

CONVERSOR TRIFÁSICO COM CARGAS RESSONANTES PARA GERAÇÃO DE OZÔNIO

Jakson P. Bonaldo, José A. Pomilio e Edson A. Vendrusculo

Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica, Departamento de Sistemas e Controle de Energia,
Universidade Estadual de Campinas

Av. Albert Einstein, 400 CEP 13083-852, Campinas-SP Brasil
jbonaldo@gmail.com, antenor@dsce.fee.unicamp.br, adriano@dsce.fee.unicamp.br

Resumo - Este trabalho apresenta um conversor ressonante trifásico alimentando um transformador de alta tensão utilizado para geração de ozônio por descarga eletrostática. Devido à dispersão dos parâmetros dos transformadores e das células geradoras de ozônio, não se torna viável a simples paralelização para que haja um aumento de produção. Uma nova estrutura é introduzida para equalizar a potência nos transformadores. A frequência de chaveamento do conversor é ajustada próxima e acima da frequência de ressonância série entre a indutância de dispersão do transformador e a capacitância equivalente referida ao primário, de modo a obter comutações suaves. É proposta uma técnica para equalizar a potência, bem como evitar a saturação dos transformadores. Simulações e resultados experimentais validam a estrutura e técnicas propostas.

Palavras-chave - Eletrônica de Potência, Geração de Ozônio, Sistemas Polifásicos, Conversor Ressonante, Comutação Suave, Fonte de alta tensão.

THREE-PHASE RESONANT CONVERTER FOR OZONE GENERATION

Abstract - This paper presents a three-phase resonant converter feeding high-voltage transformers used for ozone generation by electrostatic discharge. Due to the high dispersion of the transformers parameters, what become unpractical the parallel connection of them, a novel structure is developed for equalizing the power among the transformers. The switching frequency is adjusted near above the series resonance given by the leakage inductance of the transformer and the equivalent capacitance reflected to the primary side. In this frequency range switches' soft commutation is gotten. A procedure for equalizing the power is proposed, as well as procedures for avoiding transformer' saturation. Simulation and experimental results on a 200VA prototype confirm the expected behavior of the converter.

Keywords - Power Electronics, Ozone Generation, Poly-phase Systems, Resonant Converter, Soft-Commutation, High-voltage source.

I. INTRODUÇÃO

Devido à sua característica biocida e seu curto tempo de meia-vida o ozônio se tornou um interessante produto para aplicações como esterilização de materiais cirúrgicos, tratamento de água potável, tratamento de água de piscinas e de efluentes resultantes de processos industriais.

Uma das maneiras para a produção industrial de ozônio é através de descargas elétricas de alta tensão entre dois eletrodos, quebrando a molécula de oxigênio O_2 , que se recombina em ozônio O_3 . A descarga eletrostática geralmente se dá com baixa corrente entre os dois eletrodos separados pelo próprio oxigênio. Na célula ozonizadora há também um material dielétrico, geralmente o vidro, responsável por suportar a tensão aplicada após a ruptura do ar. Este conjunto pode ser modelado por capacitâncias, uma associada ao *gap* de ar (que suporta uma dada tensão V_z) e outra associada ao dielétrico de vidro [1], conforme ilustrado na Figura 1. Para aplicar a alta tensão à célula normalmente é utilizado um transformador cujo secundário atinge tensões da ordem de 5 kV de pico [2].

As soluções topológicas encontradas na literatura normalmente fazem proveito da ressonância entre a indutância de dispersão do transformador (que é elevada, devido à aplicação de alta tensão, que exige separação física entre os enrolamentos de entrada e de saída) e a capacitância da carga. A operação nas regiões indutivas da impedância permite obtenção de comutações do tipo ZVS nos interruptores, o que contribui para redução de perdas e de geração de interferência eletromagnética.

A topologia mais utilizada para geração de ozônio consiste em um inversor ponte completa sintetizando uma onda quadrada que é aplicada ao primário do transformador que tem o secundário conectado à célula [3].

A presença do transformador impõe precauções para se garantir que o mesmo não entre em saturação. Uma solução usual é pelo controle de corrente no primário, o que pode ser obtido com conversores tipo *push-pull* alimentado ou controlado em corrente [4]. Outros métodos podem ser utilizados, como o bloqueio de componentes CC por meio de capacitor [3], neste caso usando conversor em ponte tipo fonte de tensão. O capacitor adicionado em série com o enrolamento primário do transformador deve suportar toda a corrente da carga. Além disso, proporciona uma ressonância série, em baixa frequência, com a indutância de magnetização. Se tal ressonância for excitada, há grande risco de saturar o trans-

formador, já que haveria crescimento do fluxo de magnetização, comprometendo o funcionamento do sistema.

A regulação da potência de saída, associada à produção de ozônio, normalmente é feita por modulação por densidade de pulsos (PDM) [5], permitindo a operação do conversor com frequência fixa, além de possibilitar um fator de potência melhor na entrada do transformador, elevando o rendimento do sistema. Um ciclo PDM é composto por um período em que há tensão, alternada, sobre a carga e um período em que a tensão é zero. Em regime permanente e com pulsos simétricos, esta técnica não produz componentes espectrais em baixa frequência. No entanto, em situações transitórias e com pulsos de larguras distintas nos semiciclos positivo e negativo, há geração de componentes de baixa frequência, que poderiam excitar a ressonância série de baixa frequência [6].

Dentro da capacidade do conversor eletrônico, seja para obter um aumento na produção do gás ou ainda para escalar a produção em função da necessidade, uma alternativa é a colocação em paralelo de transformadores com as respectivas células. No entanto, devido à dispersão dos parâmetros dos transformadores e das células geradoras de ozônio, tendo-se uma única alimentação para todos os dispositivos, resulta que uma célula acaba por gerar mais ozônio que as outras, podendo sobrecarregar alguns componentes do sistema, enquanto outros são subutilizados. O uso de conversores individuais certamente resolve este problema, porém, com aumento no custo do sistema.

O que este artigo propõe é uma solução intermediária em que se utiliza um conversor polifásico único, compartilhado por todos os conjuntos de transformador e célula. Com isso tem-se a redução pela metade na quantidade de interruptores (em comparação com conversores em ponte individuais), preservando-se, no entanto, a capacidade de equilibrar a potência individualmente em cada saída e, conseqüentemente, a geração de ozônio de cada célula.

A seção II deste trabalho apresenta o modelo do transformador e da célula geradora de ozônio. A seção III traz a topologia polifásica, em uma versão trifásica, e a técnica proposta para equalizar as potências das fases do sistema. Na seção IV é discutida a integração da topologia e da técnica. Simulações são mostradas na seção V, juntamente com resultados experimentais. A seção VI traz as principais conclusões.

II. MODELO DO CIRCUITO

A modelagem da célula geradora de ozônio pode ser verificada em Figura 1. O modelo separa as capacitâncias C_a e C_v , capacitância do gap de ar e capacitância do vidro, respectivamente. A tensão em que a descarga eletrostática ocorre é indicada por V_z . Quando se inicia a descarga, os diodos conduzem, retirando C_a do circuito, fazendo com que a capacitância total conectada no secundário aumente. A célula ozonizadora apresenta, portanto, um comportamento não linear em relação à tensão [4] [5].

No modelo adotado, a capacitância entre os enrolamentos do transformador é desprezada, pois não afeta o fenômeno da ressonância série nem paralela e sua influência se dá

em uma frequência além das de interesse para a aplicação. Já a capacitância própria dos enrolamentos apresenta influência, principalmente a capacitância do enrolamento secundário, que possui muitas espiras e que, quando referida ao primário, é multiplicada pelo quadrado da relação de transformação, tornando esta capacitância ainda mais importante para o funcionamento do sistema.

A capacitância da célula pode ser referida ao primário e somada à capacitância dos enrolamentos do transformador. Deste modo, a capacitância equivalente do sistema é denominada C_{eq} .

Na configuração trifásica do conversor são utilizados três conjuntos de carga (transformador e célula geradora de ozônio). Ao inversor de frequência trifásico são conectados os terminais de primário dos transformadores, caracterizando uma conexão em delta. Ao secundário são conectadas as células geradoras de ozônio, em conexão estrela, para garantir a existência de um ponto comum entre as células, o qual corresponde ao eletrodo externo e que, por razões de segurança, deve ser aterrado.

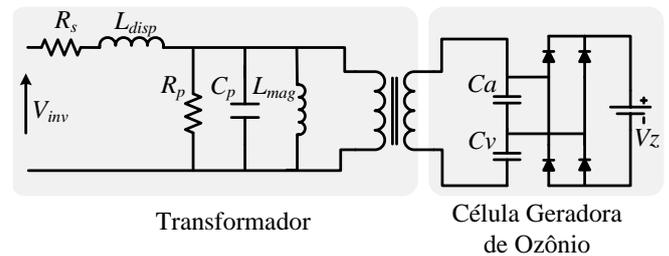


Fig. 1. Modelo do transformador elevador de tensão conectado à célula geradora de ozônio.

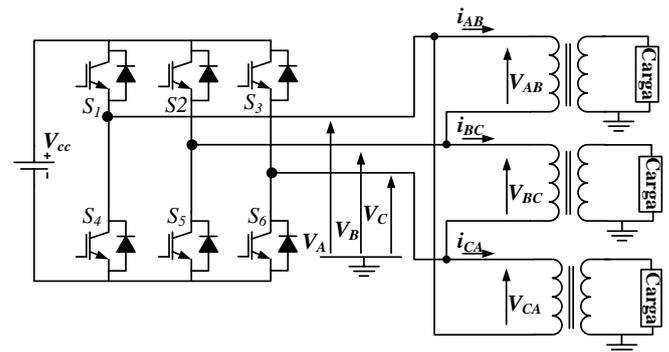


Fig. 2. Topologia trifásica, com o lado primário dos transformadores conectados em delta e secundários em estrela.

A Tabela I traz os valores dos parâmetros utilizados no circuito. Tais parâmetros são mais bem observados na Figura 3, que mostra a variação da impedância da carga em função da frequência. Foram realizados ensaios por varredura em frequência. Tal método, feito com baixa tensão aplicada, permite verificar a dispersão dos parâmetros de modo a descartar aqueles dispositivos que estiverem fora de certos limites toleráveis.

Neste ensaio, as não-linearidades dos dispositivos não são consideradas, como a saturação do transformador e a variação na capacitância da carga. A capacitância da célula ozonizadora resulta da associação série da capacitância do

vidro e do ar, ou seja, uma situação de menor capacitância e, portanto, maior frequência de ressonância. Ao ocorrer a efetiva descarga sobre o dielétrico de ar, a respectiva capacitância deixa de contribuir para a ressonância.

Do ponto de vista de funcionamento do circuito, isso não é um problema pois não compromete a obtenção de comutação suave, já que a frequência de ressonância aparente reduz seu valor. Na verdade, os valores exatos dos parâmetros, que dependem da magnetização do transformador, não precisam ser conhecidos com exatidão, uma vez que o ajuste no ponto de operação será realizado pela equalização das potências.

Conforme se observa na figura, devido à variação dos parâmetros, as ressonâncias de cada fase ocorrem em frequências diferentes. Assim, para uma dada frequência de operação, igual para as três fases, serão obtidas potências diferentes, conforme a Figura 4.

A frequência de comutação do conversor é escolhida de modo a se operar acima da ressonância série de modo a obter comutação ZVS para os interruptores. O comando dos interruptores de cada braço é complementar, de modo que a tensão de pólo resulte quadrada e que a tensão de linha resulte de três níveis, como se vê na Figura 4. Neste caso, o deslocamento temporal entre os sinais de comando de cada braço é de $1/3$ do período. Para o caso geral de um conversor polifásico com n braços, o deslocamento temporal dos comandos deve ser de $1/n$ do período.

O valor nominal de potência das células ozonizadoras é conhecido e não deve ser ultrapassado. Dadas as diferenças nos parâmetros, um conjunto de carga pode operar sobrecarregado, isto é, excedendo a potência para a qual foi projetado, diminuindo seu tempo de vida útil. Por outro lado, um dos outros conjuntos, ou mesmo os outros dois, podem estar operando abaixo de sua capacidade nominal, diminuindo a eficiência do sistema.

TABELA I
Parâmetros do protótipo

Fase	R_s	R_p	L_{disp}	L_{mag}	C_{eq}
A	3 Ω	40 k Ω	27 mH	281 mH	210 nF
B	3 Ω	40 k Ω	32 mH	312 mH	210 nF
C	3 Ω	40 k Ω	31 mH	239 mH	210 nF

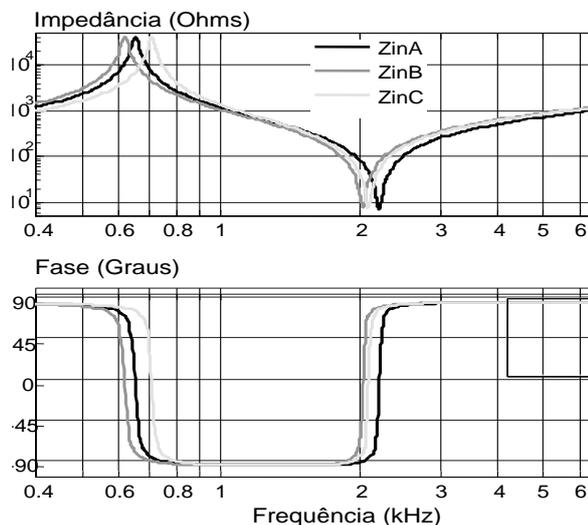


Fig. 3. Impedância dos três conjuntos de transformador e carga.

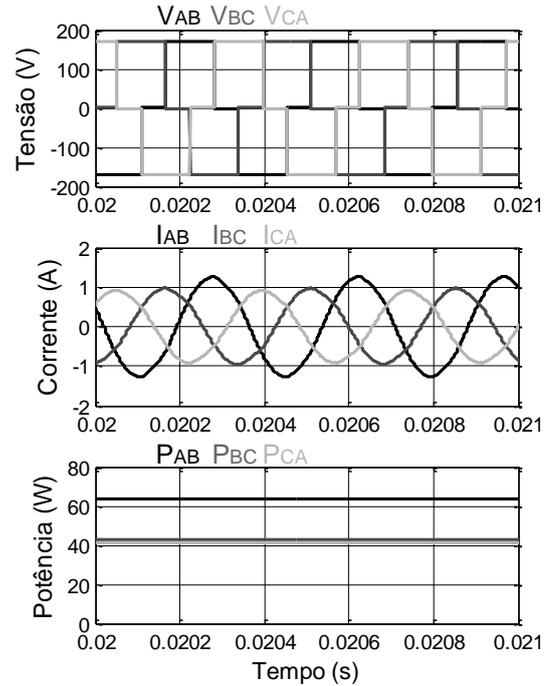


Fig. 4. Formas de onda de tensão, corrente e valores da potência para as três fases, sem equalização de potência.

A frequência de operação é ajustada em um procedimento inicial que leva a uma situação que resulte na potência nominal em uma das saídas.

Note-se que a corrente é aproximadamente senoidal, devido à operação próxima da ressonância dos circuitos. As diferenças nas correntes (e nas potências) se devem aos distintos valores das impedâncias (em 2,9 kHz), conferindo maior potência à fase A.

III. TÉCNICA DE EQUALIZAÇÃO DAS POTÊNCIAS

A equalização da potência pode ser alcançada pela aplicação de uma tensão reduzida na fase que possui menor impedância, a fim de manter o valor das correntes próximos entre si. Em um sistema trifásico, esta variação de tensão pode ser realizada pelo deslocamento de fase das tensões de polo, originando tensões de linha com valor variável. Portanto, para equalizar as potências, é necessário desequilibrar as tensões de linha, uma vez que a carga trifásica, conectada em delta, está desequilibrada [7,8].

A. Síntese das Tensões no Inversor Trifásico

Os interruptores de cada braço do inversor operam de modo complementar. Cada braço do inversor sintetiza uma onda de tensão quadrada, denominadas por V_A , V_B e V_C conforme mostra Figura 5, estando referenciadas ao potencial negativo da fonte V_{cc} . As tensões de linha, V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} , aplicadas na entrada dos transformadores são a diferença entre essas tensões, conforme (1).

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_A - V_B \\ V_{BC} &= V_B - V_C \\ V_{CA} &= V_C - V_A \end{aligned} \quad (1)$$

Para a geração de tensões de linha equilibradas, é necessário que o deslocamento temporal entre as tensões V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} seja de $1/3$ do período. Associando este intervalo a um deslocamento angular, tem-se 120° . Os valores padrão para os ângulos ϕ_A , ϕ_B e ϕ_C são respectivamente 0° , 120° e 240° .

A tensão no secundário de cada transformador é proporcional a cada uma destas tensões de linha. O ajuste das potências pode ser feito, portanto, alterando o deslocamento entre as tensões sintetizadas por cada braço do inversor, conforme Figura 5.

Devido à operação próxima à frequência de ressonância da carga, é de interesse analisar o comportamento da componente fundamental da tensão de linha resultante, conforme equação (2).

$$V_1 = \frac{4.V_{cc} \cdot \sin(\lambda/2)}{\pi} \quad (2)$$

Onde λ é a duração angular em cada semiciclo em que a tensão de linha tem amplitude igual a V_{cc} .

No caso de tensões iguais, como na Figura 4, tem-se $\lambda=2\pi/3$. Ao se alterarem os ângulos relacionados às tensões de fase, resultam mudanças nos intervalos λ de cada tensão de linha, de acordo com (2).

Sejam, conforme indicado na Figura 5:

- $\phi_A \rightarrow$ ângulo de fase da tensão V_A ;
- $\phi_B \rightarrow$ ângulo de fase da tensão V_B ;
- $\phi_C \rightarrow$ ângulo de fase da tensão V_C ;
- $\lambda_{AB} \rightarrow$ duração angular em cada semi-ciclo em que a tensão V_{AB} tem amplitude igual a V_{dc} ;
- $\lambda_{BC} \rightarrow$ duração angular em cada semi-ciclo em que a tensão V_{BC} tem amplitude igual a V_{dc} ;
- $\lambda_{CA} \rightarrow$ duração angular em cada semi-ciclo em que a tensão V_{CA} tem amplitude igual a V_{cc} ;

Para o exemplo mostrado na Figura 5, a tensão V_{AB} foi reduzida, enquanto a tensão V_{BC} foi aumentada. Neste caso, a tensão V_B não mais apresenta atraso de 120° , mas sim de 80° em relação à tensão V_A . Isto é, esta tensão sofreu um adiantamento de 40° . A defasagem de V_C não foi alterada, permanecendo 240° atrasada em relação à V_A . Logo, utilizando (2) tem-se que λ_{AB} é igual a 80° , λ_{BC} é igual a 160° e λ_{CA} continua em 120° . Portanto, as componentes fundamentais das tensões de linha seguem: $V_{BC} > V_{CA} > V_{AB}$.

Para que se garanta que não haverá saturação magnética de nenhum dos transformadores, mesmo com o aumento da tensão eficaz aplicada em pelo menos um destes, é necessário que a especificação dos mesmos preveja uma tensão quadrada com valor eficaz igual à tensão do barramento CC. Isto não é um problema pois, nas aplicações de menor potência, nas quais se utiliza uma versão monofásica do sistema, o transformador é especificado desta forma.

Erro! Não é possível criar objetos a partir de códigos de campo de edição. Fig. 5. Formas de onda do inversor trifásico, operando com deslocamento de fase.

As Tabelas II e III resumem o comportamento das tensões de linha para variações nos ângulos de fase das tensões em cada braço do inversor. A convenção adotada é válida para as tensões partindo da condição equilibrada, isto é, com uma defasagem de 120° entre elas.

Pela análise das formas de onda das tensões nos braços do inversor, Figura 5, nota-se que há restrições no valor que os ângulos ϕ podem assumir. Se estes ângulos forem deslocados mais que 60° de seus valores originais, as informações expostas nas Tabelas II e III deixam de ser válidas, a menos que ocorra igual deslocamento nos ângulos ϕ_A , ϕ_B e ϕ_C .

TABELA II
Conseqüências do decremento dos ângulos

Decrementa	Aumenta	Diminui
ϕ_A	V_{AB}	V_{CA}
ϕ_B	V_{BC}	V_{AB}
ϕ_C	V_{CA}	V_{BC}

TABELA III
Conseqüências do incremento dos ângulos

Incrementa	Aumenta	Diminui
ϕ_A	V_{CA}	V_{AB}
ϕ_B	V_{AB}	V_{BC}
ϕ_C	V_{BC}	V_{CA}

B. Algoritmo de Equalização da Potência

O algoritmo proposto para equalizar as potências controla o valor da tensão de linha aplicada aos transformadores, por meio de ajustes no ângulo ϕ entre as tensões dos braços do inversor. A Tabela IV relaciona o estado das potências polifásicas com a ação necessária para equalizá-las.

Os sinais de + e - na coluna *Ação* indicam que o ângulo das tensões dos braços do inversor deve ser incrementado ou decrementado, respectivamente. Na coluna *Conseqüência*, as setas indicam se determinada potência aumentará ou diminuirá devido à ação tomada.

TABELA IV
Ações que levam à equalização das potências

ID	Estado	Ação	Conseqüência
I	$P_A > P_B > P_C$	$+\phi_A$	$\downarrow P_A \uparrow P_C$
II	$P_A > P_C > P_B$	$-\phi_B$	$\downarrow P_A \uparrow P_B$
III	$P_A > P_B = P_C$	$+\phi_A$	$\downarrow P_A \uparrow P_C$
		$-\phi_B$	$\downarrow P_A \uparrow P_B$
IV	$P_B > P_C > P_A$	$+\phi_B$	$\downarrow P_B \uparrow P_A$
V	$P_B > P_A > P_C$	$-\phi_C$	$\downarrow P_B \uparrow P_C$
VI	$P_B > P_A = P_C$	$+\phi_B$	$\downarrow P_B \uparrow P_A$
		$-\phi_C$	$\downarrow P_B \uparrow P_C$
VII	$P_C > P_A > P_B$	$+\phi_C$	$\downarrow P_C \uparrow P_B$
VIII	$P_C > P_B > P_A$	$-\phi_A$	$\downarrow P_C \uparrow P_A$

IX	$P_C > P_B = P_A$	$+\phi_C$	$\downarrow P_C$	$\uparrow P_B$
		$-\phi_A$	$\downarrow P_C$	$\uparrow P_A$
X	$P_A = P_B > P_C$	$-\phi_C$	$\uparrow P_C$	$\downarrow P_B$
		$+\phi_A$	$\uparrow P_C$	$\downarrow P_A$
XI	$P_B = P_C > P_A$	$-\phi_A$	$\uparrow P_A$	$\downarrow P_C$
		$+\phi_B$	$\uparrow P_A$	$\downarrow P_B$
XII	$P_C = P_A > P_B$	$-\phi_B$	$\uparrow P_B$	$\downarrow P_A$
		$+\phi_C$	$\uparrow P_B$	$\downarrow P_C$

Analisando a Tabela IV, nota-se a existência de dois grupos de estados, descritos a seguir:

Grupo 1: formado pelos estados I, II, IV, V, VII e VIII. Nestes estados, as três potências são diferentes entre si. Conseqüentemente, a ação a ser tomada tende a equalizar ao menos duas das três potências. As ações correspondentes a este grupo de estados levam ao aumento da menor potência enquanto a maior potência diminui. Esta ação é tomada até que ocorra a equalização de duas potências ou até que o ângulo ϕ atinja um valor 60 graus a mais ou a menos do seu valor original.

Grupo 2: formado pelos estados III, VI, IX, X, XI e XII, apresenta duas potências iguais, que podem ser maiores ou menores que a terceira potência. Podendo, então, este grupo ser dividido em dois subgrupos:

Subgrupo 1: formado pelos estados III, VI e IX, nos quais duas potências são iguais e menores que a outra potência. Tomando o estado III como exemplo, tem-se que $P_A > P_B = P_C$. Os ângulos das tensões devem ser alterados de maneira a igualar os valores das três potências. Portanto, incrementa-se o ângulo da maior potência ($+\phi_A$), levando ao decréscimo da maior potência (P_A) em detrimento do aumento de uma das potências menores, neste caso P_C . Esta ação levaria ao desequilíbrio entre as potências, por isso, é necessário aumentar a outra menor (P_B) em detrimento do decréscimo da maior delas (P_A), isto é alcançado pelo decremento do ângulo ($-\phi_B$), conforme a Tabela IV. Portanto, basta reduzir a maior potência, conseqüentemente aumentando uma das menores potências, ao mesmo tempo em que se aumenta a outra potência menor, conseqüentemente diminuindo a maior.

Subgrupo 2: formado pelos estados X, XI e XII, nos quais duas potências são iguais e maiores que a outra potência. Para equalizar as três potências é necessário aumentar a menor potência e conseqüentemente diminuir uma das potências maiores. Simultaneamente a esta ação, é necessário diminuir a potência que não foi alterada pela ação acima, levando conseqüentemente ao aumento da menor potência.

Uma vez desenvolvida a metodologia para levar à equalização das potências e compreendidos os estados, ações e reações envolvidas, torna-se necessário desenvolver um método que determine em qual estado se encontram as potências. Para isto, basta testar cada um dos estados descritos a cima.

Porém, para encurtar o tempo de simulação e agilizar o processo de implementação prática desta técnica no processador digital de sinais, propõe-se a utilização de um método que envolve seis comparações entre as potências, gerando um código relacionado ao estado atual das potências. As comparações realizadas respeitam uma dada margem de erro, para não forçar a atuação do algoritmo quando a diferença entre as potências for aceitável. As condições utilizadas para gerar o código estão expostas abaixo, na Tabela V, onde M representa a margem de erro. Por exemplo, para um erro de 10% entre as potências utiliza-se $M = 1,1$. Quando o parâmetro e for um, há diferença entre as potências sob análise, quando for zero, a diferença entre as potências está dentro da margem de erro aceitável.

Note-se que o aumento no número de fases faz crescer rapidamente a quantidade de situações. Neste caso, é importante investigar outras estratégias de equalização. No entanto este assunto foge do foco deste artigo, embora esteja em investigação.

TABELA V

Testes para determinação do estado atual das potências

Se	Então	Senão
$P_A > (P_B * M)$	$e_1 = 1$	$e_1 = 0$
$P_B > (P_C * M)$	$e_2 = 1$	$e_2 = 0$
$P_C > (P_A * M)$	$e_3 = 1$	$e_3 = 0$
$P_B > (P_A * M)$	$e_4 = 1$	$e_4 = 0$
$P_C > (P_B * M)$	$e_5 = 1$	$e_5 = 0$
$P_A > (P_C * M)$	$e_6 = 1$	$e_6 = 0$

Interpretando o resultado dos testes acima como um número binário, gera-se um código correspondente ao estado atual das potências, identificando, desta forma, a ação a ser tomada. Estas relações estão resumidas na Tabela VI. Com base nos códigos obtidos, basta realizar, ao máximo, mais 12 comparações para determinar qual ação deve ser tomada.

TABELA VI

Relação entre o estado das potências e ação a ser tomada

ID	Estado	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	Cód
I	$P_A > P_B > P_C$	1	1	0	0	0	1	49
II	$P_A > P_C > P_B$	1	0	0	0	1	1	35
III	$P_A > P_B = P_C$	1	0	0	0	0	1	33
IV	$P_B > P_C > P_A$	0	1	1	1	0	0	28
V	$P_B > P_A > P_C$	0	1	0	1	0	1	21
VI	$P_B > P_A = P_C$	0	1	0	1	0	0	20
VII	$P_C > P_A > P_B$	1	0	1	0	1	0	42
VIII	$P_C > P_B > P_A$	0	0	1	1	1	0	14
IX	$P_C > P_B = P_A$	0	0	1	0	1	0	10
X	$P_A = P_B > P_C$	0	1	0	0	0	1	17
XI	$P_B = P_C > P_A$	0	0	1	1	0	0	12
XII	$P_C = P_A > P_B$	1	0	0	0	1	0	34

IV. INTEGRAÇÃO DA TOPOLOGIA COM A TÉCNICA

A aquisição dos sinais de tensão e correntes é realizada a uma taxa 40 vezes maior que a frequência de chaveamento. Assim, para uma frequência de chaveamento de 3 kHz, a

freqüência de amostragem é 120 kHz. A potência média é calculada ao final de cada ciclo PDM. Ao longo do ciclo PDM seguinte é executado o algoritmo de equalização. Ao final deste ciclo são calculadas as potências médias do ciclo atual e ajustam-se os ângulos de defasagem para o período PDM posterior, com base nos valores calculados no ciclo PDM anterior.

A Figura 6 mostra o esquemático geral do sistema proposto. A parte de potência é composta pelo barramento CC, inversor trifásico, transformadores com primário conectado em delta e secundário conectado à célula geradora de ozônio. A figura mostra, ainda, a estrutura de controle utilizada. Sendo que, primeiramente, é realizado o cálculo das potências envolvidas para, posteriormente, realizar os testes para definir qual é o estado atual das potências, gerando o código que orienta a tomada da ação que leva à equalização das potências.

Depois do estado da potência ter sido identificado e a ação para equalizá-las ter sido tomada, no bloco *Ações*, ocorrem mais dois testes, verificando se os ângulos ϕ extrapolaram os limites de 60° , para mais ou para menos. Caso isto ocorra, o ângulo é saturado, isto é, limitado em 60° .

A seleção prévia dos transformadores e células ozonizadoras evita que sejam utilizados dispositivos com elevada diferença de parâmetros, de modo que mesmo com a restrição de ajuste angular seja possível equilibrar as potências.

Uma vez obtidas as defasagens que levam à equalização, gera-se os pulsos de gatilho das chaves. Posteriormente realiza-se a modulação por densidade de pulsos, que tem por objetivo controlar a potência entregue à carga.

A última etapa consiste no limitador de corrente, que pode aplicar integralmente ou parcialmente os pulsos oriundos da Modulação por Densidade de Pulsos [7-9]. Se as correntes ultrapassarem um dado valor limite, os pulsos de gatilho são retirados, evitando assim, sobrecorrentes que possam levar o transformador à saturação, o que prejudicaria o desempenho da técnica de equalização.

V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para testar o funcionamento integrado das técnicas apresentadas nas subseções anteriores, foram realizadas simulações, utilizando parâmetros reais da carga, mostrados na Tabela I e que correspondem às impedâncias mostradas na Figura 3. Tanto nas simulações quanto na implementação prática do protótipo, a freqüência de chaveamento é de aproximadamente 2,9 kHz e a tensão no link CC é de aproximadamente

170 volts. A densidade de pulsos é configurada para 6/12, isto é, em seis ciclos de chaveamento há tensão aplicada sobre a carga e nos outros seis períodos a tensão é zero.

Conforme se observa na Figura 7, o algoritmo de equalização das potências começa a atuar a partir de $t=0,05s$, quando as potências apresentam os seguintes valores: $P_A=43$ W, $P_B=30$ W e $P_C=27$ W. Portanto, tem-se que, $P_A>P_B>P_C$ configurando o estado I, conforme a Tabela VI. Este estado exige, conforme a Tabela IV, um incremento do ângulo, fazendo P_A diminuir enquanto P_C sofre um ligeiro aumento. Em $t=0,09s$ tem-se que $P_A>P_B=P_C$, configurando o estado III, que pede o incremento de ϕ_A e o decremento de ϕ_B , fazendo P_A diminuir ainda mais, enquanto P_B e P_C sofrem um pequeno aumento. Este estado é mantido até $t=0,13s$ quando as potências assumem valores próximos entre si, isto é, dentro da margem de erro estipulada que, para este caso, é de 5%. Ao final do processo de equalização, as potências atingem os seguintes valores: $P_A=31$ W, $P_B=31$ W e $P_C=30$ W.

Nota-se que não ocorre a saturação dos ângulos ϕ em nenhum momento da simulação, possibilitando, desta forma, a equalização da potência, dentro de uma margem de erro pequena, em torno de 5% entre a maior e a menor potência. Se as potências, inicialmente, fossem muito discrepantes entre si, os ângulos de incremento seriam limitados em 60° . Mesmo assim, os valores de potência se aproximariam. Porém o erro percentual seria maior.

A Figura 8 mostra detalhes das tensões e correntes antes e depois da equalização das potências. Nota-se que, tanto a corrente no primário do transformador, quanto a tensão sobre a célula geradora apresentam valores de amplitude mais uniformes após o processo de equalização.

O sistema foi implementado utilizando um módulo inversor IRAMX16UP60A e um DSP TMS320F28335. O módulo inversor possui um tempo morto no comando dos transistores da ordem de $0,5 \mu s$. Este valor é pequeno, considerando a freqüência de comutação e a característica indutiva da carga. Adicionalmente, o ajuste da potência é feito a partir de medições desta grandeza, o que garante que se atinge o ponto de equilíbrio desejado, independentemente do tempo morto.

A Figura 9 mostra as potências trifásicas da configuração de testes montada. As potências P_1 , P_2 e P_3 equivalem a P_A , P_B e P_C . O valor de freqüência (f_{U1}) mostrado nas figuras não reflete a real freqüência de operação, pois a modulação PDM dificulta a atuação do *trigger* do equipamento de medição.

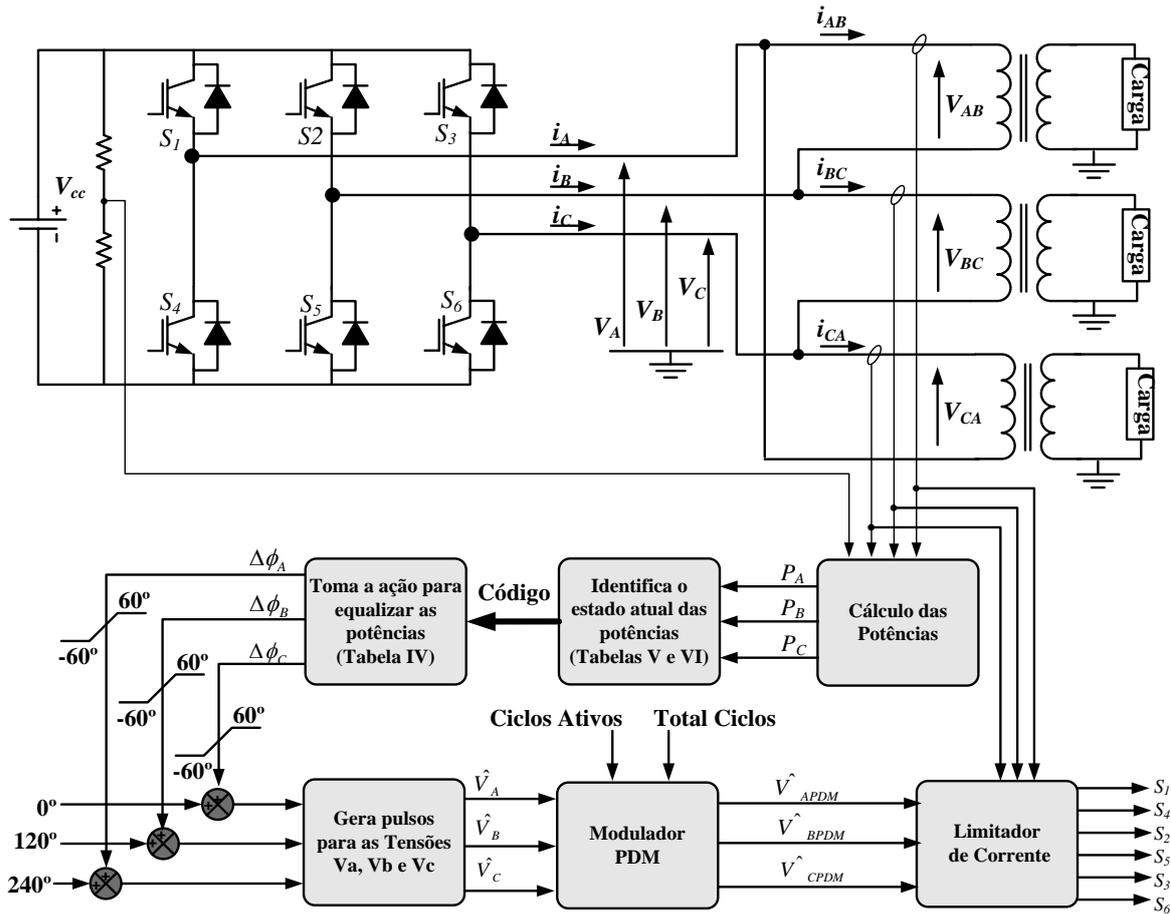


Fig. 6. Diagrama esquemático da estrutura de controle utilizada no conversor.

Antes da atuação do algoritmo de equalização, as potências apresentavam os seguintes valores: $P_A=46$ W, $P_B=26$ W e $P_C=28$ W, com uma diferença de até 55%. Após a equalização, a maior diferença entre as potências é de cerca de 5%, conforme a Figura 9. A descontinuidade nas potências durante o período de equalização se deve à atuação do limitador de corrente.

As formas de onda das tensões e correntes, ao final do processo de equalização, são mostradas na figura 10. Nota-se que a tensão V_{AB} diminuiu e que V_{BC} aumentou, enquanto V_{CA} sofreu pouca alteração. A corrente I_{AB} apresenta a maior amplitude. No entanto, a potência P_A é praticamente igual às demais potências. Isto se deve, principalmente, ao maior deslocamento angular entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente verificado na fase A que opera mais afastada da ressonância da respectiva carga.

Não se verifica impacto deste desequilíbrio na tensão CC, uma vez que a operação na faixa de kHz permite a adequada filtragem pelo capacitor presente na entrada do inversor.

VI. CONCLUSÕES

Foi apresentada uma configuração polifásica, testada em sua versão trifásica, capaz de alimentar células para produção de ozônio que apresentem pequenos desvios em suas características elétricas. Desta maneira, torna-se possível obter a de-

vida produção (associada à potência elétrica entregue à carga), com uma redução nos circuitos eletrônicos necessários à alimentação das cargas.

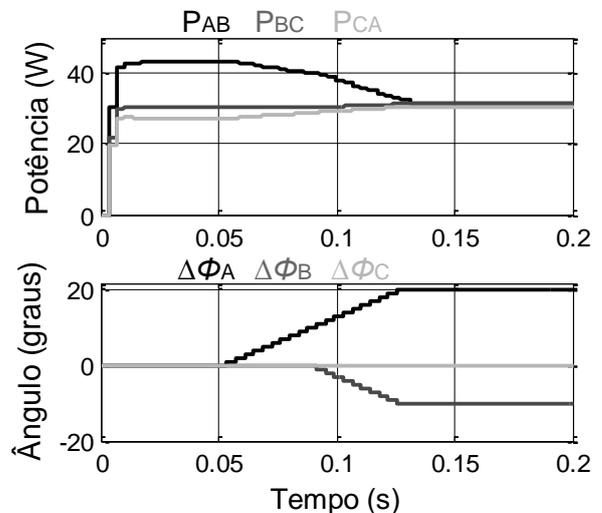


Fig. 7. Potências e incremento nos ângulos das tensões nos braços do inversor durante a atuação do algoritmo de equalização.

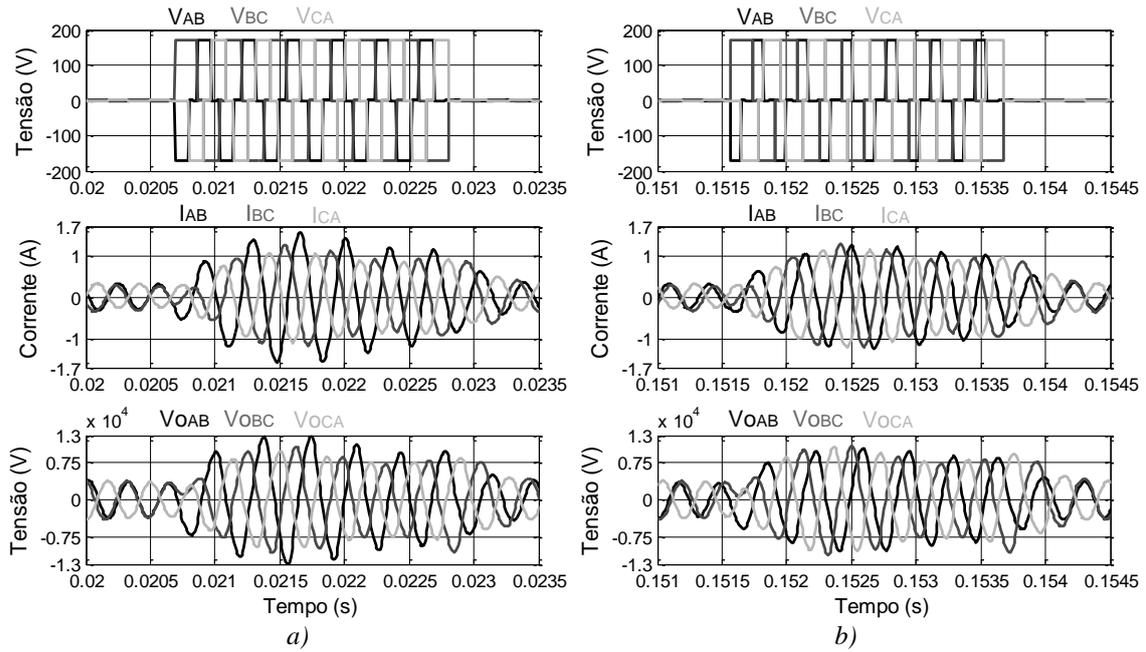


Fig. 8. Detalhes das tensões de linha, correntes de fase e tensões sobre a célula: a) antes da equalização das potências; b) depois da equalização das potências.

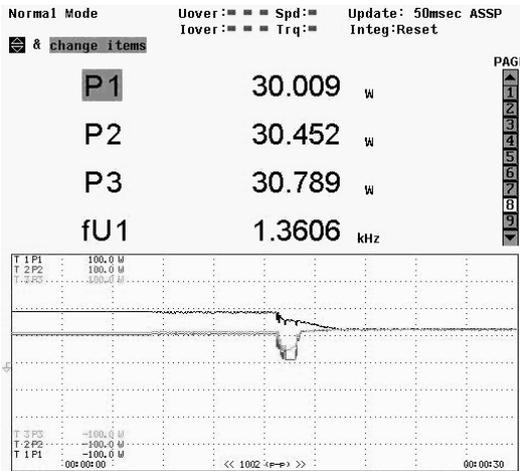


Fig. 9. Dinâmica das potências durante a atuação do algoritmo de equalização. (Os valores indicam as potências ao fim do processo de equalização).

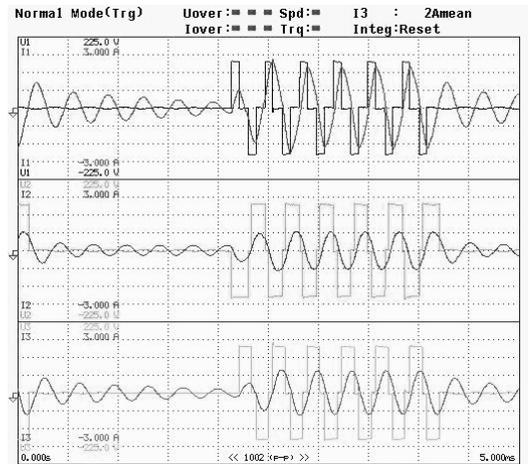


Fig. 10. Tensões (fundo de escala 225 V) e correntes (fundo de escala 3 A), ao final do processo de equalização. De cima para baixo: V_{AB} e I_{AB} , V_{BC} e I_{BC} , V_{CA} e I_{CA} .

A técnica de equalização acaba funcionando como uma espécie de compensação dos parâmetros dos dispositivos utilizados no sistema de produção de ozônio, garantindo uma divisão igual das potências entre as fases do sistema, contribuindo para o aumento do tempo de vida útil dos dispositivos.

Apesar da implementação de um protótipo de baixa potência, tanto a topologia trifásica de geração de ozônio, quanto a técnica proposta para realizar a equalização das potências, podem ser uma alternativa interessante para sistemas que requerem alta taxa de produção de ozônio e, por consequência, alta potência.

A ampliação destes procedimentos para uma quantidade maior de fases, do ponto de vista do circuito de potência, não

traz maiores dificuldades, bastando agregar braços no inversor. No entanto, a complexidade da estratégia de controle, baseada em comparações, cresce consideravelmente com o aumento do número de fases. Isso leva à necessidade de uso de outras técnicas, como controladores *fuzzy*, os quais estão em estudo para futura implementação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. Agradecemos à empresa Panozon Ambiental S/A, pelas células geradoras de ozônio cedidas.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Langlais, D. A. Reckhow, D. R. Brank, *Ozone in Water Treatment. Application and Engineering*, 1st Edition, Lewis Publishers, April 1991, 569 p.
- [2] S. Wang, M. Nakaoka, and Y. Konishi, “DSP-based PDM and PWM type voltage-fed load-resonant inverter with high-voltage transformer for silent discharge ozonizer”, *29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 98 Record.*, vol. 1, 17-22 May, pp. 159–164 vol.1., 1998
- [3] G. S. Sperandio, J. A. Pomilio, “High-efficiency, high-frequency inverter for silent discharge load”. *Proc. of 9th Brazilian Power Electronics Conference – COBEP*, Blumenau, Brazil, pp. 895-890, 2007.
- [4] J. Alonso, J. Garcia, A. Calleja, J. Ribas, and J. Cardesin, “Analysis, design, and experimentation of a high-voltage power supply for ozone generation based on current-fed parallel-resonant push-pull inverter”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1364–1372, Sept.-Oct., 2005
- [5] O. Koudriavtsev, S. Wang, Y. Konishi, and M. Nakaoka, “A novel pulse-density-modulated high-frequency inverter for silent-discharge-type ozonizer”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, No 2, March/April, 2002.
- [6] J. P. Bonaldo, J. A Pomilio, “Análise Espectral da Modulação PDM em Conversores Ressonantes para Aplicações de Alta Tensão”, *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, São Paulo, Novembro de 2010.
- [7] J. P. Bonaldo, *Conversores para Alimentação de Células geradoras de Ozônio*, Dissertação de Mestrado, FEEC, UNICAMP, Abril de 2010.
- [8] J. P. Bonaldo, J. A Pomilio, “Estratégias de Controle de Conversores para Geração de Ozônio”. *XVIII Congresso Brasileiro de Automatica – CBA 2010*, Bonito, Novembro de 2010.
- [9] H. Yushui, W. Liqiao, X. Yu, Z. Zhongchao, “Load resonant type power supply of the ozonizer based on a closed-loop control strategy”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC’04*, vol. 3, September, 2004, pp. 1642–1646.

DADOS BIOGRÁFICOS

Jakson Paulo Bonaldo é Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá (2008) e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2010). Atualmente trabalha na empresa Padtec S/A em Campinas. Suas áreas de interesse incluem controle digital, processamento digital de sinais e conversores ressonantes.

José Antenor Pomilio, é engenheiro eletricista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas.

De 1988 a 1991 foi chefe do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua e à Terceira Universidade de Roma, ambas na Itália. Foi presidente da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência – SOBRAEP e membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society. Foi editor da revista Eletrônica de Potência. Atualmente é editor associado da IEEE Trans. on Power Electronics e da revista Controle & Automação. É professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, onde é docente desde 1984.

Dr. Pomilio é membro da SOBRAEP, da SBA, da SBPC e Senior Member do IEEE.

Edson Adriano Vendrusculo é Engenheiro Eletricista pela UDESC, Santa Catarina (1993), mestre (1996) e doutor (2001) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas.

Com experiência no ensino superior, atualmente é pesquisador junto ao Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica do DSCE-FEEC-UNICAMP e membro do International Energy Initiative. Foi membro do Comitê Técnico do COBEP 2005. Suas áreas de pesquisa referem-se à eficiência energética de equipamentos eletro-eletrônicos, controle digital aplicado a conversores eletrônicos e acionamentos elétricos.

Dr. Vendrusculo é membro da SOBRAEP.