DOI: 10.48011/asba.v2i1.1447

Circuito de Auxílio à Comutação Aplicado ao Conversor DAB no Gerenciamento de Banco de Baterias

Pablo F. S. Costa [*], **Bernardo Andres** [*], **Leandro Roggia** [**] **e Luciano Schuch** [*]

[*] *Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: pablofscosta@gmail.com).*
[**] *Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, RS (e-mail: roggia@gmail.com)*

Abstract:
In order to alleviate the problems of the high number of connections of mini and micro generations in the distribution systems, the installation of energy storage systems (ESS) has grown. To perform the interface between the ESS and the system, the DAB converter has been the most used because it has characteristics such as robustness, bidirectionality, high frequency galvanic isolation, among others. However, the converter has low efficiency for low loads. With this, systems have emerged that can help the converter to obtain high efficiency in these situations. These systems are called Switching Aid Circuits (SAC). Therefore, this work will present a SAC system capable of assisting DAB in low load situations. The circuit consists of two inductors controlled by a single-pole double-throw relay (*SPDT*). Depending on the power level, the inductors operate individually or together. As a result, the primary current will always be as low as possible, which increases the efficiency of the topology, as it reduces conduction and switching losses. To prove the theoretical analyzes of the proposed topology, simulation results of the DAB converter operating with the proposed SAC will be presented.

Resumo: Para amenizar os problemas do elevado número de conexões das mini e micro gerações nos sistemas de distribuição, a instalação de sistemas de armazenamento de energia (ESS) têm crescido. Para realizar a interface entre os ESS e o sistema o conversor DAB tem sido o mais utilizado por possuir características como robustez, bidirecionalidade, isolação galvânica entre outras. Porém, o conversor apresenta baixa eficiência para baixas cargas. Com isso, surgiram sistemas que podem auxiliar o conversor a obter eficiência elevada nestas condições, estes sistemas são chamados de Circuitos de Auxílio à Comutação (CAC). Logo, neste trabalho será apresentado um sistema CAC capaz de auxiliar o DAB em situações de baixas cargas. O circuito é composto por dois indutores controlados por *single-pole double-throw relay* - *SPDT*(relé de disparo duplo monopolar). Dependendo do nível de potência os indutores operam individualmente ou em conjunto. Com isso, a corrente do primário será sempre a menor possível, o que eleva a eficiência da topologia, pois reduz as perdas em condução e em comutação. Para comprovar as análises teóricas da topologia proposta serão apresentados resultados de simulação do conversor DAB operando com o CAC proposto.

Keywords: DAB converter; Switching Assistance Circuits; soft switching; battery bank;
Palavras-chaves: Conversor DAB; Circuitos de Auxílio à Comutação; Comutação suave; Banco de baterias;

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda por energia elétrica tem trazido consigo um aumento significativo no número de instalações de sistemas de micro e mini-geração de energia elétrica. Estes sistemas podem ser conectados ou não a rede de distribuição de energia. Se conectados ao sistema (sistema *on grid*) pode ou não fazer uso de sistemas de armazenamento de energia para *backup*. Por outro lado, se o sistema for desconectado da rede de distribuição (*off grid*) tem-se a necessidade de um sistema para *backup*, geralmente composto por bancos de baterias.

Neste contexto, surge a necessidade do uso da eletrônica de potência através dos conversores eletrônicos para realizar o interfaceamento do banco de baterias com os demais sistemas conectados na microrrede. Para estas aplicações o conversor DAB tem sido um dos conversores mais difundidos na literatura, o qual apresenta inúmeras vantagens, tais como: bidirecionalidade, robustez, isolação galvânica, capacidade de processar elevados níveis de potência, entre outros (De Doncker et al., 1991)(Kheraluwala et al., 1992). Apesar da elevada eficiência do conversor DAB com *Phase-Shift Modulation* (PSM), o DAB possui a desvantagem de apresentar elevada potência aparente circulante, maior

esforços de corrente, faixa limitada de comutação com zero de tensão (ZVS). Com cargas leves as regiões com comutação suave podem ser perdidas e também ocorre a redução da eficiência do conversor DAB, especialmente se em uma das portas houver alta tensão e se o ganho d for diferente de um ($d \neq 1$). O conversor DAB clássico pode ser visualizado na Figura 1.

Para superar esses inconvenientes, a modulação de deslocamento de fase dupla (DPS) foi proposta (Bai and Mi, 2008). Posteriormente, vários esquemas de modulação foram propostos para aprimorar o desempenho do conversor DAB, como *Extended Phase Shihft* (EPS), *Triple Phase Shift* (TPS) e assim por diante (Zhao et al., 2011), (Zhou and Khambadkone, 2009) e (Oggier et al., 2011). Por outro lado, para aumentar a eficiência do conversor, duas novas configurações foram propostas reduzindo o número de dispositivos (Sedaghati et al., 2015) e (Aamir et al., 2015).

Contudo, melhorar a eficiência para as condições de carga leve é um desafio, pois durante o processo de carga e descarga do banco de baterias o conversor irá atuar por alguns instantes fora da região de ZVS, ora o ZVS será perdido nos interruptores do primário ora nos interruptores do secundário. Por estes motivos, surgiram na literatura atualmente sistemas para auxiliar o conversor durante suas comutações sem ZVS, a estes sistemas dá-se o nome de "Circuitos de Auxílio à Comutação" ou CAC. Logo, neste trabalho, serão apresentados alguns tipos de CAC aplicados atualmente ao conversor DAB, o princípio de funcionamento destes circuitos, bem como um proposta de expansão de um dos CAC apresentados para garantir maior eficiência para o conversor DAB em toda a faixa de operação.

O trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo o primeiro dedicado a uma breve contextualização. Já o capítulo 2 é dedicado a analise da operação do conversor DAB com comutações com ZVS. No capítulo 3 são realizadas uma breve revisão de topologias de circuitos de auxílio a comutação e a expansão do principio de operação do CAC proposto. O capitulo 4 apresenta os resultados de simulação do conversor DAB operando com o CAC proposto e por fim apresentam-se as conclusões do trabalho.

2. COMUTAÇÃO COM ZERO DE TENSÃO - (ZVS)

A operação do conversor DAB com ZVS ocorre quando existe corrente para polarizar os diodos em antiparalelo com os interruptores antes de cada comutação. A análise convencional sobre a operação com ZVS foi realizada inicialmente em De Doncker et al. (1991) e Kheraluwala et al. (1992) e faz referência aos valores das correntes na indutância auxiliar no instante da comutação dos interruptores. As correntes são utilizadas para determinar os limites de operação sob ZVS para o conversor DAB operando com PSM.

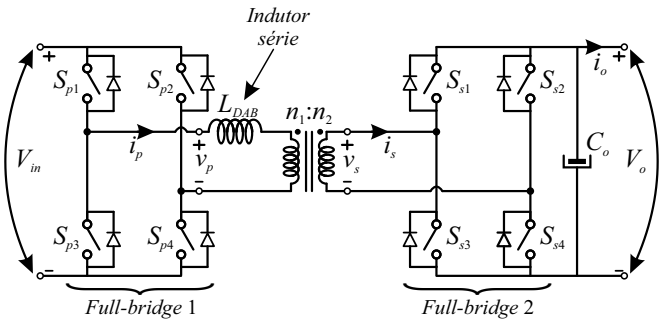


Figura 1. Conversor DAB clássico.

Levando em consideração as etapas de operação do conversor DAB como apresentado em Costa (2017), percebe-se que a entrada em condução dos interruptores do lado primário ocorre durante as etapas 4 - 1 e 2 - 3, nestes instantes a corrente na indutância é igual a I_X, como pode ser visualizado na Figura 2. Para o lado secundário, os interruptores entram em condução nas transições das etapas 1 - 2 e 3 - 4, nestes instantes a corrente na indutância auxiliar é igual a I_Y. Logo, os limites de operação com ZVS para as pontes primária e secundária do conversor são satisfeitos quando $I_X > 0$ e $I_Y > 0$, respectivamente (Kheraluwala et al., 1992).

Contudo, como mencionado anteriormente as regiões com comutação sob ZVS podem ser perdidas quando o conversor DAB opera com cargas leves, especialmente se em uma das portas houver alta tensão e se $d \neq 1$.

3. CIRCUITOS DE AUXÍLIO À COMUTAÇÃO - CAC

Os circuitos de auxílio a comutação são utilizados na sua maioria para ampliar a faixa de operação do conversor DAB com comutação suave e, geralmente são compostos por elementos passivos como capacitores e indutores ou ainda são utilizadas variações de tipos de modulação para elevar a eficiência da topologia. Em (Qin et al., 2018) uma modulação com deslocamento de fase híbrido (*Hybrid Phase-Shift* - HPS) é aplicada ao conversor DAB para que todos os interruptores atinjam ZVS em toda a faixa de operação. Em Shen et al. (2019) utiliza-se a modulação com deslocamento de fase tripla (*triple phase-shift* - TPS) para a situação em que o conversor DAB apresente $d < 1$. Além da TPS os autores combinam uma técnica de controle para otimizar a corrente RMS do primário o que permite ao DAB realizar comutações sob ZVS em todos os dispositivos semicondutores. Já em Shen et al. (2016) um pequeno indutor é inserido entre a derivação central do transformador de alta frequência. Além da alteração topológica é proposto um esquema de controle com deslocamento de fase híbrido (*Hybrid Phase-Shift* - HPS), o qual permite que todos os interruptores atinjam ZVS em toda a faixa de operação. Desse modo, as perdas

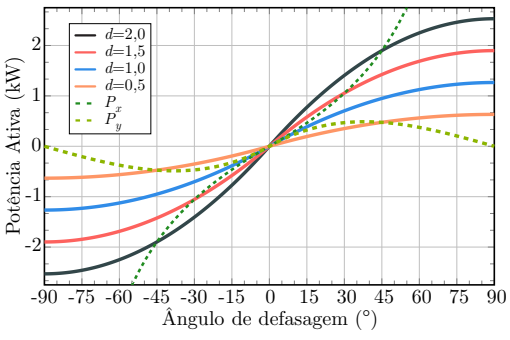


Figura 2. Limites de ZVS do conversor DAB com PSM.

de comutação são reduzidas significativamente e ainda se reduz a interferência eletromagnética.

Por outro lado, variações topológicas do conversor DAB também podem proporcionar comutações com ZVS. Com isso, em Wu et al. (2018) um novo *Dual-Active-Bridge Series-Resonant CC-CC Converter* (DABSRC) com tanque duplo baseado no DABSRC clássico é proposto para ampliar ainda mais a faixa de comutação suave e melhorar o desempenho do circuito. Em Yaqoob et al. (2018) um DABSRC baseado em impedância comutada é proposto, onde a operação com corrente mínima no tanque ressoante visa reduzir as perdas em condução resultantes da corrente circulante no lado de baixa tensão, além de proporcionar ZVS em todos os interruptores. Yaqoob et al. (2017) propõem um conversor DAB ressonante do tipo LC baseado em um indutor controlado por chave (SCI) para mitigar as perdas resultantes da comutação fora da faixa de ZVS para uma ampla faixa de tensão e corrente de saída. Para eliminar a (*circulation power flow* - CPF) Karthikeyan and Gupta (2018) propõem um novo conversor CC-CC bidirecional *Front-Rear Switch* DAB (FRS-DAB).

Por fim, Karthikeyan and Gupta (2017) propõem um método para melhorar a eficiência do conversor DAB sob condição de carga leve para aplicações com sistemas de armazenamento de energia. Nesta topologia, dois indutores são conectados em série no lado primário do transformador, como mostra a Figura 3. Os dois indutores são operados de acordo com as regiões de defasagem angular entre as tensões do primário e secundário, usando um relé de disparo único monopolar (SPDT), os indutores são utilizados de duas maneiras, para valores de carga abaixo de 30% e para valores acima de 30% da carga nominal.

Desta forma, propõe-se aqui a expansão da topologia apresentada na Figura 3, de tal forma que ambas as indutâncias possam operar de forma independente ou em conjunto. Com isso, nesta configuração de relés e indutores podem ser obtidas três configurações distintas de indutâncias, o que significa uma configuração a mais do que o proposta original. Assim, seriam inseridos relés de disparo único monopolar ($SPDT$) em paralelo com ambos os indutores, como mostra a Figura 4. Salienta-se que se houver a necessidade, o número de indutores e de relés podem ser ampliados, para que assim a corrente de pico do primário assuma sempre a menor amplitude.

3.1 Princípio de operação do CAC

Inicialmente, ambos os indutores terão circulação de corrente, isto ocorre devido às baixas cargas. Nesta configuração, a indutância auxiliar do primário será composta por $L_{DAB1} + L_{DAB2}$, até um determinado valor de potência de saída que deve ser projetado, sendo que neste caso, ambos os relés ($SPDT_1$ e $SPDT_2$) estarão "abertos", esta configuração pode ser visualizada na Figura 5.

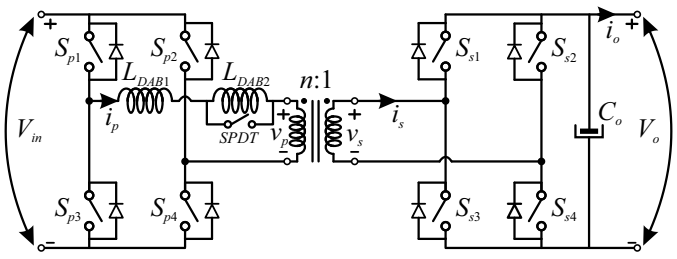


Figura 3. Conversor CC-CC bidirecional DAB com relé *SPDT*.

Para valores de potência acima do valor projetado para baixas cargas, somente o indutor com maior indutância será usado L_{DAB2}, assim o relé $SPDT_1$ estará "fechado"e o relé $SPDT_2$ estará "aberto"como mostra a Figura 6, nesta configuração o segundo limite de potência pode ser alcançado. Salienta-se que são três os limites de potência que podem ser obtidos, sendo eles: 1) Baixas cargas; 2) Cargas intermediárias e 3) Carga nominal.

Quando a carga de saída do conversor for maior do que o limite projetado para cargas intermediárias, apenas o indutor com menor indutância L_{DAB1} estará inserido no circuito do conversor DAB. Com isso, o relé $SPDT_1$ estará "aberto"e o relé $SPDT_2$ estará "fechado", com essa configuração o $SPDT_2$ estará atuando com um sistema de *by-pass* do indutor L_{DAB2}. A Figura 7 apresenta à configuração mencionada.

No conversor DAB para que seja possível atingir uma ampla faixa de transmissão de potência com PSM, deve-se variar o ângulo de defasagem entre a tensão do primário (v_p) e do secundário (v_s) do transformador. Desta forma, os indutores L_{DAB1} e L_{DAB2} precisam ser projetados para

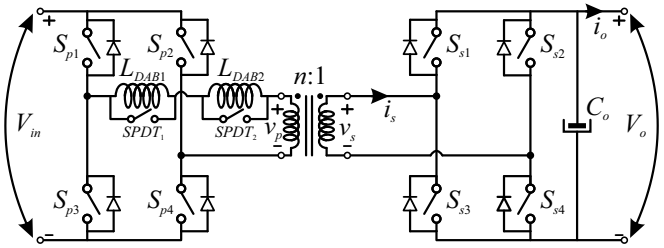


Figura 4. Conversor CC-CC bidirecional DAB com CAC proposto.

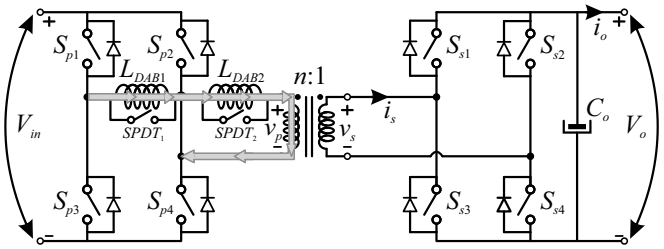


Figura 5. Conversor CC-CC bidirecional DAB com CAC proposto operando com baixas cargas.

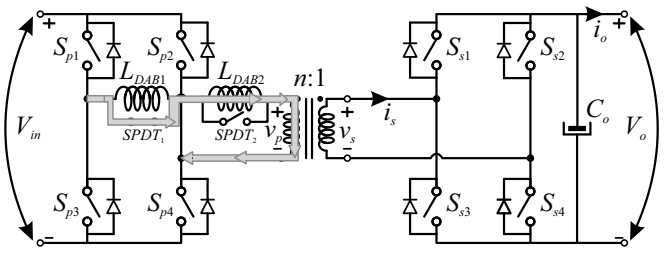


Figura 6. Conversor CC-CC bidirecional DAB com CAC proposto operando com cargas intermediária.

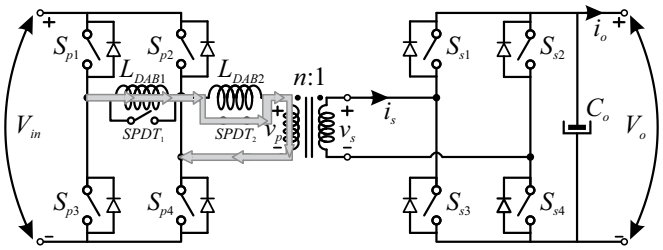


Figura 7. Conversor CC-CC bidirecional DAB com CAC proposto operando com carga nominal.

que possam transmitir uma ampla faixa de potência, a qual pode variar da condição do conversor operando à vazio até a condição de carga nominal. Assim, a transmissão de potência pode ser definida de acordo com a expressão (1).

$$P_o = \frac{nV_{in}V_o}{2L_{DAB_{eff}}f_s}\phi_{pu}\left(1-\phi_{pu}\right) \tag{1}$$

onde, ϕ_{pu} é a defasagem angular com PSM, n é a relação de transformação do transformador, V_i e V_o são as tensões de entrada e saída do DAB e $L_{DAB_{eff}}$ é a indutância auxiliar efetiva do DAB, ou seja, L_{DAB1} ou $(L_{DAB1} + L_{DAB2})$.

A transmissão de potência máxima ocorre em $\phi_{pu} = 0,5$ (Bai and Mi, 2008), e a expressão pode ser escrita como:

$$P_{max} = \frac{nV_{in}V_o}{8L_{DAB_{eff}}f_s} \tag{2}$$

As curvas de potência para um exemplo, onde os limites entre as faixas de potências foram determinadas como 30% para baixas cargas, 43% para cargas intermediárias e 100% para carga nominal podem ser visualizadas na Figura 8. Desta forma, quando a carga de saída possuir valor inferior a 30%, os indutores atuam em série (L_{DAB1}+L_{DAB2}) com ambos os relés $SPDT_1$ e $SPDT_2$ no estado "abertos", no momento em que a carga fica compreendida entre 30% e 43%, apenas o indutor L_{DAB2} será utilizado para a transferência de potência e, por fim, quando a carga de saída for superior à 43%, somente o indutor L_{DAB1} estará conectado ao circuito. Com isso, a faixa de operação do conversor DAB com corrente de pico do primário reduzida é ampliado.

Para o projeto de L_{DAB1} e L_{DAB2}, deve-se utilizar as equações (2) e (1), respectivamente. Com isso, durante

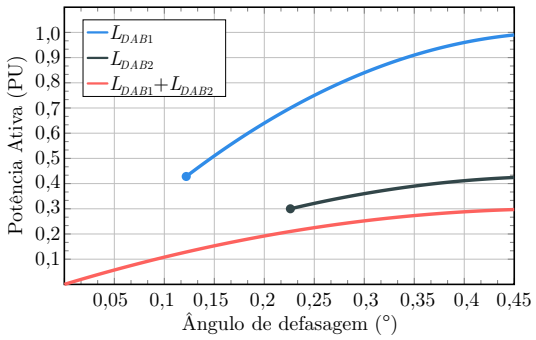


Figura 8. Características de potência do conversor DAB operando com indutores L_{DAB1}, L_{DAB2} e L_{DAB1}+L_{DAB2}.

o projeto proposto para os indutores, L_{DAB2} deve ser maior que L_{DAB1} ($L_{DAB2} > L_{DAB1}$) e a potência de referência P_{ref} deve ser comparado com o valor limite de potência de saída, o qual é considerado 0,3 ou 30% da carga nominal de saída. Quando $P_{ref} \leq 0,3 \cdot P_{max}$, a carga no conversor DAB é considerada como leve. Ao variar o valor da indutância do primário, deve-se também ajustar o ângulo de defasagem, de tal forma que a potência de saída seja mantida entre $0,43 \cdot P_{max}$ e P_{max}. O valor máximo de ϕ_{pu} para potência igual a $0,3 \cdot P_{max}$ pode ser determinado usando as equações (1) e (2), resultando na equação (3).

$$\phi_{pu} = 0,5 \pm \sqrt{0,25\left(1-x\right)} \tag{3}$$

onde x é a transferência de potência de referência normalizada que fica entre 0 e 1 e o relé $SPDT_2$ será ativado enquanto $0,43 \cdot P_{max} \leq x$.

Para a condição onde a carga de saída seja $x \leq 0,3 \cdot P_{max}$ deve-se projetar novos valores de ϕ_{pu}, pois neste momento a indutância $L_{DAB_{eff}}$ é composta pelo somatório das indutâncias L_{DAB1} e L_{DAB2} ($L_{DAB1} + L_{DAB2}$). Este novo valor pode ser encontrado através da equação (4), onde x_{pu} é igual a 0,3.

$$\phi_{pu_30\%} = 0,5 \pm \sqrt{0,25\left(1-\frac{x}{x_{pu_30\%}}\right)} \tag{4}$$

Para o caso onde a potência esteja compreendida entre $0,3 \cdot P_{max} \leq x < 0,428 \cdot P_{max}$ o ângulo de defasagem para esta faixa pode ser definido pela equação (5). Pode-se observar que as equações para ambas as faixas de potência são muito semelhantes.

$$\phi_{pu_42,8\%} = 0,5 \pm \sqrt{0,25\left(1-\frac{x}{x_{pu_42,8\%}}\right)} \tag{5}$$

Como mencionado anteriormente, o conversor DAB alcança comutações com ZVS para toda faixa de potência apenas quando $d = 1$, para valores de $d > 1$ ocorre a perda de ZVS nos interruptores do lado primário, enquanto que para valores de $d < 1$ ocorre perda de ZVS nos interruptores do secundário. Assim, torna-se necessário determinar as regiões onde o conversor irá atuar com ZVS em todos os interruptores. Para isso, podem ser utilizadas as equações (6) e (7), as quais podem determinar os limites de ZVS do conversor DAB a partir do ganho de tensão d.

Para $I_Y \geq 0$

$$\phi_{PU} \geq \frac{1-d}{2} \tag{6}$$

Para $I_X \geq 0$

$$\phi_{PU} \geq \frac{d-1}{2d} \tag{7}$$

A partir das equações (6) e (7) pode-se então definir os limites de ZVS para o conversor DAB, a Figura 9 apresenta os limites de ZVS para o DAB operando apenas com L_{DAB1}, L_{DAB2} e com $L_{DAB1} + L_{DAB2}$.

Na operação proposta do DAB, a região de comutação suave é estendida como mostrado na Figura 9 . A área A representa a região de comutação suave tradicional do conversor DAB com PSM e $d = 1$. A área $B + C$ representa uma extensão da região de comutação suave

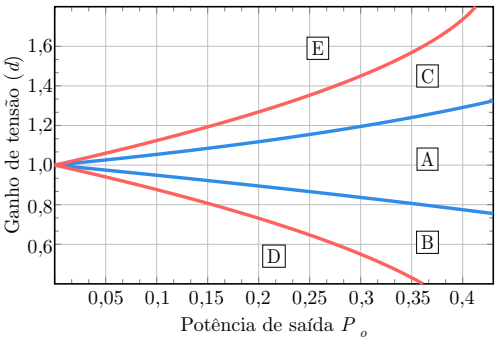


Figura 9. Região de ZVS do conversor DAB em função de d e da potência de saída.

quando $L_{DAB_{eff}}$ corresponde a $L_{DAB1} + L_{DAB2}$, porém, uma parcela deste somatório é determinado pela operação apenas de L_{DAB2}. Já a área compreendida por $A + B + C$ representa a região de comutação suave da operação do conversor DAB somando a operação tradicional com a operação com o CAC proposto. Portanto, a região de comutação suave se estende sob condições de carga leve com a operação proposta.

Para que sejam gerados os sinais de acionamento dos relés $SPDT_1$ e $SPDT_2$ um algoritmo deve ser desenvolvido. Através dele, serão tomadas as decisões de acionamento das chaves em paralelo com os indutores, bem como definir com qual das equações ((3), (4) ou (5)) será determinado o ângulo de defasagem entre as tensões do lado primário e secundário do transformador. A estrutura do algoritmo pode ser visualizada na Figura 10, onde inicialmente deve-se determinar o valor de referência para a potência de saída, em seguida, os valores do ângulo de defasagem serão determinados em razão da faixa de potência.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para validar as análises teóricas a respeito do circuito de auxílio a comutação estudados até o momento, será desenvolvida uma simulação para apresentar de forma rápida e eficiente o comportamento da topologia em estudo, com

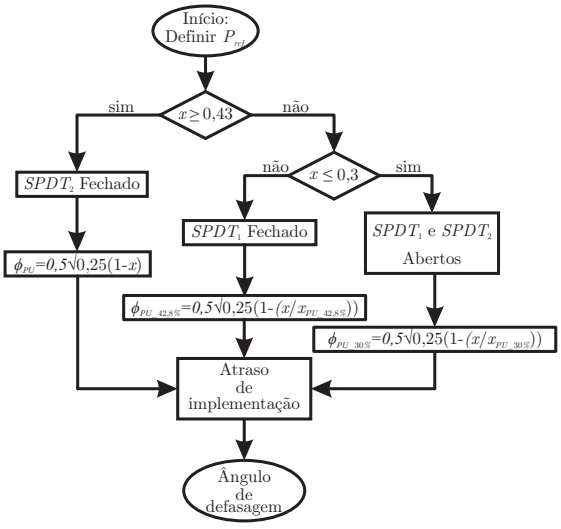


Figura 10. Fluxograma para definição dos parâmetros de acionamento do CAC.

o conversor DAB operando com PSM e com o circuito de auxílio a comutação. Os parâmetros de simulação são apresentados na Tabela 1.

Neste sentido, a seguir serão apresentadas as principais formas de onda para o conversor DAB em alguns dos possíveis pontos de operação com CAC. Para está análise o *software* utilizado foi o PSim®, salienta-se que para as simulações todos os componentes são considerados ideais.

A Figura 11 apresenta a corrente do primário do transformador com apenas a indutância L_{DAB1} conectada ao primário do transformador com carga nominal. Pode-se observar que a corrente de pico aproxima-se de 3 A. Na mesma figura são apresentadas as tensões do lado primário e secundário do transformador. Este ponto de operação corresponde ao ponto de carga nominal do conversor, ou seja, carga de 500 W.

Na Figura 12 são apresentadas as formas de onda do conversor DAB operando com 20% de carga (100 W) inicialmente apenas a indutância L_{DAB1} conectada ao primário do transformador. Neste caso a corrente de pico têm amplitude aproximada de 0,75 A com um ângulo de defasagem de $\phi = 9,5°$. Na sequência ocorre a conexão da indutância L_{DAB2} alterando a configuração da indutância do primário, a qual passa a ser composta por $L_{DAB1} + L_{DAB2}$. Com a nova configuração, pode-se perceber que o pico da corrente do primário foi reduzido, aproximando-se agora de 0,45 A, o que representa uma redução próxima de 40% para o mesmo ponto de operação da configuração inicial (apenas com L_{DAB1}).

Na Figura 13 o conversor DAB está operando com 30% da carga nominal (150 W) com apenas L_{DAB1} conectada ao primário do transformador, ou seja, $SPDT_1$ desligado e $SPDT_2$ ligado. Nesta configuração o ângulo de defasagem

Tabela 1. Parâmetros do conversor DAB.

Parâmetros	Valor	Símbolo
Tensão de entrada	400 V	V_{in}
Tensão de saída	42 V	V_o
Potência nominal de saída	500 W	P_o
Frequência de comutação	100 kHz	f_s
Indutor auxiliar 1	336 μH	L_{DAB1}
Indutor auxiliar 2	784 μH	L_{DAB2}
Capacitância de saída	560 μF	C_o
Relação de transformação	8	n
Ganho de tensão do DAB	1.2	d

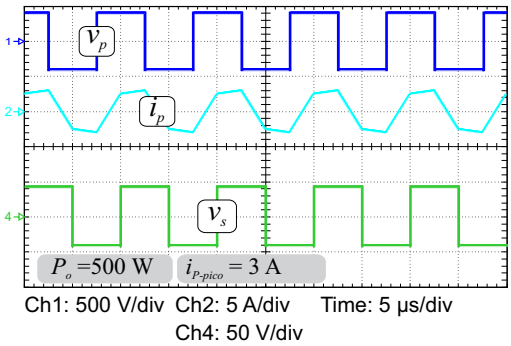


Figura 11. Corrente i_p, tensão v_p e v_s com PSM, L_{DAB1}, $\phi = 90°$, $f_s = 100$ kHz, $V_i = 400$ V, $V_o = 42$ V, $d = 1,2$ e $P_o = 500$ W.

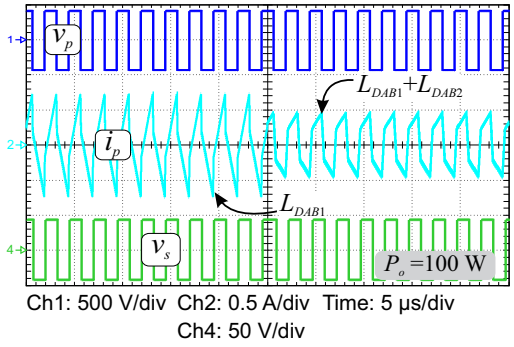


Figura 12. Corrente i_p, tensões v_p e v_s com PSM, L_{DAB1} com $\phi = 9,5°$ e $L_{DAB1} + L_{DAB2}$ com $\phi = 38,04°$, $V_i = 400$ V, $V_o = 42$ V, $d = 1,2$ e $P_o = 100$W.

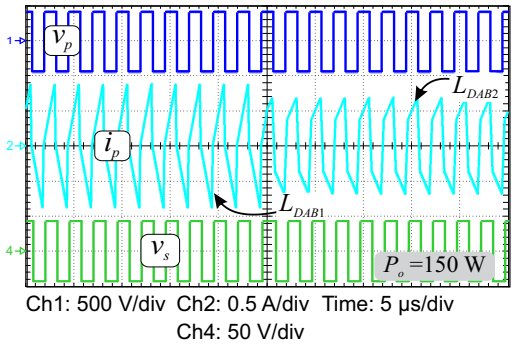


Figura 13. Corrente i_p, tensões v_p e v_s com PSM, L_{DAB1} com $\phi = 14,7°$ e L_{DAB2} com $\phi = 40,78°$, $V_i = 400$ V, $V_o = 42$ V, $d = 1,2$ e $P_o = 150$W.

entre as tensões do primário e secundário é igual a $14,7°$ com uma corrente de pico de 0,9 A. Na metade do período de operação mostrado na Figura 13 ocorre a mudança de estado do relé $SPDT_1$ de desligado para ligado e do relé $SPDT_2$ de ligado para desligado, mantendo apenas L_{DAB2} conectada ao conversor, dessa forma a corrente de pico do primário torna-se menor, atingindo valor de pico de aproximadamente a 0,7 A.

Além das análises apresentadas anteriormente, outra maneira de analisar o impacto da utilização adequada das indutâncias para determinadas faixas de carga pode ocorrer através da equação (8). Desta forma, pode-se verificar o momento exato onde devem ocorrer a abertura ou fechamento os relés $SPDT_1$ e $SPDT_2$ e ainda, os níveis de corrente de pico que serão aplicado ao primário do conversor para cada ponto de operação, dentro da fixa de operação para baixas cargas, a qual fica compreendida entre 5% e 43%. A Figura 14 apresenta o comportamento da corrente de pico para aplicação com tensão de entrada de 400 V e de saída de 42 V e $d = 1,2$.

$$i_{Lp} = \frac{nV_o}{4f_s L_{eff}} (d + 2\phi_{PU} - 1) \quad (8)$$

Analisando as curvas das correntes para todas as possíveis configurações de indutores do primário, pode-se perceber que para cargas abaixo de 25% ao utilizar os indutores L_{DAB1} e L_{DAB2} em série ($L_{DAB1} + L_{DAB}$) acarretará uma menor corrente de pico no primário. Já para cargas compreendidas entre 25% e 42,8% a utilização de apenas L_{DAB2} (relé $SPDT_1$ ligado) demonstra menor corrente

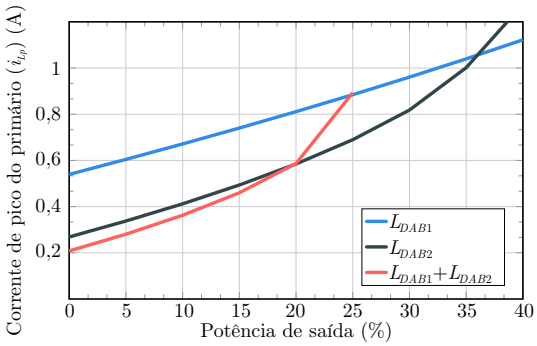


Figura 14. Corrente de pico do primário (i_{Lp}) com PSM e CAC proposto para $d = 1,2$ e potência de saída entre 25 e 225 W (5 - 45%).

de pico no primário. Para o restante da faixa de cargas de saída, deve-se utilizar o indutor L_{DAB1} (relé $SPDT_2$ ligado) conectado ao primário.

5. CONCLUSÃO

Circuitos de auxílio à comutação têm surgido como solução para melhoria dos níveis de eficiência do conversor DAB quando a potência de saída é reduzida. Assim, podem ser uma solução viável para aplicações de gerenciamento de carga de bancos de baterias que utilizam o conversor DAB. Os CAC tem como objetivo ampliar a faixa de operação do conversor DAB com comutações suaves em todos os interruptores. Com isso, foi proposto a extensão de um tipo de CAC neste trabalho, o qual ampliou a região de ZVS do DAB proposto. O CAC proposto contém dois indutores auxiliares comandados por relé, e operam independentemente entre si ou em conjunto dependendo dos níveis de carga conectados na saída do conversor. Foram desenvolvidas análises teóricas e de simulação para comprovar a aplicabilidade da topologia proposta. Ficou comprovado a partir dos resultados que com o CAC proposto a faixa de operação do conversor DAB com baixas correntes no primário são estendidas e que com isso a eficiência pode ser elevada. Os resultados obtidos comprovam a análise teórica e a funcionalidade do algoritmo proposto para determinar os ângulos de defasagem e a entrada em operação do CAC. Com o CAC a corrente de pico do primário manteve-se sempre com menor amplitude, o que por consequência reduz a potência aparente que circula através do conversor. Com isso, amplia-se as regiões de ZVS e a eficiência da topologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as agências de fomento CAPES/PROEX – código financeiro 001, INCT-GD sob doações 465640/2014–1 (CNPq), 23038.000776/2017-54 (CAPES) e 17/2551-0000517-1 (FAPERGS) CNPq 423405/2018-7, 308776/2018-6.

REFERÊNCIAS

Aamir, M., Mekhilef, S., and Kim, H.J. (2015). High-gain zero-voltage switching bidirectional converter with a reduced number of switches. *IEEE Trans Circ. Syst. II Exp. Briefs*, 62, 816–820.

Bai, H. and Mi, C. (2008). Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge dc-dc converters using novel dual-phase-shift control. *IEEE Trans Power Elec.*, 23, 2905–2914.

Bai, H. and Mi, C. (2008). Eliminate reactive power and increase system efficiency of isolated bidirectional dual-active-bridge dc-dc converters using novel dual-phase-shift control. *IEEE Trans. on Power Elec.*, 23, 2905–2914.

Costa, P.F.S. (2017). *Modelagem e Controle do Conversor DAB para Interface Entre Banco de Baterias e Sistema Elétrico de Potência*. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

De Doncker, R.W., Divan, D., and Kheraluwala, M.H. (1991). A three-phase soft-switched high-power-density dc/dc converter for high-power applications. *IEEE Trans. on Ind. App.*, 27, 63–73.

Karthikeyan, V. and Gupta, R. (2018). Frs-dab converter for elimination of circulation power flow at input and output ends. *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, 65, 2135–2144.

Karthikeyan, V. and Gupta, R. (2017). Light-load efficiency improvement by extending zvs range in dab-bidirectional dc-dc converter for energy storage applications. *Energy*, 130, 15 – 21.

Kheraluwala, M.N., Gascoigne, R.W., Divan, D.M., and Baumann, E.D. (1992). Performance characterization of a high-power dual active bridge DC-to-DC converter. *IEEE Trans. on Ind. App.*, 28(6), 1294–1301.

Oggier, G., García, G.O., and Oliva, A.R. (2011). Modulation strategy to operate the dual active bridge dc-dc converter under soft switching in the whole operating range. *IEEE Trans. Power Elec.*, 26, 1228–1236.

Qin, Z., Shen, Y., Loh, P.C., Wang, H., and Blaabjerg, F. (2018). A dual active bridge converter with an extended high-efficiency range by dc blocking capacitor voltage control. *IEEE Trans. on Power Elec.*, 33, 5949–5966.

Sedaghati, F., Hosseini, S.H., Sabahi, M., and Gharehpetian, G.B. (2015). Extended configuration of dual active bridge dc/dc converter with reduced number of switches. *IET Power Elec.*, 8, 401–416.

Shen, K., Tong, A., Shao, C., Hang, L., He, Y., Zhang, Y., Li, G., and Zhang, J. (2019). Zvs control strategy of dual active bridge dc/dc converter with triple-phase-shift modulation considering rms current optimization. *The Journal of Eng.*, 2019, 4708–4712.

Shen, Y., Sun, X., Li, W., Wu, X., and Wang, B. (2016). A modified dual active bridge converter with hybrid phase-shift control for wide input voltage range. *IEEE Trans. on Power Elec.*, 31(10).

Wu, J., Li, Y., Sun, X., and Liu, F. (2018). A new dual-bridge series resonant dc?dc converter with dual tank. *IEEE Trans. on Power Elec.*, 33, 3884–3897.

Yaqoob, M., Loo, K., and Lai, Y.M. (2018). Fully soft-switched dual-active-bridge series-resonant converter with switched-impedance-based power control. *IEEE Trans. on Power Elec.*, 33, 9267–9281.

Yaqoob, M., Loo, K.H., and Lai, Y.M. (2017). Extension of soft-switching region of dual-active-bridge converter by a tunable resonant tank. *IEEE Trans. on Power Elec.*, 32, 9093–9104.

Zhao, B., Yu, Q., and Sun, W. (2011). Extended-phase-shift control of isolated bidirectional dc-dc converter for power distribution in micro grid. *IEEE Trans Power Elec.*, 27, 4667–4680.

Zhou, H. and Khambadkone, A.M. (2009). Hybrid modulation for dual-active bridge bidirectional converter with extended power range for ultra capacitor application. *IEEE Trans Ind. Appl.*, 45, 1434–1442.