

Modelagem e Controle do Conversor *Dual Active Half-Bridge* Aplicado à um Sistema de Interconexão de Múltiplas Fontes para Geração de Energia

Maicon L. Flach*, Robinson F. de Camargo*, Lucas G. Scherer*

*Universidade Federal de Santa Maria, Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC)
Santa Maria – RS, Brasil
e-mail: flach.enge@gmail.com, robinson.camargo@gmail.com, lgscherer@gmail.com

Abstract: This paper presents a multiple source interconnection system for micro-grid energy generation. The system is based on the use of a primary DC source of energy generation (in this case PV generation) combined with a basic system of AC generation, being, in this case, a Self-Excited Induction Generator (SEIG), in addition to a battery energy storage system (ESS). The integration of multiple sources is carried out using the Dual Active Half Bridge (DAHB) isolated bidirectional converter. The DAHB converter is responsible for the interface between the power sources, as well as for managing the power flow between the primary and secondary bus. The proposed system has three voltage buses, being a three-phase bus with four wires derived from a DSTATCOM where the loads are connected, and two DC buses, being the primary and secondary bus of the DAHB converter. In this work, the mathematical modeling of the DAHB converter is developed in a simplified way, from which the design of the controllers is carried out. In addition, simulation and experimental results about the DAHB converter are presented, validating the projected controllers and the converter.

Resumo: Este trabalho apresenta um sistema de interconexão de múltiplas fontes para geração de energia em microrredes. O sistema baseia-se no uso de uma fonte CC primária de energia (neste caso, geração fotovoltaica) combinada com um sistema básico de geração de CA, sendo, nesse caso, um gerador de indução auto excitado (GIAE), além de um sistema de armazenamento de energia da bateria (ESS). A integração de múltiplas fontes é realizada por meio do conversor bidirecional isolado de *Dual Active Half-Bridge* (DAHB). O conversor DAHB é responsável pela interface entre as fontes de energia, bem como no gerenciamento do fluxo de potência entre o barramento primário e secundário. O sistema proposto possui três barramentos de tensão, sendo um barramento trifásico a quatro fios derivados de um DSTATCOM em que as cargas estão conectadas e dois barramentos CC, sendo os barramentos primário e secundário do conversor DAHB. Neste trabalho, é desenvolvida a modelagem matemática do conversor DAHB de maneira simplificada, a partir da qual o projeto dos controladores é realizado. Além disso, são apresentados resultados de simulação e experimentais acerca do conversor DAHB, validando este e os controladores projetados.

Keywords: DAHB; PV; GIAE; ESS; DSTATCOM.

Palavras-chaves: DAHB; PV; GIAE; ESS; DSTATCOM.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das fontes de geração de energia, associado à evolução da eletrônica de potência, tornou possível a integração de fontes de energia, possibilitando a implementação de microrredes e sistemas híbridos de geração de energia, a fim de assegurar uma fonte de alimentação confiável (Costa et al. 2018). Diversos sistemas híbridos são apresentados na literatura, sendo alguns deles os sistemas desenvolvidos por (Muhida et al. 2001), (Kenfack et al. 2009), (Jenna; Choudhury 2017), (Kalla et al. 2017), (Semma; Singh 2016), (Rezkallah et al. 2015). Destes, todos fazem uso de um banco de baterias para armazenar o excedente da energia gerada que não é consumida. Contudo, existem casos nos quais as baterias são conectadas diretamente ao barramento CC, como o proposto por Jena e

Choudhury (2017) que, apesar de apresentar maior simplicidade, esta estratégia pode ocasionar oscilações de tensão e corrente no banco de baterias, justamente por não possuir um sistema que realize a carga e descarga das mesmas. Ainda, o sistema proposto pelos autores não utiliza um conversor para realizar a interface do sistema fotovoltaico com o DSTATCOM, podendo ser prejudicial para o funcionamento adequado do sistema e, até mesmo, causar danos permanentes na geração fotovoltaica caso uma corrente e/ou tensão reversa seja aplicada aos terminais da mesma.

De forma similar, no sistema híbrido desenvolvido por Kalla et al. (2017) o banco de baterias é conectado diretamente ao barramento CC do sistema, e, ainda, os autores fazem uso de um conversor *Boost* conectado ao sistema fotovoltaico para interface entre o PV e o barramento CC do sistema. Já, os

sistemas híbridos propostos por Semma e Singh (2017) e Rezkallah et al. (2015), respectivamente, assim como o sistema desenvolvido por Kalla et al. (2017), fazem uso de fontes fotovoltaica e hídrica, além de um banco de baterias. Os autores, diferentemente de Jena e Choudhury (2017) e Kalla et al. (2017), conectam o banco de baterias ao barramento CC através de um conversor CC-CC bidirecional *Buck/Boost*. Em Semma e Singh (2017) um conversor *Boost* é empregado a fim de obter a máxima potência do arranjo fotovoltaico, enquanto em Rezkallah et al. (2015) não há um conversor dedicado ao sistema fotovoltaico. Cabe destacar que estes sistemas, por questões construtivas e operacionais, não permitem a conexão de cargas trifásicas e/ou monofásicas de forma simultânea (não possuem o condutor de neutro). Além disso, distúrbios ocasionados no barramento CC podem ser refletidos ao sistema fotovoltaico e ao banco de baterias, uma vez que não existe isolamento galvânica entre as fontes.

Este artigo propõe um método de interconexão de fontes renováveis de geração de energia e baterias, possibilitando a implementação de sistemas híbridos para geração de energia elétrica em locais remotos, ou seja, sem conexão com a rede elétrica convencional. Mais especificamente, é proposta a utilização do conversor DAHB (Meia Ponte Duplamente Ativa, do inglês *Dual Active Half-Bridge*) para realizar a interface entre as possíveis fontes de energia a serem integradas.

2. SISTEMA PROPOSTO

A Fig. 1 apresenta o sistema proposto para ao qual o conversor DAHB é aplicado. O sistema possui condutor de neutro, sendo capaz de alimentar tanto cargas trifásicas quanto cargas monofásicas, podendo ser elas lineares ou não lineares. Além disso, o sistema possui um ELC (*Electronic Load Control*), conectado ao barramento CC do DSTATCOM, que é utilizado para dissipar energia ativa em situações críticas, nas quais exista um excedente de energia que não possa ser utilizada ou armazenada no ESS (*Energy Storage System*). O sistema ainda compreende uma máquina primária (MP), um GIAE, capacitores de excitação, indutores de filtro, cargas, dois barramentos CC e um barramento de conexão CA. A chave S_{pv} , vista na Fig. 1, tem o objetivo de

isolar o sistema fotovoltaico do restante do sistema quando este não pode contribuir com o fornecimento de energia.

O sistema conta com dois barramentos CC, sendo o primeiro o barramento primário, cuja denominação é LVS (*Low Voltage Side*), neste barramento conecta-se o sistema fotovoltaico e o banco de baterias. Já, o segundo, é o barramento CC, cuja denominação é HVS (*High Voltage Side*), este é o barramento secundário do conversor DAHB e, também, o barramento CC do DSTATCOM. A parte CA do sistema é composta por um gerador de indução acoplado mecanicamente a uma MP de velocidade e torque constante, além disso, para a auto excitação do gerador é empregado um banco de capacitores conectados na configuração estrela, da qual o condutor neutro é derivado, caracterizando o sistema como um sistema de geração de quatro fios.

As vantagens em se utilizar o conversor bidirecional isolado DAHB neste sistema é o isolamento galvânico entre as fontes de geração, visto que variações/distúrbios no barramento CC não são refletidos ao primário. Ademais, o conversor DAHB permite a conexão do banco de baterias em baixo nível de tensão (LVS), quando comparado à tensão no barramento CC (HVS). A conexão do banco de baterias no lado primário tende a diminuir as perdas associadas durante a carga/descarga, uma vez que o ganho do conversor utilizado é menor no lado LVS do que em relação ao HVS. Por fim, o conversor DAHB permite ao sistema fluxo bidirecional de potência, desta forma as baterias podem ser carregadas tanto pela geração fotovoltaica quanto pela hidrelétrica, dependendo do modo de operação do sistema. Conseqüentemente, o conversor DAHB possui dois modos de operação, elevador (fornecendo energia ao barramento CC) e abaixador (fornecendo energia ao barramento primário).

A topologia do conversor DAHB, conforme observada na Fig. 1, consiste em duas meias pontes ativas. Possui tal denominação por ser composta de elementos ativos (chaves) e elementos passivos (capacitores). Diferentemente do realizado por (Wang et al. 2012), (Amin et al. 2015), (Chakraborty; Chattopadhyay 2017), (Han et al. 2018), (Xiangli, et al. 2018), (Wu et al. 2019), (Shi et al. 2020), que empregam a modulação *Phase-Shift* para a operação do conversor DAHB, este artigo propõem o uso de modulação PWM simétrica para a comutação das chaves.

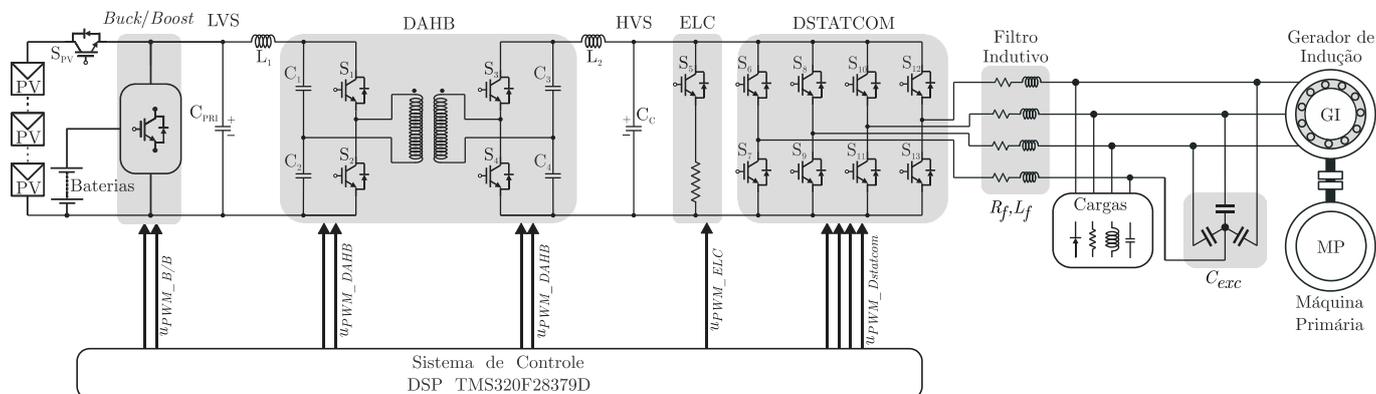


Fig. 1 Sistema proposto.

2.1 Operação do conversor DAHB com PWM simétrico

O conversor DAHB possui dois modos distintos de operação, sendo eles o modo elevador e abaixador e, em ambos os modos, emprega-se modulação PWM simétrica, resultando em duas etapas de comutação. Porém, neste artigo será apresentado somente o modo elevador. De forma a demonstrar as formas de onda para a modulação PWM simétrica apresenta-se a Fig. 2, a qual demonstra o conversor DAHB operando no modo elevador de tensão. Nesta condição, considera-se o barramento primário como fonte de tensão ideal enquanto o barramento CC é representado como uma carga RC. A corrente de entrada, advinda da fonte, é representada por “ I_{in} ”, enquanto “ I_{pt} ” representa a corrente do primário do transformador. “ V_{ab} ” e “ V_{cd} ” são as tensões aplicadas aos terminais do transformador no lado primário e secundário, respectivamente.

Durante a primeira etapa de comutação, dado por DT_s , as chaves S_1 e S_3 estão acionadas, enquanto S_2 e S_4 encontram-se desligadas, conforme observa-se na Fig. 2. Neste modo, a tensão V_{ab} é a tensão do capacitor C_1 ($+V_{pri}/2$), enquanto V_{cd} é a tensão de $+V_{C1}$ multiplicado pela relação de transformação ($V_{cd} = V_{ab} \cdot n$). De forma similar, a corrente no primário do transformador “ I_{pt} ” é a razão entre $I_{st} \cdot n$, enquanto a corrente de entrada “ I_{in} ” é dada pela relação entre a corrente drenada pela carga, $I_{load} \cdot n$, possuindo um valor médio não nulo.

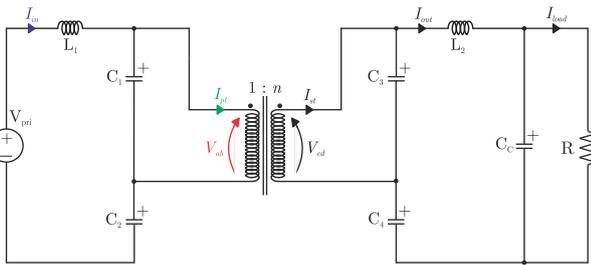


Fig. 2 Conversor DAHB no modo elevador com carga RC, primeira etapa de comutação.

Na segunda etapa de comutação, dado por $(1-D)T_s$, as chaves S_1 e S_3 encontram-se desligadas, enquanto S_2 e S_4 estão acionadas, conforme observa-se na Fig. 3. Neste modo, aplica-se à V_{ab} a tensão do capacitor C_2 ($-V_{pri}/2$), enquanto V_{cd} resulta de $V_{ab} \cdot n$. A corrente no primário do transformador “ I_{pt} ” é dada pela razão entre $I_{st} \cdot n$.

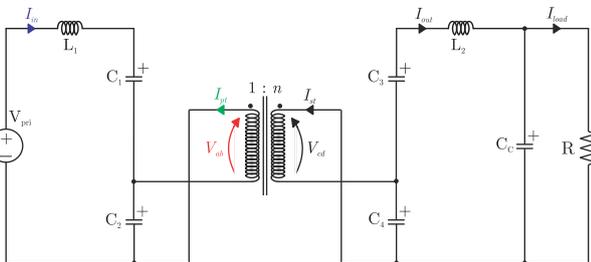


Fig. 3 Conversor DAHB no modo elevador com carga RC, segunda etapa de comutação.

A Fig. 4 apresenta as formas de onda para as duas etapas de comutação, salientando que o estado “off” a energia armazenada no indutor durante a primeira/segunda etapa é injetada nos capacitores C_1 e C_2 , enquanto a carga é suprida pela energia armazenada em C_3 , C_4 e C_c . Durante toda a

operação com PWM simétrico, a corrente aplicada ao transformador, conforme observa-se na Fig. 4, possui valor médio igual a zero, necessário para não ocorrer saturação do transformador. Já, a corrente de entrada “ I_{in} ” possui valor médio dado por $I_{load} \cdot n$. Cabe ressaltar que, tanto no modo elevador quanto no modo abaixador, as formas de onda para o conversor DAHB atuando com PWM simétrico possuem o mesmo comportamento.

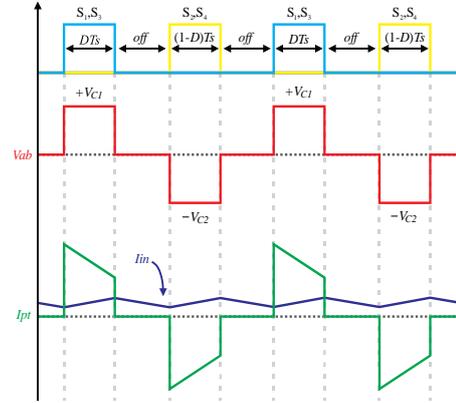


Fig. 4 Formas de onda para o conversor DAHB no modo elevador com PWM simétrico.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA DO CONVERSOR DAHB NO MODO ELEVADOR

No estado da arte existe uma vasta gama de trabalhos que demonstram a modelagem clássica do conversor DAHB, sendo alguns deles (Wang et al. 2012), (Amin et al. 2015), (Chakraborty; Chattopadhyay 2017), (Han et al. 2018), (Xiangli, et al. 2018), (Wu et al. 2019), (Shi et al. 2020). Contudo, a modelagem do conversor DAHB realizada e apresentada neste artigo difere dos trabalhos citados, uma vez que é empregada a modulação PWM simétrica no conversor DAHB, resultando em uma modelagem simplificada. Mais especificamente, considera-se o conversor DAHB, no modo elevador, como um conversor *Boost LC*.

A modelagem por espaço de estados desenvolvida contempla o uso de resistências parasitas e considera o conversor operando no modo de condução contínua, sendo representado por duas etapas de operação. Uma etapa quando a chave está ligada e outra quando a chave está desligada. Através destas, a relação entre as equações do espaço de estados e as funções de transferência são representadas por

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{u}(t) \quad (2)$$

onde $\mathbf{x}(t)$ é o vetor de estados, $\mathbf{y}(t)$ é o vetor de saídas e $\mathbf{u}(t)$ é o vetor de entradas. \mathbf{H} e \mathbf{E} são matrizes de coeficientes com dimensões apropriadas, e como existem duas etapas de operação, as matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} são:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{A}_1 D + \mathbf{A}_2 (1-D) \\ \mathbf{B} &= \mathbf{B}_1 D + \mathbf{B}_2 (1-D) \end{aligned} \quad (3)$$

em que os coeficientes subscritos “1” e “2” são respectivos à primeira e segunda etapa de operação, respectivamente, enquanto D é a razão cíclica.

3.1 Modelagem em espaço de estados no modo elevador

A Fig. 5 apresenta o circuito do conversor DAHB operando no modo elevador. Considera-se o barramento primário como uma fonte de tensão ideal, enquanto o secundário possui uma fonte de corrente (representando os distúrbios de saída). Ainda, observa-se a utilização das resistências parasitas nos indutores e capacitores, além de uma resistência de carga (R). O modelo simplificado do conversor DAHB é apresentado na Fig. 6. Visto que o modelo é simplificado, algumas aproximações são realizadas, como o capacitor $C_{3,4}$, considerado na Fig. 6, que equivale ao valor do capacitor C_3 , enquanto os capacitores C_1 e C_2 são desprezados. Ainda, os braços ativos do conversor DAHB são aproximados por uma chave (S_{DE}) e um diodo (D_{DE}), conforme pode ser observado através da Fig. 6 em relação a Fig. 5, enquanto a relação de transformação do transformador é substituída pelo ganho estático do conversor *Boost* (obtido da equação clássica que relaciona a tensão de entrada e a tensão de saída).

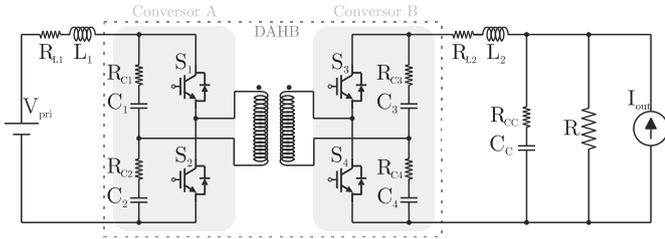


Fig. 5 Circuito do conversor DAHB no modo elevador.

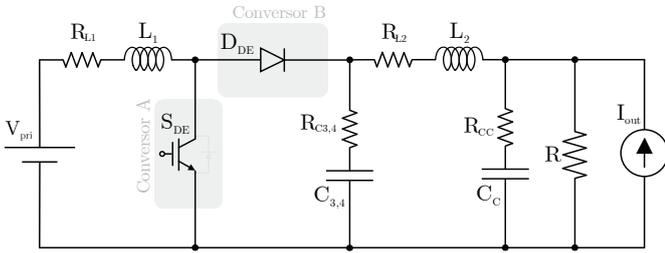


Fig. 6 Circuito simplificado do conversor DAHB no modo elevador.

A Fig. 7 apresenta a primeira etapa de condução para o circuito simplificado do conversor DAHB no modo elevador de tensão. Nesta etapa têm-se a chave (S_{DE}) conduzindo e o diodo (D_{DE}) bloqueado. É possível notar a polarização dos capacitores e o fluxo de corrente direcionado ao barramento CC do DSTATCOM, capacitor C_C , enquanto o mesmo mantém o fornecimento de energia à resistência de carga.

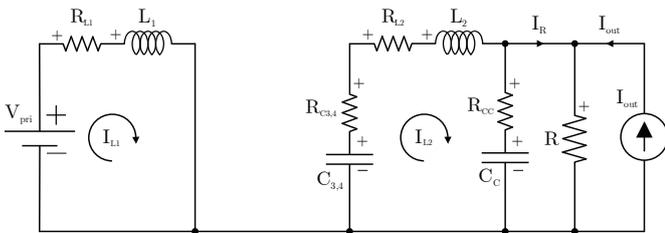


Fig. 7 Circuito simplificado do conversor DAHB no modo elevador, primeira etapa de condução.

Aplicando as Leis de Kirchhoff no circuito apresentado na Fig. 7, obtém-se as equações diferenciais para as correntes

nos indutores L_1 e L_2 , e tensões nos capacitores $C_{3,4}$ e C_C , conforme:

$$\dot{I}_{L1} = \frac{V_{pri}}{L_1} - \frac{(I_{L1}R_{L1})}{L_1} \quad (4)$$

$$\dot{I}_{L2} = -\frac{I_{L2}(R_{C3,4} + R_{L2} + R_{CC})}{L_2} + \frac{V_{C3,4}}{L_2} + \frac{V_{CC}(R_{CC} - R)}{RL_2} \quad (5)$$

$$\dot{V}_{C3,4} = \frac{I_{L2}(R_{C3,4} - 1)}{C_{3,4}} \quad (6)$$

$$\dot{V}_{CC} = \frac{I_{L2}(1 - R_{C3,4})}{C_C} + \frac{V_{CC}(R_{CC} - 1)}{RC_C} + \frac{I_{out}(1 - R_{CC})}{C_C} \quad (7)$$

As matrizes de estados, de entrada, e vetores de estados e de entrada, obtidos a partir de (4), (5), (6) e (7), para a primeira etapa de condução do conversor DAHB no modo elevador são apresentadas em (8), (9) e (10).

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(R_{C3,4} + R_{L2} + R_{CC})}{L_2} & \frac{1}{L_2} & \frac{(R_{CC} - R)}{(RL_2)} \\ 0 & \frac{(R_{C3,4} - 1)}{C_{3,4}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1 - R_{C3,4})}{C_C} & 0 & \frac{(R_{CC} - 1)}{(RC_C)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & (1 - R_{CC})/C_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ C_{3,4} \\ C_C \end{bmatrix} \quad \mathbf{e} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} V_{pri} \\ I_{out} \end{bmatrix} \quad (10)$$

A segunda etapa de condução tem como característica o desligamento da chave (S_{DE}) e condução do diodo (D_{DE}), resultando no circuito apresentado na Fig. 8.

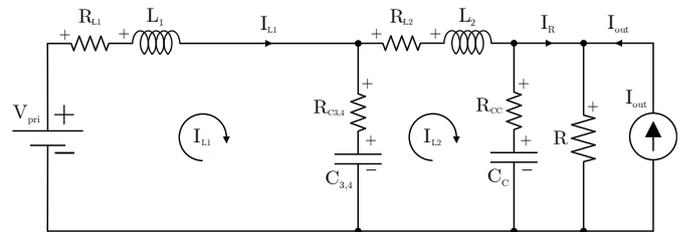


Fig. 8 Circuito simplificado do conversor DAHB no modo elevador, segunda etapa de condução.

As equações para a corrente em L_2 e tensão em C_C , para a segunda etapa de condução, são as mesmas apresentadas em (5) e (7). Enquanto as equações para a corrente L_1 e tensão em $C_{3,4}$ são apresentadas em (11) e (12).

$$\dot{I}_{L1} = \frac{V_{pri}}{L_1} - \frac{I_{L1}(R_{L1} + R_{C3,4})}{L_1} + \frac{(I_{L2}R_{C3,4})}{L_1} - \frac{V_{C3,4}}{L_1} \quad (11)$$

$$\dot{V}_{C3,4} = \frac{I_{L1}(1 - R_{C3,4})}{C_{3,4}} + \frac{I_{L2}(R_{C3,4} - 1)}{C_{3,4}} \quad (12)$$

As matrizes de estados, de entrada, obtidos a partir de (5) e (7) da primeira etapa, com (11) e (12) da segunda etapa são apresentadas em (13) e (14), enquanto os vetores de estados e de entrada são expostos em (10).

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \frac{(R_{L1} + R_{C3,4})}{L_1} & \frac{R_{C3,4}}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{(R_{C3,4} + R_{L2} + R_{CC})}{L_2} & \frac{1}{L_2} & \frac{(R_{CC} - R)}{(RL_2)} \\ \frac{(1 - R_{C3,4})}{C_{3,4}} & \frac{(R_{C3,4} - 1)}{C_{3,4}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1 - R_{C3,4})}{C_C} & 0 & \frac{(R_C - 1)}{(RC_C)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 1/L_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & (1 - R_{CC})/C_C \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.2 Validação do modelo simplificado

A validação do modelo no modo elevador foi realizada a partir de simulações computacionais confrontando o modelo matemático desenvolvido através do circuito equivalente simplificado disposto na Fig. 6 com o circuito original do conversor DAHB, apresentado na Fig. 5. Os parâmetros considerados durante as simulações computacionais são apresentados na Tabela 1, salientando que os valores das resistências parasitas foram obtidas através de ensaios experimentais. Cabe ressaltar que a relação de transformação (n) é de 5,4 vezes, assim, a tensão de saída é de 810 V a partir de 150 V de entrada. Portanto, a razão cíclica do conversor *Boost* LC, utilizada para cálculo do modelo simplificado, possui valor de 0,8148, enquanto o circuito do conversor DAHB opera, em malha aberta, com razão cíclica de 0,5.

Tabela 1. Especificações do conversor DAHB.

Símbolo	Valor
L_1, L_2	38 μ H
$C_1, C_2, C_3, C_4, C_{3,4}$	20 μ F
f	40 kHz
R_{L1}	0,0453 Ω
R_{L2}	0,0145 Ω
R_{C1}	0,0237 Ω
R_{C2}	0,0242 Ω
R_{C3}	0,0235 Ω
$R_{C4}, R_{C3,4}$	0,0245 Ω
V_{pri} (entrada)	150 V
C_C	4700 μ F
R_{CC}	0,1 Ω
R	220 Ω
n	5,4 vezes

Além disso, distúrbios na tensão de entrada e na corrente de saída (I_{out}) foram aplicados. Os distúrbios de tensão de entrada e corrente de saída, bem como os tempos aos quais foram aplicados, estão dispostos na Tabela 2. Os resultados de simulação para a corrente no indutor L_1 e tensão no capacitor C_C , expostos na Fig. 9 e Fig. 10, respectivamente, demonstram que o modelo simplificado do conversor DAHB é válido, apresentado comportamento satisfatório frente à variações na tensão de entrada e corrente de saída, tanto em regime transitório quanto em regime permanente.

Tabela 2. Variações na tensão de entrada (V_{pri}) e corrente de saída (I_{out}).

Var.	V_{pri} (V)				I_{out} (A)			
Dist.	+5	-5	-5	+5	+0,5	-0,5	-0,5	+0,5
t (s)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0

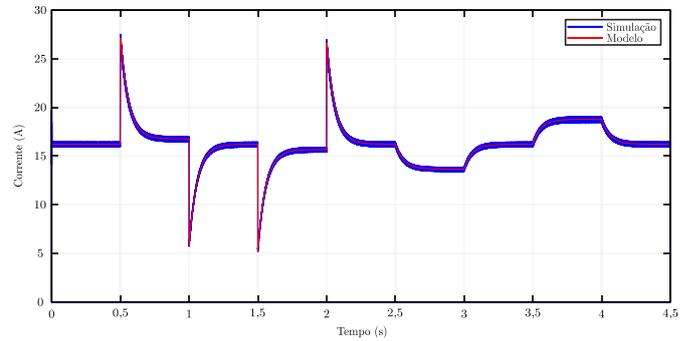


Fig. 9 Corrente no indutor L_1 (primário) do conversor DAHB no modo elevador.

É possível observar que pela relação de transformação, a tensão no barramento CC deveria ser de 810 V. Esta diferença deve-se às quedas de tensão ao longo do circuito ocasionadas pelas resistências parasitas consideradas. Contudo, este efeito não invalida o modelo apresentado, uma vez que a tensão a ser mantida pelo conversor DAHB, em malha fechada, é de 660 V. Visto que o modelo, tanto da corrente no indutor L_1 quanto da tensão no capacitor C_C , representa adequadamente o comportamento do conversor DAHB, conforme visualizado na Fig. 9 e Fig. 10.

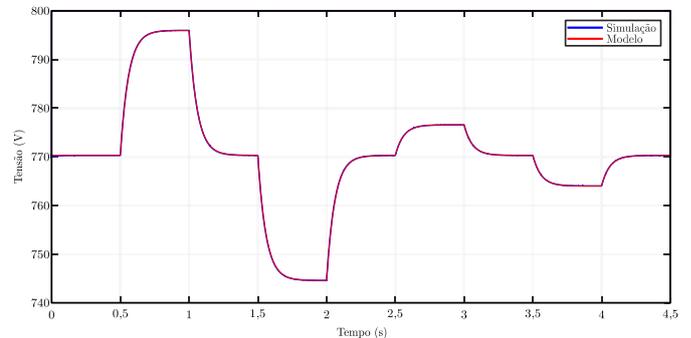


Fig. 10 Tensão no capacitor C_C (secundário) do conversor DAHB no modo elevador.

As funções de transferências (FT's) que relacionam a corrente pela razão cíclica e tensão pela corrente, para o conversor DAHB no modo elevador, são apresentadas em (15) e (16), respectivamente. Sendo G_{IDE} e G_{VDE} as funções de

transferência em malha aberta não compensadas da corrente e tensão, respectivamente, para o conversor DAHB no modo elevador. Destaca-se que a FT (16) foi simplificada, visto que existe o cancelamento natural de polos e zeros.

$$G_{IDE}(s) = \frac{2,0295 \cdot 10^7 \cdot (s + 0,259) \cdot (s^2 + 885,85s + 2,05 \cdot 10^8)}{(s + 1,83 \cdot 10^3) \cdot (s + 2,65) \cdot (s^2 + 885,85s + 2,11 \cdot 10^8)} \quad (15)$$

$$G_{VDE}(s) = \frac{-2,16 \cdot 10^5 \cdot (s - 3,5 \cdot 10^4)}{(s + 0,259) \cdot (s^2 + 885,85s + 2,05 \cdot 10^8)} \quad (16)$$

4. PROJETO DOS CONTROLADORES

Para o correto funcionamento do conversor DAHB, faz-se necessário o emprego de técnicas de controle, possuindo, no modo elevador, duas malhas de controle, uma malha interna (MI) de corrente (rápida) e a malha externa (ME) de tensão (lenta). O projeto dos controladores é realizado com base nas funções de transferência previamente obtidas conforme (15) e (16). Para o projeto dos controladores do conversor DAHB tem-se como critérios mínimos a margem de fase (MF) de 60°. Ademais, para o modo elevador definiu-se como frequência de corte (f_c) para a malha interna 1 kHz e 10 Hz para a malha externa (duas décadas abaixo). Para atender estas definições, utilizou-se controladores com ação proporcional e integral (PI), com a função de transferência dada por

$$G_{PI}(s) = \frac{Kp(s + fz)}{s} \quad (17)$$

onde Kp é o ganho proporcional, fz é a frequência do zero do PI e s é a unidade de Laplace (domínio da frequência). Os respectivos ganhos e frequência dos zeros do PI para cada controlador são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3. Especificações dos controladores.

Controlador	Kp	fz
MI_DE	0,00031788	1800
ME_DE	1,7058	0,18

O diagrama de Bode da malha interna, FT apresentada em (15), não compensada (NC) (em azul) e compensada (C) (na cor laranja) do conversor DAHB no modo elevador, é apresentada na Fig. 11. Observa-se o atendimento dos requisitos, como frequência de corte de 1 kHz e margem de fase superior a 60°. De forma similar, apresenta-se na Fig. 12 o diagrama de Bode para a FT da malha externa (tensão) (16) em malha aberta não compensado (em azul – NC) e compensado (na cor laranja – C).

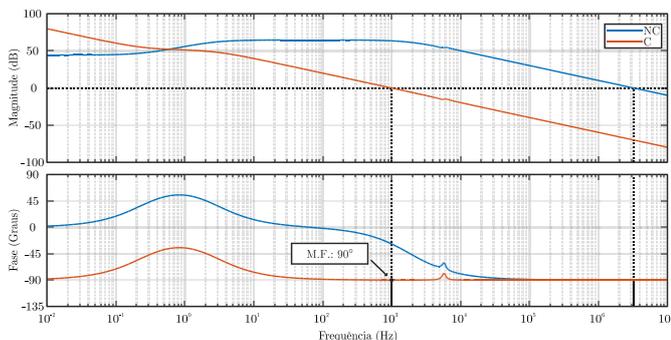


Fig. 11 Diagrama de bode em malha aberta não compensada (em azul) e compensada (na cor laranja) da função G_{IDE} .

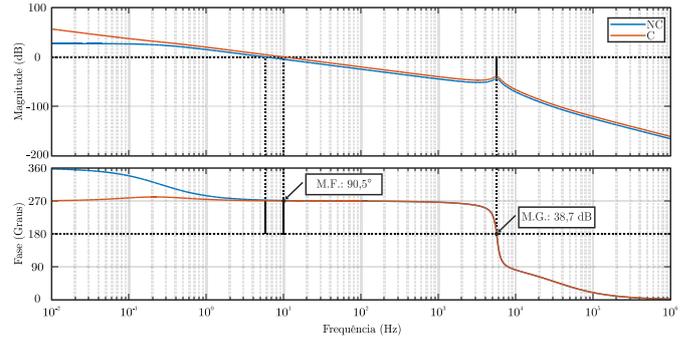


Fig. 12 Diagrama de bode em malha aberta não compensada (em azul) e compensada (na cor laranja) da função G_{VDE} .

Nota-se que, tanto f_c quanto a MF atendem aos critérios de projeto. Destaca-se, ainda, que os picos de ressonância observados em ambos os diagramas de Bode são oriundos da combinação LC entre os capacitores do conversor DAHB e indutores dispostos nos barramentos primário e secundário.

As equações de diferenças discretas, apresentadas em (18) e (19) para a malha externa e interna, respectivamente, foram obtidas com a discretização dos controladores através do método de Tustin com período de $1/f$ e são utilizadas para implementação digital dos controladores no DSP TMS320F28379D para obtenção dos resultados experimentais.

$$u_{vcc}[k] = u_{vcc}[k-1] + 1,705e_{vcc}[k] - 1,705e_{vcc}[k-1] \quad (18)$$

$$u_{IL1DE}[k] = u_{IL1DE}[k-1] + 0,00036e_{IL1DE}[k] - 0,00027e_{IL1DE}[k-1] \quad (19)$$

Onde $u_{vcc}[k]$ é a referência de corrente e $u_{IL1DE}[k]$ é a ação de controle que comanda as chaves do conversor DAHB.

5. RESULTADOS

Os resultados apresentados têm o intuito de demonstrar o funcionamento do conversor DAHB em malha fechada, validando de forma parcial, através de simulações computacionais, e, posteriormente, validar de forma experimental o conversor, bem como os controladores projetados com base no modelo simplificado.

5.1 Resultados de simulação

Para validar o conversor DAHB em malha fechada realizou-se uma simulação, do circuito apresentado na Fig. 5, na qual aplicou-se distúrbios na tensão de entrada e variações de carga, os quais, estão dispostos na Tabela 5. Os resultados da simulação são apresentados nas Fig. 13 e Fig. 14, onde é possível verificar que os controladores projetados mantêm a tensão do barramento CC, capacitor C_c , regulada em 660 V. Salientando que a referência de corrente, Fig. 13, provêm da malha externa de tensão, resultando no comportamento transitório observado frente à distúrbios de carga.

Tabela 4. Variações de tensão e carga para o conversor DAHB no modo elevador.

Var.	V_{PRI} (V)				P_{carga} (kW)			
	+5	-5	-5	+5	1,8	0,91	0,45	0,91
t (s)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0

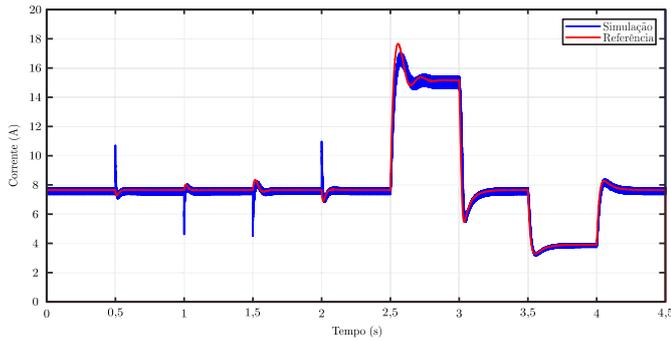


Fig. 13 Validação parcial do controlador de corrente do conversor DAHB no modo elevador (corrente no indutor L_1).

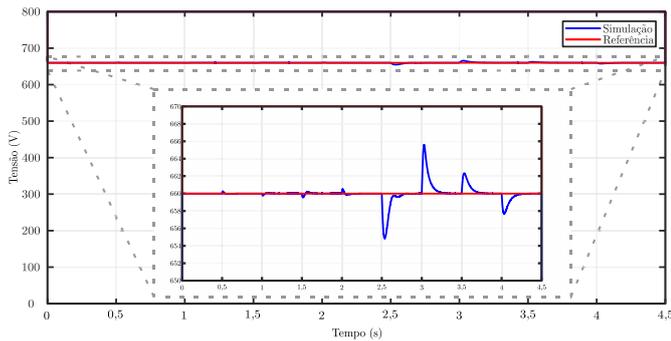


Fig. 14 Validação parcial do controlador de tensão do conversor DAHB no modo elevador (tensão no capacitor C_C).

5.2 Resultados experimentais

Testes experimentais foram realizados de forma a demonstrar o comportamento em malha fechada frente a distúrbios de entrada e saída. Para os testes utilizou-se uma fonte de tensão CC de entrada (V_{PRI}), a qual foi regulada em 125 V (levemente acima do limiar inferior de 122,22 V). Esta definição está fundamentada na verificação do funcionamento do conversor quando a tensão apresenta-se abaixo da nominal (150 V), aumentando os esforços tanto do conversor quanto dos controladores desenvolvidos. Inicialmente, partiu-se o sistema em malha aberta até que a tensão no barramento CC atingisse de 660 V, quando alcançado este nível, habilitou-se os controladores do conversor DAHB. Uma vez em malha fechada, foram aplicados degraus na tensão de entrada (V_{PRI}) e de carga no barramento CC (empregando o ELC, configurado como carga eletrônica, para aplicar os distúrbios de carga, dissipando energia). Nota-se que a tensão no barramento CC, apresentada na Fig. 15, manteve-se regulada em 660 V conforme imposto pela referência, independentemente dos distúrbios aplicados. Destaca-se ainda que a ondulação da tensão no barramento CC (capacitor C_C) não varia considerando a variação do fornecimento de potência dentro da faixa explorada. A Fig. 16 expõe a corrente drenada do barramento primário (indutor L_1 , em amarelo) e injetada no barramento CC (indutor L_2 , em azul) do conversor DAHB durante os testes realizados.

A Fig. 17 apresenta a corrente nos indutores L_1 (barramento primário, em amarelo, CH1) e L_2 (barramento secundário/CC, em azul, CH2), além da corrente drenada pela carga eletrônica (em roxo, CH3) conectada ao barramento CC

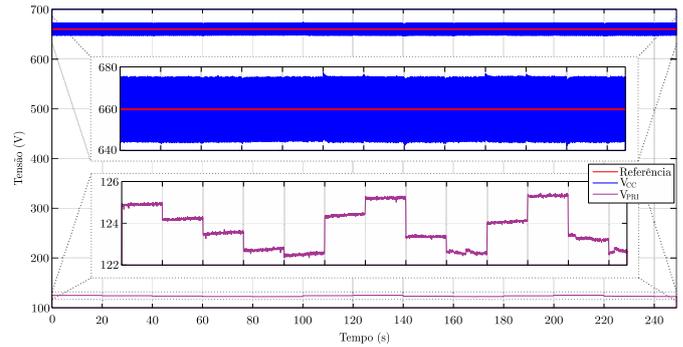


Fig. 15 Tensão de entrada (V_{PRI}), de saída (V_{CC}) e referência para validação experimental do conversor DAHB no modo elevador.

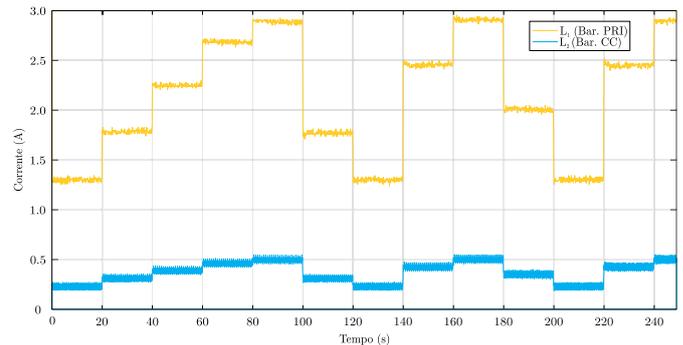


Fig. 16 Corrente drenada do barramento primário (indutor L_1) e injetada no barramento CC (indutor L_2) para validação experimental do conversor DAHB no modo elevador.

obtidas por intermédio do osciloscópio. Observa-se, através da Fig. 17, que a corrente drenada do barramento primário (indutor L_1 , em amarelo, CH1) apresenta relação de aproximadamente 5,4 vezes maior que a corrente injetada no barramento CC (indutor L_2 , em azul, CH2), conforme determinado pela relação de transformação (n). Ainda, nota-se na Fig. 17 os picos de corrente ocasionados pela comutação das chaves do conversor DAHB e da carga eletrônica (ELC) conectada ao barramento CC. Os dados apresentados pela Fig. 17 são respectivos ao período de 60 a 80 segundos das Fig. 15 e Fig. 16.

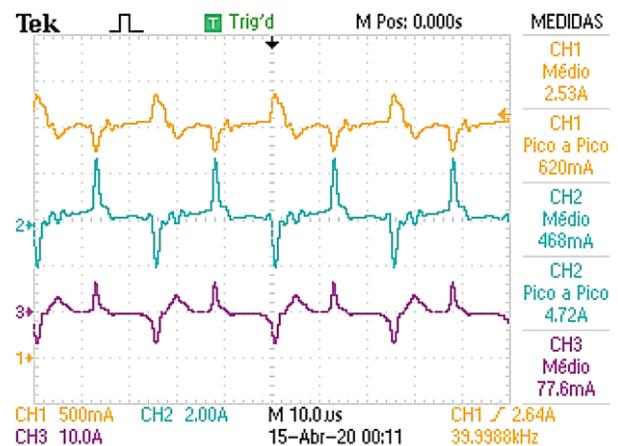


Fig. 17 Corrente no indutor L_1 (em amarelo, CH1), no indutor L_2 (em azul, CH2) e drenada pela carga (em roxo, CH3) no modo elevador.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um sistema de interconexão de múltiplas fontes para geração energia e microrredes. O sistema está fundamentado na utilização de uma fonte fotovoltaica associada a um GIAE, além de um sistema de armazenamento de energia em baterias. A integração de múltiplas fontes é realizada por meio do conversor bidirecional isolado DAHB. O conversor DAHB é responsável pela interface entre as fontes de energia, bem como pelo gerenciamento do fluxo de potência entre o barramento primário e secundário. Nesse contexto, destaca-se a modelagem simplificada realizada. As aproximações para a modelagem do conversor DAHB demonstraram-se adequadas, uma vez que o comportamento tanto em regime transitório quanto em regime permanente perante distúrbios de entrada e saída se mostraram plenamente satisfatórios. De maneira geral, os modelos simplificados são válidos para representar o comportamento do conversor DAHB. Para o correto funcionamento do sistema, faz-se necessário o desenvolvimento de controladores dedicados ao modo elevador. Os controladores projetados possuem ação proporcional e integral nas duas malhas de controle do conversor DAHB, uma vez que os critérios de margem de fase mínima de 60° e frequência de corte são atendidas pelos controladores PI. Destaca-se que o conversor DAHB e os controladores foram validados através de simulações computacionais e resultados experimentais acerca do modo elevador frente à distúrbios de entrada e saída.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Tecnologia e Desenvolvimento em Geração Distribuída (INCT-GD), processo CNPq n° 465640/2014-1, processo CAPES n° 23038.000776/2017-54 e processo FAPERGS n° 17/2551-0000517-1.

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

- Costa, P. F. S., Löbler, P. H. B., Roggia, L. and Schuch, L. (2018). Controle de corrente e tensão do conversor DAB modificado aplicado à Carga de Baterias. *XXII Congresso Brasileiro de Automática*. João Pessoa - PB, Brasil.
- Muhida, R., Mostavan, A., Sujatmiko, W., Park, M. and Mastsuura, K. (2001). The 10 years operation of a PV-micro-hydro hybrid system in Taratak, Indonesia. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 67.
- Kenfack, J., Neirac, F. P., Tatietsé, T. T., Mayer, D., Fogue, M. and Lejeune, A. (2009). Microhydro-PV-hybrid system: Sizing a small hydro-PV-hybrid system for rural electrification in developing countries. *Renewable Energy* 34.
- Jena, B. and Choudhury, A. (2017). Voltage and Frequency Stabilisation In a Micro-Hydro-PV Based Hybrid Microgrid Using FLC Based STATCOM Equipped with BESS. *International Conference on circuits Power and Computing Technologies [ICCPCT]*.
- Kalla, U. K., Singh, B. and Murthy, S. S. (2017). Slide mode control of microgrid using small hydro driven single-phase SEIG integrated with solar PV array. *IET Renew. Power Gener.*, vol 11 Iss. 11, pp 1464-1472.
- Seema and Singh, B. (2016). Intelligent Control of SPV-Battery-Hydro Based Microgrid. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*.
- Rezkallah, M., Sharma, S., Chandra, A. and Singh, B. (2015). Hybrid Standalone Power Generation System Using Hydro-PV-Battery for Residential Green Buildings. *IECON - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- Wang, M., Du, Y., Lukic, S. and Huang, A. Q. (2012). Small-Signal Analysis and Modeling of the Dual Active Half Bridge Converter. *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*.
- Amin, A., Shousha, M., Prodic, A. and Lynch, B. (2015). A Transformerless Dual Active Half-Bridge DC-DC Converter for Point-of-Load Power Supplies. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*.
- Chakraborty, S. and Chattopadhyay, S. (2017). Minimum-RMS-Current Operation of Asymmetric Dual Active Half-Bridge Converters With and Without ZVS. *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 32, no. 7.
- Han, B., Bai, C., Lee, J. S. and Kim, M. (2018). Repetitive Controller of Capacitor-Less Current-Fed Dual-Half-Bridge Converter for Grid-Connected Fuel Cell System". *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10.
- Xiangli, K., Li, S. and Smedley, K. M. (2018). Decoupled PWM Plus Phase-Shift Control for a Dual-Half-Bridge Bidirectional DC-DC Converter. *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 33, no. 8.
- Wu, S., Li, L. and Liu, W. (2019). Sensorless Current Sharing Method for Two Module Input-Parallel Output-Parallel(IPOP) Connected Dual Active Half-Bridge(DAHB) Converters. *14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*.
- Shi, H., Sun, K., Wu, H. and Li, Y. (2020). A Unified State-Space Modeling Method for a Phase-Shift Controlled Bidirectional Dual-Active Half-Bridge Converter. *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 35, no. 3.