

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102011901982687A1

Publication Date

20130328

Applicant

MAGNETI MARELLI S.P.A.

Title

PROCEDIMENTO DI SCARICA DI UN CONDENSATORE DC-LINK IN UN
APPARATO CONVERTITORE DC-DC E RELATIVO APPARATO
CONVERTITORE DC-DC

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Procedimento di scarica di un condensatore DC-link in un apparato convertitore DC-DC e relativo apparato convertitore DC-DC",

di: Magneti Marelli S.p.A., nazionalità italiana, viale Aldo Borletti 61/63, 20011 Corbetta MI

Inventori designati: Milena FEDERICO, Andrea NEPOTE.

Depositata il: 28 settembre 2011

TESTO DELLA DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda un procedimento di scarica di una capacità DC-link in un apparato convertitore DC-DC isolato comprendente un lato ad alta tensione comprendente una rete a H di interruttori, connessa fra un nodo d'ingresso su cui si realizza una tensione continua e un primo avvolgimento di un trasformatore e una capacità DC-link connessa in parallelo al nodo d'ingresso dell'apparato convertitore, un lato a bassa tensione comprendente un secondo avvolgimento di detto trasformatore con un numero minore di spire rispetto al primo avvolgimento, con una presa centrale da cui si dipartono un primo e un secondo semiavvolgimento, un circuito reattivo di immagazzinamento dell'energia, in particolare un induttore, connesso in serie fra detta presa centrale e un nodo configurato per la connessione di una batteria atta ad applicare una tensione di batteria continua, una rete di commutazione di detto primo e secondo semiavvolgimento comprendente dispositivi disposti per connettere selettivamente il primo e il secondo semiavvolgimento a un riferimento fisso di tensione, in particolare un riferimento di massa.

Un convertitore DC-DC è un circuito che converte una sorgente di corrente continua da un livello o valore di tensione a un altro. Tale tipologia di convertitori costituisce una classe di convertitori di potenza. I

convertitori DC-DC sono importanti negli strumenti elettronici mobili come i telefoni cellulari e i computer laptop, che sono alimentati da batterie. Tali strumenti elettronici spesso contengono diversi sottocircuiti, in cui ognuno necessita di un livello di tensione differente da quella fornita dalla batteria (tipicamente più alta o più bassa della tensione della batteria, e qualche volta anche tensioni negative). Inoltre, la tensione della batteria diminuisce man mano che la potenza viene prelevata. I convertitori DC-DC offrono un metodo di generare diversi livelli di tensione controllati a partire da una batteria a tensione variabile, risparmiando in tal modo spazio ed evitando di utilizzare molte batterie per fornire energia alle diverse parti dello strumento.

Nel settore automotive, ad esempio per le auto elettriche, è spesso necessario che tali apparati convertitori siano bidirezionali, operando la conversione fra un lato a un livello di tensione più alto e un lato a un livello di tensione più basso in ambedue le direzioni. Ad esempio, nei veicoli ibridi usualmente sono presenti due reti elettriche, rispettivamente una rete elettrica di tipo tradizionale per carichi quali le luci o la centralina per il controllo del motore termico e una rete elettrica ad alta tensione per il motore elettrico, che può operare ad esempio a una tensione intorno a 600 V. In tale contesto necessitano sistemi di conversione dell'energia, preferibilmente bidirezionali, che mettano in comunicazione le due reti elettriche, in particolare per trasferire energia dalla rete ad alta tensione alimentata da una batteria specifica, ad esempio a ioni di litio, alla rete convenzionale a più bassa tensione, che impiegano un convertitore.

La figura 1 rappresenta lo schema a blocchi di un convertitore DC/DC isolato, indicato con il riferimento 10, caratterizzato da un rapporto di trasformazione k tra il mondo ad alta tensione, indicato con HV, e quello a bassa

tensione, indicato con LV.

Con V_{HV} è indicata un'alta tensione, all'ingresso del convertitore 10, sul quale è posta in parallelo una capacità DC-link C_L , in particolare un condensatore, mentre con I_{HV} è indicata una corrente di carica/scarica della capacità DC-link C_L , come meglio illustrato nel seguito. Naturalmente nel presente contesto la tensione è definita alta rispetto alla tensione all'altro capo del convertitore 10, che è invece una tensione più bassa.

La capacità DC-link corrisponde in generale al condensatore connesso all'ingresso del convertitore DC-DC 10, dove giunge la tensione continua da convertire a una tensione più bassa. La capacità DC-link è di solito ottenuta tramite un condensatore elettrolitico o a film che provvede a disaccoppiare l'ingresso del convertitore DC-DC.

L'apparato convertitore DC-DC 10 in generale può funzionare in due differenti modalità.

Una prima modalità è la modalità cosiddetta "buck" o di trasformatore. L'energia transita dal lato ad alta tensione HV verso il lato a bassa tensione LV. Tale modalità viene utilizzata, ad esempio per sostituire l'alternatore di un autoveicolo e ricaricare le batterie dell'autoveicolo, oppure per scaricare e portare ad un regime di sicurezza il condensatore DC-link C_L recuperando sulla batteria 14 l'energia immagazzinata in esso.

In questo caso, per la convenzione di segno dichiarata nella figura 1, la corrente di carica/scarica I_{HV} avrà segno negativo.

In una seconda modalità, detta boost, l'energia transita dal lato a bassa tensione LV al lato ad alta tensione HV. Tale modalità viene utilizzata, ad esempio per caricare, impiegando batterie a tensione più bassa, delle batterie che operano in un campo di tensioni più alte, oppure per effettuare una precarica del condensatore DC-link.

In questo caso, la corrente di carica/scarica I_{HV} è

positiva secondo la convenzione dei segni riportata in figura 1.

In entrambe le modalità, però, tale apparato convertitore DC/DC 10 presenta dei limiti funzionali dovuti al rapporto spire del trasformatore che lo caratterizza ed al valore di tensione delle batterie dal lato a bassa tensione LV.

Infatti:

- la modalità buck si caratterizza per determinare una conversione di tipo step-down o riduttrice. In questo caso quindi il convertitore 10 funziona solo quando la tensione di batteria riportata lato a alta tensione ($V_{LV} \cdot k$) è minore dell'alta tensione V_{HV} .
- per contro, la modalità boost si caratterizza per determinare una conversione di tipo step-up o elevatrice. In questo caso, quindi, il convertitore 10 funziona solo quando la tensione di batteria riportata sul lato alta tensione HV, ($V_{LV} \cdot k$) è minore dell'alta tensione V_{HV} .

In figura 1b è rappresentato a questo proposito a un diagramma che mostra la corrente di carica/scarica I_{HV} in funzione dei valori assunti dall'alta tensione V_{HV} . Tale diagramma mostra la soglia al valore di tensione di batteria V_{LV} moltiplicata per il rapporto di trasformazione k sia per la modalità buck, in un quadrante indicato con il riferimento 100, che per la modalità boost, in un quadrante indicato con il riferimento 200.

In figura 2 è mostrata in dettaglio un'architettura d'esempio dell'apparato convertitore 10, di tipo switching bidirezionale isolato. In particolare, in figura 2 con il riferimento 11 è indicato un trasformatore con un rapporto spire k , o di trasformazione, maggiore di uno fra il primario e il secondario. Tale trasformatore 11 dunque comprende un avvolgimento primario, indicato con il riferimento 12, mentre con il riferimento 13 è indicato un

avvolgimento secondario.

Con riferimento al lato a bassa tensione LV, l'avvolgimento secondario 13 è del tipo a presa centrale con avvolgimento doppio, cioè rispettivamente due semi-avvolgimenti 13a e 13b che si dipartono da una presa centrale 13c che costituisce un terminale comune. Con 14 è indicata una batteria, che applica una tensione di batteria V_{LV} da convertire, la quale viene riportata attraverso un circuito reattivo di immagazzinamento dell'energia, qui ottenuto tramite un induttore serie 15, alla presa centrale 13c dell'avvolgimento secondario 13 del trasformatore 11. I due semi-avvolgimenti 13a e 13b del secondario 13 che si dipartono dalla presa centrale 13c sono connessi tramite gli altri loro terminali verso un riferimento di massa 16 tramite rispettivi interruttori di commutazione principali M1 e M2, che individuano una rete di commutazione per la bassa tensione, per operare cioè la conversione boost. Tali primo interruttore principale M2 e secondo interruttore principale M1 sono ottenuti tramite transistori, in particolare transistori MOSFET, pilotati da un modulo controllore, non mostrato in figura 1, che invia rispettivi segnali di pilotaggio, V1 e V2, in particolare livelli di tensione, sul loro elettrodo di controllo, ad esempio il gate del MOSFET, per provocarne l'apertura e la chiusura. L'apparato convertitore 10 può operare quindi come un convertitore DC-DC boost isolato switching, con un funzionamento di tipo push-pull degli interruttori principali M1, M2.

Dal lato ad alta tensione HV, è connesso viceversa un ponte a H 20, comprendente una prima coppia di transistori MOSFET MA, MC, connessa fra la tensione d'ingresso e il riferimento di massa 16, formanti una prima gamba del ponte a H 20 e connessi al morsetto positivo del primario 12 tramite il loro morsetto comune (source). Il ponte a H 20 comprende inoltre ulteriori transistori MOSFET MB e MD, formanti la seconda gamba del ponte 20, connessi al

morsetto negativo del primario 12 tramite il loro nodo comune.

Ciascun transistor MOSFET nello schema di figura 1 e nei seguenti schemi è rappresentato insieme al proprio diodo di body connesso fra source e drain.

Fra un nodo d'ingresso 25 dell'apparato convertitore 10 e il riferimento di massa 16 è rappresentata la capacità DC-link C_L , sulla quale si realizza una caduta di tensione, corrispondente all'alta tensione V_{HV} all'ingresso del convertitore DC-DC 10.

Come detto, in tale modalità classica di funzionamento di un convertitore DC-DC converter, il condensatore DC-link C_L può essere scaricato con un pilotaggio di tipo buck fintanto che l'alta tensione V_{HV} sul condensatore C_L non raggiunge il valore V_{LV} della batteria 14 moltiplicato per il rapporto spire k del trasformatore 11.

In tale pilotaggio di tipo buck, la modulazione delle diagonali del ponte a H 20 ad alta tensione, ossia la chiusura simultanea alternativamente della coppia di MOSFET MA, MD o MB, MC, con un duty cycle in funzione dell'alta tensione V_{HV} sulla capacità DC-link C_L e della corrente di scarica di tale condensatore C_L eseguita in modo intervallato di un tempo pari a metà dell'inverso della frequenza di commutazione, per evitare la saturazione del nucleo del trasformatore 11.

Con una diagonale attiva, ad esempio i MOSFET MA e MD, la tensione di primario V_p si riporta sull'avvolgimento secondario 13 diviso il rapporto spire k , e corrisponde in questo caso alla tensione V_{s1} sul semiavvolgimento 13b connesso all'interruttore M2. Il passaggio dell'energia del condensatore C_L all'induttanza 15 e a un nodo 17 d'uscita del convertitore al quale è connesso un condensatore d'uscita C_o e sul quale è connettibile, come mostrato in figura 1, la batteria 14, avviene con la conduzione dell'interruttore MOSFET M1 o solo del diodo di body dell'interruttore MOSFET M1. La successiva scarica

dell'induttanza 15 sulla batteria 14 avviene nel tempo rimanente all'attivazione dell'altra diagonale con la conduzione di entrambi gli interruttori principali M1 e M2 in quanto si ipotizza sul lato a tensione alta HV del convertitore un pilotaggio di tipo hard switching, che comporta, in questo intervallo, di avere 0V ai capi del trasformatore 11.

Con l'attivazione dell'altra diagonale (MOSFET MB, MC) del ponte 20, l'induttanza 15 si ricarica tramite la tensione V_{s2} sull'altro semiavvolgimento 13a via l'interruttore principale MOSFET M2; la sua scarica avverrà in modo analogo a quanto descritto sopra.

Può essere verificato che il pilotaggio lato alta tensione HV, che sia hard switching o phase shift, non va ad inficiare la modalità di scarica della capacità C_L , in quanto in entrambi i casi la modulazione che si ottiene riguarda il tempo di accensione delle diagonali e quindi l'intervallo nel quale si ha reale passaggio di energia tra lato a alta tensione HV e bassa tensione LV.

L'energia immagazzinata dalla capacità DC-link C_L viene quindi trasferita direttamente tramite il trasformatore 11 all'induttanza 15 e alla batteria 14.

In figura 3 sono mostrati gli andamenti in funzione del tempo delle coppie di tensioni di pilotaggio VA, VD e VB, VC, corrispondenti ai transistori MA, MD e MB, MC sulle due diagonali del ponte 20, la tensione sull'avvolgimento primario V_P , la corrente I_L nell'induttore 15. Tali andamenti sono determinati dal pilotaggio di tipo buck. Sono altresì raffigurate le correnti I_1 e I_2 che scorrono nei MOSFET principali M1 e M2.

Da quanto sopra, risulta che il pilotaggio buck può essere effettuato fintanto che la tensione sul secondario, pari a V_{HV}/k , è maggiore della tensione di batteria V_{LV} .

La scarica della capacità DC-link C_L potrebbe quindi proseguire in modo dissipativo, ad esempio, sfruttando le resistenze parassite del ponte e/o del trasformatore,

oppure mettendo in cortocircuito le gambe del ponte, oppure ancora tramite pilotaggio in regime lineare di uno dei dispositivi a semiconduttore.

Dunque, tale tipologia di circuito presenta l'inconveniente di non potere utilizzare completamente un pilotaggio di tipo buck per la scarica del condensatore, dovendo ricorrere a metodi dissipativi quando la tensione sul condensatore scende sotto il livello della tensione di batteria moltiplicata per il rapporto spire.

La presente invenzione si prefigge lo scopo di realizzare una soluzione di procedimento di scarica di un condensatore DC-link in un apparato convertitore DC-DC che risolva gli inconvenienti dell'arte nota, e, in particolare, permetta di operare la scarica del condensatore DC link evitando di ricorrere a metodi dissipativi quando la tensione sul condensatore DC link scende al di sotto della tensione di batteria moltiplicata per il rapporto spire.

Secondo la presente invenzione, tale scopo viene raggiunto grazie ad un procedimento di scarica, nonché un corrispondente apparato convertitore aventi le caratteristiche richiamate in modo specifico nelle rivendicazioni che seguono.

L'invenzione verrà descritta con riferimento ai disegni annessi, forniti a puro titolo di esempio non limitativo, in cui:

- le figure 1a, 1b, 2 e 3 sono già state illustrate in precedenza;

- la figura 4 rappresenta uno schema circuitale di principio di una forma realizzativa di un apparato convertitore implementante il procedimento di scarica secondo l'invenzione;

- la figura 5 mostra un diagramma temporale di segnali di pilotaggio impiegati dall'apparato convertitore di figura 3;

- la figura 6 rappresenta uno schema circuitale di

principio di una forma realizzativa preferita dell'apparato convertitore implementante il procedimento di scarica secondo l'invenzione;

- la figura 7 rappresenta un diagramma di campi di impiego della forma realizzativa di Figura 6.

In breve, il procedimento di scarica prevede di impiegare un apparato convertitore comprendente un rispettivo interruttore aggiuntivo per la scarica della capacità DC-link oltre agli interruttori principali della rete di switching del convertitore DC-DC. Secondo un aspetto principale, oltrepassato il limite del classico pilotaggio buck, nella quale si opera una conversione dell'energia dal lato a alta tensione verso il lato a bassa tensione del convertitore, modulando i tempi di accensione delle diagonali del ponte a H per trasferire la tensione sul nodo d'ingresso sul circuito reattivo, e quindi sulla batteria, quando la tensione sul secondario scende invece al di sotto della tensione di batteria a bassa tensione, il convertitore inizia ad essere pilotato in modalità boost sfruttando il pilotaggio degli interruttori aggiuntivi per la carica dell'induttanza al valore di tensione riportato sul secondario e degli interruttori principali per scaricare il circuito reattivo alla tensione presente sull'uno o l'altro semiavvolgimento secondario del trasformatore e quindi determinare un cammino elettrico alternativo per il flusso della corrente attraverso un interruttore aggiuntivo e il corrispondente semiavvolgimento verso il nodo cui è connessa la batteria, al fine di operare una scarica completa di detta capacità DC-link.

In figura 4 è mostrato dunque un apparato convertitore adatto a implementare il procedimento di scarica secondo l'invenzione.

Tale circuito, indicato con il riferimento 30 corrisponde sostanzialmente al circuito di figura 1, tuttavia comprende degli interruttori aggiuntivi M3 e M4.

Secondo un aspetto principale dell'invenzione, ciascuno dei semi-avvolgimenti 13a e 13b che si dipartono dalla presa centrale 13c del secondario 13 al suo altro capo è sia :

- selettivamente connettibile tramite il rispettivo interruttore principale M2 o M1 al riferimento di massa 16, sia

- selettivamente connettibile, a mezzo di un interruttore aggiuntivo M4 o M3 al nodo 17 cui viene connessa la batteria 14.

L'interruttore aggiuntivo M4 connette il semi-avvolgimento 13a al nodo 17 cui si connette la batteria 14, in parallelo all'induttore 15. L'interruttore aggiuntivo M3 connette il semi-avvolgimento 13b al nodo 17 cui è connessa la batteria 14, in parallelo all'induttore 15.

Fra il semiavvolgimento 13b e l'interruttore aggiuntivo M3 è interposto un diodo serie D1 che permette il flusso della corrente verso tale semiavvolgimento 13b e blocca la corrente verso la batteria 14. Fra il semiavvolgimento 13a e l'interruttore aggiuntivo M4 è interposto un diodo serie D2 che permette il flusso della corrente verso tale semiavvolgimento 13a e blocca la corrente verso la batteria 14. Tali diodi serie D1 e D2 evitano che, con i soli MOSFET aggiuntivi M3 e M4 sui rispettivi rami, nella modalità buck, i rispettivi diodi di body possano cortocircuitare gli elettrodi di drain degli interruttori principali MOSFET M1 e M2 sulla batteria 14.

In figura 5 sono mostrati diagrammi rappresentativi dell'andamento in funzione del tempo dei segnali nell'apparato convertitore 30 di figura 4, in particolare gli andamenti in funzione del tempo delle coppie di tensioni di pilotaggio VA, VD e VB, VC, corrispondenti ai transistori MA, MD e MB, MC sulle due diagonali del ponte 20, la corrente I_L nell'induttore 15. Sono altresì raffigurate le correnti I_1 e I_2 che scorrono nei MOSFET principali M1 e M2 e le correnti I_3 e I_4 che scorrono nei

MOSFET aggiuntivi M3 e M4. Tali correnti sono determinate dagli stati di apertura e chiusura qui descritti e comandati agli ingressi di pilotaggio, o elettrodi di gate, dei MOSFET, da corrispondenti segnali di pilotaggio generati da un controllore, non rappresentato nelle figure.

Tale apparato 40 permette la completa scarica della capacità DC-link C_L recuperando tutta l'energia immagazzinata nel condensatore, in quanto, quando la tensione sul secondario scende al di sotto della tensione di batteria, l'apparato convertitore inizia ad essere pilotato in modalità boost sfruttando il pilotaggio dei MOSFET aggiuntivi M4 e M3.

I MOSFET MA, MB, MC, MD dal lato ad alta tensione vengono sempre pilotati in maniera bilanciata, ossia con duty cycle del 50% o comunque sincrono con il secondario e maggiore o uguale a quest'ultimo quindi:

- gli interruttori MOSFET MA, MD della prima diagonale del ponte 20, chiusi, riportano l'alta tensione V_{HV} scalata del rapporto di trasformazione k come tensione V_{s1} sul semiavvolgimento 13b;

- gli interruttori MOSFET MB, MC della seconda diagonale, chiusi, riportano l'alta tensione V_{HV} scalata del rapporto di trasformazione k come tensione V_{s2} sul semiavvolgimento 13a.

Riportata la tensione su un avvolgimento secondario, ad esempio il semiavvolgimento 13b su cui si realizza la tensione V_{s1} , viene operata la chiusura dell'interruttore aggiuntivo M3 corrispondente a tale semiavvolgimento 13b, sicché l'induttanza 15 si ricarica alla medesima tensione presente sull'avvolgimento 13b.

Quindi, si provvede ad aprire l'interruttore aggiuntivo M3 per operare la scarica dell'energia immagazzinata nell'induttore 15 sulla batteria 14. L'interruttore principale M1 relativo al semiavvolgimento 13b viene chiuso per permettere il fluire della corrente. Eventualmente la corrente può transitare sul diodo di body

dell'interruttore principale MOSFET M1, che può non essere necessariamente chiuso.

Quando la tensione viene invece riportata sull'altro semiavvolgimento 13a, come tensione V_{s2} , il pilotaggio dell'interruttore principale M2 e dell'interruttore aggiuntivo M4 è analogo e simmetrico a quanto descritto per il semiavvolgimento 13b.

La modulazione del duty cycle avviene solo sugli interruttori MOSFET dal lato bassa tensione LV monitorando il valore di picco della corrente I_L sull'induttanza 15. La modulazione del duty cycle può avvenire per esempio secondo la modalità classica del "current mode", monitorando cioè la corrente di induttore tramite un corrispondente sensore e commutando in spegnimento rispettivamente i MOSFET aggiuntivi M3 ed M4 quando tale corrente raggiunge una soglia prefissata.

In figura 6 è mostrata una forma realizzativa preferita dell'invenzione, dove per ciascun semiavvolgimento 13a, 13b è previsto il rispettivo interruttore aggiuntivo M3 o M4, ma inoltre comprendono interposto fra il rispettivo semiavvolgimento 13a o 13b e l'interruttore aggiuntivo M3 o M4 un ulteriore interruttore M5 o M6, circuitalmente connesso al posto del diodo serie D1 o D2 di figura 4, realizzato anch'esso preferibilmente attraverso un transistor MOSFET, posto in configurazione back-to-back rispetto all'interruttore aggiuntivo M3 o M4, con il quale ha in comune l'elettrodo di source. L'interruttore ulteriore M5 è connesso all'interruttore aggiuntivo M3, mentre l'interruttore ulteriore M6 è connesso all'interruttore aggiuntivo M4.

Tale circuito svolge sia la funzione di scarica della capacità DC-link C_L , sia una funzione di limitazione della in-rush current.

Nell'ambito della limitazione della in-rush current, ciascuno dei semi-avvolgimenti 13a e 13b che si dipartono dalla presa centrale 13a del secondario 13 al suo altro

capo è sia :

- selettivamente connettibile tramite il rispettivo interruttore principale M2 o M1 al riferimento di massa 16, sia

- selettivamente connettibile, a mezzo del rispettivo interruttore ulteriore M6 o M5 alla batteria 14, determinando, quando il rispettivo ulteriore interruttore di limitazione M6 o M5 è chiuso, un percorso chiuso dal secondario 13 verso il nodo 17 nel quale può fluire una corrente, in particolare la corrente che scorre nell'induttore 15.

In particolare, il pilotaggio prevede di comandare tali interruttori del lato a bassa tensione LV secondo le seguenti fasi, per limitare la corrente di in-rush:

- in una prima fase chiudere l'interruttore principale M2 e l'interruttore ulteriore M4 relativi al semiavvolgimento 13a, mantenendoli chiusi, finché la corrente I_L nel circuito induttivo di immagazzinamento 15 raggiunge un valore di corrente limite I_p , in particolare misurato o stimato, mantenendo aperti l'interruttore principale M1 e l'interruttore ulteriore M5 relativi al semiavvolgimento 13b;

- in una seconda fase, aprire l'interruttore principale M2 mantenendo chiuso l'interruttore ulteriore M6 per far fluire una corrente verso la batteria 14;

- in una terza fase chiudere l'interruttore principale M1 e l'interruttore ulteriore M5, mantenendoli chiusi finché la corrente I_L nel circuito induttivo di immagazzinamento 15 raggiunge il valore predeterminato I_p o per il tempo adatto a raggiungere detto valore predeterminato I_p , mantenendo chiusi l'interruttore principale M2 e l'interruttore ulteriore M5;

- in una quarta fase aprire l'interruttore principale M1, mantenendo chiuso detto interruttore ulteriore M5 per far fluire una corrente verso la batteria 14.

Tale modalità di controllo della corrente di in-rush è

descritta in maggior dettaglio nella domanda di brevetto italiana TO2010A000417 a nome della stessa Richiedente, il cui contenuto si intende qui incorporato per riferimento.

Si sottolinea a questo riguardo che la corrente di in-rush, o corrente di spunto, è una corrente che si genera all'accensione del convertitore, pertanto gli interruttori M5 e M6 vengono usati per la limitazione della corrente di in-rush in una fase temporale che in generale non si sovrappone con il periodo in cui invece si deve operare la scarica del condensatore DC-link.

Nella soluzione descritta della domanda italiana TO2010A000417, per limitare la corrente di in-rush fra semiavvolgimento 13a e 13b e nodo 17 sono compresi un MOSFET e un diodo in serie, ma con polarità invertita rispetto all'architettura di figura 4. Nel circuito di figura 6 si adotta invece vantaggiosamente una configurazione back-to-back del MOSFET aggiuntivo M3 (o rispettivamente M4) e del MOSFET ulteriore M5 (M6), in cui il MOSFET aggiuntivo M3 o M4 durante la limitazione svolge la funzione del diodo, attraverso il rispettivo diodo di body.

Il diodo di body dei MOSFET aggiuntivi M3, M4 svolge la funzione di un diodo serie di blocco, che nella citata precedente architettura per la limitazione dell'in-rush current era necessaria inserire appositamente, mentre il diodo di body dei MOSFET ulteriori M5, M6 invece opera come il diodo serie D1, D2 che blocca la corrente nella forma realizzativa di figura 4 durante la scarica del condensatore DC-link.

Per ottenere quindi la completa scarica del condensatore DC-link C_L è necessario almeno pilotare gli interruttori aggiuntivi M3 e M4 e sfruttare il diodo di body degli ulteriori interruttori MOSFET, non pilotando altresì gli interruttori M5 e M6, oppure pilotare gli interruttori M4, M6 e M3, M5 simultaneamente come spiegato precedentemente. I segnali di pilotaggio che determinano

gli andamenti di corrente di figura 5 per esempio per l'interruttore M3, sono gli stessi per l'interruttore M5 durante la modalità di scarica, ossia vengono comandati allo stesso modo in apertura e chiusura. Per effettuare però la funzione di in-rush i gate dei MOSFET M4, M6 e M3, M5 devono essere invece pilotati con uno schema di modulazione differente rispetto a quello impiegato per la modalità di scarica.

In figura 7 è riportato un diagramma analogo a quello di figura 1b, che mostra come con il circuito di figura 6 sia possibile operare lavorare su tutto il range positivo di alta tensione V_{HV} , sia in modalità buck che in modalità boost. Al di sotto della soglia $V_{LV} \cdot k$ si opera in modalità buck per la limitazione della corrente di in-rush (quadrante 150), mentre si opera in modalità boost per operare la completa scarica del condensatore DC link (quadrante 250).

La soluzione proposta permette dunque vantaggiosamente di evitare di ricorrere a metodi dissipativi quando la tensione sul condensatore DC link scende al di sotto della tensione di batteria, eseguendo per la scarica un pilotaggio in modalità boost sfruttando il pilotaggio degli interruttori aggiuntivi.

Inoltre vantaggiosamente, l'architettura proposta si presta a essere integrata facilmente con un'architettura di apparato convertitore adatta a limitare la corrente di in-rush.

Naturalmente, fermo restando il principio del trovato, i particolari di costruzione e le forme di attuazione potranno ampiamente variare rispetto a quanto descritto ed illustrato a puro titolo di esempio, senza per questo uscire dall'ambito della presente invenzione.

L'apparato convertitore proposto può essere impiegato nei più diversi campi dove sia richiesta una conversione DC-DC, ad esempio nel campo degli strumenti elettronici mobili come i telefoni cellulari e i computer laptop.

L'apparato convertitore proposto trova particolare preferita applicazione nel settore automotive, ad esempio, nei già citati veicoli elettrici o ibridi, con propulsione termica e elettrica, che comprendono due reti elettriche, rispettivamente una rete elettrica di tipo tradizionale, ad esempio per carichi quali le luci o la centralina per il controllo del motore termico e una rete elettrica ad alta tensione per il motore elettrico.

Il ponte a H di interruttori di tipo full-bridge può eventualmente anche essere secondo le applicazioni un ponte di tipo half-bridge, in cui alcuni interruttori sono sostituiti da condensatori.

RIVENDICAZIONI

1. Procedimento di scarica di una capacità DC-link (C_L) in un apparato convertitore DC-DC isolato comprendente un lato ad alta tensione (HV) comprendente

una rete a H (20) di interruttori (MA, MB, MC, MD), connessa fra un nodo d'ingresso (25) su cui si realizza una tensione continua (V_{HV}) e un primo avvolgimento (12) di un trasformatore (11) e

una capacità DC-link (C_L) connessa in parallelo al nodo d'ingresso (25) dell'apparato convertitore (10; 30; 50),

un lato a bassa tensione (LV) comprendente

un secondo avvolgimento (13) di detto trasformatore (11) con un numero (k) minore di spire rispetto al primo avvolgimento (12), con una presa centrale (13c) da cui si dipartono un primo (13a) e un secondo semiavvolgimento (13b),

un circuito reattivo di immagazzinamento dell'energia (15), in particolare un induttore connesso in serie fra detta presa centrale (13c) e un nodo (17) configurato per la connessione di una batteria (14) atta ad applicare una tensione di batteria continua (V_{LV}),

una rete di commutazione (M1, M2) di detto primo (13a) e secondo semiavvolgimento (13b) comprendente dispositivi interruttori principali (M1, M2) disposti per connettere selettivamente il primo (13a) e il secondo semiavvolgimento (13b) a un riferimento fisso di tensione (16), in particolare un riferimento di massa,

caratterizzato dal fatto che detto procedimento di scarica comprende le operazioni di

- operare in una fase iniziale una conversione dell'energia dal lato a alta tensione (HV) verso un lato a bassa tensione (LV) di detto apparato convertitore (10; 30; 50), comprendente modulare i tempi di accensione di diagonali di interruttori (MA, MD; MB, MC) del ponte a H

(20) per trasferire la tensione (V_{HV}) al nodo d'ingresso (25) su detto circuito reattivo (15),

- successivamente a detta fase iniziale, pilotare detti interruttori principali (M1, M2) e degli interruttori aggiuntivi (M3, M4) compresi in detto apparato convertitore (10; 30; 50) e disposti in modo da porre selettivamente tramite il loro stato di apertura e chiusura in connessione elettrica il rispettivo primo (13a) e secondo semiavvolgimento (13b) di detto secondo avvolgimento (13) del trasformatore (11) con il nodo di uscita (17) configurato per la connessione di una batteria (14) e secondo una configurazione di connessione che in un primo stato di configurazione carica detto circuito reattivo (15) alla tensione (V_{s1} , V_{s2}) presente sul corrispondente semiavvolgimento (13a, 13b) e in un altro stato di configurazione determina un cammino elettrico per il flusso della corrente attraverso il corrispondente interruttore principale (M1, M2) e il corrispondente semiavvolgimento (13a, 13b) nel nodo (17) configurato per la connessione di una batteria (14), al fine di operare una scarica completa di detta capacità DC-link (C_L).

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detta operazione di pilotare successivamente a detta fase iniziale, detti interruttori principali (M1, M2) e detti interruttori aggiuntivi (M3, M4) avviene quando il valore della tensione (V_{HV}) su detta capacità DC-link (C_L) scende al di sotto del valore di tensione (V_{LV}) della batteria (14) moltiplicato per il rapporto di trasformazione (k) del trasformatore (11).

3. Procedimento secondo la rivendicazione 1 o 2, caratterizzato dal fatto che detta operazione di pilotare detti interruttori principali (M1, M2) e detti interruttori aggiuntivi (M3, M4) comprende di:

riportata la tensione (V_{HV}) su detta capacità DC-link (C_L) sul primo (13a) o secondo semiavvolgimento (13b) ottenendo una corrispondente tensione (V_{s1} , V_{s2}), chiudere

l'interruttore aggiuntivo (M3, M4) connesso a detto semiavvolgimento (13a, 13b) per ricaricare il circuito reattivo (15) a detta corrispondente tensione (V_{s1} , V_{s2}), mantenendo aperto l'interruttore principale connesso a detto semiavvolgimento (13a, 13b),

aprire l'interruttore (M3, M4) connesso a detto semiavvolgimento (13a, 13b) per operare la scarica dell'energia immagazzinata sulla batteria (14), chiudendo l'interruttore principale (M1, M2) connesso a detto semiavvolgimento (13a, 13b) per far fluire una corrente verso il nodo (17) configurato per la connessione di una batteria (14).

4. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che comprende di bloccare (D1, D2; M5, M6) la corrente che fluisce dal semiavvolgimento (13a, 13b) verso la batteria (14) attraverso detti interruttori aggiuntivi (M3, M4).

5. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che comprende di comandare gli stati di apertura e chiusura di ulteriori interruttori (M5, M6) posti in configurazione back-to-back rispetto agli interruttori aggiuntivi (M3, M4) per bloccare (D1, D2) la corrente che fluisce dal semiavvolgimento (13a, 13b) verso la batteria (14) attraverso detti interruttori aggiuntivi (M3, M4) e per operare una funzione di controllo della corrente di in-rush durante una fase di accensione dell'apparato convertitore (30).

6. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che detta operazione di pilotare successivamente a detta fase iniziale, detti interruttori principali (M1, M2) e detti interruttori aggiuntivi (M3, M4) comprende inoltre di pilotare gli interruttori (MA, MB, MC, MD) del ponte ad H (20) secondo una commutazione bilanciata per riportare la tensione (V_{HV}) su detta capacità DC-link (C_L) alternativamente sul primo (13a) o secondo semiavvolgimento (13b), detta commutazione

bilanciata comprendendo di commutare in modo bilanciato la chiusura degli interruttori (MA, MD) di una prima diagonale del ponte (20) per riportare la tensione (V_{HV}) della capacità DC-link (C_L) sulla tensione (V_{s1}) del secondo semiavvolgimento (13b) e la chiusura degli interruttori (MB, MC) di una seconda diagonale del ponte (20) per riportare la tensione (V_{HV}) della capacità DC-link (C_L) sulla tensione (V_{s2}) del primo semiavvolgimento (13a).

7. Apparato convertitore DC-DC isolato comprendente

un lato ad alta tensione (HV) comprendente

una rete a H (20) di interruttori (MA, MB, MC, MD), connessa fra un nodo d'ingresso (25) su cui si realizza una tensione continua (V_{HV}) e un primo avvolgimento (12) di un trasformatore (11) e

una capacità DC-link (C_L) connessa in parallelo al nodo d'ingresso (25) dell'apparato convertitore (10; 20; 30),

un lato a bassa tensione (LV) comprendente

un secondo avvolgimento (13) di detto trasformatore (11) con un numero (k) minore di spire rispetto al primo avvolgimento (12), con una presa centrale (13c) da cui si dipartono un primo (13a) e un secondo semiavvolgimento (13b),

un circuito reattivo di immagazzinamento dell'energia (15), in particolare un induttore, connesso in serie fra detta presa centrale (13c) e un nodo (17) configurato per la connessione di una batteria (14) atta ad applicare una tensione di batteria continua (V_{LV}),

una rete di commutazione (M1, M2) di detto primo (13a) e secondo semiavvolgimento (13b) comprendente dispositivi interruttori principali (M1, M2) disposti per connettere selettivamente il primo (13a) e il secondo semiavvolgimento (13b) a un riferimento fisso di tensione (16), in particolare un riferimento di massa,

caratterizzato dal fatto che comprende interruttori aggiuntivi (M3, M4), disposti in modo da porre

selettivamente tramite il loro stato di apertura e chiusura in connessione elettrica il rispettivo primo (13a) e secondo semiavvolgimento (13b) di detto secondo avvolgimento (13) del trasformatore (11) con il nodo (17) configurato per la connessione di una batteria (14),

e comprende un circuito di controllo configurato per fornire segnali di pilotaggio a detta rete a H (20), rete di commutazione (M1, M2) e interruttori di aggiuntivi (M3, M4) per implementare il procedimento secondo le rivendicazioni da 1 a 6.

8. Apparato secondo la rivendicazione 7, caratterizzato dal fatto che opera la conversione fra due reti elettriche, a più alta tensione e più bassa tensione rispettivamente, di un autoveicolo, in particolare reti elettriche di un veicolo ibrido a propulsione termica e elettrica o di un veicolo puramente elettrico.

9. Apparato secondo la rivendicazione 7 o 8, caratterizzato dal fatto che ciascuno di detti rispettivi interruttori aggiuntivi (M3, M4) sono transistori MOSFET il cui elettrodo di source è connesso a un rispettivo semiavvolgimento (13a, 13b) e il cui elettrodo di drain è connesso al nodo di batteria (14).

10. Apparato secondo una delle rivendicazioni da 7 a 9, caratterizzato dal fatto che comprende, interposti fra ciascun semiavvolgimento (13a, 13b) e il rispettivo interruttore aggiuntivo (M3, M4) un diodo serie (D1, D2) per bloccare la corrente dal semiavvolgimento (13a, 13b) verso la batteria (14) attraverso detti interruttori aggiuntivi (M3, M4).

11. Apparato secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che comprende detti ulteriori interruttori (M5, M6) MOSFET posti in configurazione back-to-back, ponendo in comune il rispettivo elettrodo di source, rispetto agli interruttori aggiuntivi (M3, M4) MOSFET per bloccare la corrente che fluisce dalla batteria (14) verso il semiavvolgimento (13a, 13b) attraverso detti

interruttori aggiuntivi (M3, M4) durante una fase di limitazione di corrente di in rush e per bloccare la corrente che fluisce dal semiavvolgimento (13a, 13b) verso la batteria (14) durante la scarica della capacità DC-link (C_L).

CLAIMS

1. Method of discharge of a DC-link capacitor (C_L) in an insulated DC-DC converter apparatus including
a high voltage side (HV) including
an H network (20) of switches (MA, MB, MC, MD), connected between an input node (25) on which a continuous voltage (V_{HV}) is produced and a first winding (12) of a transformer (11) and

a DC-link capacitor (C_L) connected in parallel to an input node (25) of the converter apparatus (10; 30; 50),

a low voltage side (LV) comprising

a second winding (13) of said transformer (11) with a number (k) of turns lower with respect to said first winding (12), with a central tap (13c) from which a first (13a) and second half-winding (13b) depart,

an energy storage reactive circuit (15), in particular an inductor series connected between said central tap (13c) and a node (17) configured for the connection of a battery (14) able to apply a continuous battery voltage (V_{LV}),

a switching network (M1, M2) of said first (13a) and second half-winding (13b) including main switches (M1, M2) arranged to selectively connect the first (13a) and the second half-winding (13b) to a voltage fixed reference (16), in particular a ground reference,

characterized in that said discharge method includes the operations of

- operating in an initial phase a energy conversion from the high voltage side (HV) to the low voltage side (LV) of said converter apparatus (10: 30; 50), including modulating the switch on time of the diagonals of the switches (MA, MD; MB, MC) of the H bridge (20) to transfer the voltage (V_{HV}) at the input node (25) on said reactive circuit (15),

- subsequently to said initial phase, driving said main switches (M1, M2) and additional switches (M3, M4) included in said converter apparatus (10; 30; 50) and

arranged to selectively place, by their open or closes state, in electrical connection the respective first (13a) and second half-winding (13b) of said second winding (13) of the transformer (11) with the output node (17) configured for the connection of a battery (14) and according to a connection configuration by which in a first configuration state charges said reactive circuit (15) to the voltage (V_{s1} , V_{s2}) which is present on the corresponding half-winding (13a, 13b) and in another configuration state determines an electrical path for the current flow through the corresponding main switch (M1, M2) and the corresponding half-winding (13a, 13b) in the node (17) configured for the connection of a battery (14), in order to perform a complete discharge of said DC-link capacitor (C_L).

2. Method according to claim 1, characterized in that said operation of driving subsequently to said initial phase said main switches (M1, M2) and additional switches (M3, M4) takes place when the value of the voltage (V_{HV}) on said DC-link capacitor (C_L) goes below the value of the voltage (V_{LV}) of the battery (14) multiplied by the transformation ratio (k) of the transformer (11).

3. Method according to claim 1 or 2, characterized in that, said operation of driving said main switches (M1, M2) and said additional switches (M3, M4) includes:

after bringing the voltage (V_{HV}) on said DC-link capacitor (C_L) on the first (13a) or second half-winding (13b) obtaining a corresponding voltage (V_{s1} , V_{s2}), closing the additional switch (M3, M4) connected to said half-winding (13a, 13b) to recharge the reactive circuit (15) to said corresponding voltage (V_{s1} , V_{s2}), keeping open the main switch connected to said half-winding (13a, 13b),

open the switch (M3, M4) connected to said half-winding (13a, 13b) to perform the discharge of the energy stored on the battery (14), closing the main switch (M1, M2) connected to said half-winding (13a, 13b) to make a

current flow to the node (17) configured for the connection of a battery (14).

4. Method according to any of the preceding claims, characterized in that includes blocking (D1, D2; M5, M6) the current that flows from the half-winding (13a, 13b) toward the battery (14) through said additional switches (M3, M4).

5. Method according to any of the preceding claims, characterized in that includes commanding the opening and closing state of further switches (M5, M6) arranged in back-to-back configuration with respect to the additional switches (M3, M4) to block (D1, D2) the current flowing from the half-winding (13a, 13b) toward the battery (14) through said additional switch (M3, M4) and to operate a control function of the in-rush current during a switch-on phase of the converter apparatus (30).

6. Method according to any of the preceding claims, characterized in that said operation of driving subsequently to said initial phase said main switches (M1, M2) and additional switches (M3, M4) further includes driving the switches (MA, MB, MC, MD) of the H bridge (20) according to a balanced switching to bring the voltage (V_{HV}) on said DC-link capacitor (C_L) alternatively on the first (13a) or second half-winding (13b), said balance switching including switch in a balanced mode the closing of the switches (MA, MD) of a first diagonal of the bridge (20) to bring the voltage (V_{HV}) on said DC-link capacitor (C_L) on the voltage (V_{s1}) of the second half-winding (13b) and the closing of the switches (MB, MC) of a second diagonal of the bridge (20) to bring the voltage (V_{HV}) on said DC-link capacitor (C_L) on the voltage (V_{s2}) of the first half-winding (13a).

7. Insulated DC-DC converter apparatus comprendente a high voltage side (HV) including
an H network (20) of switches (MA, MB, MC, MD),
connected between an input node (25) on which a continuous

voltage (V_{HV}) is produced and a first winding (12) of a transformer (11) and

a DC-link capacitor (C_L) connected in parallel to an input node (25) of the converter apparatus (10; 30; 50), a low voltage side (LV) comprising

a second winding (13) of said transformer (11) with a number (k) of turns lower with respect to said first winding (12), with a central tap (13c) from which a first (13a) and second half-winding (13b) depart,

an energy storage reactive circuit (15), in particular an inductor series connected between said central tap (13c) and a node (17) configured for the connection of a battery (14) able to apply a continuous battery voltage (V_{LV}),

a switching network (M1, M2) of said first (13a) and second half-winding (13b) including main switches (M1, M2) arranged to selectively connect the first (13a) and the second half-winding (13b) to a voltage fixed reference (16), in particular a ground reference,

characterized in that includes additional switches (M3, M4), arranged to selectively place, by their open or closes state, in electrical connection the respective first (13a) and second half-winding (13b) of said second winding (13) of the transformer (11) with the output node (17) configured for the connection of a battery (14),

and includes a control circuit configure to supply driving signal to said H network (20), switching network (M1, M2) and additional switches (M3, M4) to implement the method according to claims 1 to 6.

8. Apparatus according to claim 7, characterized in that perform the conversion between two electric networks, at a higher and lower voltage respectively, of an auto vehicle, in particular electric networks of an hybrid vehicle having thermal and electrical propulsion or a purely electric vehicle.

9. Apparatus according to claim 7 or 8, characterized in that each of said respective additional switches (M3,

M4) is a MOSFET transistor which source electrode is connected to a respective half-winding (13a, 13b) and which drain electrode is connected to the battery node (14).

10. Apparatus according to any of claims from 7 to 9, characterized in that includes, interposed between each half-winding (13a, 13b) and the respective additional switch (M3, M4), a series diode (D1, D2) to block the current from the half-winding to the battery (14) through said additional switches (M3, M4).

11. Apparatus according to claim 9, characterized in that includes said further switches (M5, M6) which are MOSFET arranged in arranged in back-to-back configuration, placing the respective source electrode in common, with respect to the additional switches (M3, M4), which are MOSFET, to block the current flowing from the battery (14) to the half-winding (13a, 13b) through said additional switches (M3, M4) during a phase of limitation of the in-rush current and to block the current flowing from the half-winding (13a, 13b) to the battery (14) during the discharge of the DC-link capacitor (C_L).

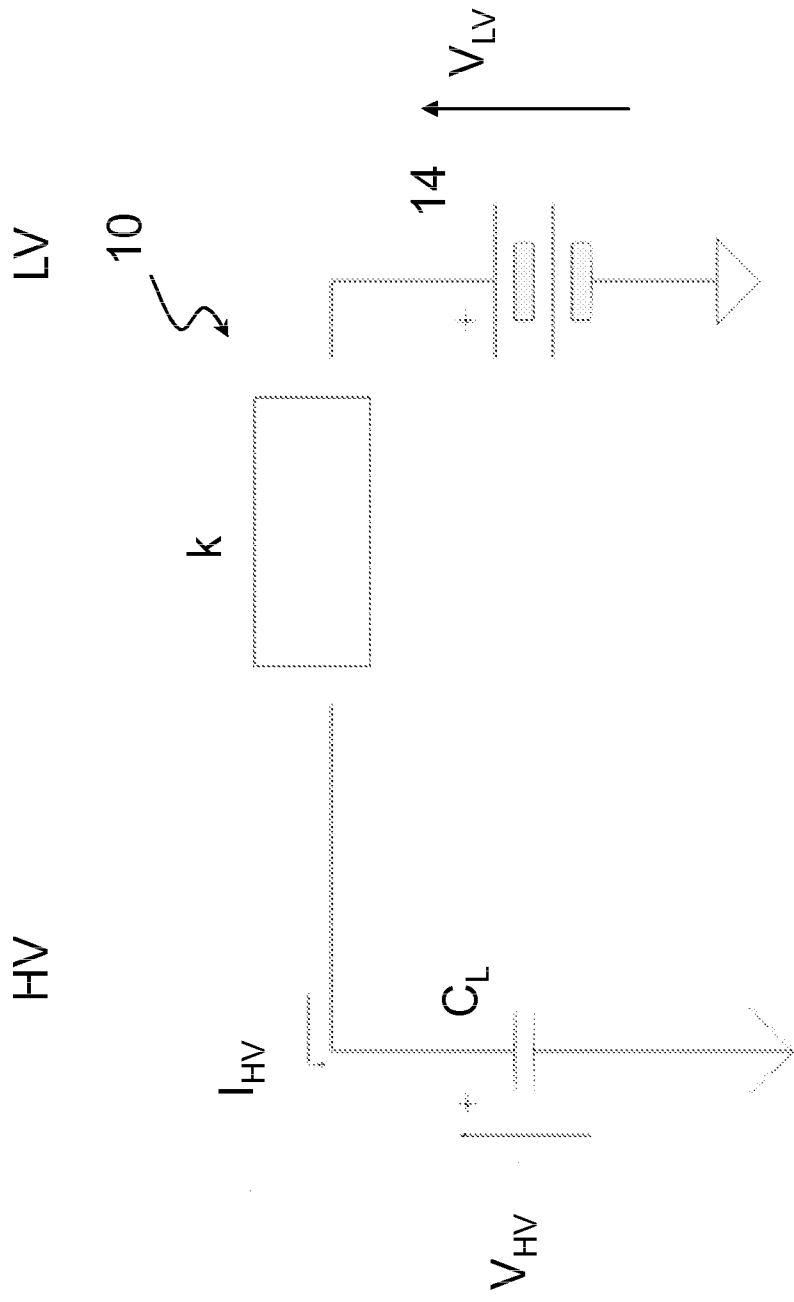


Fig. 1a

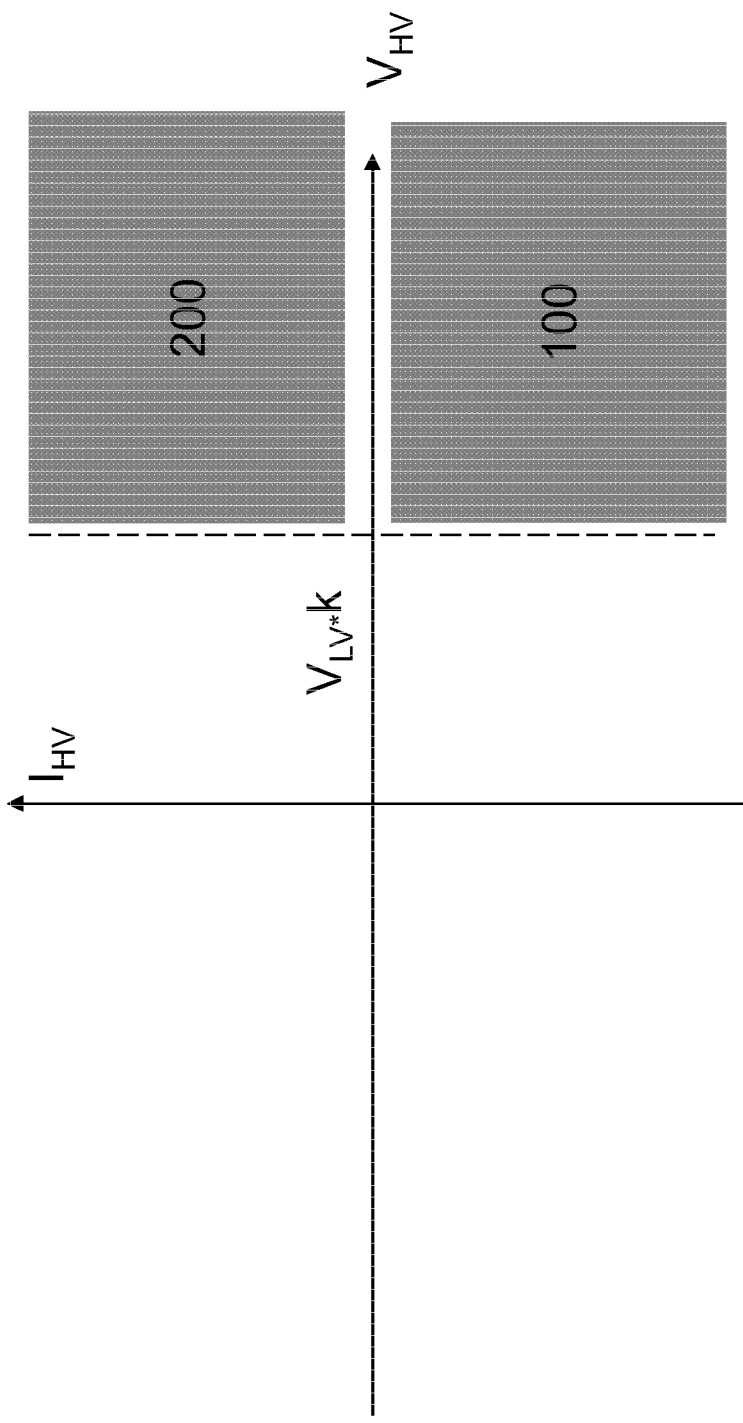
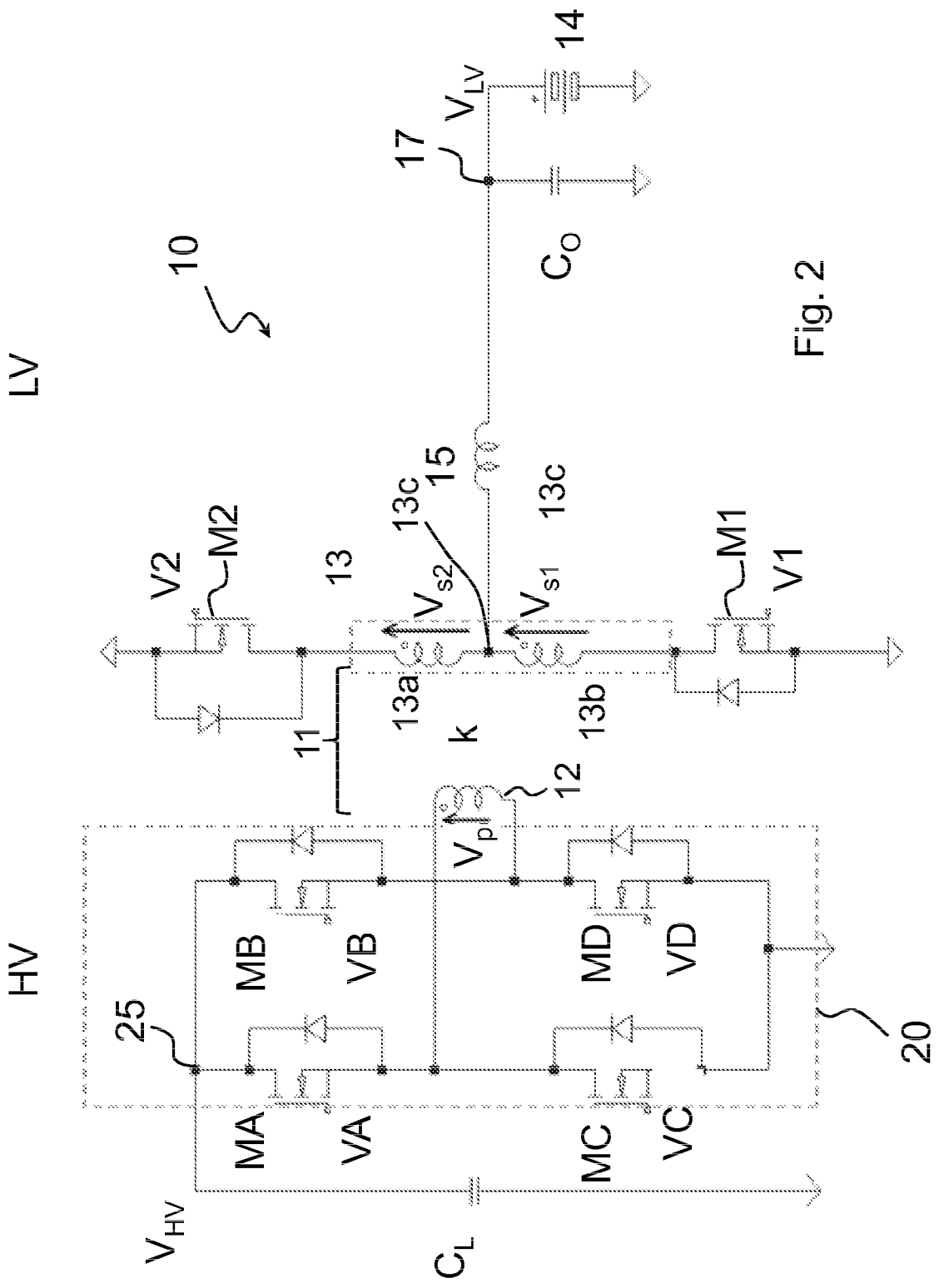


Fig. 1b



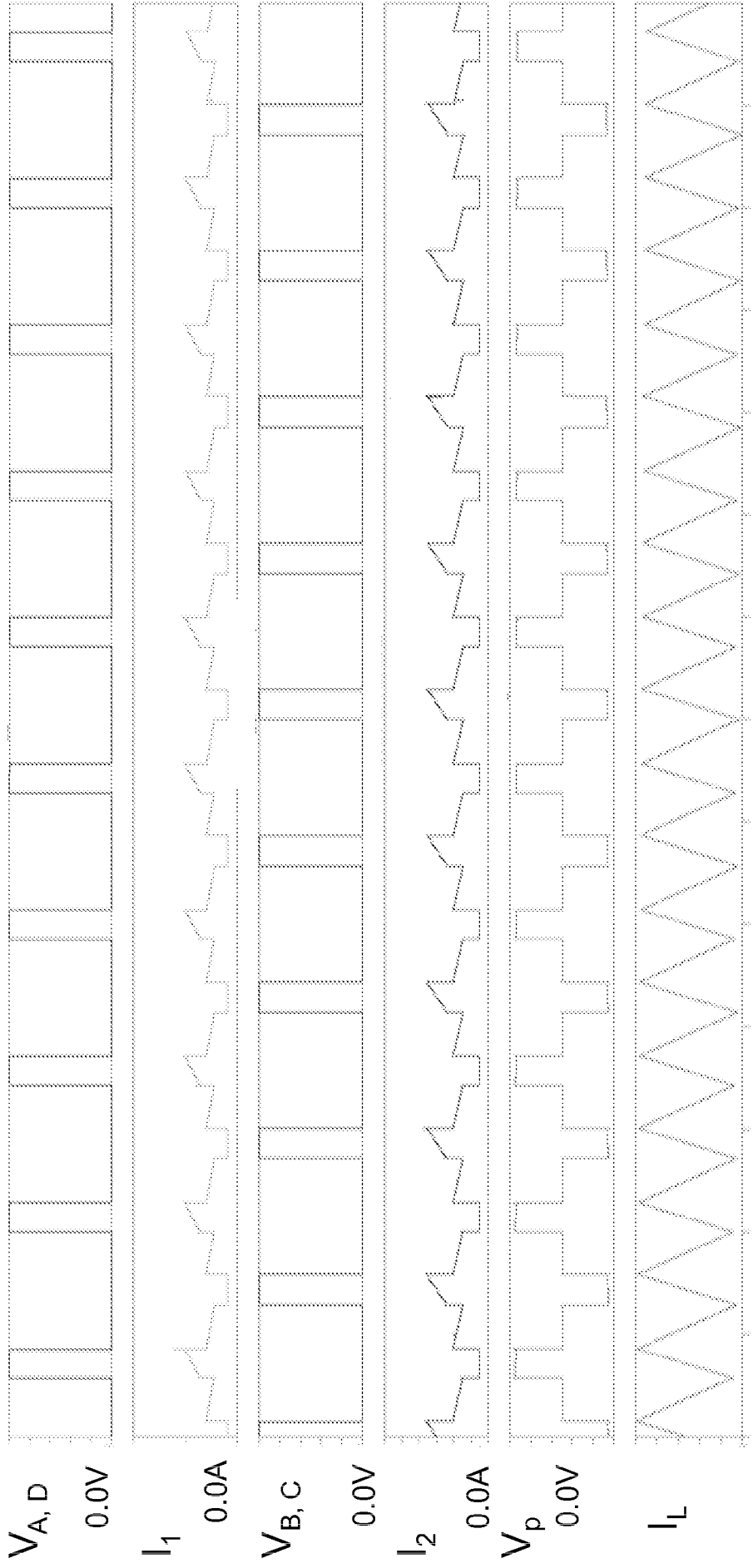


Fig. 3

t

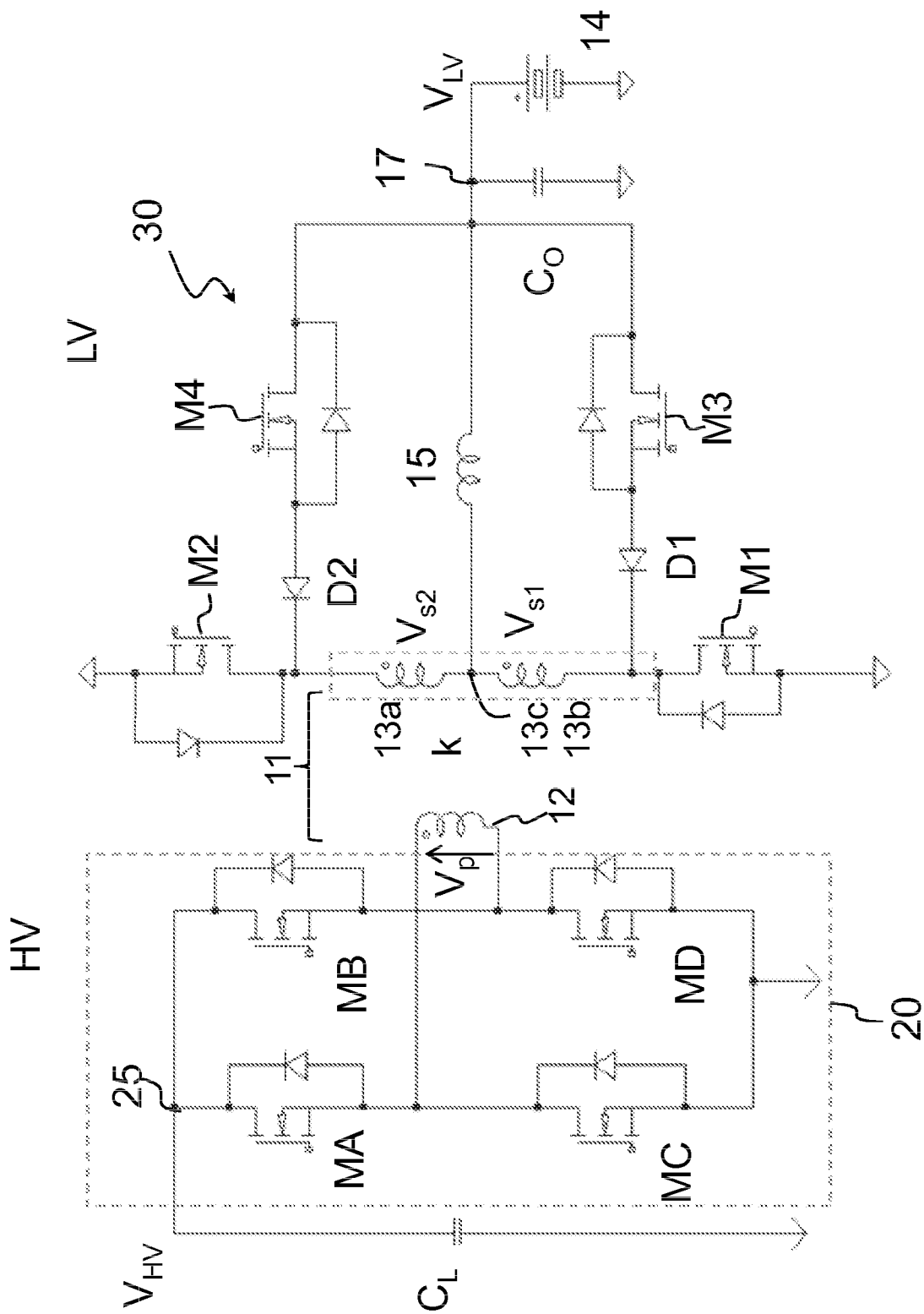


Fig. 4

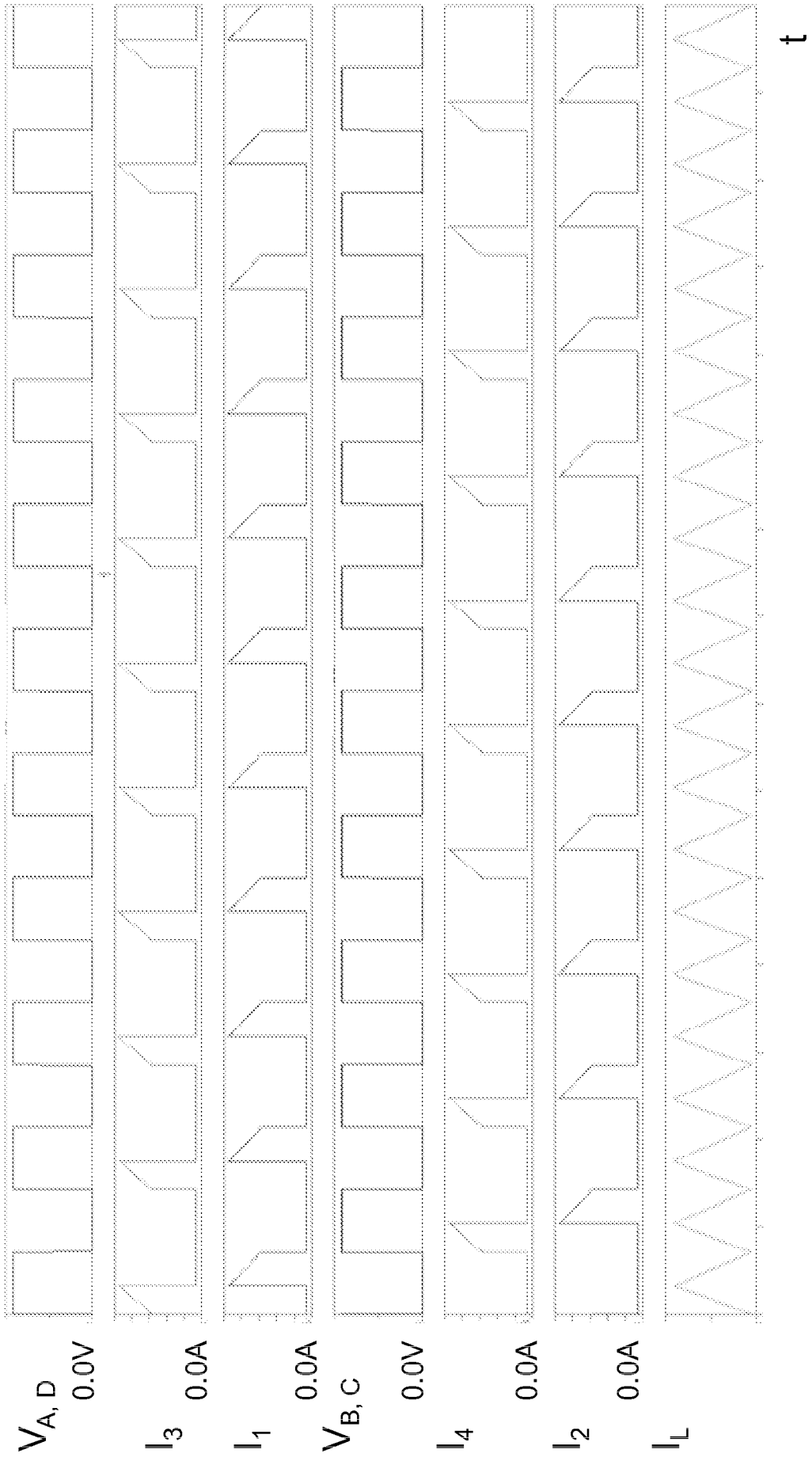


Fig. 5

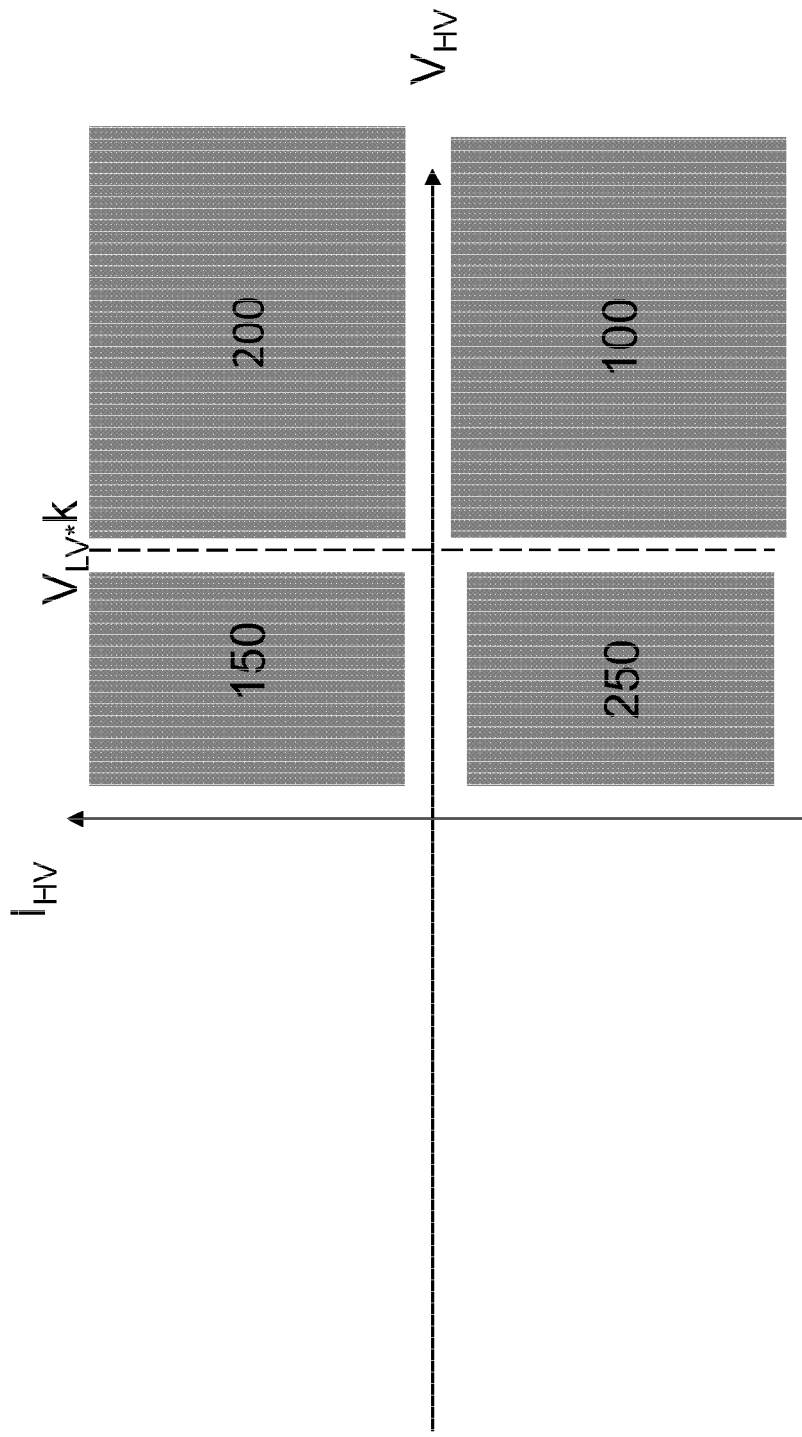


Fig. 7