



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102010901845185
Data Deposito	03/06/2010
Data Pubblicazione	03/12/2011

Classifiche IPC

Titolo

METODO DI COMMUTAZIONE TRA UNA MODALITA' DI FUNZIONAMENTO A ELEVAZIONE DI TENSIONE E UNA MODALITA' DI FUNZIONAMENTO A RIDUZIONE DI TENSIONE PER UN CONVERTITORE DC-DC

DESCRIZIONE

del brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"METODO DI COMMUTAZIONE TRA UNA MODALITA' DI FUNZIONAMENTO A ELEVAZIONE DI TENSIONE E UNA MODALITA' DI FUNZIONAMENTO A RIDUZIONE DI TENSIONE PER UN CONVERTITORE DC-DC"

di ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

di nazionalità italiana

con sede: VIALE DELL'AERONAUTICA, S.N.C.

POMIGLIANO D'ARCO (NA)

Inventori: ANASTASIO Vincenzo, DI DONNA Laura, MARINO Pompeo, CAVALLO Alberto, GUIDA Beniamino, RUBINO Luigi

* * *

La presente invenzione è relativa ad un metodo di commutazione tra una modalità di funzionamento a elevazione di tensione e una modalità di funzionamento a riduzione di tensione e viceversa per un convertitore DC-DC, in particolare per un convertitore DC-DC bidirezionale.

Come noto, le operazioni che un convertitore DC-DC bidirezionale compie sono principalmente due: elevazione della tensione fra un bus di ingresso, dove è presente una sorgente DC a bassa tensione (ad esempio pari a 28 V), ed un bus di uscita, dove è richiesta una tensione DC più elevata di quella presente sul bus di ingresso (ad esempio pari a 270 V); e riduzione della tensione fra un bus di ingresso, dove è presente una sorgente DC ad alta tensione,

ed un bus di uscita, dove è richiesta una tensione DC ridotta rispetto a quella presente sul bus di ingresso.

I convertitori DC-DC sono ad esempio utilizzati in buck mode quando sul bus ad alta tensione è presente una tensione avente valore accettabile per l'applicazione desiderata (ad esempio con riferimento ad un determinato standard) o per il funzionamento di dispositivi e apparecchiature alimentate tramite il bus ad alta tensione e sul bus a bassa tensione è invece presente una batteria da ricaricare. La tensione prelevata sul bus ad alta tensione è quindi ridotta ad un valore accettabile per il bus a bassa tensione ed iniettata in ingresso al bus a bassa tensione e il convertitore DC-DC può, in alternativa o in aggiunta a quanto detto, essere utilizzato per alimentare generici dispositivi collegati al bus a bassa tensione.

Il convertitore DC-DC viene comandato in boost mode quando sul bus ad alta tensione è presente una tensione avente valore non accettabile per l'applicazione desiderata (ad esempio con riferimento ad un determinato standard) o per il funzionamento di dispositivi e apparecchiature alimentate tramite il bus ad alta tensione. In questo caso l'energia accumulata nella batteria durante il funzionamento in buck mode viene prelevata, elevata, e fornita in ingresso al bus ad alta tensione, in modo da

ripristinare il livello di tensione richiesto sul bus ad alta tensione. Il flusso di energia tra il bus a bassa tensione ed il bus ad alta tensione permane fino a che la causa che ha generato un abbassamento di tensione sul bus ad alta tensione non viene eliminata o fino all'esaurimento della batteria. In quest'ultimo caso, il sistema comprendente il bus a bassa tensione, il convertitore DC-DC ed il bus ad alta tensione viene tipicamente dichiarato in errore a causa del mancato rispetto dei valori di tensione richiesti per il suo funzionamento.

Attualmente, la transizione da buck mode a boost mode avviene in modo non automatico, od automatico ma in modo non trasparente, nel senso che il convertitore DC-DC viene dichiarato come inutilizzabile per l'intervallo di tempo necessario al passaggio tra le due modalità di funzionamento (è necessaria un'elettronica di controllo, esterna al convertitore, che gestisce la transizione). Analogamente, anche la transizione da boost mode a buck mode viene effettuata in modo non automatico, od automatico ma in modo non trasparente.

Scopo della presente invenzione è fornire un metodo di commutazione tra una modalità di funzionamento a elevazione di tensione e una modalità di funzionamento a riduzione di tensione per un convertitore DC-DC bidirezionale esente dai problemi dell'arte nota.

Secondo la presente invenzione viene realizzato un metodo di commutazione tra una modalità di funzionamento a elevazione di tensione e una modalità di funzionamento a riduzione di tensione per un convertitore DC-DC come definito nella rivendicazione 1.

Per una migliore comprensione della presente invenzione viene ora descritta una forma di realizzazione preferita, a puro titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la figura 1 mostra una rete elettrica comprendente un convertitore DC-DC;

- la figura 2 mostra un convertitore bidirezionale DC-DC utilizzabile nelle rete elettrica di figura 1;

- la figura 3 mostra in forma circuitale un circuito di conversione DC-DC appartenente al convertitore bidirezionale DC-DC di figura 2;

- le figure 4a-4d mostrano l'andamento dei segnali di pilotaggio del circuito di conversione di figura 3 operante in modalità boost con duty cycle maggiore del 50%;

- le figure 5a-5d mostrano l'andamento dei segnali di pilotaggio del circuito di conversione di figura 3 operante in modalità boost con duty cycle minore del 50%;

- le figure 6a-6d mostrano l'andamento dei segnali di pilotaggio del circuito di conversione di figura 3 operante in in modalità buck con duty cycle maggiore del

50%;

- la figura 7 mostra mediante schema a blocchi una logica di controllo e di pilotaggio del circuito di conversione di figura 3;

- la figura 8 mostra, mediante diagramma a stati, un metodo di controllo del convertitore bidirezionale DC-DC di figura 2;

- la figura 9 mostra un circuito equivalente per il convertitore bidirezionale DC-DC di figura 2;

- la figura 10 mostra, mediante diagramma a stati, un metodo di commutazione tra una modalità di funzionamento a elevazione di tensione e una modalità di funzionamento a riduzione di tensione del convertitore bidirezionale DC-DC di figura 2;

- la figura 11 è una rappresentazione maggiormente dettagliata del diagramma a stati di figura 10;

- la figura 12 è una rappresentazione a blocchi di controllore isteretico utilizzato, secondo il metodo di figura 10, per variare il duty cycle di pilotaggio del convertitore bidirezionale DC-DC di figura 2 durante un funzionamento di quest'ultimo in modalità a riduzione; e

- la figura 13 è una rappresentazione a blocchi di controllore isteretico utilizzato, secondo il metodo di figura 10, per variare il duty cycle di pilotaggio del convertitore bidirezionale DC-DC di figura 2 durante un

funzionamento di quest'ultimo in modalità a elevazione.

La presente invenzione è relativa ad un metodo di controllo della commutazione tra buck mode e boost mode per un convertitore DC-DC bidirezionale in modo automatico e trasparente all'utilizzatore. Più in dettaglio, la gestione della transizione tra buck mode e boost mode è basata sull'analisi della "Power Quality" (PQ) sul bus ad alta tensione. Il passaggio da buck mode a boost mode viene gestito in modo innovativo, in quanto in buck mode il convertitore DC-DC stesso viene considerato come un carico collegato al bus ad alta tensione e dunque, se a seguito dell'abbandono del buck mode la Power Quality risulta essere accettabile rispetto ad un valore di riferimento, si abilita un trasferimento di energia dal bus ad alta tensione al bus a bassa tensione in quantità ridotta e pertanto sostenibile dal sistema nel suo complesso.

Anche il passaggio da boost mode a buck mode viene gestito in modo innovativo, in quanto l'evento che sancisce la transizione viene correlato ad una analisi effettuata sulla condizione di carico del bus ad alta tensione, la quale non richiede l'utilizzo di informazioni supplementari sui dispositivi collegati al bus ad alta tensione stesso, che possono dunque essere di qualsiasi tipo.

La figura 1 mostra una rete elettrica 3 comprendente un bus ad alta tensione 4 che alimenta una pluralità di

dispositivi. Ad esempio, il bus ad alta tensione 4 alimenta un attuatore elettromeccanico 5, assorbente una potenza nominale pari a 2 kW, ed un generico carico resistivo 7, assorbente una potenza nominale pari a 75 kW. La rete elettrica 3 comprende inoltre un bus a bassa tensione 2, a cui è collegata una batteria 11. Il bus a bassa tensione 2 è collegato al bus ad alta tensione 4 tramite un convertitore bidirezionale DC-DC 100. Il bus ad alta tensione 4 opera ad una tensione ad esempio pari a 270 V, mentre il bus a bassa tensione 2 opera ad una tensione inferiore, ad esempio pari a 28 V. Il bus ad alta tensione 4 può ad esempio essere collegato all'uscita di un autotrasformatore rettificatore (non mostrato) che alimenta il bus ad alta tensione 4; l'autotrasformatore rettificatore è a sua volta alimentato da uno o più generatori (non mostrati). Il bus a bassa tensione 2 e il bus ad alto potenziale 4 possono comprendere indifferentemente elementi attivi e/o passivi.

All'accensione della rete elettrica 3 il convertitore bidirezionale DC-DC 100 è configurato per operare in buck mode e si porta in tale modalità in seguito ad una fase di inizializzazione ("start-up") di tipo noto.

In figura 2 è mostrato un dispositivo di conversione DC-DC 1 elettricamente collegato tra il bus a bassa tensione 2 e, tramite quest'ultimo, alla batteria 11, ed il

bus ad alto potenziale 4.

Il dispositivo di conversione DC-DC 1 è collegato al bus a bassa tensione 2 tramite una prima interfaccia di potenza 6 ed è collegato al bus ad alto potenziale 4 tramite una seconda interfaccia di potenza 8. La prima interfaccia di potenza 6 e la seconda interfaccia di potenza 8 sono realizzate in modo analogo tra loro, e sono speculari rispetto al dispositivo di conversione DC-DC 1. Il dispositivo di conversione DC-DC 1, insieme con la prima interfaccia di potenza 6 e la seconda interfaccia di potenza 8, forma un convertitore bidirezionale 100.

La prima interfaccia di potenza 6 comprende un primo ramo elettrico 10 collegante direttamente il bus a bassa tensione 2 con il dispositivo di conversione DC-DC 1 ed un secondo ramo elettrico 12 collegante il bus a bassa tensione 2 con il dispositivo di conversione DC-DC 1 tramite un primo interruttore 14. Il primo interruttore 14 è collegato tra un primo nodo 14' direttamente collegato con il secondo ramo elettrico 12 ed un secondo nodo 14'' che idealmente coincide con il primo nodo 14' quando il primo interruttore 14 è chiuso. Quando il primo interruttore 14 è aperto, la prima interfaccia di potenza 6 non è direttamente alimentata dal, o non alimenta il, bus a bassa tensione 2; viceversa, quando il primo interruttore 14 è chiuso, la prima interfaccia di potenza 6 è direttamente

alimentata dal, o alimenta il, bus a bassa tensione 2.

La prima interfaccia di potenza 6 comprende inoltre un primo resistore 16 ed un secondo interruttore 18, disposti in serie tra loro e colleganti il primo ramo elettrico 10 con il secondo ramo elettrico 12. La prima interfaccia di potenza 6 comprende inoltre un secondo resistore 20 ed un primo condensatore 22, disposti in serie tra loro e colleganti il primo ramo elettrico 10 con il secondo ramo elettrico 12. In particolare, il primo condensatore 22 è collegato direttamente al primo ramo elettrico 10, ed è collegato al secondo ramo elettrico 12 tramite il secondo resistore 20. In questo modo, la serie costituita dal primo resistore 16 e dal secondo interruttore 18 è collegata in parallelo alla serie costituita dal secondo resistore 20 e dal primo condensatore 22. Il primo condensatore 22 è inoltre collegato in parallelo con un terzo interruttore 24 atto a creare, quando chiuso, un cortocircuito che bypassa il secondo resistore 20. Il terzo interruttore 24 è comandato in apertura e chiusura direttamente dal dispositivo di conversione DC-DC 1, tramite un collegamento di controllo 25, sulla base della necessità, durante l'uso, di caricare il primo condensatore 22. Inoltre, collegato tra il primo ramo elettrico 10 e il secondo ramo elettrico 12, è disposto un rilevatore di tensione 26, di tipo isolato, configurato per rilevare la tensione presente tra

il primo ramo elettrico 10 e il secondo nodo 14" del primo interruttore 14 e fornire il valore rilevato al dispositivo di conversione DC-DC 1 (tale valore è indicato in figura con il riferimento M_L).

La seconda interfaccia di potenza 8 è, come detto, speculare alla prima interfaccia di potenza 6 rispetto al dispositivo di conversione DC-DC 1. La seconda interfaccia di potenza 8 comprende dunque un terzo ramo elettrico 30 collegante direttamente il bus ad alto potenziale 4 con il dispositivo di conversione DC-DC 1 ed un quarto ramo elettrico 32 collegante il bus ad alto potenziale 4 con il dispositivo di conversione DC-DC 1 tramite un quarto interruttore 34, controllato in apertura e chiusura dal dispositivo di conversione DC-DC 1 tramite un collegamento di controllo 35. Il quarto interruttore 34 è collegato tra un terzo nodo 34' direttamente collegato con il quarto ramo elettrico 32 ed un quarto nodo 34" che idealmente coincide con il terzo nodo 34' quando il quarto interruttore 34 è chiuso. Quando il quarto interruttore 34 è aperto la seconda interfaccia di potenza 8 non alimenta il, o non è direttamente alimentata dal, bus ad alto potenziale 4; viceversa, quando il quarto interruttore 34 è chiuso, la seconda interfaccia di potenza 8 alimenta il, o è direttamente alimentata dal, bus ad alto potenziale 4. La seconda interfaccia di potenza 8 comprende inoltre un terzo

resistore 36 ed un quinto interruttore 38, disposti in serie tra loro e colleganti il terzo ramo elettrico 30 con il quarto nodo 34". Il resistore 36 ha, analogamente al resistore 16, la funzione di garantire al dispositivo di conversione DC-DC 1 la presenza di un carico anche nel caso di disconnessione improvvisa della regione ad alto potenziale 4.

In serie al quarto interruttore 34, collegato al quarto nodo 34", è collegato un induttore 90. L'induttore 90 è collegato tra il quarto nodo 34" e un quinto nodo 90'.

La seconda interfaccia di potenza 8 comprende inoltre un quarto resistore 40 ed un secondo condensatore 42, disposti in serie tra loro. La serie costituita dal terzo resistore 36 e dal quinto interruttore 38, e la serie costituita dal quarto resistore 40 e dal secondo condensatore 42 sono collegate tra il terzo ramo elettrico 30 e, rispettivamente, il quarto nodo 34" e il quinto nodo 90'. Il quarto resistore 40 è inoltre collegato in parallelo con un sesto interruttore 44 atto a creare, quando chiuso, un cortocircuito che bypassa il quarto resistore 40. Il sesto interruttore 44 è comandato in apertura e chiusura direttamente dal dispositivo di conversione DC-DC 1, tramite un collegamento di controllo 45, sulla base della necessità di caricare o meno il secondo condensatore 42.

Inoltre, collegato in parallelo alla serie del quarto resistore 40 e del secondo condensatore 42, è disposto un rilevatore di tensione 46 configurato per rilevare la tensione presente tra il terzo ramo elettrico 30 e il quarto ramo elettrico 32 e fornire tale valore rilevato al dispositivo di conversione DC-DC 1 (valore indicato in figura con il riferimento M_H).

Infine, tramite un trasduttore di corrente 47 collegato al quinto nodo 90', il dispositivo di conversione DC-DC 1 conosce la corrente I_H che scorre dal e verso il dispositivo di conversione DC-DC 1.

La figura 3 mostra una rappresentazione circuitale di una porzione del dispositivo di conversione DC-DC 1. La figura 3 non mostra, per semplicità di rappresentazione, blocchi di controllo logico, di tipo noto, del dispositivo di conversione DC-DC 1, atti a comandare in accensione e spegnimento i transistori del dispositivo di conversione DC-DC 1 e gli interruttori della prima interfaccia di potenza 6 e della seconda interfaccia di potenza 8 al fine di operare nelle modalità di funzionamento boost e buck. Il dispositivo di conversione DC-DC 1 di figura 3 comprende un convertitore boost-full bridge isolato 55 ("isolated boost full bridge converter").

L'ingresso del convertitore boost-full bridge isolato 55 dal lato del bus a bassa tensione 2 comprende un trasduttore di corrente 57. In questo modo, il dispositivo di conversione DC-DC 1 conosce la corrente I_L che scorre nel nodo 14". Il convertitore boost-full bridge isolato 55 comprende inoltre, collegato in serie al trasduttore di corrente 57 sul secondo ramo elettrico 12, un induttore 60 avente un primo terminale 60a collegato al secondo nodo 14" ed un secondo terminale 60b collegante il secondo nodo 14" con un ramo comprendente un transistor 68 e un transistor 70 collegati in serie tra loro tra il secondo terminale 60b e il primo ramo elettrico 10. L'induttore 60 è utilizzato nella modalità boost per effettuare un primo innalzamento della tensione presente sul secondo terminale 60b dell'induttore 60; viceversa nella modalità buck l'induttore 60 unitamente al primo condensatore 22 fungono da filtro LC eliminando in tal modo le armoniche di commutazione.

Ciascun transistor 68 e 70 è provvisto, in uso, di un rispettivo diodo interno indicato in figura rispettivamente come un diodo 69 e diodo 71, collegati in antiparallelo rispettivamente al transistor 68 e al transistor 70. Infine, in parallelo al ramo comprendente i transistori 68 e 70 è presente un ramo comprendente un transistor 74 e un transistor 76. Il transistor 74 e il transistor 76 sono

collegati in serie tra loro e collegano il primo ramo elettrico 10 con il secondo ramo elettrico 12. In uso, essi sono provvisti di un rispettivo diodo interno indicato in figura rispettivamente come diodo 75 e diodo 77, collegati tra i terminali di conduzione del transistore 74 e, rispettivamente, del transistore 76.

L'induttore 60 e i rami comprendenti il transistore 68, il transistore 70, il transistore 74, e il transistore 76 sono collegati ad un avvolgimento 80a di un trasformatore 80. In particolare, l'avvolgimento 80a comprende un primo terminale 80a' collegato tra il transistore 68 e il transistore 70 ed un secondo terminale 80a'' collegato tra il transistore 74 e il transistore 76.

Ciascuno tra il transistore 62, transistore 64, transistore 68, transistore 70, transistore 74 e transistore 76 è un transistore di potenza di tipo MOSFET e possiede un proprio terminale di controllo (terminale di gate) controllato in conduzione e interdizione da un segnale opportuno.

Il convertitore full bridge isolato 55 comprende inoltre un transistore 92 e un transistore 93, disposti in serie tra loro e collegati tra il terzo ramo elettrico 30 e il quarto ramo elettrico 32, e provvisti, in uso, di un rispettivo diodo 94 e di un diodo 95 (mostrati collegati ai terminali di conduzione del rispettivo transistore 92 e

transistore 93); e un transistore 96 e un transistore 97 disposti in serie tra loro e collegati tra il terzo ramo elettrico 30 e il quarto ramo elettrico 32, e provvisti, in uso, di un rispettivo diodo 98 e di un diodo 99 (mostrati collegati ai terminali di conduzione del rispettivo transistore 92 e transistore 93).

I rami comprendenti il transistore 92, transistore 93, transistore 96, transistore 97 sono collegati ad un avvolgimento 80b del trasformatore 80. In particolare, l'avvolgimento 80b comprende un primo terminale 80b' collegato tra il transistore 96 e il transistore 97 ed un secondo terminale 80b'' collegato tra il transistore 92 e il transistore 93.

Ciascuno tra il transistore 92, il transistore 93, il transistore 96, e il transistore 97 è un transistore di tipo IGBT e possiede un proprio terminale di controllo controllato in conduzione e interdizione da un segnale opportuno.

Il dispositivo di conversione DC-DC 1 di figura 2 può comprendere un solo o una pluralità di convertitori boost-full bridge isolati 55 del tipo mostrato in figura 3. In questo ultimo caso, ciascun convertitore full bridge isolato 55 è collegato con gli altri convertitori full bridge isolati 55 in modalità PIPO ("Parallel Input Parallel Output"), formando un dispositivo di conversione

DC-DC 1 ad elevata potenza. Ad esempio, nel caso di utilizzo di quattro convertitori boost-full bridge isolati 55, se ogni convertitore boost-full bridge isolato 55 è configurato per gestire una potenza ad esempio pari a 3 kW, la potenza totale gestita dal dispositivo di conversione DC-DC 1 sarà pari a 12 kW. Condividendo uno stesso ingresso e una stessa uscita, ciascun convertitore full bridge isolato 55 lavora con una frazione dell'intera potenza.

Il convertitore bidirezionale 100 può trovare applicazione sia come convertitore ad incremento di tensione ("boost converter") che come convertitore riduttore di tensione ("buck converter"), e può essere controllato in una o l'altra modalità operativa.

Il metodo descritto secondo la presente invenzione può essere implementato per controllare un convertitore del tipo descritto con riferimento alle figure 2 e 3, oppure per controllare un qualsiasi convertitore DC-DC purché esso possieda i seguenti requisiti: deve essere possibile imporre un flusso di potenza nullo quando richiesto; il convertitore deve essere di tipo isolato, ad esempio prevedendo la presenza di un trasformatore di accoppiamento, in modo tale da consentire la coesistenza di una pluralità di sorgenti di tensione su uno stesso bus a bassa o alta tensione 2, 4; e deve essere possibile imporre la direzione della corrente e quindi il segno del flusso di

potenza.

Vengono ora descritte esemplificativamente, con riferimento alle figure 4a-4d e 5a-5d, le tempistiche di controllo dei transistori del convertitore bidirezionale 100 (con riferimento alla realizzazione circuitale di figure 2 e 3), operante in modalità ad elevazione di tensione.

Le figure 4a-4d mostrano segnali di controllo del transistore 68 (segnale LVAH), del transistore 70 (segnale LVAL), del transistore 74 (segnale LVBH) e del transistore 76 (segnale LVBL) aventi duty cycle maggiore del 50%.

Se il duty cycle di tali segnali è maggiore del 50%, in ogni periodo T_{PERIOD} esistono uno o più intervalli temporali, indicati con il numero di riferimento 113, in cui il transistore 68, il transistore 70, il transistore 74 e il transistore 76 sono contemporaneamente accesi, e caricano l'induttore 60.

Le figure 5a-5d mostrano segnali di controllo del transistore 68 (segnale LVAH), del transistore 70 (segnale LVAL), del transistore 74 (segnale LVBH) e del transistore 76 (segnale LVBL) aventi duty cycle minore del 50%.

Se il duty cycle dei segnali LVAH e LVBH è inferiore al 50%, è possibile controllare i transistori 68, 70, 74, 76 alternativamente in conduzione ed interdizione in modo che non si verifichi mai la condizione in cui entrambi i

transistori 68 e 70 o entrambi i transistori 74 e 76 conducono corrente elettrica. L'importanza di poter lavorare con duty cycle minori 50% è legata al fatto che in tal modo è possibile lavorare in uno "stato di zero", cioè è possibile imporre un flusso di potenza nullo. Con riferimento alle figure 5a-5d, si ha flusso di potenza nullo quando sia il segnale di figura 5a che il segnale di figura 5b sono nulli per tutta la durata del periodo (che corrisponde ad un duty cycle nullo). Tale caratteristica è utile per ottenere uno spegnimento del dispositivo di conversione DC-DC 1 senza dover effettuare un disconnessione elettrica dal bus a basso potenziale 2.

Tenendo presente che sul bus ad alto potenziale 4 possono esserci uno o più generatori di tensione (non mostrati), è necessario che il dispositivo di conversione DC-DC 1, quando operante nella modalità ad elevazione, garantisca l'unidirezionalità della corrente dal bus a basso potenziale 2 verso il bus ad alto potenziale 4 in modo topologico. Tale obiettivo è raggiunto controllando in interdizione il transistor 92, il transistor 93, il transistor 96, e il transistor 97 collegati al bus ad alto potenziale 4. In tal modo si sfruttano i diodi (indicati in figura come diodo 94, diodo 95, diodo 98, diodo 99) interni agli IGBTs (rispettivamente transistor 92, transistor 93, transistor 96, transistor 97) per

raddrizzare la tensione in uscita dal trasformatore 80 (cioè in uscita sul lato dell'avvolgimento 80b) alimentata al bus ad alto potenziale 4.

Con riferimento ai segnali delle figure 4a-4d (duty cycle maggiore del 50%) e delle figure 5a-5d (duty cycle minore del 50%), il transistor 96, il transistor 68, il transistor 76, il transistor 92, il transistor 74, il transistor 70, il transistor 97, il transistor 93 sono pilotati con i rispettivi segnali HVAH, LVAH, LVBL, HVBH, LVBH, LVAL, HVAL, HVBL.

Le figure 6a-6d mostrano esemplificativamente le tempistiche di controllo dei transistori del convertitore bidirezionale 100 (con riferimento alla realizzazione circuitale di figure 2 e 3), operante in modalità a riduzione di tensione (o modalità buck).

In modalità a riduzione di tensione, i transistori 68, 70, 74, 76 vengono comandati in modo da far funzionare il ponte ("bridge") formato da tali transistori come raddrizzatore sincrono, sfruttando in tal modo la bidirezionalità in corrente dei dispositivi MOSFET, ed aumentando conseguentemente il rendimento. L'induttore 60 e il primo condensatore 22 (avente, in modalità a riduzione di tensione, la funzione di condensatore di uscita) realizzano un filtro LC, limitando in tal modo il picco massimo di corrente a monte ed a valle del trasformatore

80. Il trasformatore, infatti, a meno del rapporto di trasformazione, ha identica forma d'onda sia di tensione che di corrente sia in ingresso che in uscita. Il filtro LC è utile anche per filtrare la tensione in uscita, ed ottenere quindi un andamento della tensione quasi costante (a meno di un piccolo ripple). A tal fine il transistor 96, il transistor 68, il transistor 76, il transistor 92, il transistor 74, il transistor 70, il transistor 97, il transistor 93 sono pilotati con i rispettivi segnali HVAH, LVAH, LVBL, HVBH, LVBH, LVAL, HVAL, HVBL come mostrato nelle figure 6a-6d.

Dalle figure 6a-6d si evince che il metodo di pilotaggio dei transistori della prima interfaccia di potenza 6 e della seconda interfaccia di potenza 8 in modalità a riduzione è uguale al metodo di pilotaggio dei transistori della prima interfaccia di potenza 6 e della seconda interfaccia di potenza 8 delle figure 5a-5d. In particolare, il duty cycle dei segnali LVAH e LVBH che controllano in conduzione e interdizione rispettivamente il transistor 68 e il transistor 70, è minore del 50%.

La figura 7 mostra, mediante uno schema a blocchi, la logica di controllo e di pilotaggio 121 del dispositivo di conversione DC-DC 1.

La logica di controllo e di pilotaggio 121 comprende una interfaccia analogica di condizionamento dei segnali

122, configurata per ricevere le correnti I_L , I_H (dai trasduttori di corrente 57 e 47) e i valori di tensione M_L , M_H (dai rilevatori di tensione 26, 46); un elaboratore di segnale digitale 124 (DSP - "digital signal processor"), collegato all'interfaccia analogica 122 (quest'ultima provvista di uno o più convertitori A/D per la trasformazione da analogico a digitale delle grandezze analogiche I_L , I_H , M_L , M_H , per successive elaborazioni); e un generatore di segnali di pilotaggio 126, ad esempio un FPGA ("Field Programmable Gate Array"). L'interfaccia analogica 122 è configurata per ricevere in ingresso segnali analogici (in particolare le correnti I_L , I_H e i valori di tensione M_L , M_H) e generare in uscita rispettivi segnali digitali I_{LD} , I_{HD} , M_{LD} e M_{HD} , correlati ai segnali analogici ricevuti in ingresso, e aventi un formato tale da poter essere interpretati correttamente dall'elaboratore di segnale digitale 124. L'elaboratore digitale 124 riceve in ingresso i segnali digitali I_{LD} , I_{HD} , M_{LD} e M_{HD} e comanda il generatore di segnali di pilotaggio 126 affinché quest'ultimo generi in uscita i segnali di pilotaggio LVAH, LVAL, LVBH, LVBL, HVAH, HVAL, HVBH, HVBL dei transistori appartenenti al dispositivo di conversione DC-DC 1 di figura 3, nonché i segnali di pilotaggio degli interruttori 14, 18, 24 appartenenti alla prima interfaccia di potenza 6 e degli interruttori 34, 38, 44 della seconda interfaccia

di potenza 8 di figura 2. Da un punto di vista hardware, l'interfaccia analogica 122, l'elaboratore di segnale digitale 124, e il generatore di segnali di pilotaggio 126 sono di tipo noto e sono ampiamente utilizzati nei convertitori DC-DC buck/boost noti. Secondo la presente invenzione, l'interfaccia analogica 122, l'elaboratore di segnale digitale 124, e il generatore di segnali di pilotaggio 126 implementano un metodo di pilotaggio del convertitore bidirezionale 100 sia in modalità buck che in modalità boost e di passaggio tra le due modalità del tipo illustrato nelle figure 10 e 11, e descritto con riferimento a tali figure.

La figura 8 mostra, mediante diagramma di stato, il funzionamento del convertitore bidirezionale DC-DC 100 in seguito alla fase di inizializzazione, secondo la presente invenzione.

In dettaglio, all'accensione, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 si porta nello stato S0 ed opera in buck mode. Nello stato S0 un contatore temporale t_1 viene inizializzato ad un valore di riferimento, ad esempio al valore zero. Il convertitore bidirezionale DC-DC 100 è mantenuto nello stato S0 per il tempo necessario a caricare il secondo condensatore 42. Il tempo di carica T_{CH} del secondo condensatore 42 è dato da $T_{CH}=10 \cdot R_H \cdot C_H$ secondi, dove R_H è il valore di resistenza del quarto resistore 40 e C_H è

il valore di capacità del secondo condensatore 42. Per valori di $R_H=100\ \Omega$ e $C_H=0.2\ \text{mF}$, il tempo di carica T_{CH} è pari a circa 100 ms.

Il secondo condensatore 42 è utilizzato in buck mode come accumulatore di energia.

In seguito alla carica del secondo condensatore 42, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 esce dallo stato S0 ed entra nello stato S1. Nello stato S1 viene chiuso il sesto interruttore 44 ed inizia la fase attiva di conversione DC-DC (con riferimento alla figura 1, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 ricarica la batteria 11).

La tensione di uscita, in questo caso la tensione sul bus a bassa tensione 2, è controllata e mantenuta stabile controllando, in modo noto, il duty cycle di pilotaggio dei transistori 68, 70, 74, 76, 92, 93, 96, 97 del convertitore bidirezionale DC-DC 100. Il duty cycle viene dunque fatto variare per mantenere il valore di tensione ad un livello desiderato, entro un intervallo di valori predeterminato.

Finché la tensione V_L , misurata dal rilevatore di tensione 26 sul bus a bassa tensione 2, è inferiore ad un valore di soglia predeterminato, ad esempio 24 V, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 permane nello stato S1 e opera in modalità di funzionamento buck. Quando il rilevatore di tensione 26 misura una tensione V_L sul bus a bassa tensione 2 maggiore del valore di soglia

predeterminato, ad esempio maggiore di 24V, si passa allo stato S2. Fintanto che il convertitore bidirezionale DC-DC 100 permane nello stato S2 sono attive protezioni necessarie per evitare danneggiamenti al convertitore bidirezionale DC-DC 100 stesso. Queste protezioni hanno la funzione di prevenire o, quantomeno, ridurre, eventuali problemi di sottotensione e/o sovratensione, e sono impostate in modo software in un firmware a bordo del convertitore bidirezionale DC-DC 100 (o collegato ad esso). Ad esempio, se la tensione misurata sul bus a bassa tensione 2 permane ad un valore minore/maggiore di un valore minimo/massimo accettabile (ad esempio minore di 24 V o maggiore di 32 V) per un tempo sufficientemente elevato (cioè non è più conforme ad uno standard prefissato), il convertitore bidirezionale DC-DC 100 viene dichiarato in errore, o "fault". In questo caso, il duty cycle viene gradualmente comandato in decrescita fino ad un valore nullo. Quando tali protezioni non sono attive, nello stato S2 il convertitore opera a regime.

La tabella 1 mostra, secondo una forma di realizzazione esemplificativa, intervalli di tensioni di funzionamento normale e di funzionamento anormale del convertitore bidirezionale DC-DC 100, in ingresso e in uscita dal convertitore bidirezionale DC-DC 100 operante in buck mode.

Ingresso (bus ad alta tensione 4)	Uscita (bus a bassa tensione 2)
Tensione normale DC: 250 - 280 V	Tensione normale DC: 24 - 32 V
Tensione anormale DC: <250 V e >280 V	Tensione anormale DC: <24 V e >32 V
Corrente max: 30 A	Corrente max: 250 A
	Tensione nominale DC: 28 V
	Ripple di tensione DC: ± 1.5 V
	Potenza richiesta max: 6 kW
	Efficienza: > 83%

Tabella 1

Quando viene rilevato un valore di tensione al di fuori dei limiti riportati in tabella 1 (tensione anormale sul bus a bassa tensione 2 e/o sul bus ad alta tensione 4), il convertitore bidirezionale DC-DC 100 viene comandato in spegnimento controllando il duty cycle a zero. Contestualmente, si esce dallo stato S2 e si torna allo stato S0. Il convertitore bidirezionale DC-DC 100 permane nello stato S0 fino all'arrivo di un opportuno segnale di reset dell'intero sistema elettrico. Il segnale di reset può arrivare da un centro di distribuzione di energia (PEPDC - "Primary Electrical Power Distribution Center",

non mostrato), che è l'organo di controllo e distribuzione dei flussi di energia sull'intera rete elettrica 3 di cui il convertitore bidirezionale DC-DC 100 fa parte. L'effetto del segnale di reset è l'annullamento di ogni segnalazione di errore ("fault") del convertitore bidirezionale DC-DC 100 e, conseguentemente, la possibilità di effettuare una nuova sequenza di avvio delle operazioni di funzionamento normale in boost mode o buck mode del convertitore bidirezionale DC-DC 100.

La transizione dallo stato S2 allo stato S0 può essere causata anche dalla disconnessione dal centro di distribuzione di energia (PEPDC - "Primary Electrical Power Distribution Center"), o a causa di una richiesta di arresto delle operazioni da parte di un operatore.

Come detto, secondo la presente invenzione, è possibile utilizzare convertitori bidirezionali DC-DC diversi dal convertitore bidirezionale DC-DC 100 di figure 2 e 3, a patto che tali convertitori posseggano alcuni requisiti. Il convertitore bidirezionale DC-DC utilizzato deve essere tale da poter imporre un flusso di potenza nullo quando richiesto (ad esempio, come detto, controllando il duty cycle a zero); la realizzazione circuitale del convertitore bidirezionale DC-DC deve prevedere mezzi di accoppiamento (ad esempio il trasformatore 80 di figura 3) tali da consentire la

coesistenza di una pluralità di sorgenti di tensione diverse tra loro su uno stesso bus; e deve essere possibile imporre, quando necessario, una direzione al flusso di corrente, e quindi imporre la direzione del flusso di potenza.

Tali condizioni summenzionate sono soddisfatte dalla forma di realizzazione di figura 2 e 3. Il convertitore bidirezionale DC-DC 100, quando opera in boost mode, può essere schematizzato mediante un generatore di corrente. Alternativamente, nel caso in cui il dispositivo di conversione DC-DC 1 adotti una architettura cellulare (cioè comprendente una pluralità di convertitori full bridge isolati 55), mediante una pluralità (N) di generatori di corrente 120 elettricamente collegati in parallelo tra loro come mostrato in figura 9.

I generatori di corrente 120 sono inoltre collegati in parallelo ad una sorgente di tensione primaria 130 (schematizzata in figura 3 come un generatore di tensione 132 collegato in parallelo ai generatori di corrente 120 tramite un elemento a diodo 131 e rappresentante il bus ad alta tensione 4), evitando la connessione di due generatori di tensione in parallelo, come noto topologicamente non ammessa nei sistemi elettrici. Infine, la figura 9 mostra un carico, ad esempio un carico resistivo 135 schematizzato mediante una pluralità di resistori 136, collegato in

parallelo ai generatori di corrente 120. I resistori 136 rappresentano generici carichi collegati al bus ad alta tensione 4.

Con riferimento alla figura 9, se il convertitore bidirezionale DC-DC 100 operante in boost mode volesse imporre una tensione di, ad esempio e con riferimento alla tabella 1, 270 V su un bus ad alta tensione 4 già alimentato da un secondo generatore, si creerebbe un conflitto dovuto all'impossibilità di avere due sorgenti di tensione in parallelo sullo stesso nodo. Invece, se il convertitore bidirezionale DC-DC 100 in boost mode non impone una tensione, ma inietta corrente sul bus ad alta tensione 4, quest'ultimo non andrebbe più in sovraccarico e la sua tensione automaticamente si riporterebbe al valore nominale di 270 V, imposto dal secondo generatore.

La figura 10 mostra, mediante diagramma a stati, stati di funzionamento del convertitore bidirezionale DC-DC 100. Con riferimento a questa figura, il convertitore bidirezionale DC-DC 100, in seguito alla fase di start-up (passaggio dallo stato spento 140 allo stato acceso 142), opera, come detto, secondo il controllo ordinario tipico del buck mode (stato 144), ma è in grado di commutare automaticamente in boost mode (stato 146) quando sul bus di alta tensione 4 viene rilevato un sovraccarico e, dunque, un problema di Power Quality dell'energia erogata (tensione

anormale sul bus ad alta tensione 4, ad esempio minore di 250 V con riferimento alla tabella 1).

Quando la condizione di tensione ottimale è stata ristabilita sul bus ad alta tensione 4 (la tensione è tornata a valori normali, ad esempio compresi tra 250 e 280 V), il convertitore bidirezionale DC-DC 100 torna nello stato 144 (cioè torna ad operare in buck mode). Il passaggio tra gli stati di buck mode 144 e di boost mode 146 e viceversa avviene attraverso il passaggio in un rispettivo stato di passaggio 147 e 148. Il convertitore bidirezionale DC-DC 100 commuta in automatico tra lo stato di buck mode 144 e lo stato di boost mode 146 a seconda delle condizioni di sovraccarico della rete elettrica 3, e non necessita di un comando esplicito generato esternamente al convertitore stesso; la commutazione tra gli stati 144 e 146 è pertanto "trasparente" all'utilizzatore, in quanto l'utilizzatore non deve scegliere manualmente la modalità di funzionamento, ma è il convertitore bidirezionale DC-DC 100 stesso a selezionarla sulla base delle misure di tensione V_L e V_H . Il passaggio tra gli stati 144 e 146 avviene, come meglio descritto in seguito, mediante un decremento del duty cycle dal valore di regime (ad es., 35% per il buck mode e 70% per il boost mode, variabile e regolabile secondo il controllo ordinario di un convertitore DC-DC operante, in modo noto, nelle modalità

buck e boost) fino a 0%, per poi risalire al valore di regime nell'altra modalità di funzionamento.

La figura 11 mostra in modo più dettagliato gli stati di funzionamento del convertitore bidirezionale DC-DC 100.

In particolare, figura 11, dopo l'accensione, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 entra nello stato S0 di start-up. Questo stato corrisponde allo stato S0 già descritto con riferimento alla figura 8. All'uscita dallo stato S0 il convertitore bidirezionale DC-DC 100 si porta nello stato S1a di funzionamento in buck mode. Lo stato S1a di figura 11 corrisponde agli stati S1 e S2 di figura 8 e non sono qui pertanto ulteriormente descritti. Tuttavia, in questo caso, l'uscita dallo stato S2 non porta nuovamente allo stato S0 come mostrato in figura 8, ma porta allo stato S2a.

Il rilevatore di tensione 46 effettua una misura del valore di tensione V_H sul bus ad alta tensione 4. Il convertitore bidirezionale DC-DC 100 permane nello stato S1a fintanto che il valore di tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 si mantiene entro l'intervallo di normalità (si veda a tal riguardo la precedente tabella 1). Quando la tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 scende al di sotto di una soglia minima (ad esempio, $V_H < 250$ V), il convertitore bidirezionale DC-DC 100 esce dallo stato S1 e passa allo stato S2a. L'ingresso nello stato S2a

corrisponde all'avvio di un contatore temporale $\underline{t_2}$. Il convertitore bidirezionale DC-DC 100 permane nello stato S2a finché il valore di tensione V_H sul bus ad alta tensione è al di sotto del limite inferiore di normalità (250 V con riferimento alla tabella 1) ma superiore ad un valore minimo accettabile V_{inf} (ad esempio impostato pari a 200 V) e, contemporaneamente, il contatore temporale $\underline{t_2}$ ha un valore inferiore ad un valore di soglia t_{th1} , ad esempio pari a 10 ms. La soglia t_{th1} può essere diversa dal valore qui indicato, e scelta in accordo con un particolare standard. Nel caso descritto, la soglia t_{th1} è stata scelta con riferimento a quanto prescritto dallo standard MIL-STD-704F, in particolare con riferimento al valore minimo accettabile $V_{inf}=200$ V al tempo $\underline{t_2}=0$ ms. Secondo quanto prescritto idealmente da tale standard, la tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 può permanere a tale valore minimo accettabile V_{inf} fino ad un tempo massimo $\underline{t_2}=10$ ms, per poi aumentare con una pendenza a rampa per $\underline{t_2}$ compreso fra 10 ms e 40 ms, fino a portarsi al valore di 250 V in $\underline{t_2}=40$ ms e non variare più.

L'uscita dallo stato S2a può avvenire per due condizioni. In una prima condizione, se la tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 ha un valore superiore al valore minimo accettabile V_{inf} ma il contatore temporale $\underline{t_2}$ assume un valore superiore al valore di soglia t_{th1} , allora si

passa dallo stato S2a ad uno stato S4 di controllo di Power Quality. In una seconda condizione, se la tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 assume un valore inferiore al valore minimo accettabile V_{inf} prima che il contatore temporale t_2 assuma un valore superiore al valore di soglia t_{th1} , allora si passa dallo stato S2a ad uno stato S3 di passaggio da buck mode a boost mode. In questo caso infatti il bus a alta tensione 4 è sovraccaricato ed il convertitore bidirezionale DC-DC 100 lo alimenta prelevando energia dal bus a bassa tensione 2 (in particolare dalla batteria 11).

Tornando allo stato S4, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 permane nello stato S4 per un intervallo temporale predefinito, ad esempio compreso tra 10 ms e 40 ms. A tal fine, l'ingresso nello stato S4 fa partire un contatore temporale t_4 . Se al tempo $t_4=40$ ms la tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 è risalita all'interno dell'intervallo di valori di normalità (ad esempio, superiore a 250 V), il convertitore bidirezionale DC-DC 100 ritorna nello stato S0 (e riprende quindi il funzionamento in buck mode). Altrimenti, se durante tutto l'intervallo temporale predefinito la tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 permane al di sotto dell'intervallo di normalità o se, in particolare, è scesa al di sotto del valore minimo accettabile V_{inf} , il convertitore bidirezionale DC-DC 100 passa dallo stato S4 allo stato S3.

Lo stato S3 gestisce l'abbandono del buck mode e l'ingresso nel boost mode. A tal fine, il valore di duty cycle di pilotaggio del dispositivo di conversione DC-DC 1 viene progressivamente portato a zero (comandando in questo modo lo spegnimento del convertitore bidirezionale DC-DC 100). Al raggiungimento del valore zero di duty cycle, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 esce dallo stato S3 e passa allo stato S5. Nello stato S5 la tensione V_H sul bus ad alta tensione 4 viene nuovamente misurata dal rilevatore di tensione 46. Il valore di tensione V_H misurato durante la permanenza del convertitore bidirezionale DC-DC 100 nello stato S5 è confrontato un valore di tensione di soglia V_p prossimo, per eccesso, alla soglia inferiore dell'intervallo di funzionamento normale. Ad esempio, considerando tale valore di soglia inferiore pari a 250 V, V_p è, ad esempio, pari a 251 V. Questo controllo ha lo scopo di verificare se la causa dell'abbassamento di tensione sul bus ad alta tensione 4 sia il convertitore bidirezionale DC-DC 100 stesso. Infatti, durante il funzionamento in buck mode, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 è visto come un carico per il bus ad alta tensione 4, e dunque esso stesso potrebbe essere la causa del sovraccarico sul bus ad alta tensione 4. Pertanto, se la tensione V_H misurata risulta essere maggiore del valore minimo dell'intervallo di funzionamento normale (ad esempio

di 251 V), il convertitore bidirezionale DC-DC 100 esce dallo stato S5 per entrare nello stato S7. Alternativamente, nel caso in cui la tensione V_H misurata sia inferiore al valore minimo dell'intervallo di funzionamento normale (inferiore a 251 V), il convertitore bidirezionale DC-DC 100 esce dallo stato S5 ed entra nello stato S6.

Nello stato S7 il convertitore bidirezionale DC-DC 100 è comandato per operare nuovamente in buck mode, ed il controllo delle operazioni è effettuato utilizzando il controllore isteretico 200 di figura 12 (descritto in seguito con riferimento a tale figura). Il ripristino di un valore di tensione V_H superiore al valore minimo dell'intervallo di funzionamento normale ($V_H > 251$ V) consente di operare nuovamente il convertitore bidirezionale DC-DC 100 in buck mode. A tal fine, il duty cycle, precedentemente comandato a zero (durante lo stato S3), viene incrementato. Contemporaneamente, sia la tensione V_H che la tensione V_L vengono monitorate. In particolare, il duty cycle viene comandato ad un valore tale da mantenere la tensione V_L al di sotto del valore massimo di funzionamento normale (dunque al di sotto di 28 V secondo per congruenza con i precedenti esempi). Questo controllo viene effettuato dopo un intervallo di stabilizzazione della rete elettrica 3, ad esempio pari a

400 ms a partire dall'ingresso del convertitore bidirezionale DC-DC 100 nello stato S7, per consentire un ripristino della corretta operatività di quest'ultimo dopo l'abbandono dello stato S3, in cui il dispositivo di conversione DC-DC 1 (e di conseguenza il convertitore bidirezionale DC-DC 100) era stato spento comandandone il duty cycle di pilotaggio dei transistori a zero. Tuttavia, se durante la permanenza nello stato S7, la tensione V_H scende al di sotto del valore di soglia inferiore di funzionamento normale (inferiore a 250 V, per congruenza con gli esempi precedenti), il duty cycle viene nuovamente comandato in decremento, fino a raggiungere il valore zero. In quest'ultimo caso, si ha l'uscita dallo stato S7 e il passaggio allo stato S6. Viceversa, se, in seguito ad una attesa pari all'intervallo di stabilizzazione della rete elettrica 3 (scelto, come detto, pari a 400 ms), la tensione V_L sul bus a bassa tensione 2 supera il valore massimo di funzionamento normale (superiore 28 V), allora si ha l'uscita dallo stato S7 e il ritorno allo stato S1a. Nello stato S6, il convertitore bidirezionale DC-DC 100 è comandato in funzionamento in boost mode. Il controllo del duty cycle in boost mode è effettuato mediante il controllore isteretico 300 di figura 13 (descritto in seguito con riferimento a tale figura).

Nello stato S6, in boost mode, il duty cycle è

incrementato (e, se necessario, decrementato) per mantenere la tensione sul bus ad alta tensione 4 entro i limiti di funzionamento normale (come da tabella 1). Il convertitore bidirezionale DC-DC 100 permane nello stato S6 per un tempo non inferiore ad un intervallo temporale predefinito, ad esempio pari a $t_4=200$ ms, per consentire una stabilizzazione del sistema nel suo complesso e consentire al convertitore bidirezionale DC-DC 100 di operare a regime. La condizione di uscita dallo stato S6, valutata dopo l'intervallo di 200 ms dall'ingresso nello stato S6, dipende dal valore di duty cycle regolato dal controllore isteretico 300; se tale valore di duty cycle scende al di sotto del 50% non è più opportuno operare in boost mode, in quanto il valore di tensione fornito al bus ad alta tensione 4 è considerato non significativo. In quest'ultimo caso si esce dallo stato S6 e si ritorna allo stato S1a, riportando il convertitore bidirezionale DC-DC 100 in funzionamento in buck mode.

La figura 12 mostra un circuito per il controllo isteretico del duty cycle in buck mode. Il controllore isteretico 200 di figura 12 comprende un multiplatore 205 ricevente su un primo ingresso 205a il valore di tensione V_L misurata sul bus a bassa tensione 2 e su un secondo ingresso 205b il valore di tensione V_H misurata sul bus ad alta tensione 4, e genera in uscita entrambi i segnali

presenti sugli ingressi 205a e 205b per la valutazione di condizioni isteretiche. Il segnale in uscita dal moltiplicatore 205 è fornito in ingresso al blocco 206 che utilizza una isteresi sulla tensione di bus a alta tensione 4 e bassa tensione 2 per variare il duty cycle. L'uscita del blocco 206 è fornita in ingresso ad un integratore 207, che genera in uscita un valore di duty cycle.

L'uscita dal blocco 206 è un segnale logico che assume un valore logico alto "1" e un valore logico basso "-1". L'integratore 207 è definito da un guadagno K e dalla variabile di Laplace S . Il duty cycle finale, in uscita dall'integratore 207, cresce gradualmente con una pendenza a rampa se il segnale logico di uscita dal blocco 206 ha valore di incremento ("1") e decresce gradualmente con una pendenza a rampa se il segnale logico di uscita dal blocco 206 ha valore di decremento ("-1"). Il duty cycle può essere ad esempio espresso in formato digitale su 12 bit, e assume in questo caso valori da 0 (duty cycle pari allo 0%) a 2^{12} (duty cycle pari al 100%). Quindi se in uscita dal blocco 206 si ha il valore logico alto "1", ad ogni ciclo di clock il duty cycle aumenta di 1 unità nella scala da 0 a 2^{12} .

In uso, se il valore di tensione V_H è maggiore del valore minimo di funzionamento normale (ad esempio, con riferimento alla tabella 1, $V_H \geq 252$ V) e contemporaneamente

la tensione V_L è minore del valore nominale (ad esempio, con riferimento alla tabella 1, $V_L < 28$ V), il blocco 206 comanda il valore di duty cycle in incremento di un valore unitario predefinito, (ad esempio +1). Viceversa, se il valore di tensione V_H è minore di 252 V (per congruenza con l'esempio precedente), ad esempio $V_H \leq 251$ V o, in alternativa, la tensione V_L è maggiore di 28 V, ad esempio $V_L > 28.3$ V, il blocco 206 comanda il valore di duty cycle in decremento di un valore predefinito (ad esempio -1).

È possibile notare come il controllore isteretico 200 comandi in decremento il duty cycle se la tensione misurata è istantaneamente minore del valore di soglia, posto in questo esempio a 251 V. La condizione di incremento del duty cycle si riferisce alla condizione in cui la tensione sul bus ad alta tensione 4 è maggiore di un valore maggiore di una soglia minima, posta pari a 252 V nell'esempio precedente, e contemporaneamente la tensione sul bus a bassa tensione 2 è minore di 28 V, scelta come tensione di controllo nell'esempio precedente; in questo caso è possibile effettuare una carica parziale della batteria incrementando il duty cycle.

Se invece il convertitore bidirezionale DC-DC 100 sta imponendo una tensione maggiore di quella di controllo, cioè pari o superiore a 28 V maggiorata di 0.3 V nell'esempio descritto, il duty cycle viene decrementato.

La figura 13 mostra un circuito per il controllo isteretico del duty cycle in boost mode. Il controllore isteretico 300 di figura 13 comprende un blocco 306 configurato per ricevere in ingresso il valore di tensione V_H presente sul bus a alta tensione 4 e generare in uscita un valore di controllo del duty cycle in incremento o decremento. Il segnale di uscita dal blocco 306 è quindi fornito in ingresso ad un integratore 30, che genera in uscita un valore di duty cycle.

In uso, il duty cycle è incrementato se la tensione V_H è inferiore al valore minimo di funzionamento normale (con riferimento alla tabella 1, se $V_H < 250$ V); viceversa, il duty cycle è decrementato se la tensione V_H è superiore ad una soglia posta all'interno dell'intervallo di funzionamento normale, ad esempio pari a 265 V.

Risulta evidente che, pur avendo fatto riferimento, nelle forme di realizzazione descritte, al valore minimo di funzionamento normale, pari a 250 V, può essere consigliabile utilizzare un valore di tensione superiore al valore minimo, ad esempio pari a 260 V. Ciò garantisce una maggiore stabilità del sistema, consentendo al convertitore di reagire in tempo ad eventi di abbassamento di tensione sul bus ad alta tensione 4.

Da un esame delle caratteristiche del metodo realizzato secondo la presente invenzione sono evidenti i

vantaggi che essa consente di ottenere.

Infatti, il metodo proposto secondo la presente invenzione permette di gestire in modo intelligente le transizioni fra modalità di riduzione e di elevazione di tensione per un convertitore DC-DC, nell'ottica di ottenere un dispositivo di conversione in grado di assistere il bus elettrico ad alta tensione in caso di sovraccarico di quest'ultimo, e di caricare invece l'accumulatore di energia collegato al bus a bassa tensione quando sussiste una condizione di normalità con riferimento alla tensione misurabile sul lato ad alta tensione. Tale gestione risulta essere automatica, ottenendo il vantaggio di evitare la scelta manuale della modalità di funzionamento da parte di un operatore; ciò è permesso dalla topologia circuitale del convertitore, in grado di gestire flussi di potenza bidirezionali. Inoltre, la strategia di controllo scelta permette l'utilizzo del convertitore come generatore di corrente e non di tensione, ottenendo come ulteriore vantaggio la risoluzione del noto problema dell'utilizzo di due generatori di tensione in parallelo sullo stesso bus, che può creare situazioni di instabilità a causa della non predicibilità del comportamento dei due generatori rispetto all'erogazione delle potenze necessarie per l'alimentazione dei carichi presenti sul bus stesso. Tramite il metodo secondo la presente invenzione, il convertitore fornisce

parte della potenza necessaria a sostenere il funzionamento dei carichi alimentati dal bus ad alto potenziale sotto forma di corrente erogata per ripristinare il livello di tensione fruibile dal bus stesso, ottenendo il vantaggio di poter continuare ad utilizzare il generatore principale alimentante il bus a 270 V (che, sebbene in sovraccarico, può alimentare parte dei carichi presenti) in affiancamento al convertitore in modalità di generazione.

Risulta infine chiaro che al metodo qui descritto ed illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione, come definito nelle rivendicazioni allegate.

I valori della soglia V_{inf} e del timer dello stato S2a possono essere modificati a seconda della definizione del criterio da rispettare (al limite, gli stati S2a ed S4 possono essere eliminati, verificando il solo valore istantaneo della tensione), così come la soglia per il passaggio dallo stato S5 allo stato S6 o allo stato S7. Inoltre anche i controllori isteretici di figura 12 e figura 13 possono essere modificati, aumentando o diminuendo il valore della costante K dell'integratore in modo da accelerare o decelerare il tasso di variazione del duty cycle, ed anche l'ampiezza delle fasce ottimali per la tensione del bus ad alta o bassa tensione.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo di controllo di un convertitore DC-DC (100) collegabile tra un bus ad alta tensione (4) e un bus a bassa tensione (2) per il passaggio da una prima modalità di funzionamento (144) in cui l'alta tensione viene convertita in bassa tensione ad una seconda modalità di funzionamento (146) in cui la bassa tensione viene convertita in alta tensione, comprendente le fasi di:

- comandare (S1a) il convertitore bidirezionale DC-DC (100) nella prima o nella seconda modalità di funzionamento con un duty cycle avente valore maggiore dello 0%;

- misurare (S2) una prima tensione (V_H) presente sul bus ad alta tensione (4);

- misurare (S1) una seconda tensione (V_L) presente sul bus a bassa tensione (2);

- sulla base di detta prima e seconda tensione misurata, comandare (147) un passaggio del convertitore bidirezionale DC-DC (100) dalla prima modalità di funzionamento alla seconda modalità di funzionamento o viceversa, la fase di comandare (147) il passaggio dalla prima modalità di funzionamento alla seconda modalità di funzionamento e viceversa comprendendo decrementare (S3) a passi predefiniti il duty cycle fino a raggiungere un valore di duty cycle pari allo 0%.

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, in cui detta

fase di comandare (147) il passaggio dalla prima modalità di funzionamento alla seconda modalità di funzionamento comprende, al termine di detta fase di decrementare, la fase di incrementare a passi predefiniti il duty cycle per operare la detta seconda modalità di funzionamento.

3. Metodo secondo la rivendicazione 1 o 2, in cui detta fase di comandare (147) il passaggio dalla seconda modalità di funzionamento alla prima modalità di funzionamento comprende, al termine di detta fase di decrementare, la fase di incrementare a passi predefiniti il duty cycle per operare la detta prima modalità di funzionamento.

4. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre, durante la seconda modalità di funzionamento (146), le fasi di:

- misurare (S6), in modo continuativo, la tensione (V_H) presente sul bus ad alta tensione (4);
- confrontare (S6) la tensione (V_H) misurata sul bus ad alta tensione (4) con un primo intervallo di valori di funzionamento ottimale predefinito;
- sulla base di detto confronto della tensione (V_H) misurata sul bus ad alta tensione (4) con il primo intervallo di valori di funzionamento ottimale predefinito, incrementare (S6) o decrementare (S6) a passi predefiniti il valore di duty cycle per mantenere il primo valore di

tensione (V_H) entro il primo intervallo di valori di funzionamento ottimale predefinito.

5. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre, durante la prima modalità di funzionamento (144), le fasi di:

- misurare (S7), in modo continuativo, la tensione (V_L) presente sul bus a bassa tensione (2);

- confrontare (S1a; S1, S2) la tensione (V_L) misurata sul bus a bassa tensione (2) con un secondo intervallo di valori di funzionamento ottimale predefinito;

- sulla base di detto confronto della tensione (V_L) misurata sul bus a bassa tensione (2) con il secondo intervallo di valori di funzionamento ottimale predefinito, incrementare (S7) o decrementare (S1a; S1, S2) a passi predefiniti il valore di duty cycle per mantenere il primo valore di tensione (V_L) entro il secondo intervallo di valori di funzionamento ottimale predefinito.

6. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre, prima di comandare un passaggio dalla prima modalità di funzionamento alla seconda modalità di funzionamento del convertitore bidirezionale DC-DC (100), le fasi di:

- misurare (S4), in modo continuativo durante un primo intervallo temporale (t_2) predefinito, la tensione (V_H) presente sul bus ad alta tensione (4);

- confrontare (S4) la tensione (V_H) misurata sul bus ad alta tensione (4) con un primo valore di soglia (V_{inf});

- verificare (S4) se, entro il primo intervallo temporale (t_2), la tensione (V_H) sul bus ad alta tensione (4) assume un valore inferiore al primo valore di soglia (V_{inf}), e, in caso positivo, comandare (147; S3, S4) il passaggio del convertitore bidirezionale DC-DC (100) dalla prima modalità di funzionamento alla seconda modalità di funzionamento.

7. Metodo secondo la rivendicazione 6, in cui detta fase di comandare (147; S3, S4) il passaggio del convertitore bidirezionale DC-DC (100) dalla prima modalità di funzionamento alla seconda modalità di funzionamento comprende inoltre le fasi di:

- misurare (S5), in modo continuativo, la tensione (V_H) presente sul bus ad alta tensione (4);

- confrontare (S5, S7) la tensione (V_H) misurata sul bus ad alta tensione (4) con un secondo valore di soglia (V_p) maggiore del primo valore di soglia (V_{inf});

- se la tensione (V_H) misurata sul bus ad alta tensione (4) è maggiore del secondo valore di soglia (V_p), mantenere (S7) il convertitore bidirezionale DC-DC (100) nella prima modalità di funzionamento;

- se la tensione (V_H) misurata sul bus ad alta tensione (4) è minore del secondo valore di soglia (V_p),

completare (S5, S6) il passaggio dalla prima modalità di funzionamento alla seconda modalità di funzionamento comandando il convertitore bidirezionale DC-DC (100) nella seconda modalità di funzionamento.

8. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui la fase di comandare (148) il passaggio dalla seconda modalità di funzionamento alla prima modalità di funzionamento comprende inoltre le fasi di:

- mantenere (S6) il convertitore bidirezionale DC-DC (100) nella seconda modalità di funzionamento per un secondo intervallo temporale (t3) predefinito;

- rilevare (S6) in modo continuativo, al termine del secondo intervallo temporale (t3), il valore di duty cycle durante detta seconda modalità di funzionamento;

- confrontare (S6) il valore di duty cycle rilevato con un valore di soglia di duty cycle;

- se il valore di duty cycle rilevato è minore del valore di soglia di duty cycle, comandare (S6, S1a) il passaggio dalla seconda modalità di funzionamento alla prima modalità di funzionamento.

p.i.: ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

Simone BONGIOVANNI

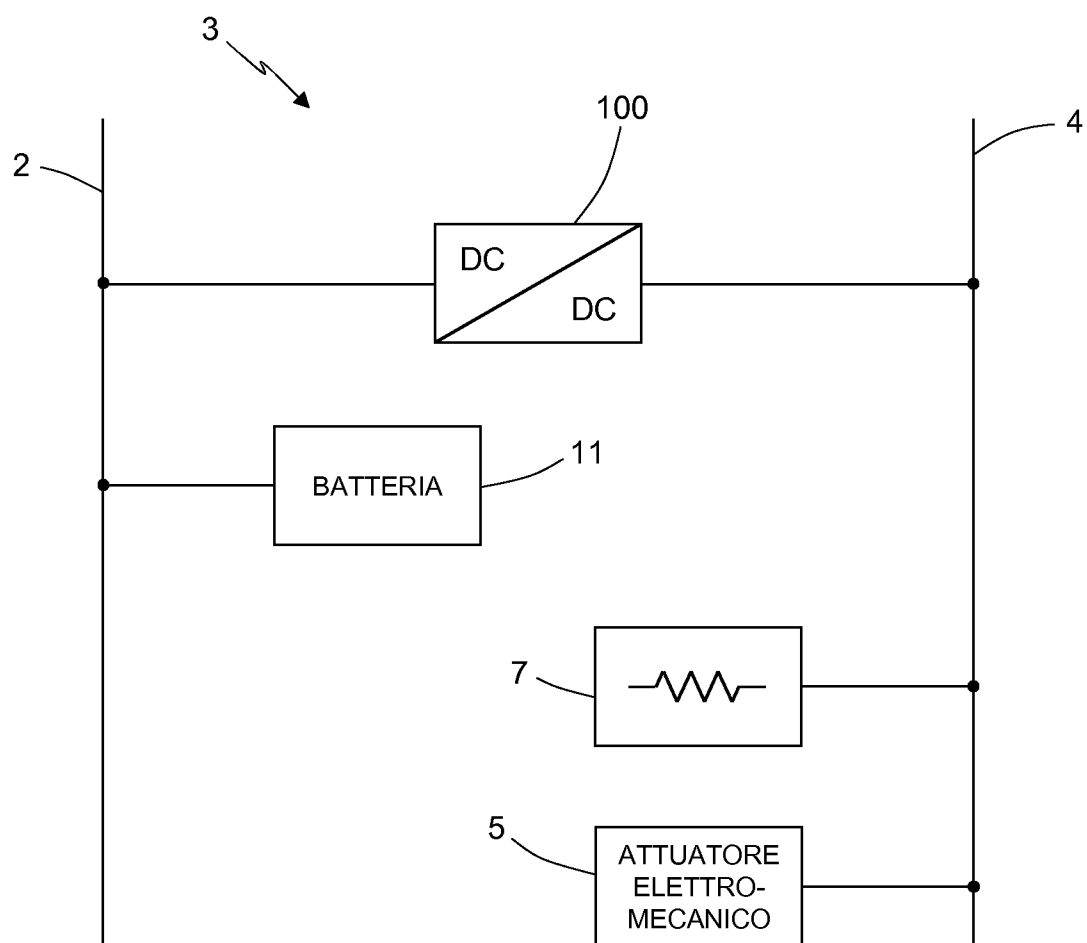


Fig.1

p.i.: ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

Simone BONGIOVANNI
(Iscrizione Albo nr. 615/BM)

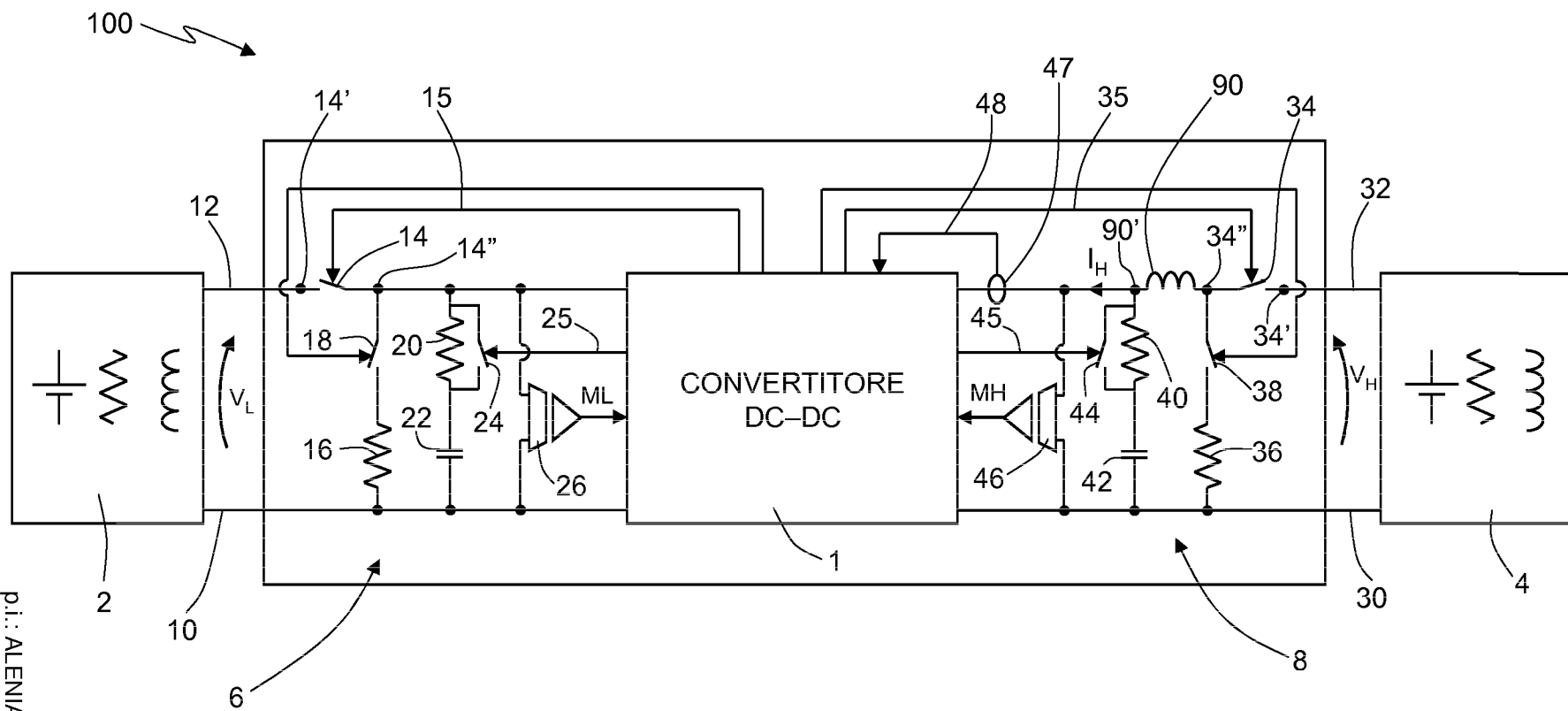


Fig.2

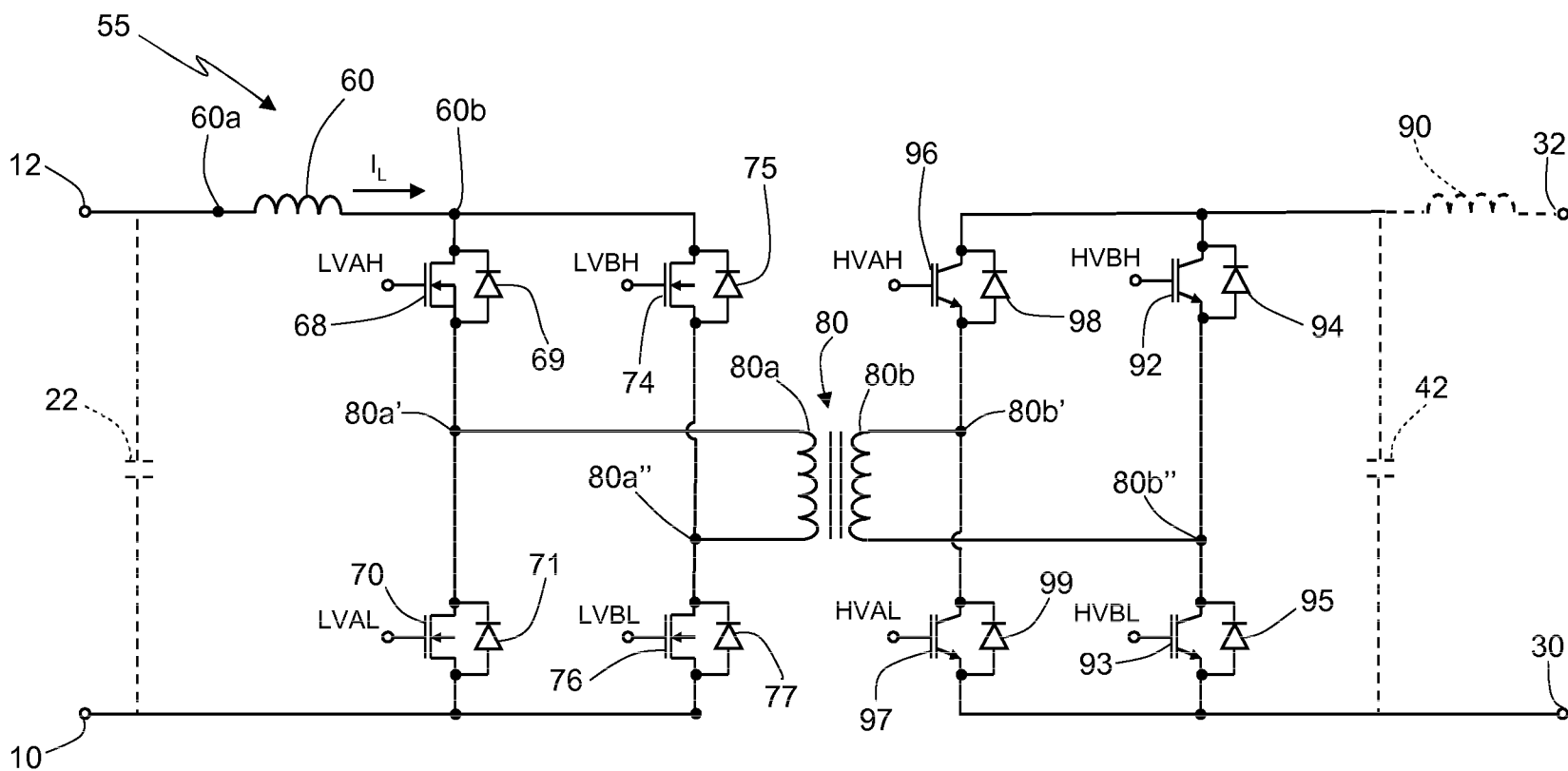
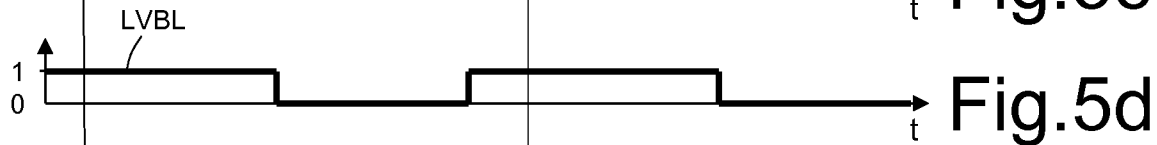
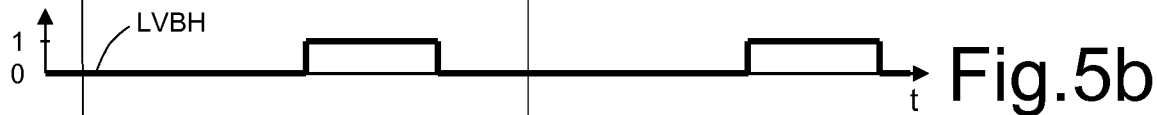
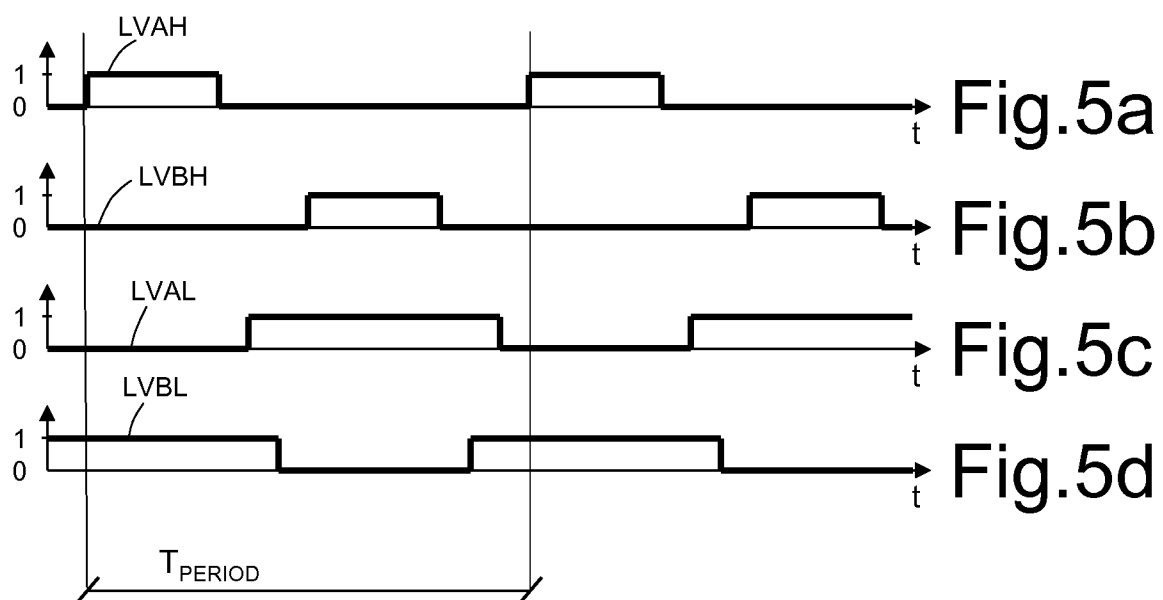
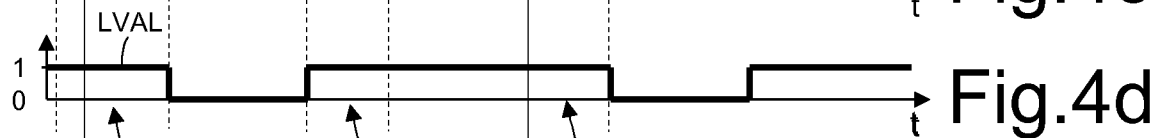
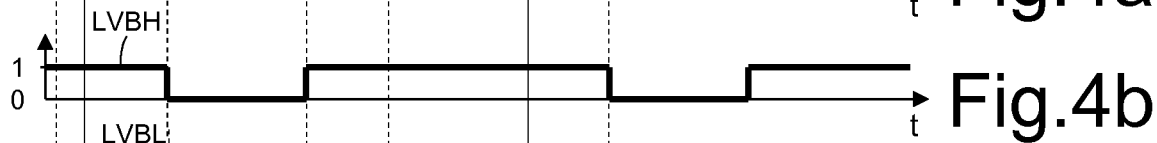
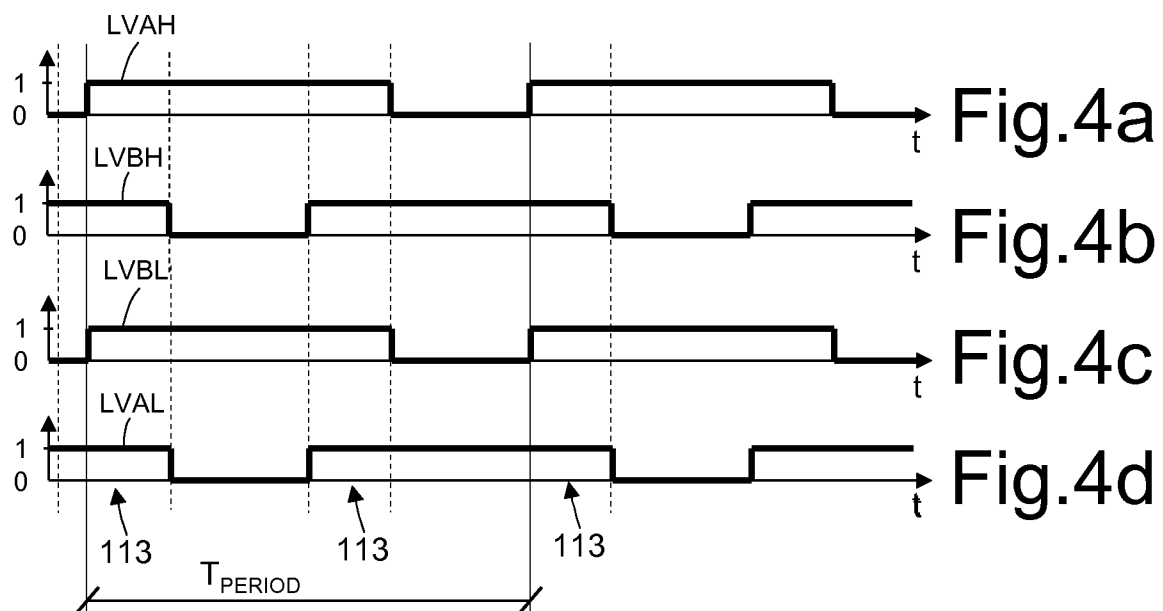


Fig.3



p.i.: ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

Simone BONGIOVANNI
(Iscrizione Albo nr. 615/BM)

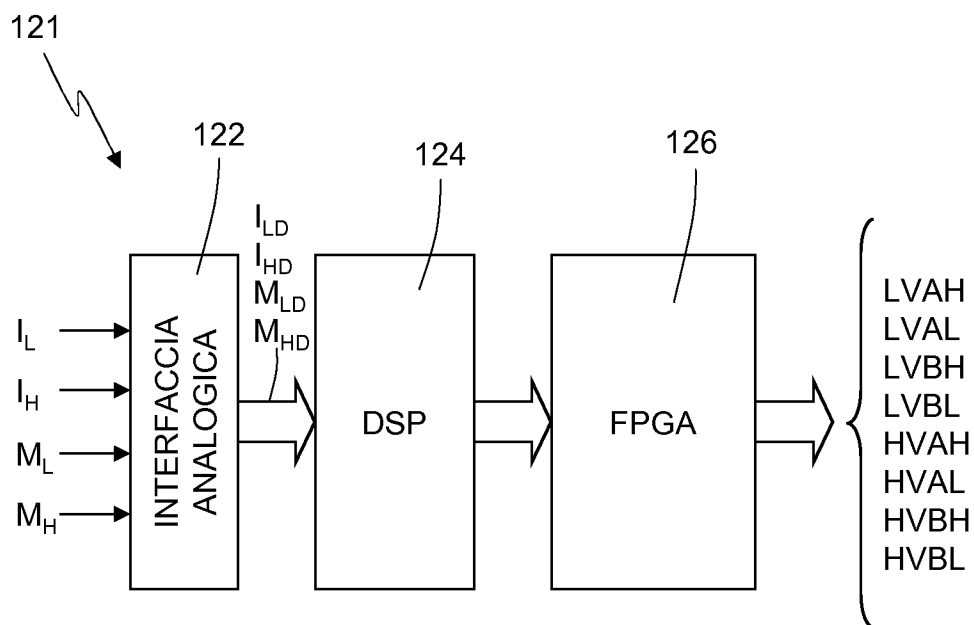
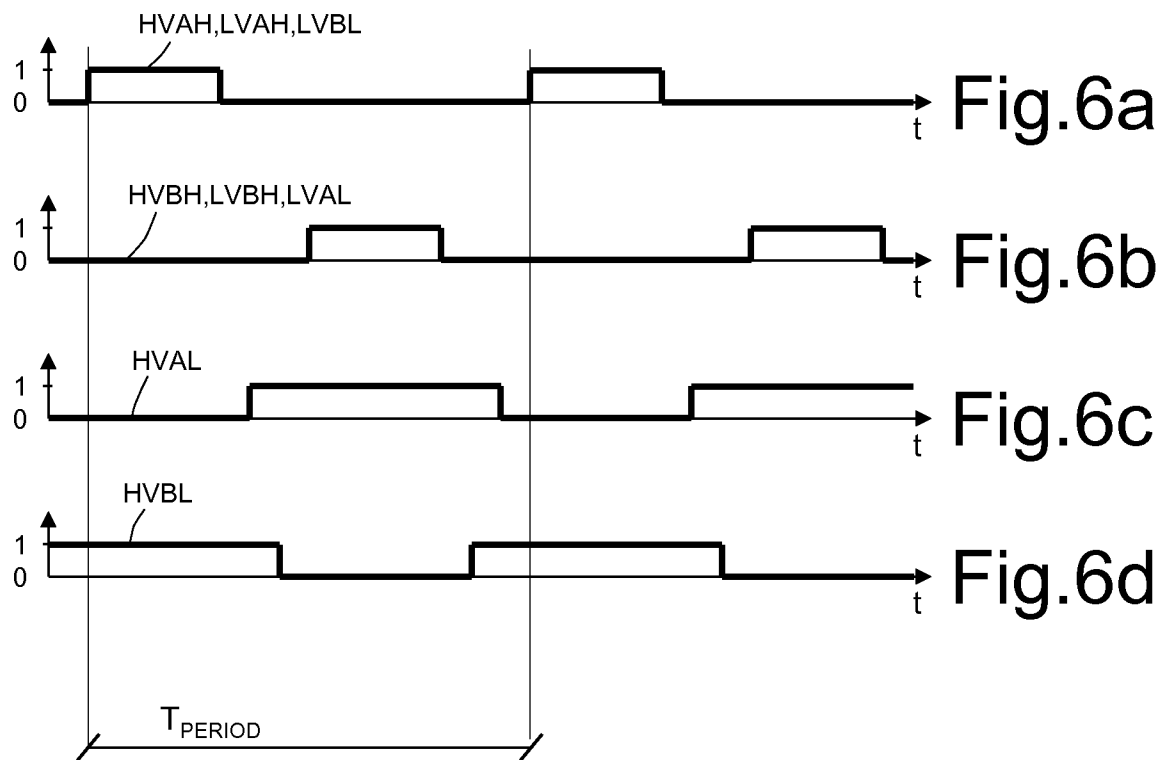


Fig.7

p.i.: ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

Simone BONGIOVANNI
(Iscrizione Albo nr. 615/BM)

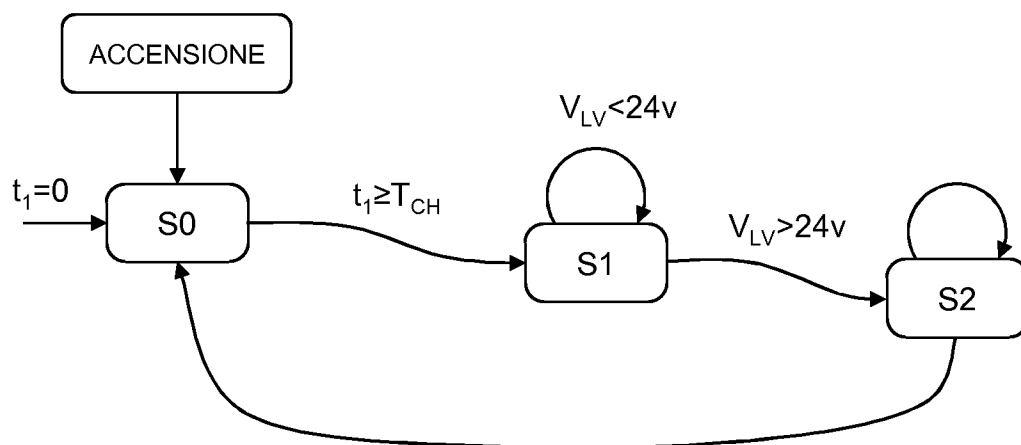


Fig.8

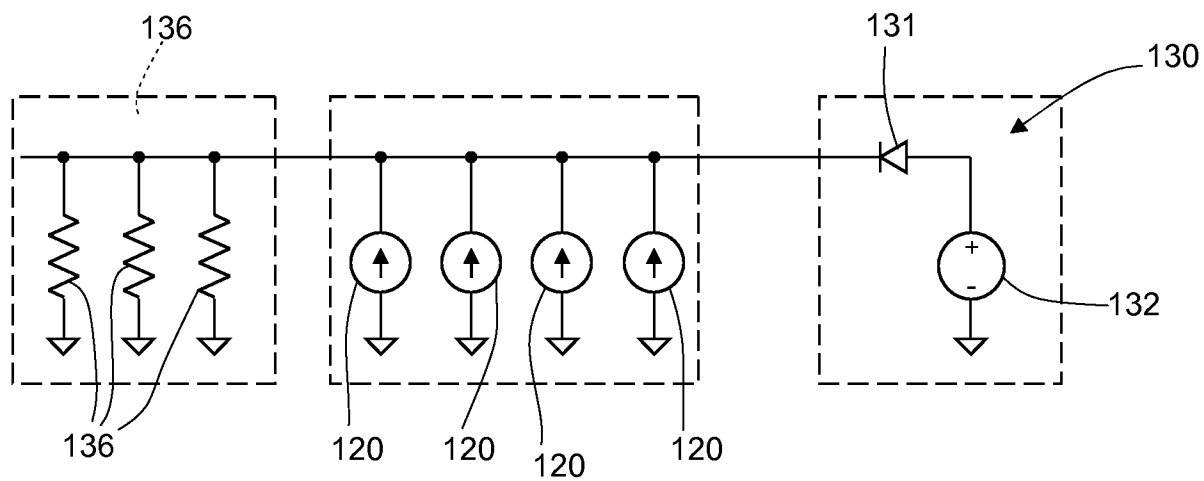


Fig.9

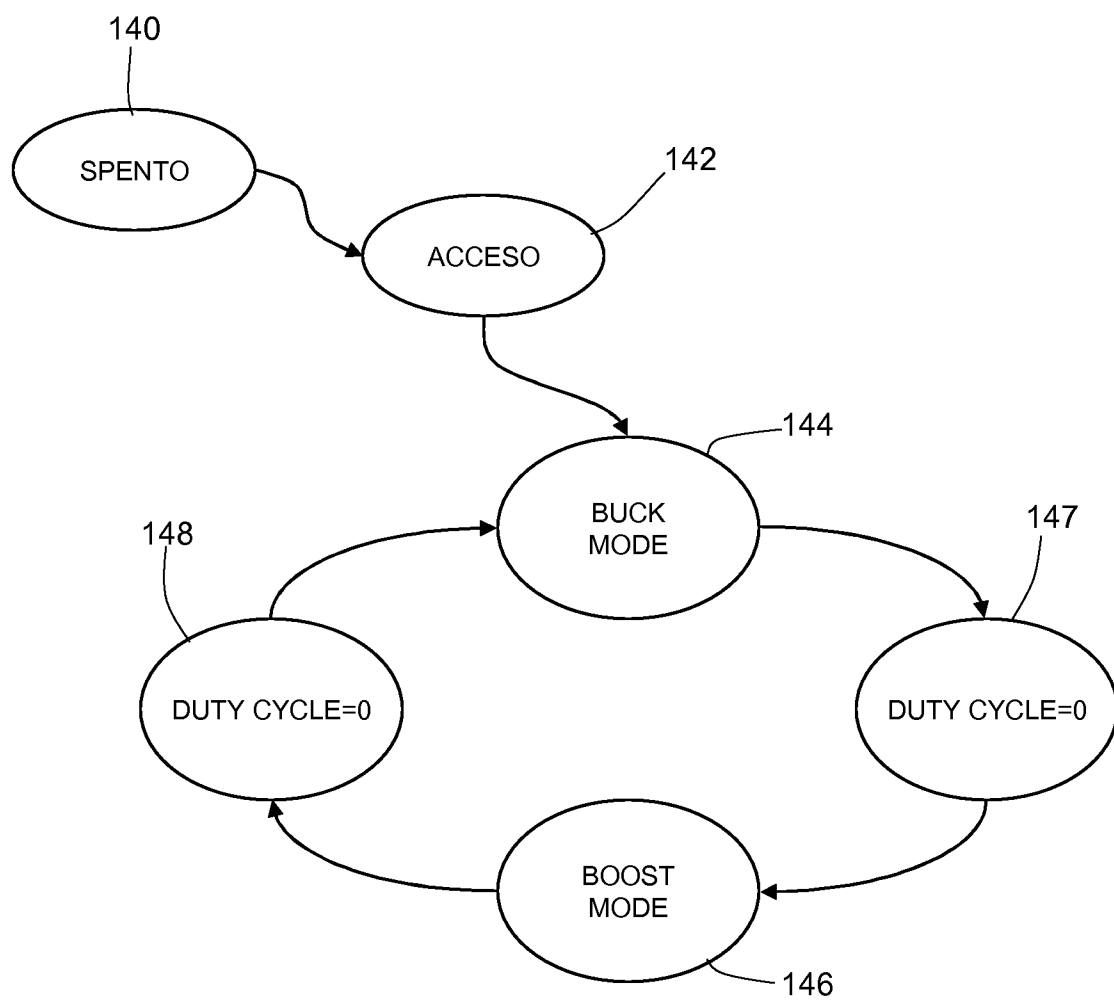


Fig.10

p.i.: ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

Simone BONGIOVANNI
(Iscrizione Albo nr. 615/BM)

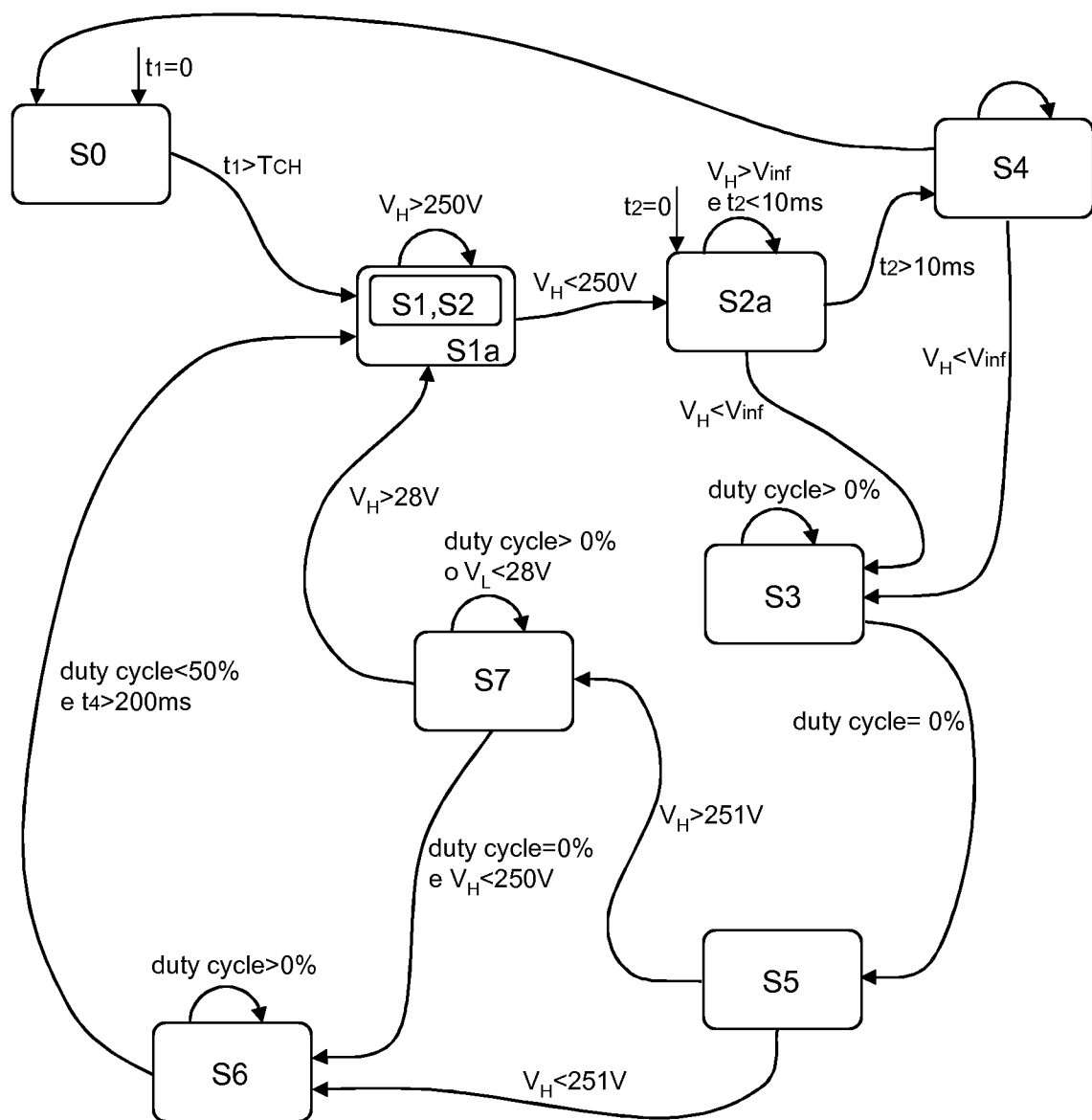


Fig.11

p.i.: ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

Simone BONGIOVANNI
(Iscrizione Albo nr. 615/BM)

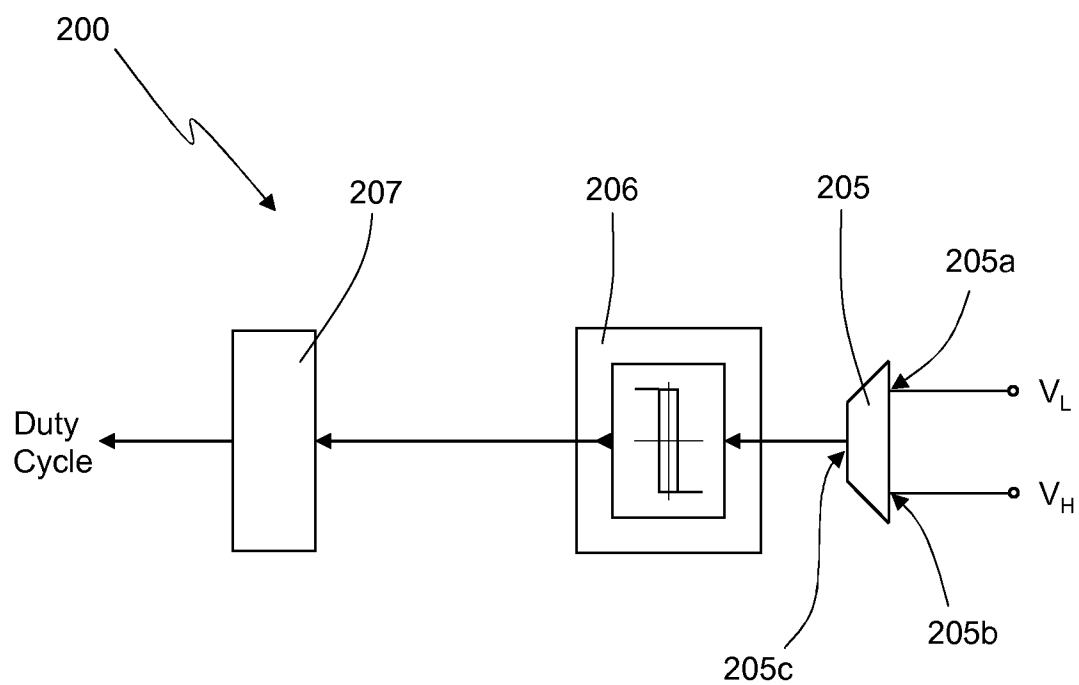


Fig.12

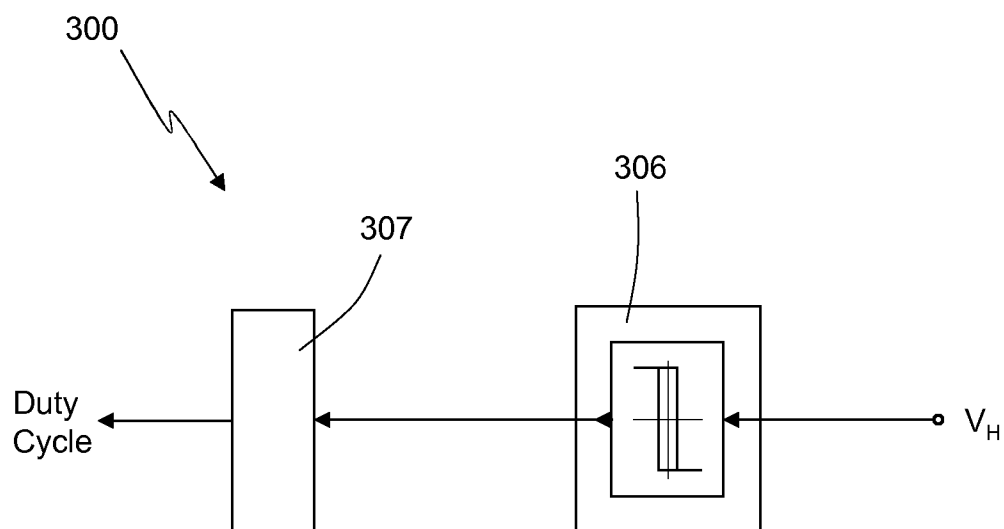


Fig.13

p.i.: ALENIA AERONAUTICA S.P.A.

Simone BONGIOVANNI
(Iscrizione Albo nr. 615/BM)