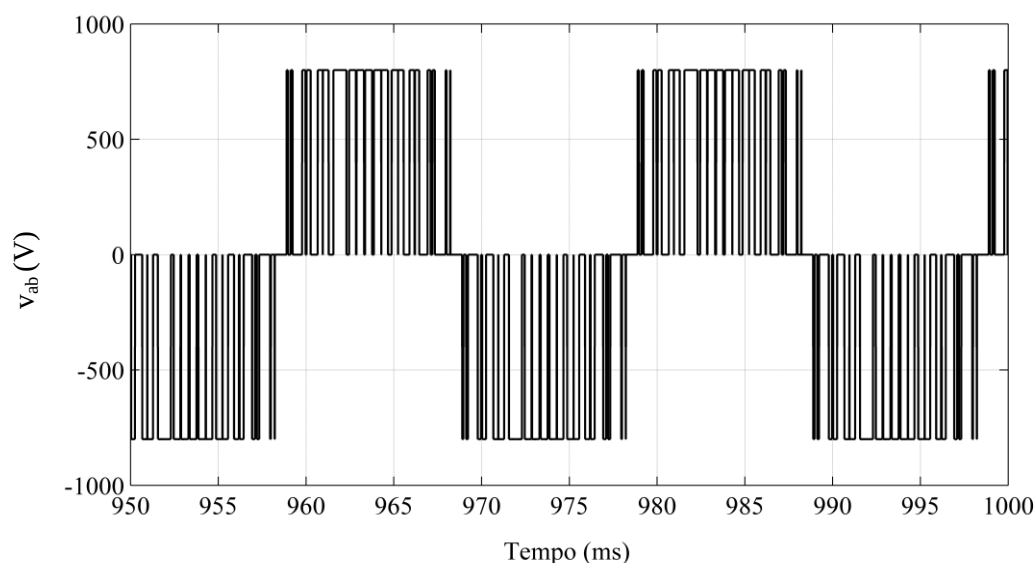


Figura 5.23: Tensione concatenata in uscita dal modello del convertitore DC/AC

Unendo i modelli creati in EMTP-RV delle unità di celle, del convertitore bidirezionale DC/DC a commutazione e del convertitore DC/AC trifase a commutazione si può creare il modello del layout classico di un sistema di accumulo elettrochimico dell'energia elettrica. In Figura 5.24 e 5.25 vengono riportati, rispettivamente, i modelli dei sistemi di accumulo per l'unità di celle sodio-zolfo da 1.2MW e per l'unità di celle da 0.5 MW di celle sodio-cloruro di nickel. Va fatto notare, che in tali modelli mancano i due stadi di trasformazione BT/MT e MT/AT, che potranno essere inseriti, in futuro, per ulteriori approfondimenti e per altre trattazioni che mirino allo studio degli effetti dei sistemi di accumulo sulle reti.

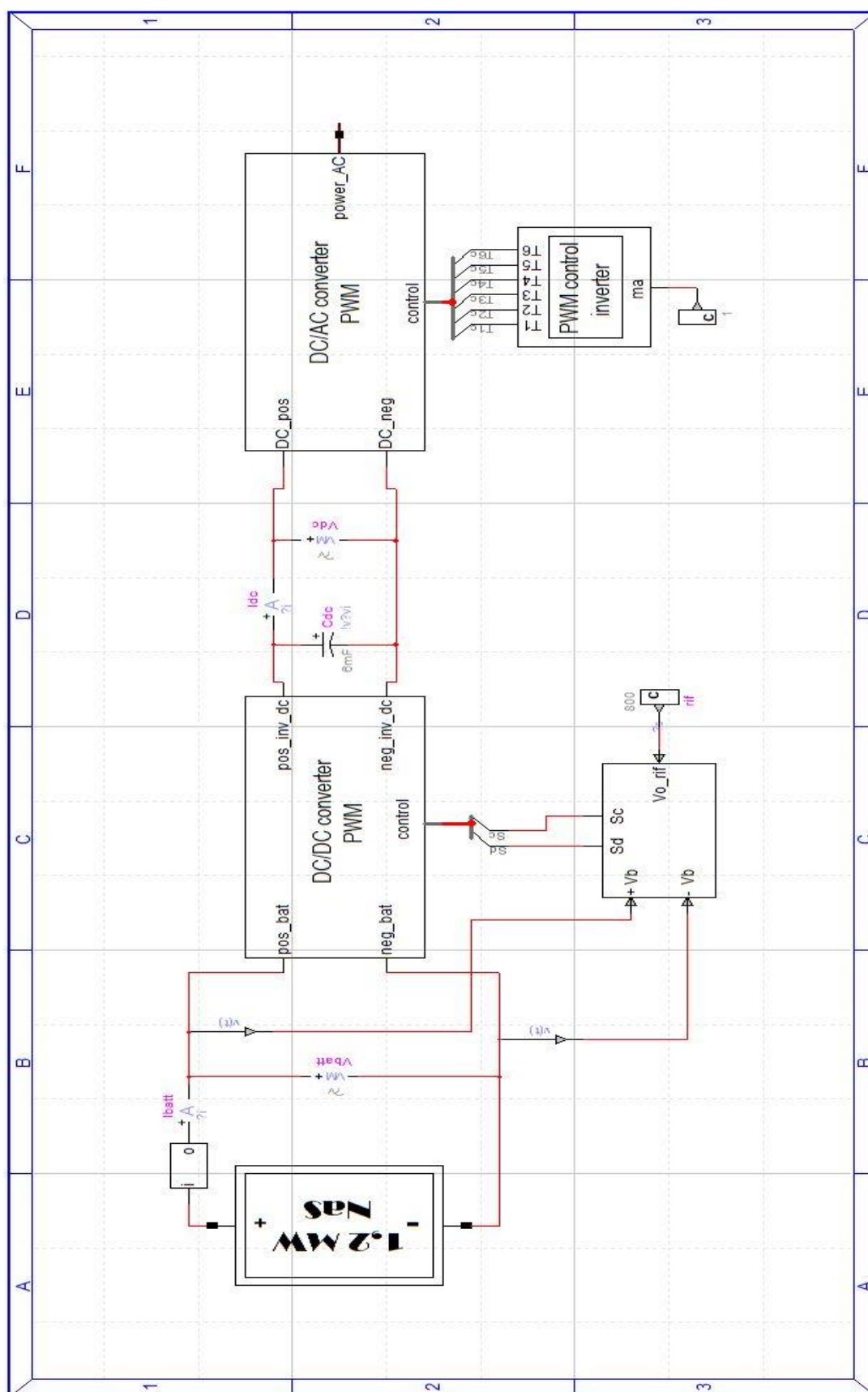


Figura 5.24: Layout sistema di accumulo con unità di celle sodio-zolfo

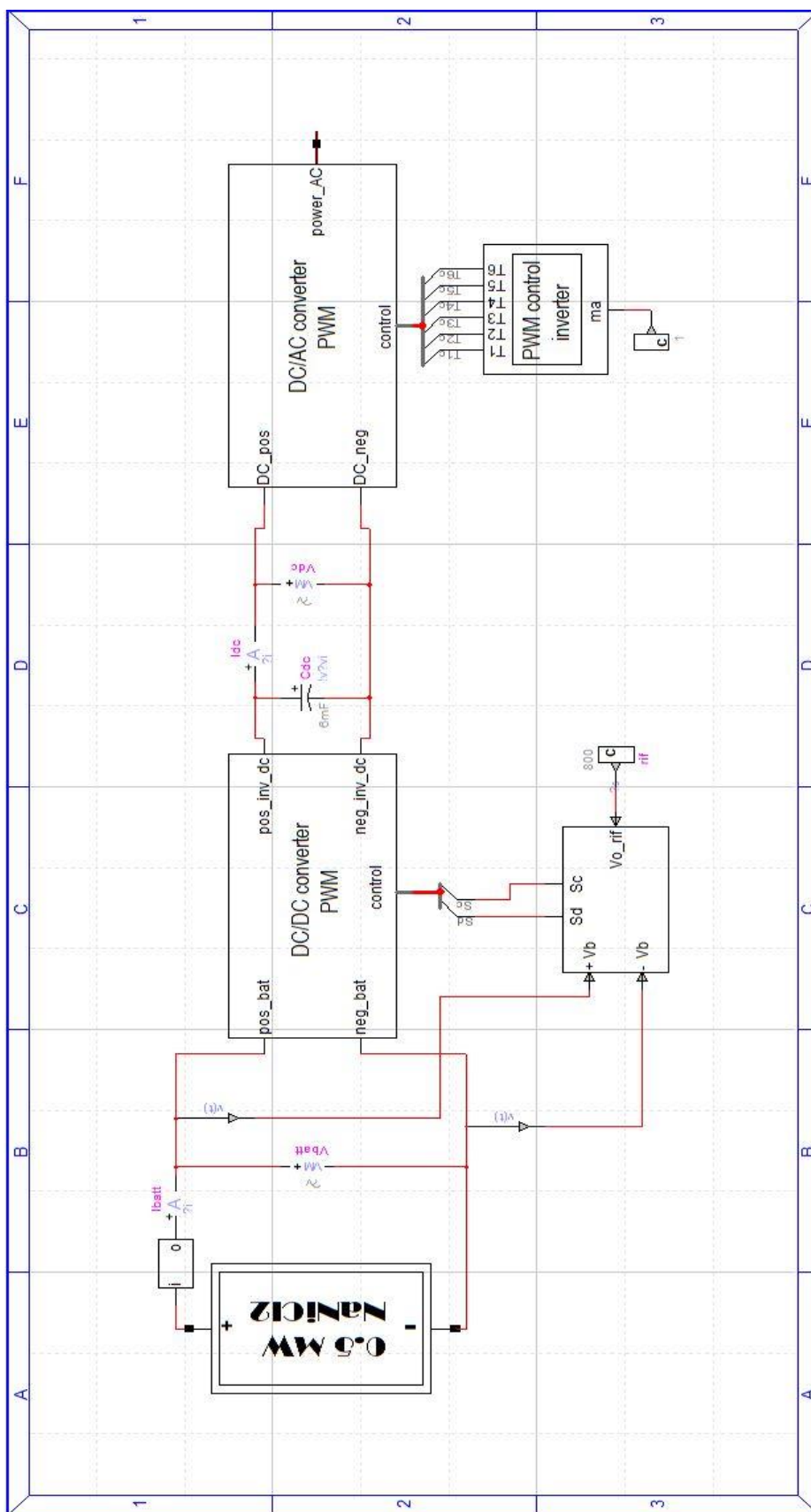


Figura 5.25: Layout sistema di accumulo con unità di celle sodio-cloruro di nickel

Capitolo 6

Conclusioni

Il lavoro presentato in questo documento ed, in particolar modo, i modelli sviluppati rappresentano un primo importante avvicinamento alla modellizzazione di elementi circuitali, quali sono le celle Na-Beta, fortemente non lineari ai fini dello studio ed analisi degli effetti benefici che queste possono portare alla rete di trasmissione, o in altri campi di applicazione.

I modelli presentati in questa trattazione, rappresentativi del comportamento in modo semplificato del comportamento delle celle e dei sistemi di conversione, possono essere modificati andando a considerare alcuni elementi di influenza sul funzionamento dei sistemi di accumulo nel loro complesso.

I modelli delle celle qui mostrati, infatti, non tengono conto, ad esempio, dell'effetto della temperatura sulla tensione a circuito aperto e sulle resistenze interne; in particolare il valore di quest'ultima subisce una notevole influenza dalla temperatura, che gioca un ruolo fondamentale durante i vari regimi di funzionamento. Inoltre, un modello più complicato può essere sviluppato inserendo all'interno del modello stesso un condensatore, di capacità da determinare, che tenga conto della sovra-caricabilità delle celle sodio-cloruro di nickel e di fenomeni transitori che si presentano in particolare nei primi istanti di inserimento delle unità di celle Na-Beta.

Nel modello sviluppato non è stata considerata la presenza del BMS (battery management system) che, tenendo sotto controllo alcune grandezze caratteristiche delle celle, interviene ai fini del ristabilimento delle condizioni di normale funzionamento in caso di necessità.

Miglioramenti possono essere apportati ai sistemi di conversione ed, in modo particolare, alla parte di pilotaggio e controllo.

Tuttavia, tenendo conto che la modellizzazione è stata effettuata sulla base di dati reperibili in letteratura e non avendo potuto effettuare prove sperimentali direttamente sugli elementi componenti i sistemi di accumulo analizzati, i modelli creati rappresentano un primo soddisfacente approccio all'analisi del comportamento delle celle e la loro integrazione con i sistemi di conversione, a completare la struttura dei sistemi di accumulo. Quest'ultimi, infatti, svolgeranno un ruolo fondamentale nell'immediato futuro per la sicurezza e stabilità del sistema elettrico; potranno ricoprire, successivamente, compiti di ancor più fondamentale importanza ai fini dell'integrazione completa degli impianti a fonte rinnovabili, con lo scopo di avere, in futuro, un sistema elettrico più affidabile, maggiormente efficiente e più sostenibile da un punto di vista economico, ambientale e sociale.

Appendice A

Guida all'uso di EMTP-RV

Con lo scopo di rendere maggiormente comprensibile quanto visto precedentemente ed aiutare chi si volesse avvicinare alla modellizzazione delle celle di accumulo elettrochimico e dei sistemi di conversione si presenta, di seguito, una breve guida. In particolare, si vogliono mettere in evidenza i blocchi maggiormente distintivi, che richiedono una particolare attenzione. Si riportano dapprima le spiegazioni in lingua inglese reperibili nel “rule book”[23].

A.1 Modello di cella

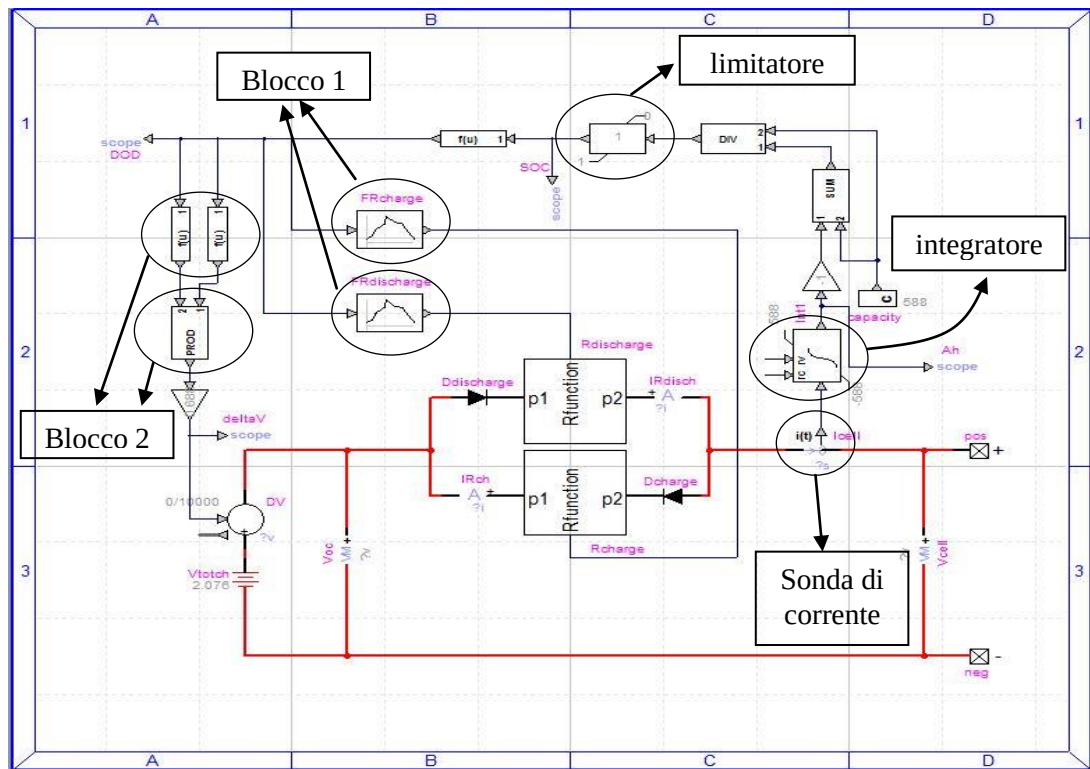


Figura A.1: Modello di una cella con blocchi particolari in evidenza

In riferimento alla figura A.1 si descrivono i seguenti blocchi:

Blocco 1

“ This device applies the specified table function to its input.
The function is specified as a lookup table. Staircase and linear

interpolation may be applied to the table entries. This device has two signal pins:

pin	description	value when unconnected
in	input	0
out	output	as calculated

The function is defined in the form of a lookup table of $(x, f(x))$ value pairs. The number of value pairs is arbitrary. The lookup values will be interpolated between the specified value points, using staircase or linear interpolation as specified by the user. Selection options for the history value of the output signal:

option	value	rules
zero	Inherit from input	
constant value	history(t) = user-defined value	any value, 0 means inherit, use 0.0 to get 0.
function value	history(t) = user-defined function	constant or $f(t)$

Setting the scope flag enables monitoring of the output signal during the simulation.

During the simulation, the output value of this device is calculated at successive instants t at intervals Δt . Between these simulation instants, the output value can be set to vary in one of two modes, ramped or stepped:

mode	output value between $t-\Delta t$ and t^-	value at t^-	value at t
ramped	interpolated linearly between values $out(\Delta t-t)$ and $out(-t)$	calculated at t^-	calculated at t
stepped	remains at $out(t-\Delta t)$	remains at $out(t-\Delta t)$	calculated at t

In the time-domain calculation at $t > 0$, the output value is calculated as follows: $out(t) = f(in(t))$

In the steady-state calculation at $t = 0$, the output value is calculated as follows: if history is defined $out(0) = history(0)$ else $out(0) = f(in(0))$.

Va posta particolare attenzione alla scelta dell'interpolazione da usare, una volta inseriti i valori di x e di $f(x)$. Le possibilità sono 2: interpolazione lineare ed interpolazione a gradini. Nel primo caso in uscita dal bocco si avrà una variazione lineare tra il valore precedente ed il successivo, mentre nel secondo caso l'uscita rimane costante variando a gradino nel momento in cui si passa al valore di ascissa successivo preimpostato. In questa trattazione è stata sempre scelta l'interpolazione lineare in quanto più si avvicina alle richieste. Un esempio di quanto fatto è riportato in Figura A.2.

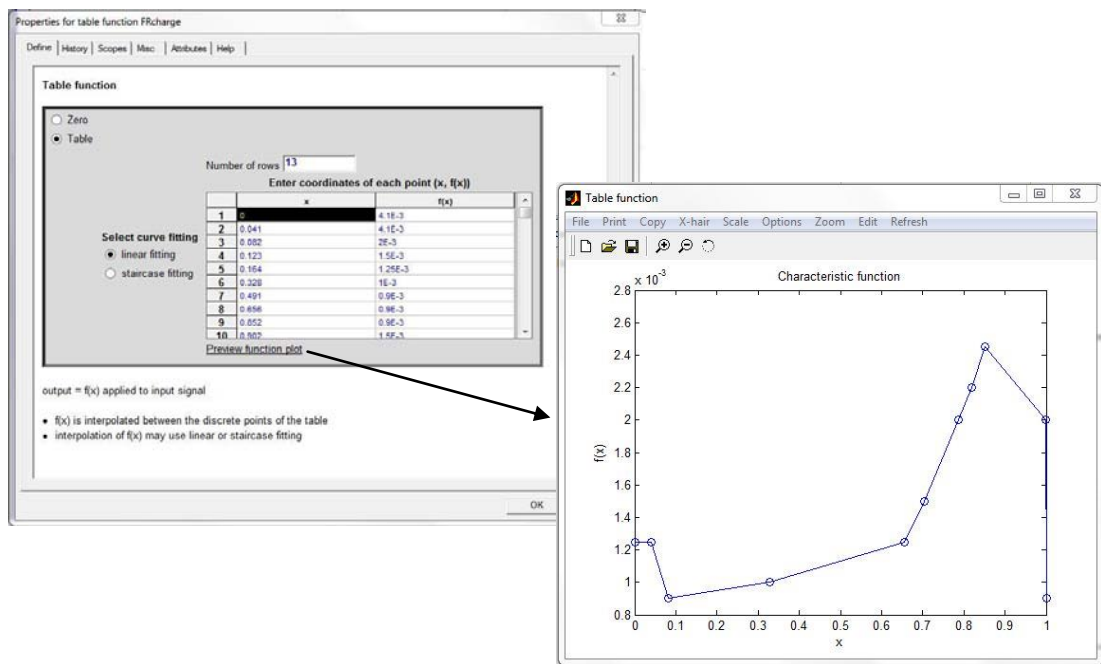


Figura A.2: Schermata definizione valori del blocco 1

Blocco 2

“This device applies the specified function to its inputs. The number of inputs is arbitrary, and can be zero. The function may be defined arbitrarily by the user, or selected from a list of pre-defined functions. User-defined functions may refer to simulation variables such as the value of time or time-step, and to the value of the applied input signals. This device has one or more signal pins:

pin	description	value when unconnected
in1	input 1	0
...	more inputs	0
out	output	as calculated

When selecting a pre-defined function, the function is considered to be applied to all inputs of the function. Some of the pre-defined functions require a specific number of inputs, while others work with a list of any number of inputs. When selecting a pre-defined function, the drawing of the function is automatically modified according to the selection. The following pre-defined functions are available:

function	description	output value
NOT	not	Out=NOT(in>0)
AND	and	Out=(in1>0) AND (in2>0) AND ...
OR	or	Out=(in1>0) OR (in2>0) OR ...
XOR	exclusive or	Out=(in1>0) XOR (in2>0) XOR ...
NAND	not and	Out=(in1>0) NAND (in2>0) NAND ...
NOR	not or	Out=(in1>0) NOR (in2>0) NOR ...

function	description	output value
RECIP	multiplicative inverse	when in(t)=0 then out=infinity else out=1/in
ABS	absolute value	Out=abs(in)
SQRT	square root	out=sqrt(in)
EXP	exponential	Out=e^in
LOG	base-e logarithm	Out=log _e (in)
LOG10	base-10 logarithm	Out=log ₁₀ (in)
DEG	radians to degrees	Out=in*180/π
RAD	degrees to radians	Out=in*π/180
SUM	sum	Out=in1+in2+...
PROD	product	Out=in1*in2*...
MIN	minimum	Out=min(in1, in2, ...)
MAX	maximum	Out=max(in1, in2, ...)
NORM	Euclidian norm	Out=sqrt(in1 ² +in2 ² +...)

function	output value
SIN	Out=sin(in)
COS	Out=cos(in)
TAN	Out=tan(in)
COTAN	Out=cotan(in)
ASIN	Out=sin ⁻¹ (in)
ACOS	Out=cos ⁻¹ (in)
ATAN	Out=tan ⁻¹ (in)
SINH	Out=sinh(i)
COSH	Out=cosh(in)
TANH	Out=tanh(i)

User-defined functions are arbitrary expressions written according to the expression syntax rules.

Selection options for the history value of the output signal: zero, constant value and function value.

Setting the scope flag enables monitoring of the output signal during the simulation.

During the simulation, the output value of this device is calculated at successive instants t at intervals Δt . Between these simulation instants, the output value can be set to vary in one of two modes, ramped or stepped.

In the time-domain calculation at $t > 0$, the output value is calculated as follows: out(t)=f(t,in1(t),in2(t),...)

In the steady-state calculation at $t=0$, the output value is calculated as follows: if history is denied, out(0)=history(0), else out(0)=f(t, in1(t), in2(t),...)."

I principali vantaggi dell'utilizzo di questo blocco della libreria sono la possibilità di impostare il numero di ingressi desiderati, possibilità impostare la funzione predisposta desiderata oppure di crearne una da sé. Va fatta attenzione che quando si imposta una funzione di

“verifica”, ad esempio $u[1] < u[2]$, l’uscita sarà pari ad uno quando la relazione è verificata, zero quando non lo è. Di conseguenza, il blocco può essere usato anche come comparatore.

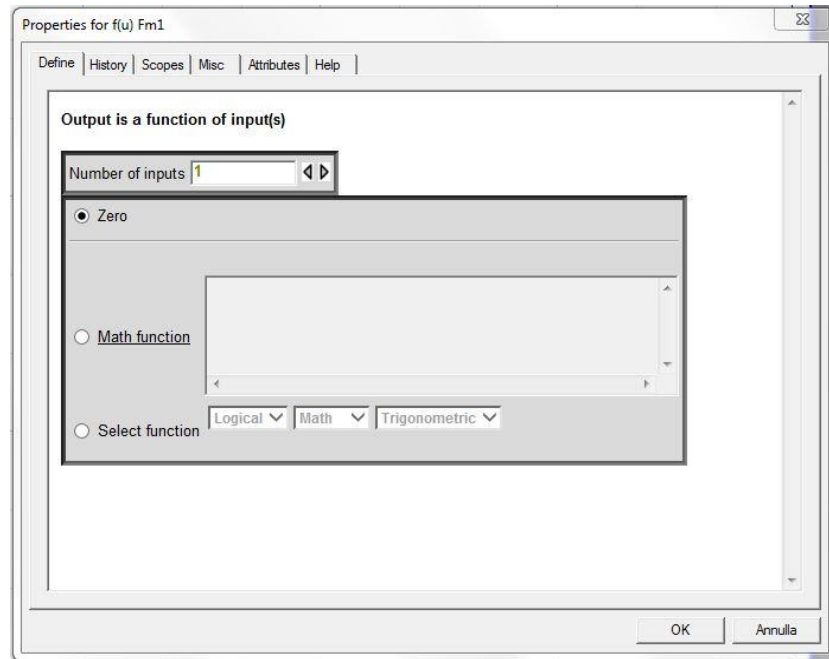


Figura A.3: Schermata del Blocco 2

“Control device data expressions can use the following unary and binary operators:

<i>operator</i>	<i>description</i>	<i>use example</i>	<i>priority</i>	<i>type</i>
+	unary plus	+x	8	unary left
-	unary minus	-x	8	unary left
**, ^	power	x ** y	7	binary
MODULO	modulo	x MODULO y	7	binary
ATAN2	atan2	y ATAN2 x	7	binary
*	multiply	x * y	6	binary
/	divide	x / y	6	binary
+	add	x + y	5	binary
-	subtract	x - y	5	binary
==, .EQ.	is equal	x == y	4	binary
/=, ~=, .NE.	is equal	x ~= y	4	binary
>=, .GE.	is greater or equal	x >= y	4	binary
>, .GT.	is greater	x > y	4	binary
<=, .LE.	is less or equal	x <= y	4	binary
<, .LT.	is less	x < y	4	binary
NOT, ~, .NOT.	unary logical not	~x	3	unary left
AND, .AND.	logical and	x AND y	2	binary
NOR	logical nor	x NOR y	2	binary
OR, .OR.	logical or	x OR y	1	binary
NAND	logical nand	x NAND y	1	binary
XOR	logical xor	x XOR y	1	binary
(	start sub-expression	(expr)	0	unary left
)	end sub-expression		0	unary right

parentheses can be used for modifying the default precedence order

in the absence of parentheses, operators with higher precedence are applied first

ex: $a * -b + c$ is calculated as $(a*(-b)) + c$

conversion between numerical and logical value is applied automatically as needed

>0	is converted to	true
<=0	is converted to	false
true	is converted to	1
false	is converted to	0.”

Cliccando su math function appare una finestra in cui vengono spiegate le modalità di scrittura necessarie per rendere comprensibile al blocco la funzione desiderata.

A.2 Modello dei convertitori

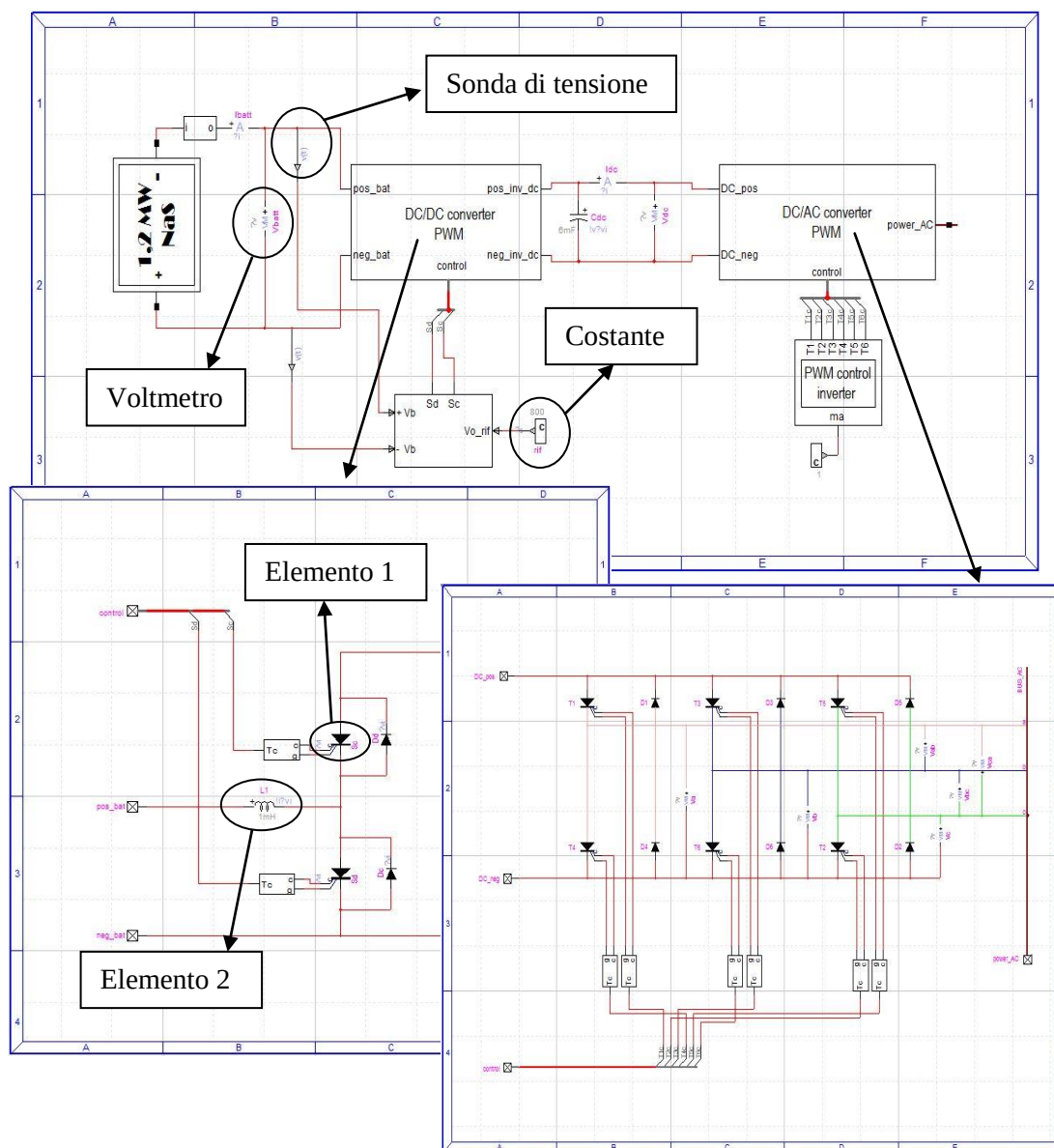


Figura A.4: Modello sistema di accumulo e sotto-circuiti modelli convertitori

In figura A.4 si mostra la composizione del sistema di accumulo nel suo complesso e i sotto-circuiti corrispondenti ai modelli dei convertitori. In particolare, all'interno di quest'ultimi sono stati usati:

Elemento 1: Dispositivo comandabile in apertura e chiusura

“This device is an ideal switch type device. It has a zero resistance and zero voltage drop when closed and infinite resistance when open. It is a 1-phase device.

The parameters from the data tab are:

- V_{ig} is the ignition voltage, the minimum voltage required for firing the thyristor. This voltage should be greater than 0.
- I_{hold} is the holding current. The thyristor stops conducting when its current falls below this value or crosses 0 when $I_{hold}=0$. This value is greater or equal to 0.
- t_{deion} is the thyristor de-ionization time. When the thyristor stops conducting it becomes de-ionized after a wait time of t_{deion} . If the thyristor voltage becomes positive while the thyristor is still ionized, the thyristor will turn back on again.
- Closed at $t=0$

This option is used for initializing the simulated network in steady-state solution. When this option is checked the thyristor is closed in the steady-state solution and its symbol color changes to green.

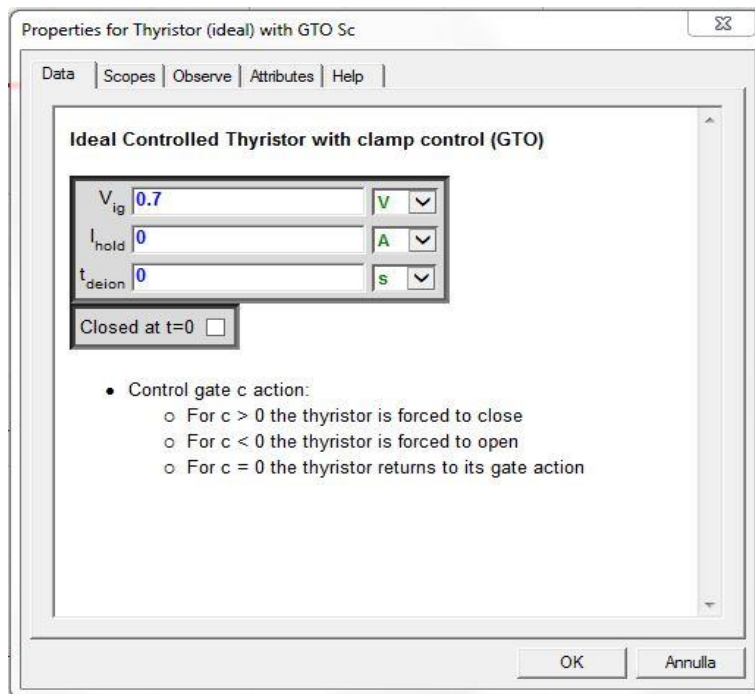


Figura A.5: Impostazioni da definire sul dispositivo controllato in accensione e spegnimento

The control signal action connected to the gate pin is to fire the thyristor when it becomes greater than 0 and the $V_{ig}>0$. When the c-pin is present then the control signal c action is:

- o for $c>0$ the thyristor is forced to close
- o for $c<0$ the thyristor is forced to open
- o for $c=0$ the thyristor returns to its gate action

This is a 1-phase device and it is not allowed to change its pin attributes. It is not allowed to delete any pins.

This is an ideal device. Placing several thyristors in parallel is acceptable if the thyristors are not closed at the same time. When paralleled thyristors are closed at the same time, mathematically impossible conditions will result and EMTP will try to solve such cases by inserting dummy resistances.

If the thyristor is closed at $t=0$, it is modeled as an ideal closed switch. It is an open-circuit otherwise.

Similar to the steady-state. The thyristor is modeled by an ideal closed (zero resistance) switch when conducting and by an ideal infinite resistance open switch when turned off.”

Particolare attenzione va posta, oltre ai valori da impostare come secondo Figura A.4, anche a come si andrà a comandare il componente, con riguardo alla possibile influenza del pin di gate che interviene qualora nel pin di comando c entri un segnale nullo. È molto interessante la possibilità di andare a visualizzare, una volta completata la simulazione, i valori di tensione e corrente caratteristici del suo funzionamento, e di impostare inizialmente chiuso il dispositivo, permettendo l’inizializzazione delle simulazioni e la scomparsa di errori dovuti alla presenza di punti flottanti.

Elemento 2: Induttanza

All’interno della libreria di EMTP-RV questo elemento circuitale riferisce ad un elemento serie RLC in cui resistenza ed induttanza sono nulli.

“The RLC device accepts both 1-phase (general) and 3-phase signals. The 3-phase version is the equivalent of 3 decoupled branches (one for each phase).

When the device is in its 1-phase state and its signal is changed to 3-phase, but the device is not double-clicked, balanced conditions are assumed and the 1-phase quantities are automatically propagated to the new phases. The Netlist is generated for the 3-phase version.

When the device is in its 3-phase state and its signal is changed to 1-phase, but the device is not double-clicked, phase-quantities are automatically retained for the 1-phase version. The Netlist is generated for the 1-phase version. The generic version of RLC has one or two pins. When only one pin is present, the ground node GND is assumed for the other pin. At least one parameter, R, L or C should be non-zero. It is allowed to create a short-circuit branch by setting R, L and C to zero. Although EMTPWorks sends a warning when such a condition is encountered, it can still accept it by automatically replacing the shorted branch by an ideal closed switch. In some situations this can create degenerate numerical conditions, so users must be careful when creating short-circuits. Only the m-pin can be deleted to create an automatic ground connection. Any pin can be connected to ground. The standard library also provides separate R, L and C only versions of RLC. There are also other combinations, such as R-L or L-C.

The generic rule is that any version of RLC cannot create a short-circuit in the network. The Netlist syntax does not change.

The RLC device is represented in steady-state for automatic harmonic initialization and frequency scan solutions. The steady-state models the RLC device as an impedance at the given frequency:

$$Z_{RLC} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

Automatic initial conditions are found from the steady-state solution. Manual initial conditions can be provided for the inductance current and the capacitor voltage. In the frequency scan model the branch impedance is found at each frequency. In the time-domain the device is discretized according to the integration time-step and solved at each simulation time-point.”

Il modello dell'induttanza fa riferimento ad un modello RLC serie in cui R e C sono nulli, mentre va impostato il valore di L e la corrente iniziale i_0 , come si può vedere in Figura A.6

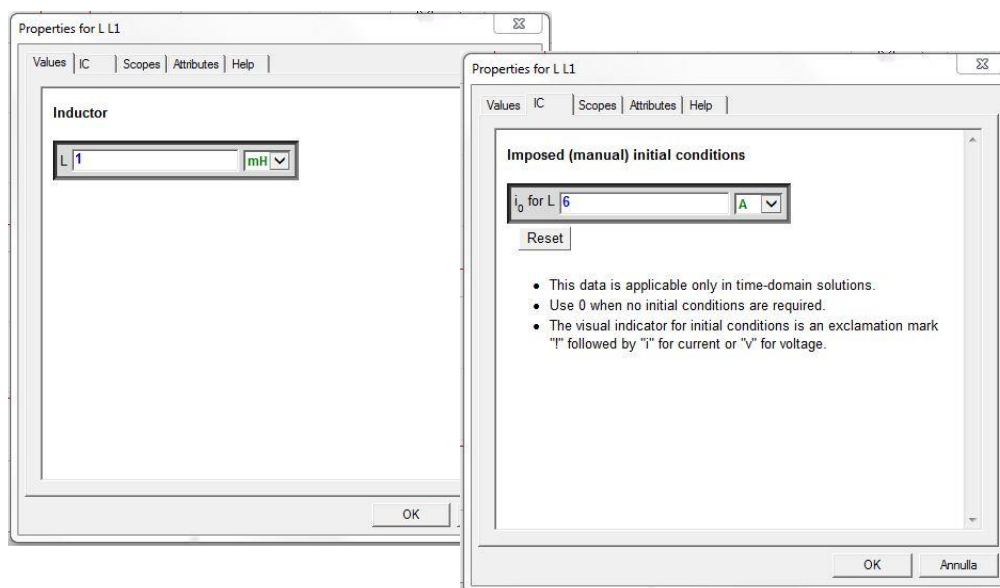


Figura A.6: Impostazioni del blocco dell'induttanza in EMTP-RV

Le stesse operazioni eseguibili sull'induttanza, sono possibili per eventuali condensatori, con la differenza che per quest'ultimi si può impostare il valore iniziale della tensione.

A.3 Modello di PWM

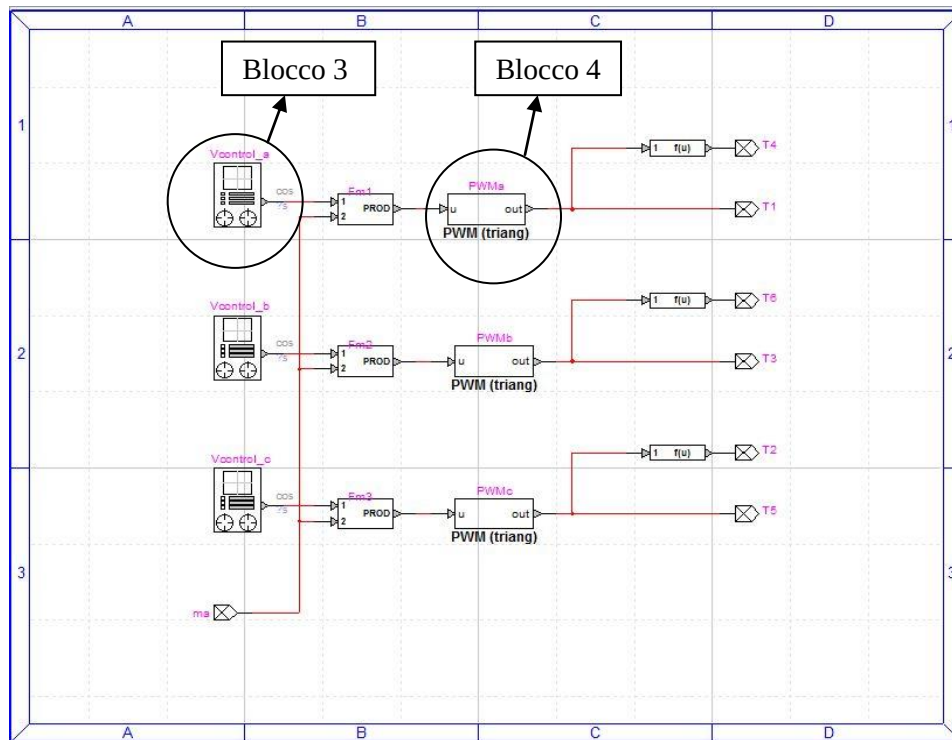


Figura A.7: Modello creato in EMTP-RV della PWM c on blocchi in evidenza

In riferimento alla Figura A.7, che fa riferimento al modello creato in EMTP-RV della PWM del convertitore DC/AC trifase, si analizzano, in particolare, i due blocchi evidenziati.

Blocco 3: Generatore di segnale

“This device can be used for generating signals of the following types: cosine, step, ramp, user-defined. The generated signal may be single-shot or periodic. The user-defined parameters include time-shifting and amplitude-shifting (bias).

The output value of the cosine signal is calculated as follows:

$$\text{out}(t) = \text{Bias} + A \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \Phi)$$

The parameters for the cosine signal are:

parameters	definition	rules
Amplitude (A)	required	>0
Frequency (f)	required	>0
Bias	optional,default=0	
Phase shift	optional,default=0	

The output value of the step signal is calculated as follows:

If $0 \leq t - t_{\text{shift}} < \text{Width}$, $\text{out}(t) = \text{Bias} + A$, else $\text{out}(t) = \text{Bias}$, optionally repeated every period.

parameters	definition	rules
Amplitude	required	
Width	required	>0
Bias	optional, default=0	
t_{shift}	optional, default=0	
Period	optional, default=not repeated	>0

The output value of the ramp signal is calculated as follows:
If $0 \leq t - t_{\text{shift}} < \text{Width}$, $\text{out}(t) = \text{Bias} + \text{slope} * t$, else $\text{out}(t) = \text{Bias}$, optionally repeated every period.

$\text{Slope} = \text{Amplitude} / \text{Width}$

The parameters for the ramp signal are the same of step signal.

The output value of the user-defined math signal is calculated as follows:
 $\text{out}(t) = \text{function}(\text{shifted } t)$, optionally repeated every period.

function = user-defined expression
shifted $t = t - t_{\text{shift}}$

the parameters for the user defined math signal are:

parameters	definition	rules
function expression	required	Variable t refers to $t - t_{\text{shift}}$
t_{shift}	optional, default=0	
Period	optional, default=not repeated	>0

No user-defined history is required. The output is automatically initialized if the signal exists for $t \leq 0$. Setting the scope flag enables monitoring of the output signal during the simulation. During the simulation, the output value of this device is calculated at successive instants t at intervals Δt . Between these simulation instants, the output value can be set to vary in one of two modes, ramped or stepped. In the time-domain calculation at $t > 0$, the output value is calculated according to defined signal source. In the steady-state calculation at $t = 0$, the output value is calculated according to defined signal source.”

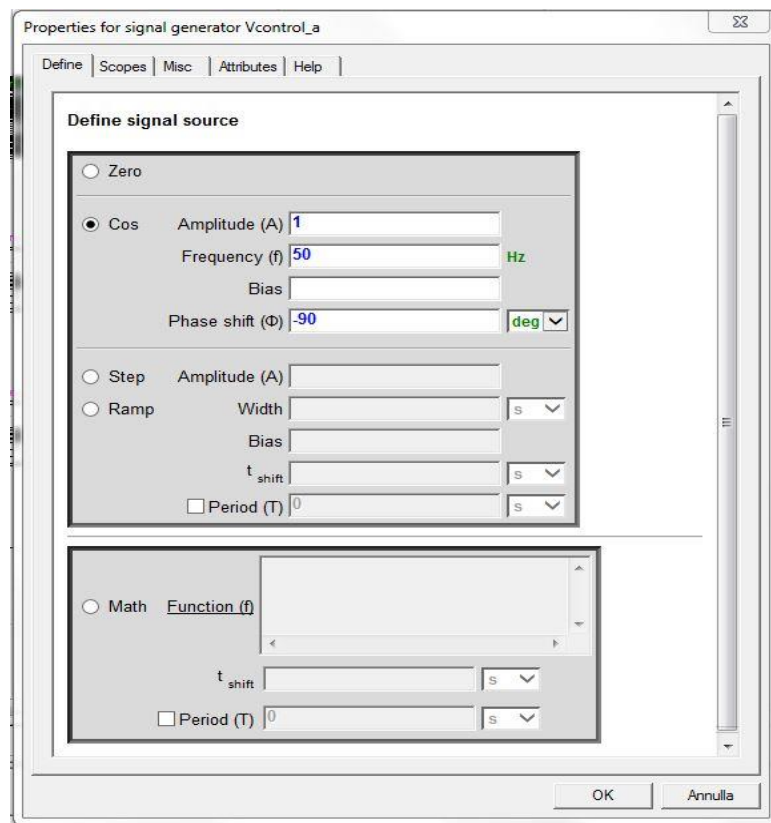


Figura A.8: Impostazioni da definire nel generatore di segnale

In riferimento alla Figura A.8, si deve far notare che l'impostazione di -90° come angolo di sfasamento serve per ottenere una forma d'onda sinusoidale e non cosinusoidale. In generale, comunque, questo blocco permette di poter creare segnali di qualsiasi forma a seconda delle proprie esigenze.

Blocco 4: Generatore di PWM

"This device is an implementation of a PWM (pulse-width modulation) controller with a triangular (ramp up and ramp down) reference. For a version with a rising-ramp-only reference, use the device "PWM, ramp reference".

This device has two pins:

pin	type	description
u	input	controller input
out	output	controller output

The following parameters must be defined:

parameter	description	units
fc	carrier frequency	Hz
umax	maximum input value (at duty ratio =1)	units of u
stepped	=1 to indicate stepped transitions =0 to indicate ramped transitions	

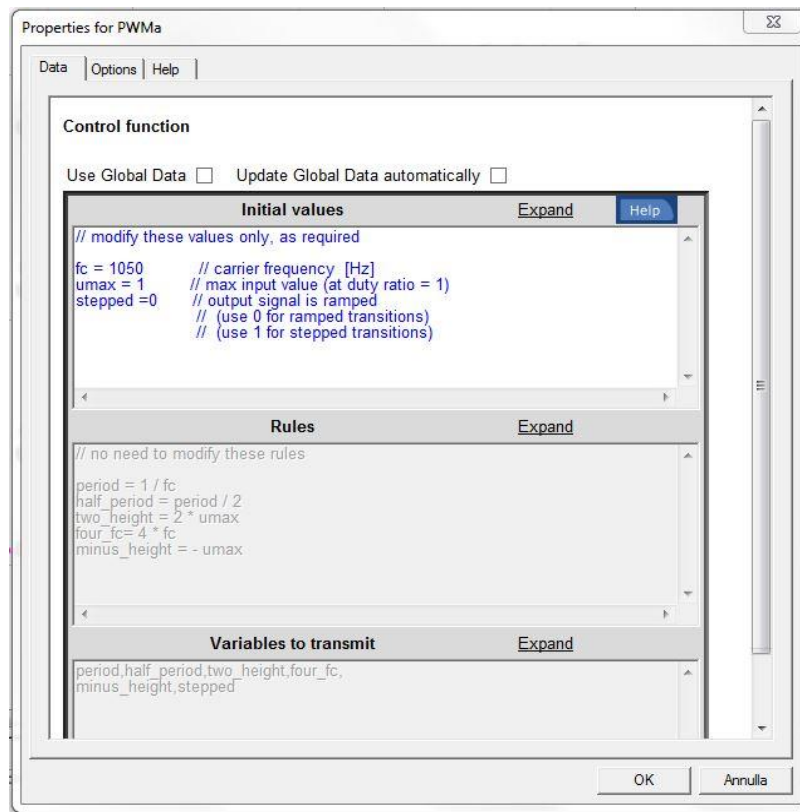


Figura A.9: Impostazioni da definire blocco PWM

The value of the parameter stepped determines whether the device operates with stepped or ramped transitions. In stepped mode (the default for ideal logical signals), the output is represented as a stepped signal, where changes in value are observed as vertical steps at the time they occur. In ramped mode, the value transitions of the output are seen as ramps between $t-\Delta t$ and t . The input pin may be connected to any control signal. The output is a pulse-width modulated signal of value 0 or 1. It consists of a sequence of variable-width pulses generated at frequency fc . The width of each pulse corresponds to the scaled amplitude of the input signal. When the input value is $umax$, the pulse is on for a full period, that is, pulse width = period = $1/fc$.

When the input value is 0, the pulse is off for a full period, that is, pulse width = 0.

The representation of the output as having stepped or ramped transitions is determined by the value given to the parameter stepped. The implementation of the model can be inspected by opening the device's subcircuit.

The model applies the following equation:

when input > reference output = 1

when input ≤ reference output = 0.

where reference is the instantaneous value of the generated sawtooth calculated as

reference = $umax * (2t/T)$ for $0 \leq t \leq T/2$, repeated every period

reference = $u_{max} * 2(T-t)/T$ for $T/2 \leq t < T$, repeated
every period.”

In questo caso, oltre a dover impostare correttamente i valori di frequenza e di ampiezza massima in base alle esigenze, si deve fare attenzione ai possibili effetti della scelta tra transizione a rampa e transizione a scalini. Tale scelta, infatti, può risultare determinante ai fini dei risultati con la possibile introduzione di errori, specialmente quando si vanno a simulare funzionamenti ad elevati valori di frequenza.

Per costruire un blocco da inserire nella libreria di EMTP-RV, racchiudendo all'interno un modello creato è sufficiente seguire il seguente percorso: Options-Subcircuit>Create sub-circuit Block.

Per far partire le simulazioni dopo aver impostato i tempi caratteristici desiderati nella sezione EMTP-Simulation Options, si deve seguire il percorso: Start EMTP-Run.

Ringraziamenti

Voglio ringraziare innanzitutto i miei genitori, Paola e Giorgio, generosi e comprensivi sostenitori di questo mio percorso; ringrazio Erica e Francesco, fratelli sempre vicini e ammirabili. Un grazie:

A Giulia, paziente compagna di questi anni.

Agli amici di sempre, incontrati all'asilo e mai più lasciati, fonte di divertimento e sempre presenti nel mio cammino di crescita.

Ai compagni di università, lodevoli nel rendere questi anni meno pesanti e più piacevoli.

Ai colleghi di lavoro, divertenti compagni delle varie ore da cameriere.

Voglio ringraziare, inoltre, il professor Benato, che con il suo entusiasmo e le sue passioni mi ha costantemente aiutato in questi mesi di tesi, Fabio e, soprattutto, Sebastian per i loro importanti consigli e la loro gentilezza, sempre disponibili alla soluzione di ogni problema o mio dubbio.

Ringrazio, infine, chi mi ha insegnato la cultura della fatica e del lavoro, e tutti quelli che, nel loro piccolo, hanno contribuito a rendere straordinaria questa esperienza.

Bibliografia

- [1] IEC: Electrical Energy Storage, *White Paper*, Dicembre 2011.
- [2] N.Cosciani, F.Zanellini, “Il ruolo dei sistemi di accumulo elettrochimico nei sistemi elettrici”, *AEIT*, vol.100,n.4/5,pp.18-27, maggio 2013.
- [3] A.F.Zobaa,*Energy storage technologies and applications*,Croazia,InTechOpen, 2013.
- [4] D.Linden, T.B.Reddy, *Handbook of batteries*,United States of America, McGraw-Hill,2002
- [5] C.Daniel, J.O.Besenhard, *Handbook of battery materials*,Oak Ridge(USA),Wiley-Vch, 2008
- [6] Z.F.Hussien, L.W.Cheung, M.F.M.Siam, A.B.Ismail,”*Modeling of sodium sulfur battery for power system applications*”, *Elekrika*, vol.9,n.2, pag.66-72.
- [7] “EPRI-DOE Handboof of energy storage for transmission & distribution applications”,www.sandia.gov/ess/publications, dicembre 2003.
- [8] “I progetti di terna sulle applicazioni di accumulo elettrochimico”,
www.canaleenergia.com, ottobre 2013.
- [9] J.Larminia, J.Lowry,*Electric vehicle technology explained*,West Sussex, John Wiley & Sons, 2003
- [10] “Sodium Nickel Batteries for Energy Storage Solutions”, www.fiamm.com/it/, novembre 2012
- [11] J.L.Sudworth,“The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery”, *Journal of power sources*, vol.100, pag.149-163, 2001.
- [12] C.H.Dustmann,”Advances in ZEBRA batteries”, *Journal of power sources*, vol.127, pag.85-92, 2004.
- [13] “Fiamm Sonick energy storage, ST523”, www.fiamm.com/it/, gennaio 2014
- [14] “Fiamm Sonick energy storage spring 620 V 1.5 MWh”, www.fiamm.com/it/, gennaio 2014
- [15] “Interruttori ABB per applicazioni in corrente continua”, www.abb.com, settembre 2007.
- [16] S.Piras,”Dimensionamenti in corrente continua”, *Elettrificazione*, 6/08, pag.32-39.
- [17] CEI EN 61660-1: Correnti di cortocircuito negli impianti ausiliari in c.c. nelle centrali e nelle stazioni elettriche, 1999-04.
- [18] J.Schlabbach, *Short-circuit currents*, Herts (UK), IET,2008.
- [19] I.Trintis, S.Munk-Nielsen R.Teodorescu.”Single stage grid converters for battery energy storage”, Department of energy technology, Aalborg University, Denmark.

- [20] S.Vazquez, S.M.Lukic,E.Galvan, L.G.Franquelo, J.M.Carrasco,”Energy storage system for transposrt and grid applications”,*IEEE Transaction on industrial electronics*, vol.57,.n.12,dicembre 2010.
- [21] N.Mohan, M.Undeland Tore,P.R.Williams, *Elettronica di potenza*, Hoepli, 2005.
- [22] M.K.Kazimierczuk,*Pulse-width modulated DC-DC power converters*,Singapore, John Wiley & Sons, 2008.
- [23] EMTP model documentation, documentazione integrata al software tratta dalla funzione help di EMTP-RV, ver.2.2.1, marzo 2014
- [24] R.Benato, L.Fellin, *Impianti elettrici*, Torino, UTET Scienze tecniche, 2011

