

(12) FASCÍCULO DE PATENTE DE INVENÇÃO

(22) Data de pedido: 2008.08.27	(73) Titular(es): MASCHINENFABRIK REINHAUSEN GMBH FALKENSTEINSTRASSE 8 93059 REGENSBURG DE
(30) Prioridade(s):	
(43) Data de publicação do pedido: 2011.05.11	(72) Inventor(es): DIETER DOHNAL DE OLIVER BRUECKL DE HANS-HENNING LESSMANN-MIESKE DE
(45) Data e BPI da concessão: 2011.11.30 063/2012	(74) Mandatário: MARIA SILVINA VIEIRA PEREIRA FERREIRA RUA CASTILHO, N.º 50, 5º - ANDAR 1269-163 LISBOA PT

(54) Epígrafe: **COMUTADOR ESCALONADO COM ELEMENTOS DE COMUTAÇÃO DE SEMICONDUTORES**

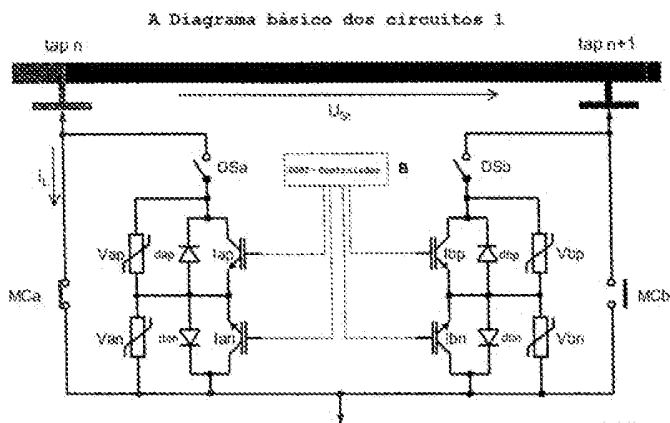
(57) Resumo:

A INVENÇÃO REFERE-SE A UM COMUTADOR ESCALONADO PARA UMA COMUTAÇÃO ININTERRUPTA ENTRE DUAS TOMADAS DE ENROLAMENTO (TAP N, TAP N+1) DE UM TRANSFORMADOR ESCALONADO, EM QUE CADA UMA DAS DUAS TOMADAS DE ENROLAMENTO ESTÁ CONECTADA COM A DERIVAÇÃO DE CARGA COMUM POR INTERMÉDIO DE UM COMUTADOR MECÂNICO (DS) E UMA DISPOSIÇÃO EM SÉRIE LIGADA EM SÉRIE AO COMUTADOR E COMPOSTA POR DOIS IGBTs (IP, IN). DE ACORDO COM A INVENÇÃO, CADA IGBT É CURTO-CIRCUITADO EM CADA CASO POR UM VARISTOR (VP, VN) ESPECIALMENTE DIMENSIONADO, CONECTADO EM PARALELO COM ESTE.

RESUMO

"COMUTADOR ESCALONADO COM ELEMENTOS DE COMUTAÇÃO DE SEMI-CONDUTORES"

A invenção refere-se a um comutador escalonado para uma comutação ininterrupta entre duas tomadas de enrolamento (tap n, tap n+1) de um transformador escalonado, em que cada uma das duas tomadas de enrolamento está conectada com a derivação de carga comum por intermédio de um comutador mecânico (Ds) e uma disposição em série ligada em série ao comutador e composta por dois IGBTs (I_p , I_n). De acordo com a invenção, cada IGBT é curto-circuitado em cada caso por um varistor (V_p , V_n) especialmente dimensionado, conectado em paralelo com este.



DESCRIÇÃO

"COMUTADOR ESCALONADO COM ELEMENTOS DE COMUTAÇÃO DE SEMI- CONDUTORES"

A invenção refere-se a um comutador escalonado com elementos de comutação de semicondutores para uma comutação ininterrupta entre tomadas de bobinas de um transformador de degraus.

Um comutador escalonado com elementos de comutação de semicondutores o qual é configurado como um comutador IGBT híbrido, é conhecido a partir da WO 01/22447. O comutador escalonado ali descrito funciona pelo princípio de um comutador de carga deslizante, com o qual se pode prescindir de um acumulador de energia. Ele possui como comutadores híbridos uma parte mecânica e uma parte elétrica.

A parte mecânica que é propriamente o objeto da WO 01/22447 possui interruptores de contacto; a parte central é um contacto deslizante, o qual é deslocado ao longo de uma calha de contacto ligada com o ponto neutro por meio de um mecanismo de acionamento por motor, conectando neste caso elementos de contacto fixos. A própria comutação de carga efetua-se por intermédio de dois IGBTs com respetivamente quatro diodos como retificador em ponte.

Este conceito conhecido de um comutador híbrido é dispendioso e complicado, para garantir a necessária comutação de carga exatamente ao nível zero da corrente de carga.

A partir da WO 97/05536 é conhecido mais outro dispositivo de comutação, no qual as tomadas do enrolamento de regulação de um transformador de potência estão ligadas através de uma conexão em série de dois IGBTs com uma derivação em carga comum.

Este conhecido dispositivo de comutação funciona conforme a modulação por duração de pulso; neste caso efetua-se uma limitação da corrente circulante pela reactância reativa transitória (TER) do enrolamento escalonado.

Esta conhecida disposição de circuitos e o princípio de comutação exigem uma adaptação específica do comutador escalonado ao respetivo transformador regulador, o qual deverá ser conectado. Por outras palavras: transformador regulador e comutador escalonado são mutuamente afinados e atuam eletricamente em conjunto. O conhecido dispositivo de comutação não é portanto produzível em separado como equipamento universalmente aplicável. A WO 97/05536 revela um comutador escalonado de acordo com o conceito genérico da reivindicação 1.

A partir da GB-A2424766 são ainda conhecidas diferentes disposições de circuitos para um comutador escalonado, os quais contêm varistores conectados de modo diferente. Numa forma de realização os varistores estão ligados em paralelo para com os respetivos elementos de comutação e servem para a distribuição da tensão.

O objetivo da invenção é a apresentação de um comutador escalonado do tipo inicialmente mencionado, o qual é de construção simples, possuindo uma elevada segurança funcional e para o qual não é necessário ter de efetuar a comutação só exatamente ao nível zero da corrente de carga.

É além disso o objetivo da invenção apresentar um comutador escalonado o qual não necessita de ser adaptado à respetiva corrente nominal e aos respetivos enrolamentos do transformador de regulação a ser comutado, mas sim praticamente produzido em série, podendo ser conectado como equipamento funcional nos mais diferentes transformadores de regulação.

Este objetivo é atingido por meio de um comutador escalonado com as características da primeira reivindicação. As reivindicações subsequentes referem-se a aperfeiçoamentos particularmente favoráveis.

A invenção parte de duas unidades de comutação, em que cada unidade de comutação é composta por dois IGBTs antiparalelos correspondentes. A cada um dos IGBTs está associado um varistor conectado em paralelo ao mesmo. O varistor é neste caso dimensionado de tal forma que a tensão do varistor é mais reduzida do que a máxima tensão de bloqueamento do respetivo IGBT paralelo, contudo maior do que o máximo valor instantâneo da tensão de escala.

De forma particularmente favorável os dois IGBTs correspondentes de uma unidade de comutação antiparalela estão interconectados sob forma de um *stack* compacto.

É além disso particularmente favorável posicionar o respetivo varistor no sentido de uma zona paralela de indutância tão baixa quanto possível diretamente ao lado de cada IGBT e integrá-lo no *stack*. Deste modo é possível a realização de ligações de linhas extremamente curtas entre IGBT e o varistor situado em paralelo. Esta disposição permite também, aquando de um valor instantâneo elevado da

corrente de carga, uma desconexão muito rápida, "dura" da corrente de carga que circula através do IGBT, com comutação entre 0,1 ... 1 μ s ao varistor conectado com indutância extremamente baixa, o qual apresenta somente um atraso de resposta extremamente pequeno.

O "*hard-switching*" do IGBT reduz decisivamente a perda de energia de corte convertida e possibilita só então - como a seguir explicado em pormenor - o conceito de comutação para a comutação de um comutador escalonado (OLTC) aquando de qualquer valor da corrente de carga momentânea, sem uma impedância de comutação no OLTC, sem necessidade de conhecer a reactância de dispersão do enrolamento de camadas sobrepostas, sem necessidade de uma adaptação do OLTC à respetiva corrente de carga nominal ou à tensão de escala e sem a necessidade de uma afinação temporal μ s exata do grupo de ligação IGBT a ser desconectado e a ser admitido.

Contudo a partir da DE 101 18 743 A1 e numerosas outras publicações já são conhecidos varistores em combinação com IGBTs. Os mesmos no estado da técnica servem no entanto exclusivamente para o efeito de proteger de sobretensão os semicondutores, possuem portanto somente uma função para a limitação da tensão.

No caso da invenção porém, a função de cada varistor disposto em paralelo a cada IGBT é outra. Após a comutação da corrente de carga aplicada, acionada pela tensão de rede do IGBT a ser desconectado, para um varistor situado em paralelo (circuito de comutação mais pequeno), o varistor percorrido pela corrente de carga produz uma tensão consoante a sua curva característica I-U, a qual mostra uma

dependência relativamente reduzida do valor instantâneo e que durante o processo de comutação do OLTC se mantém praticamente constante.

Os varistores são neste caso de forma particularmente favorável dimensionados de tal modo que a tensão do varistor, a qual resulta aquando da carga com a amplitude da corrente máxima, ainda apresenta um distanciamento de segurança suficiente à tensão de bloqueio do IGBT.

Por outro lado a tensão de carga dos varistores (U_{Var} a 1 mA) deve situar-se claramente acima da amplitude da tensão de escala máxima, para que a corrente de carga do lado do OLTC a ser desconectado através da tensão de escala admitida possa comutar para o lado que admite a corrente de carga (grande circuito de comutação).

A diferença ΔU entre o valor instantâneo da queda de tensão no varistor e o valor instantâneo da tensão de escala causa devido ao dimensionamento especial dos varistores a comutação da corrente de carga através da indutância de dispersão do enrolamento de camadas sobrepostas e as indutâncias de linhas para o lado de admissão do comutador escalonado e determina o di/dt do processo de comutação ($di/dt = \Delta U/L_{Kom}$).

Isto explica que os varistores no âmbito da presente invenção não são, como do conhecimento conforme o estado da técnica, aplicados para a redução de sobretensões transitórias. No caso da presente invenção os varistores adotam as seguintes funções atípicas para a sua categoria e não as funções indicadas pelo estado da técnica:

- Admissão da corrente de carga dos IGBTs de desconexão dura
- produção de uma queda de tensão, a qual independentemente do valor instantâneo da corrente de carga deve situar-se numa banda de tensão entre a máxima tensão de bloqueio dos IGBTs e a amplitude e tensão de escala máxima
- disponibilização de um escalonamento temporal de tensão, o qual comuta a corrente de carga do lado energizado do comutador escalonado sobre a tensão de escala orientada ao contrário para o lado de admissão do comutador escalonado.

Devido à invenção resulta um dimensionamento muito simples e de baixos custos dos grupos de ligação de eletrónica de potência, dado que o volume que admite a energia no caso do varistor ser variável de forma flexível e ser desigualmente maior do que o volume do chip IGBT muito menor, mais caro e quanto ao volume só dificilmente variável.

Como outro efeito positivo da condução de corrente de carga através dos varistores, da disponibilização dos necessários escalonamentos temporais de tensão de comutação através dos varistores e da admissão da então perda de energia igualmente através dos varistores resulta uma zona de tolerância muito grande atendendo à sincronização do momento de desligamento do grupo IGBT a ser desligado e o momento de conexão do grupo IGBT de admissão.

Caso no decurso dos anos de operação devido ao envelhecimento de componentes e deslocação do ponto de operação na eletrónica de comando suceder um comportamento

de comutação sobreposto ou com falhas numa ordem de grandeza de aproximadamente $\pm 10 \mu\text{s}$, então não resulta daí um risco da função no conceito de comutação de acordo com a invenção.

Resumindo a invenção apresenta as seguintes vantagens:

- Opção da comutação a qualquer valor instantâneo da corrente de carga sem sobrecarga térmica dos IGBTs
- Processo extraordinariamente rápido de comutação da corrente de carga a partir do lado do comutador escalonado A→B ou B→ A dentro de aproximadamente 10 μs .
- Prevenção de oscilações perturbadoras
- Uma adaptação específica do objetivo de cada comutador escalonado aos dados concretos das escalas nominais da encomenda (tensão de escala, corrente nominal de passagem, indutância de dispersão) é suprimida, enquanto os valores limites da tensão de escala e da corrente nominal de passagem não sejam ultrapassados.
- Conceito de comutação intrinsecamente seguro e robusto, com uma zona de tolerância muito grande quanto ao desvio de tempo de comutação entre os dois grupos de ligação IGBT. Não é necessário qualquer reajuste após um período prolongado de funcionamento.

A invenção é a seguir explicada em pormenor de forma exemplificativa na base das figuras.

Figura 1 mostra a conexão de um primeiro comutador escalonado de acordo com a invenção.

Figura 2 mostra a conexão de um segundo comutador escalonado, modificado no âmbito da invenção.

Como representado na fig. 1, cada uma das duas tomadas de enrolamento tap n bem como tap n+1 está ligada através de um comutador mecânico DS_a respetivamente DS_b com uma conexão em série com a derivação do comutador escalonado respetivamente conectadas em sentido contrário com dois IGBTs I_{an} e I_{ap} no lado n bem como I_{bn} e I_{bp} no lado n+1. Em paralelo para cada um dos conectados em série dois IGBTs I_{an} e I_{ap} de um lado e I_{bn} e I_{bp} do outro lado, é conectado respetivamente um diodo d_{an} , d_{ap} respetivamente d_{bn} , d_{bp} . Neste caso os diodos de um lado, isto é d_{an} e d_{ap} respetivamente d_{bn} e d_{bp} , estão conectados em sentido contrário uns para com os outros, isto é com uma direção de passagem contrária.

Por sua vez em paralelo para cada uma destas ligações paralelas de IGBT e diodo está previsto respetivamente um varistor V_{an} , V_{ap} respetivamente V_{bn} , V_{bp} .

Finalmente estão também ainda representados os contactos principais permanentes de cada lado MC_a respetivamente MC_b , os quais no funcionamento estacionário fazem ponte respetivamente em toda a unidade de comutação. Os IGBTs de ambos os lados I_{an} , I_{ap} ; I_{bn} , I_{bp} são acionados por um controlador IGBT comum, representado esquematicamente, conhecido a partir do estado da técnica.

A seguir é explicada em pormenor uma sequência de comutação de por exemplo tap n para tap n+1: Na posição básica a corrente de carga corre através do contacto principal

permanente MC_a de tap n para a derivação Y do comutador escalonado.

Como primeiro passo para a sequência de comutação os contactos de desconexão DS_a e DS_b são fechados.

A seguir a tensão de arranque é aplicada nas *gates* das IGBTs I_{an} e I_{ap} . Agora o contacto principal permanente MC_a abre e comuta a corrente de carga I_L para o grupo IGBT I_{an}/I_{ap} .

Após menos de 10 ms de duração do fluxo de corrente de I_L através do grupo IGBT I_{an}/I_{ap} , estes IGBTs recebem uma instrução de desconexão e o grupo IGBT I_{bn}/I_{bp} simultaneamente (pelo menos no caso standard) uma instrução de conexão.

A tensão que se constitui no IGBT a ser desconectado transmite-se para o varistor situado em paralelo. Se após poucos 100 ns for atingida a tensão em carga do varistor, o varistor inicia a condução, pelo que se inicia a admissão da corrente de carga dos IGBTs I_{an} e I_{ap} .

De acordo com a invenção o varistor está dimensionado de tal modo que a tensão do varistor percorrido pela corrente de carga se varia por um lado abaixo da máxima tensão de bloqueio do IGBT paralelo, por outro lado acima do máximo valor instantâneo da tensão de escala.

O excesso do valor instantâneo da tensão do varistor acima do valor instantâneo da tensão de escala provoca a descomutação da corrente de carga com aproximadamente um constante di/dt do lado A e uma transposição através da tensão de escala e a indutância de dispersão do enrolamento

de camadas sobrepostas L_σ (circuito grande de comutação) com o mesmo di/dt (neste caso positivo) para o lado B. Apesar da corrente continuamente decrescente, que percorre o varistor no lado A, a tensão do varistor permanece numa primeira aproximação constante.

Após aproximadamente 10 μs a totalidade da corrente de carga é comutada pelo varistor do lado A percorrido pela corrente para os IGBTs condutores do lado B. Com a aproximação da corrente do lado A ao valor 0 modifica-se a tensão no grupo de ligação A fundamentalmente:

A tensão do varistor colapsa, a transiente

$$L_\sigma \frac{di}{dt}$$

desaparece e no grupo A IGBT-/varistor aparece a tensão de escala, a qual dependente da polaridade existe em um IGBT de bloqueio, do diodo situado em paralelo para com o mesmo e o respetivo varistor também situado em paralelo. Mesmo sob carga com a amplitude da tensão de escala, o varistor ainda não admite uma condução significativa de corrente.

Menos de 10 ms após a comutação de potência eletrónica da corrente de carga do lado A para o lado B, o contacto principal permanente MC_b fecha e deriva o grupo IGBT B. A seguir os IGBTs I_{bn}/I_{bp} são através do acionamento da *gate* comutados para o estado não condutor.

A sequência de comutação termina com a abertura dos contactos mecânicos DS_a e DS_b , os quais protegem os IGBTs de cargas de tensão transientes, as quais podem ter efeito no enrolamento de camadas sobrepostas.

Na fig. 2 é representada uma conexão modificada de um comutador escalonado de acordo com a invenção, na qual os dois varistores de respetivamente um lado V_{an} , V_{ap} respetivamente V_{bn} , V_{bp} estão reunidos num varistor V_a respetivamente V_b comum. Neste caso o respetivo comutador mecânico de cada lado das respetivamente DS_b e o respetivo varistor do correspondente lado V_a respetivamente V_b forma também uma conexão em série para a derivação de carga comum.

Lisboa, 16 de Março de 2012

REIVINDICAÇÕES

1. Comutador escalonado com elementos de comutação semicondutores para a comutação ininterrupta entre tomadas de enrolamento de um transformador escalonado, em que o comutador escalonado apresenta dois ramais de carga, podendo ser ligados com as respectivas tomadas de enrolamento, em que os elementos de comutação semicondutores são IGBTs ($I_{an}, I_{ap}; I_{bn}, I_{bp}$), em que cada um dos dois ramais de carga está, através de uma conexão em série de dois IGBTs ($I_{an}, I_{ap}; I_{bn}, I_{bp}$) conectados em oposição, ligado eletricamente com uma derivação de carga comum e em que paralelamente a cada IGBT ($I_{an}, I_{ap}; I_{bn}, I_{bp}$) está conectado um diodo ($d_{an}, d_{ap}, d_{bn}, d_{bp}$), em que os dois diodos em cada ramal de carga (d_{an}, d_{ap} respectivamente d_{bn}, d_{bp}) estão conectados em oposição uns para com os outros, **caracterizado por,** respectivamente um comutador mecânico (DS_a, DS_b) com conexão em série de IGBTs ($I_{an}, I_{ap}; I_{bn}, I_{bp}$) e diodos paralelos ($d_{an}, d_{ap}, d_{bn}, d_{bp}$) estar em cada ramal de carga conectado em série, paralelamente para cada conexão paralela de IGBT ($I_{an}, I_{ap}; I_{bn}, I_{bp}$) e diodos ($d_{an}, d_{ap}, d_{bn}, d_{bp}$) estar respectivamente conectado um varistor ($V_{an}, V_{ap}; V_{bn}, V_{bp}$) e os varistores ($V_{an}, V_{ap}; V_{bn}, V_{bp}$) ou (V_a, V_b) serem dimensionados de tal modo que a sua tensão de varistor seja inferior do que a máxima tensão de bloqueio do respetivo IGBT paralelo, contudo superior do que o máximo valor momentâneo da tensão de escala.

2. Comutador escalonado de acordo com a reivindicação 1,

caracterizado por,

cada IGBT (I_{an} , I_{ap} ; I_{bn} , I_{bp}) estar reunido estruturalmente em comum com o varistor (V_{an} , V_{ap} ; V_{bn} , V_{bp}) conectado em paralelo com o mesmo bem como o diodo (d_{an} , d_{ap} , d_{bn} , d_{bp}) formando um stack.

3. Comutador escalonado de acordo com a reivindicação 1,

caracterizado por,

os dois varistores (V_{an} , V_{ap} ou V_{bn} , V_{bp}) previstos num ramal de carga estarem respetivamente agrupados num único varistor (V_a , V_b).

4. Comutador escalonado de acordo com uma das reivindicações 1 até 3,

caracterizado por,

em paralelo para cada um dos ramais de carga estar previsto respetivamente um contacto principal permanente mecânico (MC_a , MC_b).

Lisboa, 16 de Março de 2012

A Diagrama básico dos circuitos 1

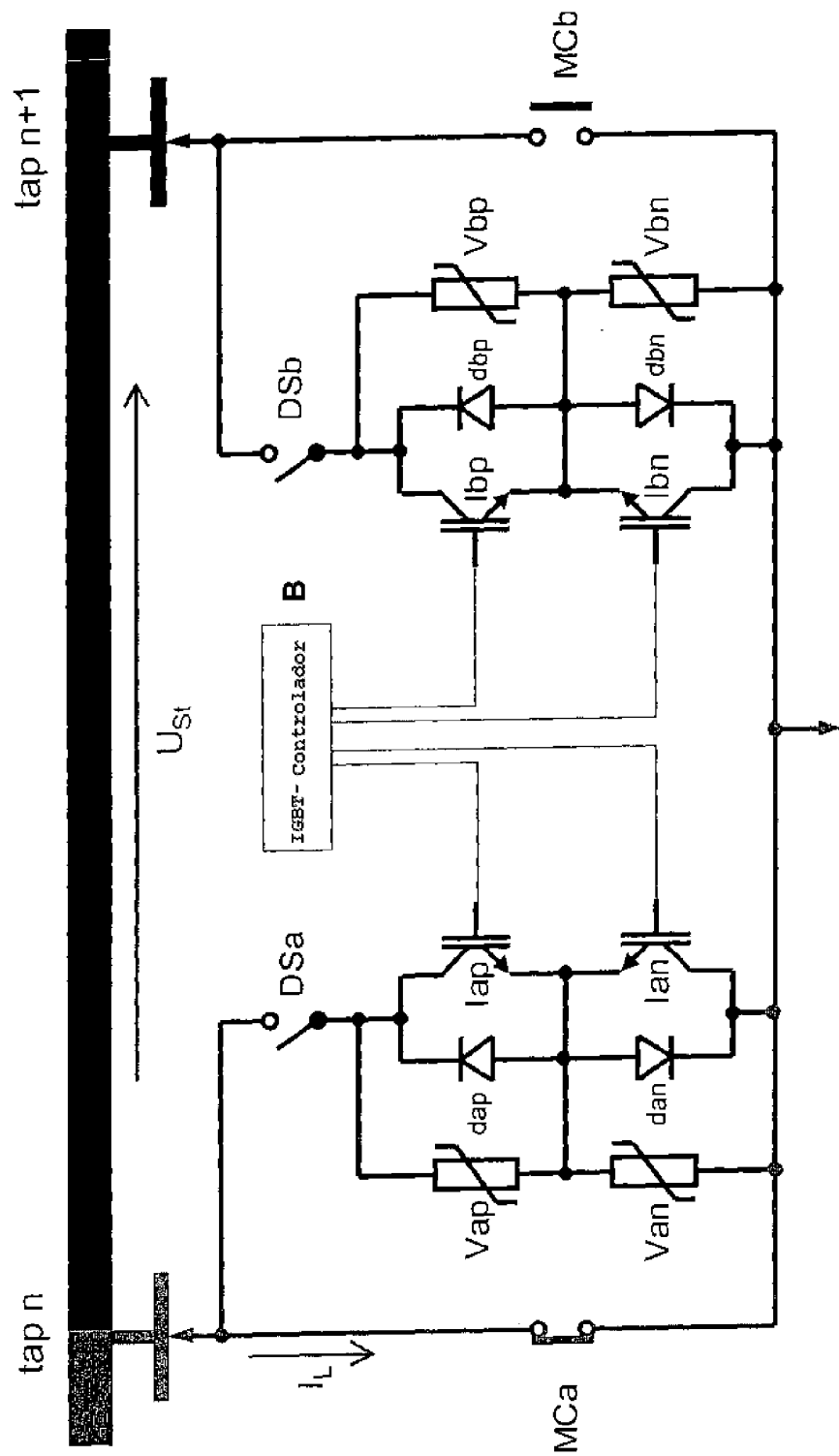


FIG. 1

Diagrama básico dos circuitos 2

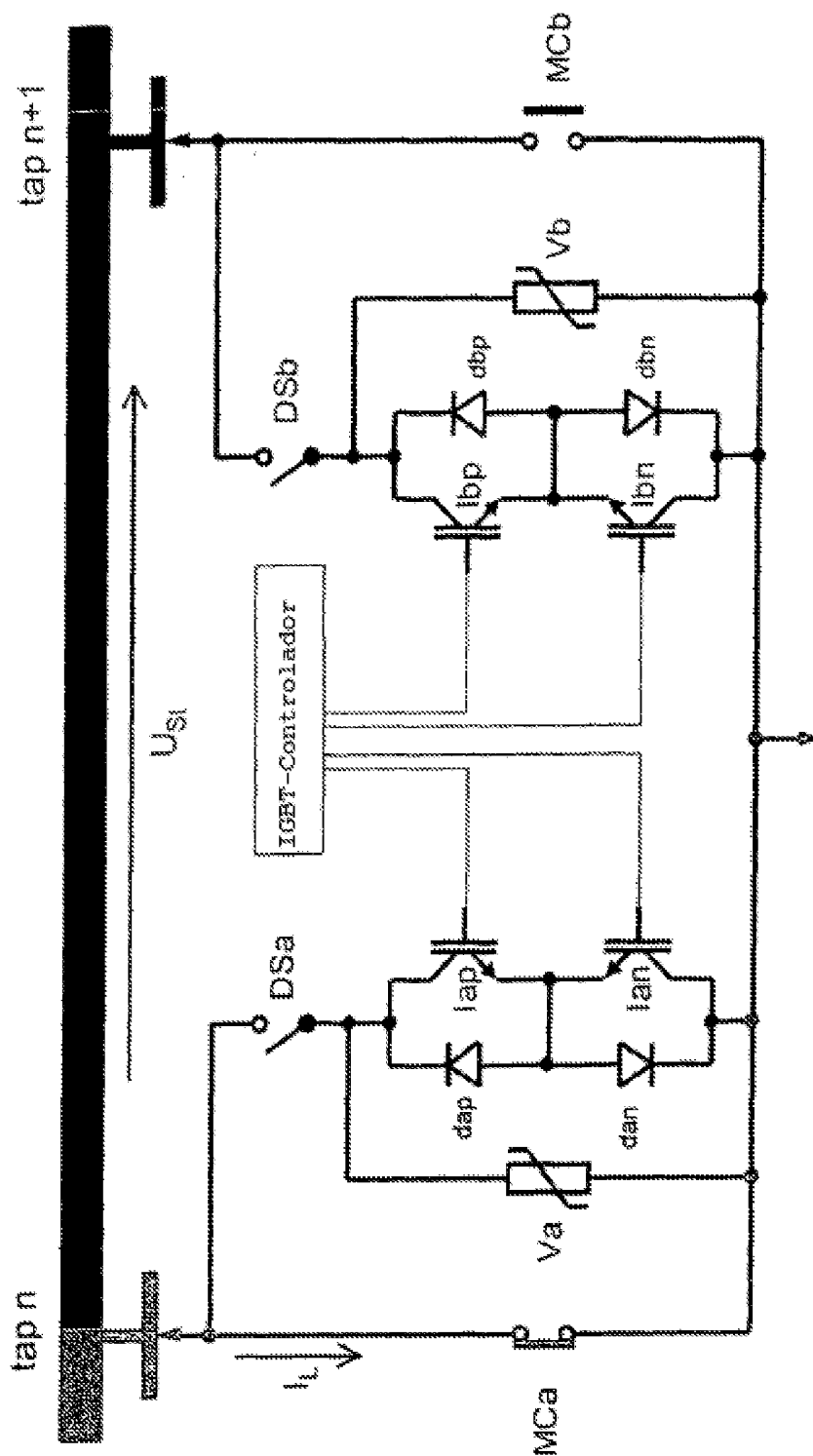


FIG. 2