

"CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM
COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA".

Refere-se o presente relatório a uma patente de invenção que trata de um conversor CC-CA trifásico com comutação em baixa frequência e baixa distorção harmônica, sendo configurado como um conversor eletrônico de potência capaz de, a partir de uma fonte de tensão em corrente contínua, produzir uma saída em corrente alternada, para injeção de potência em uma rede elétrica trifásica. O conversor ora tratado é um elemento fundamental para a aplicabilidade de fontes alternativas de energia, tais como células fotoelétricas, células a combustíveis, baterias, etc. Tais conversores são também denominados Inversores.

No estado da técnica atual, o uso de conversores CC-CA para converter corrente contínua em corrente alternada é fundamental para a aplicabilidade de fontes de energia nas quais a potência gerada dá-se na forma CC, como é o caso de células a combustível, painéis fotovoltaicos, baterias, etc. Uma vez que a rede elétrica e as cargas tipicamente alimentadas operam em 50/60 Hz, com tensão estabilizada e com baixa distorção, é necessário que o condicionamento da energia proporcionado pelo Inversor permita atender especificações de qualidade da energia.

No caso de sistemas de co-geração, no qual a energia produzida pela fonte alternativa deve ser injetada na rede, o Inversor deve operar de maneira a que a corrente injetada na rede apresente-se com mínima distorção harmônica, a fim de preservar a qualidade da tensão

suprida.

Tradicionalmente são empregados dois tipos de inversores: os de comutação pela rede e os de comutação forçada.

5 Os inversores com comutação pela rede tipicamente utilizam tiristores como interruptores de potência, apresentam comutação em baixa frequência e alto rendimento, devido às baixas perdas de comutação e de condução. No entanto, a forma de onda da corrente injetada na
10 rede apresenta-se muito distorcida e com baixo fator de potência, devido ao controle de fase utilizado no comando do conversor.

Já os conversores com comutação forçada, tipicamente utilizam circuitos com transistores,
15 operando em modulação por largura de pulso ou por histerese. A forma de onda injetada na rede é praticamente senoidal e com fator de potência que pode atingir a unidade, no entanto faz uso de comutações em alta frequência, o que reduz o rendimento (devido às perdas de comutação) e é uma considerável fonte de
20 interferência eletromagnética (IEM), exigindo cuidados especiais em termos de blindagens e a inclusão de filtros na conexão com a rede (O'Sullivan, 2000).

Soluções outras têm sido propostas, visando mitigar os problemas apontados pelas duas
25 soluções anteriores.

Dentre as propostas mais recentes referentes aos circuitos com comutação em alta frequência, uma alternativa é a de utilizar tiristores (menores perdas de

condução e custo reduzido, em comparação com transistores),
garantindo a comutação dos mesmos por meio de correntes
pulsadas no barramento CC (Ledwich and Wang, 1999). Uma vez
que neste caso mantém-se a presença de correntes e/ou tensões
de alta frequência, os problemas de IEM continuam existindo,
bem como a exigência de filtros na conexão com a rede visando
a adequação das formas de onda com exigências de qualidade de
energia.

Outra via é a aplicação de
comutação em baixa frequência utilizando transistores, de
maneira a ter maior possibilidade de controle (em relação aos
circuitos com tiristores), mas minimizando problemas de IEM e
de perdas.

Diversos circuitos deste tipo
foram descritos recentemente, mas com aplicação na conversão
CA-CC (retificadores) que são, de certa forma, os conversores
duais dos inversores (Marafão, Pomilio e Spiazzi, 2001).

A solução proposta por El-Tamaly
e outros (2000) vai neste sentido, partindo de circuitos
anteriores utilizados em conversores CA-CC. Utiliza um
transformador em conexão zig-zag e um interruptor adicional,
com comutação em baixa frequência, numa aplicação trifásica.
É precisamente este transformador com enrolamento especial que
torna esta alternativa menos interessante.

A solução aqui proposta apresenta
também as características de comutação em baixa frequência, e
a garantia de obtenção de correntes com reduzida distorção
harmônica, empregando circuitos e componentes de maior

simplicidade e é uma extensão do circuito monofásico cuja patente foi requerida (Pomilio, 2001).

A seguir a patente ora tratada será pormenorizadamente descrita com referência aos desenhos abaixo relacionados, nos quais:

a figura 1 ilustra o circuito empregado no conversor ora proposto;

a figura 2 ilustra o circuito do interruptor bidirecional que integra o escopo da presente patente;

a figura 3 ilustra um diagrama das formas de onda para o comando dos interruptores, sendo que, de cima para baixo: T1, T3, T5, T4, T6, T2, Sa, Sb, Sc; e

a figura 4 ilustra dois gráficos sendo que a tensão sobre o capacitor C_2 no gráfico superior e a tensão da rede (u_a) e corrente da fase a (i_a) no gráfico inferior.

De conformidade com o quanto ilustram as figuras acima relacionadas, o conversor CC-CA trifásico ora tratado utiliza o circuito mostrado na figura 1, que é uma estrutura em ponte, possuindo seis transistores (bipolar, IGBT, MOSFET, ou qualquer outro tipo de interruptor controlável na condução e no bloqueio) e seis diodos em anti-paralelo, ou seja, fazendo a condução de corrente no sentido oposto ao dos transistores. Estes interruptores são indicados por chaves abertas na figura 1, denominados de T_1 a T_6 .

A rede CA é conectada, por meio de indutores, aos pontos médios de cada ramo da ponte. A fonte CC é conectada entre os terminais da semiponte superior e

inferior. Esta fonte CC representa qualquer tipo dos
supridores de energia citados (célula a combustível, painel
fotovoltaico, etc.), que podem estar diretamente conectados a
estes pontos ou através de um conversor CC-CC (para ajuste da
5 tensão).

O par de capacitores, conectados
em série entre si e colocados em paralelo com a fonte CC, tem
seu ponto médio (M) interligado aos indutores por meio de
interruptores auxiliares (S_a , S_b , S_c), os quais devem ter uma
10 característica bidirecional em tensão e corrente.

Tais interruptores podem ser
TRIACs (ou dois tiristores em anti-paralelo) ou um arranjo de
diodos e transistores. Os tiristores podem ser utilizados
caso, neste ramo, a corrente venha a se anular, caracterizando
15 a chamada comutação natural. Caso contrário devem ser
utilizados transistores associados a diodos.

O objetivo é injetar na rede uma
corrente com mínima distorção harmônica. Pode-se tomar como
parâmetro de qualidade da corrente os valores estabelecidos
20 por normas internacionais que limitam o conteúdo harmônico da
corrente consumida por equipamentos e/ou instalações
(International Electrotechnical Commission, 1995 e 1998).
Embora tais normas não tratem de fornecimento de corrente ao
sistema, mas sim de consumo, o efeito da distorção da corrente
25 sobre o sistema é análogo, de maneira a ser bastante razoável
admitir os mesmos limites.

Garantida uma distorção aceitável
da corrente, outra propriedade do circuito deve ser a de

controlar o fluxo de potência, de acordo com algum critério estabelecido pelo usuário.

Diversas possibilidades se abrem neste aspecto, uma vez que é possível fazer o controle da potência injetada na rede pelos seguintes meios: variação da
5 tensão CC; variação do comando dos interruptores da ponte, variação do comando dos interruptores auxiliares.

Em termos práticos, o circuito auxiliar tem um papel mais relacionado com a melhoria da forma
10 de onda (redução da distorção harmônica), afetando marginalmente a potência convertida.

Os indutores são dimensionados para a frequência da rede e operação sem corrente CC.

Pelo circuito auxiliar circula apenas uma corrente relativamente pequena (em relação à
15 corrente nominal do conjunto). As perdas de potência nos interruptores referem-se quase que exclusivamente às perdas de condução, as quais podem ser estimadas com boa precisão, determinando o dimensionamento do sistema de dissipação de
20 calor.

Os capacitores do circuito auxiliar são do tipo eletrolítico, para operação em baixa frequência. Sua tensão é automaticamente limitada pela fonte
CC.

O comando dos transistores da semiponte superior, assim como dos auxiliares, necessita de acionamentos isolados, enquanto os transistores da semiponte inferior podem ser alimentados a partir da própria fonte CC.
25

Caso os transistores selecionados sejam MOSFETs, não é necessária a inclusão dos diodos em anti-paralelo, podendo ser utilizados os diodos intrínsecos deste tipo de transistor.

5 No que diz respeito ao funcionamento do presente conversor, a corrente injetada na rede, a partir da fonte CC, terá sua forma determinada pelo indutor de acoplamento, em função da tensão instantânea aplicada sobre ele.

10 Tomando como exemplo a fase a, tal tensão é a diferença entre a tensão da rede (ponto A) e a tensão no ponto B. Uma forma de onda de corrente com baixa distorção depende da imposição adequada, por intervalos de tempo determinados, do potencial no ponto B.

15 No ponto A tem-se tipicamente uma senóide (negligenciando as distorções presentes na tensão), enquanto no ponto B tem-se a tensão positiva do barramento CC (caso estejam em condução o transistor T1 ou o diodo associado), ou a tensão negativa (caso conduzam T3 ou o diodo associado).

20

Alternativamente, quando nenhum destes componentes estiver em condução, a tensão neste ponto pode ser imposta pela condução do interruptor auxiliar, S_a , o que faz com que o potencial do ponto médio dos capacitores (ponto M) seja aplicado no ponto B. Esta é uma situação em que se tem uma ressonância entre a indutância de entrada e as capacitâncias.

25

O dimensionamento dos componentes

passivos (indutor e capacitores) é feito para a situação de potência nominal, ou seja, quando toda potência gerada pela fonte CC deve ser injetada na rede. Como regra geral deve-se buscar um valor mínimo para a indutância, uma vez que o volume (e conseqüentemente massa e custo) da mesma lhe é proporcional.

A descrição a seguir pressupõe operação na potência nominal. Neste caso busca-se obter o máximo fator de potência, com as correntes estando "em fase" com as tensões.

O comando dos transistores se dá na freqüência da rede. A todo instante deve haver pelo menos um interruptor de cada semiponte em condução. O início da condução (que se estende por $1/3$ do período) se dá no cruzamento da respectiva tensão de fase com o zero. Quando se faz o desligamento de um dado interruptor é acionado o interruptor auxiliar ligado àquela fase, de maneira a manter a continuidade da corrente até o final do semi-ciclo, o que significa uma condução por $1/6$ do período.

Não pode haver condução simultânea de interruptores do mesmo ramo da ponte, bem como do interruptor auxiliar ligado na respectiva fase.

Com a condução do interruptor auxiliar, a passagem da corrente pelo ramo dos capacitores descarrega um deles, carregando o outro complementarmente, dado que a soma de ambas tensões é igual à tensão do barramento CC.

Ao se completar tal processo de

carga/descarga a corrente pelo interruptor auxiliar se anula. Caso isso ocorra, o interruptor utilizado pode ser do tipo tiristor (TRIAC). Caso o início do semiciclo seguinte ocorra antes que ocorra completamente tal processo, é necessário usar transistores para implementar o interruptor auxiliar, interrompendo o intervalo de ressonância.

Esta alteração nas tensões dos capacitores sempre garante a condição inicial necessária para o adequado funcionamento do processo para a fase seguinte.

A figura 3 ilustra as formas de onda dos sinais de comando dos interruptores. Na figura 4 tem-se a forma de onda no capacitor C_2 , a tensão na fase a e a corrente injetada na rede nesta fase. Nas demais fases o comportamento é análogo. Observa-se a baixa distorção, bem como se pode inferir o elevado fator de potência resultante.

Observe-se aqui que a norma IEC 61000-3-2, válida para tensões de 220 a 240 V, e correntes até 16 A por fase, estabelece valores absolutos para as componentes harmônicas. Já a IEC 61000-3-4, válida para correntes acima de 16 A, apresenta valores relativos à componente fundamental.

O controle da corrente pode ser feito por diferentes métodos. Caso o sistema de geração permita a variação da tensão CC, é possível manter o acionamento como descrito anteriormente, eventualmente eliminando a atuação do circuito auxiliar e ajustando os intervalos de condução de cada interruptor.

Quando a tensão CC for fixa,

deve-se proceder a um ajuste do acionamento dos interruptores (T_1 a T_6), atrasando o início de sua condução, de maneira que a tensão aplicada ao indutor seja reduzida.

5 Embora com forma de onda mais distorcida, os limites da norma IEC 61000-3-4 devem ser respeitados.

10 As principais vantagens desta patente de invenção, e que se constituem em novidades são: a) aplicação em redes trifásicas; b) obtenção de corrente com baixa distorção harmônica utilizando comutação em baixa frequência; c) eliminação de interferência eletromagnética produzida pelo conversor de potência; d) não necessidade de filtros de interferência eletromagnética; e) eliminação das perdas de comutação, reduzindo drasticamente as perdas do

15 circuito, minimizando as necessidades de dispositivos de dissipação de calor; f) utilização de topologia típica de inversores industriais; g) os circuitos adicionais necessários não necessitam alteração topológica, uma vez que são conectados adicionalmente à topologia básica; h) utilização de

20 componentes de baixo custo, uma vez que são operados em baixa frequência; i) maior densidade de potência (maior potência em menor volume) devido às menores dimensões do sistema de dissipação de calor e não necessidade de filtro de linha; e j) baixo custo total devido à simplicidade do circuito de

25 potência e de controle, o que é essencial para a aplicação em sistemas de geração em alternativa de energia de baixa potência, para realizar sua conexão com a rede.

A principal inovação é a

aplicação em um sistema trifásico, com realização de comutação em baixa frequência através da inclusão do circuito auxiliar que permite obter formas de onda de corrente com mínima distorção harmônica e elevado fator de potência enquanto praticamente elimina problemas de IEM e a necessidade de filtros e minimiza a dissipação de potência.

A melhoria da forma de onda se dá pela ação do circuito auxiliar (interruptor e capacitores), permitindo um grau de liberdade adicional em relação à ponte. O substancial efeito sobre a forma de onda garante o atendimento das prescrições de normas relativas à distorção harmônica da corrente.

Seguem-se abaixo as referências consideradas no contexto da presente patente:

El-Tamaly, A. M., Enjeti, P. N. and El-Tamaly, H. H., (2000) "An improved approach to reduce harmonics in the utility interface of wind, photovoltaic and fuel cell power systems" , IEEE - APEC 2000, New Orleans, USA.

International Electrotechnical Commission, (1995) IEC 1000-3-2: "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current \leq 16A per phase)". Genève, Switzerland, First edition.

International Electrotechnical Commission, (1998) IEC 61000-3-4, "Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A per phase". Genève, Switzerland.

Ledwich, G. and Wang, P., (1999)

"Simple Grid Interfaces for Renewables", International Journal of Renewable Energy Engineering, vol. 1, no. 2, August 1999, pp. 50-55.

5

O'Sullivan, G. A., (2000) "Fuel

Cell Inverters for Utility Applications", IEEE PESC 2000, June 2000, Galway, Ireland, pp. 1191-1194.

Marafão, J. H. A. G., Pomilio,

J. A., Spiazzi, G. (2001): "Improved Three-Phase High-Quality

10

Rectifier with Line-Commutated Switches". IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC2001, Vancouver, Canadá, 17 a 21 de junho 2001, pp. 695-700.

Pomilio, J. A. (2001): "Disposição

Construtiva Introduzida em Conversor CC-CA monofásico com comutação em baixa frequência e baixa distorção harmônica" Relatório Técnico de Patente Requerida (MU 8.100.701-9) ao INPI.

15

REIVINDICAÇÕES

1. "CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM
COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA".
caracterizado pelo fato de que o conversor CC-CA trifásico ora
5 tratado utiliza um circuito que é uma estrutura em ponte,
possuindo seis transistores, que podem ser do tipo bipolar, IGBT,
MOSFET, ou qualquer outro tipo de interruptor controlável na
condução e no bloqueio, e seis diodos em anti-paralelo, fazendo
a condução de corrente no sentido oposto ao dos transistores; os
10 interruptores sendo denominados de T_1 a T_6 .

2. "CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM
COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA",
segundo o reivindicado em 1, caracterizado pelo fato de que a
rede CA é conectada, por meio de indutores, aos pontos médios de
15 cada ramo da ponte; a fonte CC é conectada entre os terminais da
semiponte superior e inferior, sendo que esta fonte CC pode ser
representada por qualquer tipo dos supridores de energia citados,
tais como: célula a combustível, painel fotovoltaico, e outros,
que podem estar diretamente conectados a estes pontos ou através
20 de um conversor CC-CC (para ajuste da tensão).

3. "CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM
COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA".
segundo o reivindicado em 1 e 2, caracterizado pelo fato de que
o par de capacitores, conectados em série entre si e colocados em
25 paralelo com a fonte CC, tem seu ponto médio (M) interligado aos
indutores por meio de interruptores auxiliares (S_a , S_b , S_c), os
quais devem ter uma característica bidirecional em tensão e
corrente, sendo que os citados interruptores podem ser TRIACs.

4. "CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA". segundo o reivindicado em 3, caracterizado pelo fato de que os interruptores podem ser dois tiristores em anti-paralelo.

5

5. "CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA". segundo o reivindicado em 3 ou 4, caracterizado pelo fato de que os interruptores podem ser um arranjo de diodos e transistores.

10

6. "CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA". segundo o reivindicado em 1, caracterizado pelo fato de que o conversor ora tratado compreende um circuito auxiliar, através do qual circula apenas uma corrente relativamente pequena; os capacitores do circuito auxiliar são do tipo eletrolítico, para operação em baixa frequência, sendo sua tensão automaticamente limitada pela fonte CC.

15

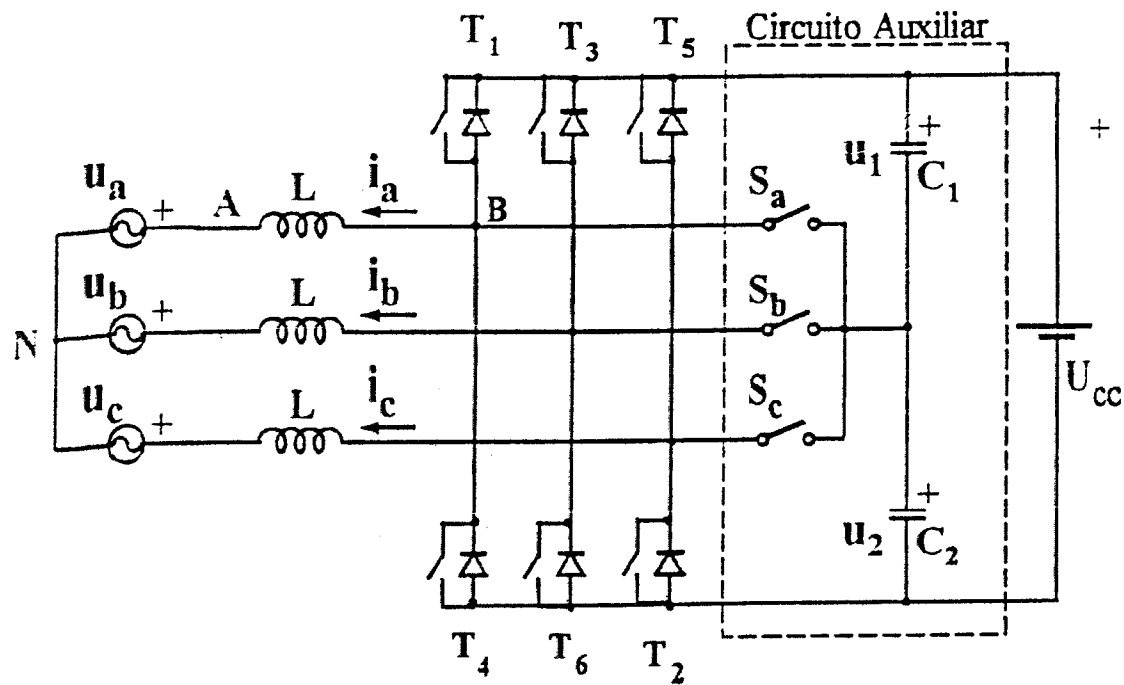
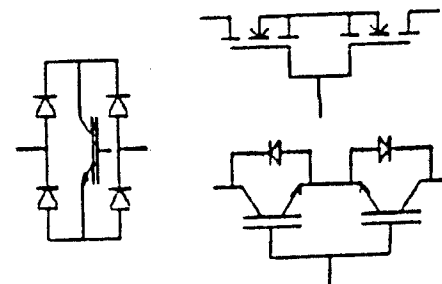


FIG. 1



Interrupor bidirecional
em tensão e corrente (S)

FIG. 2

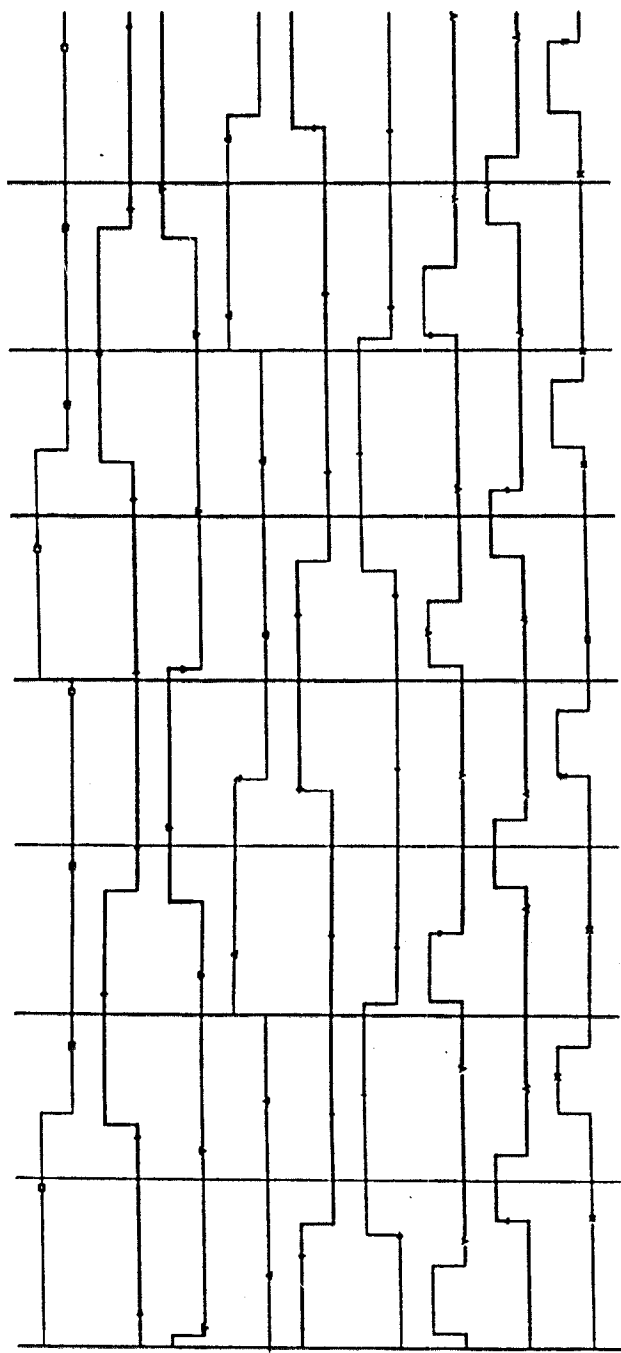
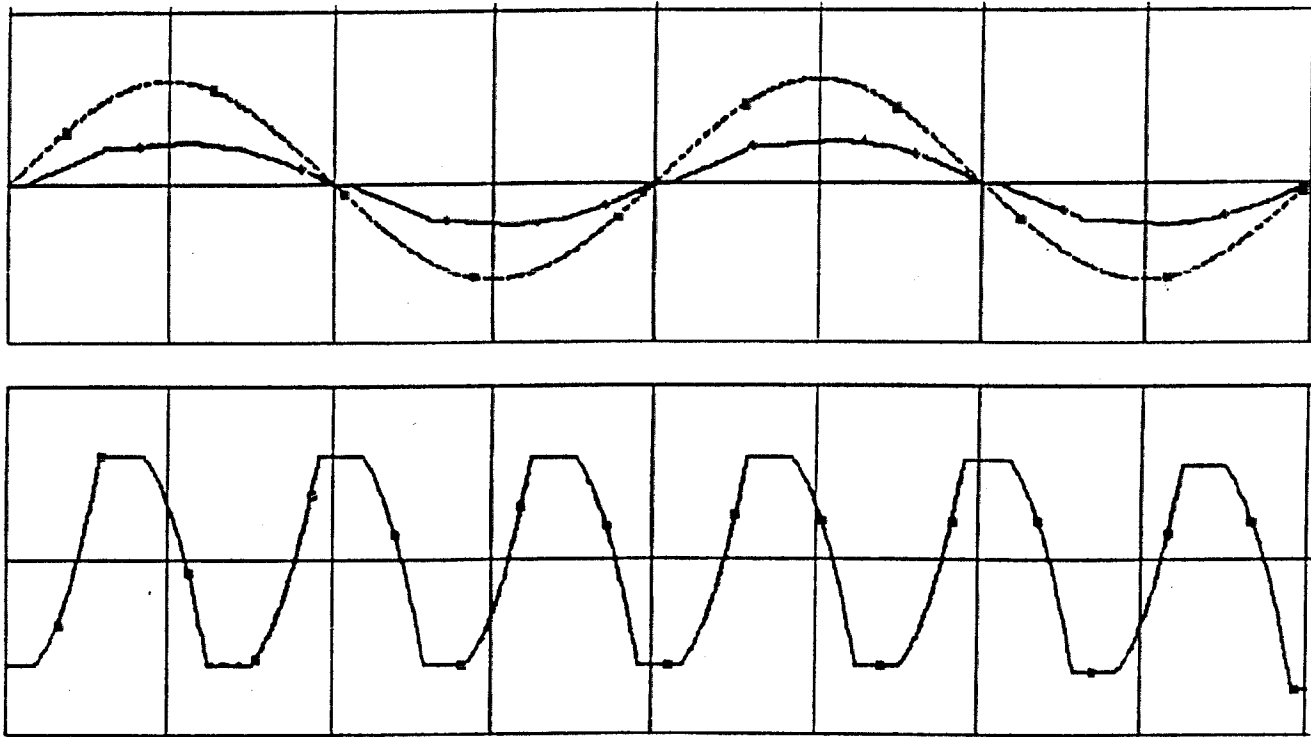


FIG. 3

FIG. 4



RESUMO

"CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO COM COMUTAÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA E BAIXA DISTORÇÃO HARMÔNICA". caracterizado pelo fato de que o conversor CC-CA trifásico ora tratado utiliza um circuito que é uma estrutura em ponte, possuindo seis transistores, que podem ser do tipo bipolar, IGBT, MOSFET, ou qualquer outro tipo de interruptor controlável na condução e no bloqueio, e seis diodos em anti-paralelo, fazendo a condução de corrente no sentido oposto ao dos transistores; os interruptores sendo denominados de T_1 a T_6 . Adiciona-se um circuito auxiliar composto por interruptores bidirecionais eletrolíticos, tendo como função melhorar a forma de onda.

5

10