

TESTE E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE ACIONAMENTO PARA MOTORES DE INDUÇÃO TOLERANTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Nelber X. Melo¹, Ruth P.S. Leão², René P.T. Bascopé³, Fernando L.M. Antunes⁴,
Raimundo F. Sampaio⁵, Janaina B. Almada⁶

^{1,5}Universidade Federal do Ceará- Campus de Sobral;

^{2,3,4,6}Universidade Federal do Ceará- Campus Fortaleza. Grupo de Processamento de Energia e Controle
CEP: 60.455-760 Fortaleza – CE Brasil

e-mails: ¹nelber@dee.ufc.br, ²rleao@dee.ufc.br, ³rene@dee.ufc.br, ⁴fantunes@dee.ufc.br,
⁵rfurtado@dee.ufc.br, ⁶janainaalma@gmail.com

Resumo – Este artigo apresenta o projeto de um conversor *boost* com controle modo corrente média para mitigar afundamentos de tensão em acionamentos de velocidade variável (AVV). Com base em testes para obter a sensibilidade do AVV a afundamentos de tensão, o conversor *boost* foi projetado para aumentar a tolerância do AVV a afundamentos trifásicos de 0,7 p.u. e duração de 200 ms para 0,5 p.u. de qualquer duração. Testes recomendados pelo grupo de trabalho JWG C4.110 do CIGRE/CIRED/UIE foram realizados para validar a suportabilidade do sistema de acionamento que compreende conversor *boost* conectado ao AVV com alimentação compartilhada. Os resultados comprovaram a eficácia do conversor projetado.

Palavras-Chave – Acionamento de Velocidade Variável, Afundamento de Tensão, Conversor *Boost*, Suportabilidade a Afundamento de Tensão.

TEST AND EVALUATION OF A DRIVE SYSTEM FOR INDUCTION MOTORS TOLERANT TO VOLTAGE SAGS

Abstract – This paper presents the design of a boost converter with average current mode control to mitigate voltage sags in adjustable speed drives (ASD). Based on tests performed on the ASD to assess its tolerance to voltage sags, the boost converter was designed to increase the voltage ride-through of the ASD from 0.7 p.u. and 200 ms to 0.5 p.u. of any length. Tests recommended by the Working Group C4.110 sponsored by CIGRE/CIRED/UIE were performed to validate the voltage ride-through capability of the drive system comprising the boost converter connected to the ASD, both sharing the same power supply. The results have attested the efficiency of the converter designed.

Keywords – Adjustable speed drive, Boost Converter, Voltage Sag, and Voltage Ride-Through.

I. INTRODUÇÃO

Os acionamentos de velocidade variável (AVV) são dispositivos eletrônicos usados para controlar a velocidade de motores elétricos com carga variável. São vários os benefícios em operar motores com acionamento eletrônico dentre os quais incluem controle da corrente de partida, controle de aceleração e de velocidade de rotação do motor, ajuste do ponto de torque máximo, controle de parada, aumento do fator de potência e, por conseguinte, economia de energia e redução de distúrbios na rede elétrica. Os vários benefícios têm sido a causa do crescente uso de AVVs na indústria.

Não obstante sua importância no processo produtivo, os AVVs são sensíveis a afundamentos de tensão, visto que possuem, em geral, proteção contra subtensão e sobrecorrente, fenômenos estes que podem estar associados aos afundamentos de tensão.

Segundo o Bell Labs, 87% dos distúrbios que ocorrem no sistema elétrico são atribuídos a afundamentos de tensão, e de acordo com o EPRI (*Electric Power Research Institute*), 92% dos distúrbios de qualidade de energia são devidos a afundamentos de tensão para até 50% da tensão nominal, com duração de 500 ms [1].

Afundamentos de tensão com magnitude entre 65% a 51% da tensão nominal [2] e duração entre 3 e 30 ciclos [3] respondem pela grande maioria dos desligamentos de acionamentos de velocidade variável.

Diversos trabalhos que tratam da análise do desempenho dos AVVs sob afundamentos de tensão têm sido publicados e diferentes soluções para aumentar a tolerância dos AVV aos afundamentos de tensão têm sido propostas [4-10]. Dentre as soluções indicadas podem-se destacar a adição de capacitores ao elo cc do AVV para aumento do tempo de descarga do capacitor; mitigação regenerativa que trata do reaproveitamento da energia cinética do motor quando da redução de sua velocidade, convertendo-a em energia elétrica que é transferida para o elo cc; adição do neutro da fonte ao ponto médio do elo cc através de uma chave controlada; e a utilização de conversores *boost* conectados ao elo cc [8]. Uma comparação do custo-benefício de cada uma destas técnicas aponta a conexão de conversores *boost* ao elo cc como a que apresenta melhor desempenho técnico, ao mesmo tempo em que é uma das alternativas de menor custo dentre aquelas apresentadas [8]. A técnica de aumento da tolerância de AVVs a afundamentos de tensão através da

Artigo submetido em 31/08/2010. Primeira revisão em 15/04/2011; segunda revisão em 04/06/2011. Aceito para publicação em 04/06/2011 para a Sessão Especial por recomendação do editor especial Antonio J. Marques Cardoso.

conexão de conversor *boost* será descrita e avaliada neste artigo.

II. CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os afundamentos de tensão variam em magnitude e ângulo de fase à medida que se propagam no sistema elétrico. As características dos afundamentos variam segundo a causa, a distância elétrica ao ponto do distúrbio, a conexão do transformador pelos quais se propagam e o tipo de conexão da carga [11].

Na literatura, os afundamentos de tensão são classificados em sete categorias (Tipos A, B, C, D, E, F e G), classificados segundo o tipo de falta e o tipo de conexão da carga e do transformador à montante da carga.

A padronização de tipos de afundamentos que possam ser usados para projetar e avaliar a imunidade de equipamentos a afundamentos de tensão é uma necessidade da indústria e de fabricantes. Com base em estudos conduzidos pelo grupo de estudo JWG C4.110 do CIGRE/CIREN/UIE [12], [13], três dentre os sete tipos de afundamentos foram classificados com este fim, com base no número de tensões fase-neutro que apresentam uma significativa redução na magnitude de tensão. Os afundamentos selecionados são do tipo A, C e F, mostrados na Figura 1. O afundamento tipo A apresenta redução significativa nas três tensões fase-neutro, o tipo C em duas fases e tipo F em uma fase.

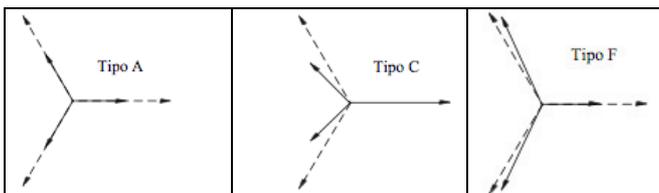


Fig. 1 Afundamentos de Tensão Classificados para Teste de Imunidade.

As expressões analíticas para o afundamento tipo A são mostradas nas equações (1), (2) e (3); para o tipo C, nas equações (4), (5) e (6) e para o F, em (7), (8) e (9) [11].

$$V_a = h \quad (1)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{\sqrt{3}}{2}h \quad (2)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{\sqrt{3}}{2}h \quad (3)$$

$$V_a = 1 \quad (4)$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}h \quad (5)$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h \quad (6)$$

$$V_a = h \quad (7)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h) \quad (8)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h) \quad (9)$$

O valor do parâmetro h ($0 \leq h \leq 1$) determina a magnitude em p.u. e o ângulo de fase da tensão fase-neutro. Para os afundamentos tipo A e F o valor de h define diretamente a magnitude do afundamento de tensão. A magnitude do afundamento tipo C porém, não depende diretamente de h . Para $h=0$, a magnitude do afundamento de tensão tipo C é igual a 0,5 p.u.

A imunidade dos equipamentos deve ser apresentada por uma curva de tolerância de tensão, que é uma maneira simples para fabricantes de equipamentos e usuários de seus equipamentos estabelecer troca de informação sobre o desempenho dos equipamentos a afundamentos de tensão [12]. A curva de tolerância de tensão descreve a capacidade do equipamento de suportar afundamentos de tensão. A curva de tolerância de tensão convencional é retangular como mostrado pela Curva 1 na Figura 2. Para afundamentos de tensão para V_{\min} p.u. com duração até t_{\min} segundos, o equipamento é capaz de operar normalmente. Afundamentos de tensão causados por curto-circuitos apresentam perfil de tensão retangular. No entanto, em indústrias com grandes motores de indução, a tensão não se restabelece imediatamente após a falta. Durante o afundamento de tensão, o torque e a velocidade do motor são reduzidos e quando a tensão recupera o motor demanda uma elevada corrente de *inrush* que pode causar um afundamento pós-falta. Neste caso, o perfil da tensão é não retangular, como mostrado na Curva 2 da Figura 2. Para perfil de tensão não retangular, a recuperação linear da tensão entre V_{\min} e V_{rem} ocorre no período de t_{\min} a t_1 . Após t_1 segundos do início do afundamento de tensão, a tensão é igual ou maior que V_{rem} , e a proteção não deve operar.

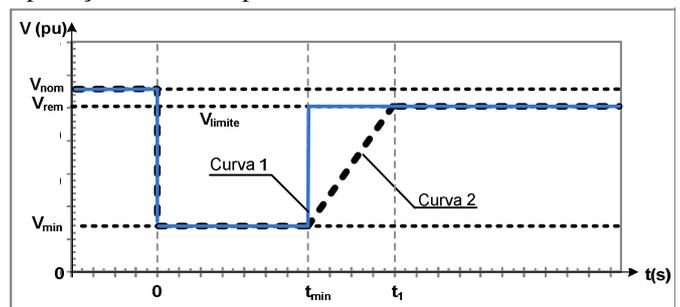


Fig. 2 Curva de Tolerância de Tensão.

Afundamentos de tensão com magnitude e duração que recaem sobre ou acima da curva de tolerância de tensão indicam que o equipamento deve apresentar imunidade e, portanto, continuar operando normalmente. Do contrário, o equipamento pode apresentar algum desvio podendo inclusive desligar, e a proteção de subtensão pode operar.

Segundo a norma IEC 61000-4-30 [14], a severidade em magnitude de um afundamento de tensão em sistemas trifásicos é definida como a menor das tensões medidas durante o afundamento. O afundamento tem início no instante em que o valor eficaz em uma ou mais das tensões medidas cai abaixo de um limite pré-estabelecido e termina quando o valor rms de todas as tensões medidas no ponto de monitoramento é igual ou maior do que o limite especificado; a duração é a diferença entre os instantes em que inicia e termina o afundamento de tensão.

Os valores para V_{\min} , t_{\min} e t_1 devem ser acordados entre fabricantes, usuários, agências reguladoras, pesquisadores e entidades de normatização. Pela Figura 2 verifica-se que a duração do afundamento de tensão depende do valor limite de tensão, o qual define o início e o fim do afundamento.

O valor V_{\min} em p.u. corresponde ao valor de h definidos para os afundamentos tipos A e F, enquanto que o tipo C tem valor mínimo igual a 0,5 p.u. como mencionado anteriormente.

III. CONVERSOR BOOST COMO ALTERNATIVA DE MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM AVV

O conversor *boost* é um conversor de energia cc-cc composto de indutor *boost*, diodo, chave eletrônica e capacitância de saída. Sua entrada tem característica de fonte de corrente, devido à presença do indutor em série com a fonte de tensão de alimentação, e saída com característica de fonte de tensão, o que é assegurado pelo capacitor conectado à saída do conversor *boost*. A característica principal de um conversor *boost* é prover tensão de saída V_o maior ou igual à tensão de entrada V_i , sendo a relação entre a entrada e a saída dada por (10).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)} \quad (10)$$

em que D é a razão cíclica, definida como a relação entre o tempo em que a chave eletrônica permanece fechada e o tempo em que permanece aberta. Verifica-se que para $D=0$ o ganho de tensão é unitário, e para D próximo à unidade o ganho de tensão cresce acentuadamente levando V_o a valores muito elevados. Por este motivo, na prática, aconselha-se trabalhar com valores de D menores que a unidade ($D < 1$) e em geral até 0,8.

A estratégia de empregar conversores *boost* na mitigação de afundamentos de tensão em AVV consiste em conectar o conversor aos terminais do elo cc do AVV (acessíveis externamente na maioria dos AVVs modernos), podendo a alimentação do *boost* ser independente (p.ex. com baterias) ou derivada da alimentação do AVV.

Para uma razão cíclica de até 0,8 o conversor *boost* é capaz de mitigar afundamentos de tensão para até 0,2 p.u. de tensão remanescente, mantendo uniforme a tensão no elo cc do AVV e tensão de saída do AVV constante.

O diagrama de um conversor *boost* conectado a um AVV com alimentação compartilhada é mostrado na Figura 3. O AVV é composto basicamente por um retificador de entrada, um filtro LC, um conversor cc-ca e um sistema de controle. O retificador de entrada é, na maioria dos casos, um retificador não controlado, não possuindo, portanto, a capacidade de regulação da tensão do elo cc. O filtro LC é capaz de limitar a corrente de carga do capacitor e filtrar harmônicas de corrente [15].

No conversor *boost*, a fonte cc está representada por um retificador trifásico de onda completa e um capacitor de alisamento da tensão de saída da ponte retificadora. Quando aplicado para aumentar a suportabilidade do AVV a afundamento de tensão, o capacitor da barra cc do AVV é normalmente usado como o capacitor de saída do *boost*.

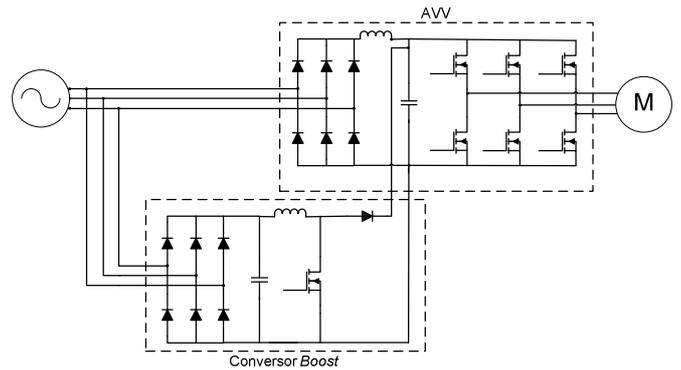


Fig. 3. Conversor *Boost* Conectado ao Elo cc de um AVV.

IV. PROJETO DE UM CONVERSOR BOOST PARA AUMENTO DE TOLERÂNCIA DE AVV A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

No projeto do conversor *boost* deve ser considerada a máxima severidade de afundamento de tensão que se deseja mitigar, em especial se o conversor compartilha da mesma fonte de alimentação que o AVV. Neste caso, para se manter uma tensão de saída constante, quanto menor o valor de tensão de entrada maior deverá ser o valor do ciclo de trabalho D do *boost*. Porém, como mencionado anteriormente, a razão cíclica recomendada para operar o conversor *boost* é de até 0,8. Assim, não é recomendável a aplicação do conversor para mitigar afundamentos de tensão que levem sua tensão de entrada retificada para valores menores que 0,2 p.u.

Neste trabalho o conversor *boost* compartilha a mesma fonte de alimentação que o AVV. Assim, embora haja a restrição quanto à máxima intensidade de afundamento de tensão mitigável, não há restrições quanto à duração do evento já que o conversor pode operar enquanto durar o afundamento. Por outro lado, em casos em que o conversor *boost* é alimentado por uma fonte independente, o conversor poderá mitigar afundamentos de tensão de qualquer intensidade, já que sua tensão de entrada é fixa, porém, quanto menor a autonomia da fonte independente de alimentação do conversor *boost*, menor o tempo que o conversor poderá suprir energia à barra cc do AVV. Assim sendo, a alimentação independente do conversor *boost* requer que seja considerada a duração máxima de afundamento que se deseja mitigar, enquanto que compartilhando da mesma alimentação do AVV, deve-se considerar a máxima intensidade de afundamento a mitigar.

Quanto ao controle do conversor *boost*, este deve ser projetado para apresentar uma resposta rápida a fim de atender a característica própria dos afundamentos de tensão, que é de rápida redução no valor da tensão, evitando assim alteração na velocidade do motor. No entanto, embora a resposta do controle necessite ser rápida, o sinal de controle não pode exceder a especificação de sobretensão do AVV, desta forma, é importante que seja implementada uma função de *shutdown* no controle do *boost*.

A. Especificação do Conversor Boost

O conversor *boost* foi projetado para mitigar afundamentos de tensão de até 0,5 p.u. de tensão remanescente na entrada retificada, considerando que esse

valor corresponde à maior parte dos casos de afundamentos de tensão, como anteriormente mencionado.

O AVV trifásico usado nos ensaios foi alimentado com tensão nominal de linha de 220 V. A tensão nominal do elo cc do AVV equivale, portanto, à tensão de pico da rede de alimentação, i.e., 311Vcc. A fim de que em regime permanente o diodo *boost* permaneça reversamente polarizado, a tensão nominal de entrada retificada do conversor *boost*, V_i , foi especificada em 300Vcc. Desta forma a tensão cc mínima de entrada do conversor deve ser 150Vcc, valor este equivalente a 50% da tensão cc de entrada.

A potência P_{out} do conversor *boost* adotada para o projeto foi de 200 W para alimentar um AVV de 250 W, que por sua vez alimenta um motor de indução trifásico de 0,25 hp (186,5W). Assumiu-se, para simplificar o projeto, a potência de entrada P_{in} do *boost* igual à de saída.

A frequência de chaveamento do conversor, f_s , foi adotada como 40 kHz, valor típico para uso em conversores com comutação dissipativa [16].

Assumiu-se ainda, como critério para o projeto, uma ondulação de corrente no indutor, ΔI_L , de 10% da corrente máxima, I_{Lmax} . A corrente máxima no indutor I_{Lmax} pode ser calculada com base na potência de entrada e na tensão mínima de entrada do conversor, como mostrado em (11). Como a menor tensão de entrada admitida no projeto é de 150 V, e a potência de entrada é de 200 W, então resulta em I_{Lmax} igual a 1,33 A. Assim, a ondulação de corrente no indutor deverá ser de 0,13 A.

$$I_{Lmax} = \frac{P_{in}}{V_{i\min}} \quad (11)$$

B. Cálculo do Indutor Boost

O cálculo do indutor *boost* é feito a partir da menor tensão de entrada, $V_{i\min}$, da ondulação de corrente especificada para o indutor, ΔI_L , da razão cíclica, D , e da frequência de chaveamento, f_s , como se segue em (12).

$$L = \frac{V_{i\min} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (12)$$

O ciclo de trabalho a ser utilizado no cálculo de L deve ser aquele que corresponde à mínima tensão de entrada, ou seja, a máxima razão cíclica assumida no projeto, que é de 0,5. Assim, com base em (12) a indutância do conversor é de 14 mH.

A metodologia para ser definido o núcleo magnético a ser utilizado pode ser encontrada em [2] e [16].

C. Capacitor do Filtro de Saída

Em aplicação para mitigação de afundamentos de tensão em AVVs, o filtro capacitivo de saída do conversor *boost* pode ser dispensado para que haja a redução de custos em sua implementação, já que a saída do conversor deverá ser conectada ao elo cc do AVV, onde há a presença de uma capacitância maior, em geral, que aquela que seria especificada como filtro de saída do conversor. Assim, foi verificada a presença de um capacitor de 330 μ F no elo cc do AVV, que é usado como capacitância de filtro do conversor *boost*.

D. Dimensionamento do Diodo Boost

O dimensionamento do diodo *boost* deve ser feito com base no valor da máxima corrente eficaz que o diodo conduzirá, a qual corresponde à máxima corrente do indutor *boost*. Isso ocorre quando a tensão de entrada é mínima, ou seja, quando a corrente de entrada e a razão cíclica são máximas. Logo, a corrente eficaz do diodo, I_{dEF} , será calculada por (13) em que $I_{inmax} = I_{Lmax}$. Desta forma, a corrente para a qual deve ser especificado o diodo do conversor deve ser igual a 0,94 A.

$$I_{dEF} = \sqrt{1-D} \cdot I_{in\max} \quad (13)$$

A máxima tensão à qual o diodo *boost* deverá ficar submetido quando reversamente polarizado deve ser a própria tensão de saída do conversor V_o . Porém, é recomendado que o diodo seja dimensionado para uma tensão V_d 20% superior, logo a tensão reversa que o diodo deve suportar é de 360 V.

E. Dimensionamento do Transistor

O transistor utilizado no projeto do conversor *boost* pode ser IGBT ou MOSFET. Caso seja utilizado um IGBT este deve ser dimensionado com base no máximo valor médio de corrente previsto em seus terminais. No caso de ser utilizado um MOSFET, o dimensionamento deve ser baseado na máxima corrente eficaz especificada que fluirá através do MOSFET.

O valor médio, I_{smed} , e o eficaz, I_{sEF} , da corrente através da chave podem ser calculados com base em (14) e (15), respectivamente:

$$I_{smed} = D \cdot I_{in\max} \quad (14)$$

$$I_{sEF} = \sqrt{D} \cdot I_{in\max} \quad (15)$$

Como resultado, um IGBT deve ser especificado para $I_{smed} = 0,66$ A. Por sua vez, um MOSFET deve ser dimensionado para suportar pelo menos o valor de corrente eficaz igual a 0,94 A.

A tensão de operação do transistor, V_s , deve ser igual ou superior à tensão de saída V_o , já que quando o mesmo está bloqueado, o diodo está diretamente polarizado e a tensão de saída é diretamente aplicada ao transistor. Desta forma, atribuindo-se um valor 20% superior, tem-se V_s igual a 360 V.

Seguindo os critérios mencionados nesta seção, as especificações do conversor *boost* resultam como mostradas na Tabela I.

TABELA I
Especificações do Conversor Boost

V_i	150-300 V	L	14 mH
V_o	300 V	$I_{d,ef}$	0,94 A
P_{in}	200 W	V_d	360 V
P_{out}	200 W	$I_{s,med}$	0,66 A
f_s	40 kHz	$I_{s,ef}$	0,94 A
ΔI_L	0,13 A	V_s	360 V

F. Controle Modo Corrente Média

O controle do *boost* é baseado no modo corrente média, adequado para a aplicação proposta por permitir uma tensão de saída do *boost* com poucas variações, o que assegura uma adequada tensão no elo cc do AVV, além de impedir que haja variações significativas na corrente de entrada, evitando assim, por ocasião de afundamentos de tensão, grandes variações de corrente, o que sensibilizaria a proteção contra

sobrecorrete do AVV. O controle modo corrente média melhora a resposta dinâmica do sistema, a imunidade a ruídos e o erro estático, introduzindo um alto ganho em baixas frequências e integrando o erro do amplificador de corrente [17].

O diagrama de blocos do controle modo corrente média é mostrado na Figura 4 [18]. A malha dentro da região tracejada corresponde à malha de controle de corrente, enquanto que a malha externa representa a malha de controle de tensão que gera a referência da malha de corrente.

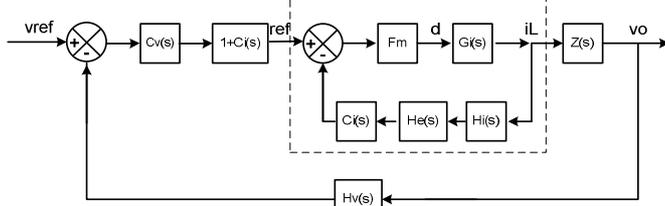


Fig. 4. Diagrama de Blocos do Controle Modo Corrente Média.

Na malha de corrente, F_m é o ganho do modulador, $G_i(s) = i_L/D$ é a função de transferência que relaciona corrente no indutor com a razão cíclica, $H_i(s)$ é o ganho de amostragem de corrente, $H_e(s)$ é um ganho de amostragem que representa as não idealidades que não são consideradas na modelagem, principalmente, em altas frequências e $C_i(s)$ a função de transferência do compensador de corrente. Na malha de tensão, $C_v(s)$ é o compensador de tensão, $H_v(s)$ o ganho de amostragem de tensão e $Z(s) = v_o/i_L$ é a função de transferência que relaciona a tensão de saída com a corrente no indutor. As equações (16) a (23) mostram as funções de transferência (FT) representadas no diagrama de blocos da malha de controle do *boost*.

$$G_i(s) = \frac{V_o}{L \cdot s} \quad (16)$$

$$H_e(s) = 1 + \frac{s}{\omega_n \cdot Q_z} + \frac{s^2}{\omega_n^2} \quad (17)$$

em que,

$$\omega_n = \pi \cdot f_s \quad (18)$$

$$Q_z = -\frac{2}{\pi} \quad (19)$$

e

$$F_m = \frac{1}{V_D} \quad (20)$$

$$H_i = M \cdot R_s \quad (21)$$

$$C_i(s) = \frac{1}{k_1} \cdot \frac{s + k_2}{s \cdot (s + k_3)} \quad (22)$$

$$H_v = \frac{V_{ref}}{V_o} \quad (23)$$

$$Z(s) = (D-1) \cdot \frac{R \cdot r_c}{R + r_c} \cdot \frac{s + \frac{1}{r_c \cdot C}}{s + \frac{1}{(R + r_c) \cdot C}} \quad (24)$$

$$C_v(s) = k_4 \cdot \frac{s + k_5}{s} \quad (25)$$

Na equação (20), V_D é a amplitude da portadora em (21), R_s é a resistência de amostragem de corrente e M é o ganho do amplificador diferencial de amostragem de corrente; em (22), k_1 , k_2 e k_3 são as constantes do compensador de corrente definidas em [15.]; em (23), V_{ref} é a referência da malha de tensão; em (24), R é a resistência de carga e r_c a resistência série do capacitor e em (25), k_4 e k_5 são as constantes do compensador de tensão definidas em [15].

1) *Malha de corrente* – O ganho da função de transferência em malha aberta da planta de corrente, $FTMA_i$, em baixas frequências é baixo, o que implica em erro estático. Para corrigir o problema, foi implementado um compensador PI com filtro capacitivo, que possui um zero alocado convenientemente para que a frequência de cruzamento ocorra no ponto desejado de 20 db/dec, conforme sugestão da teoria de controle de fontes chaveadas [12], [16], um pólo na origem e outro que pode ser alocado numa frequência qualquer, no caso usado para compensar um zero da planta em altas frequências. O pólo na origem inserido pelo compensador minimiza o erro estático. Os pólos e zeros do compensador foram alocados de acordo com os critérios adotados em [19].

Assim, a alocação de pólos, após ajustes para se obter melhor margem de fase e ganho, resulta em: $f_{ci}=3,33$ kHz, frequência de cruzamento da malha de corrente; $f_z=83$ Hz, frequência do zero do compensador; e $f_p=20$ kHz, frequência do pólo do compensador.

2) *Malha de tensão* – A malha de tensão compreende além da malha de corrente, o ganho de amostragem de tensão, H_v , a função de transferência da planta de tensão v_o/i_L que é apresentada no diagrama de blocos da Figura 4 como $Z(s)$, e o bloco $C(s) = 1 + C_i(s)$.

O ganho de amostragem de tensão é feito através de um divisor resistivo colocado na saída do conversor *boost*. O valor é ajustado de tal forma que quando a saída de tensão estiver em seu valor nominal de 300 V, a tensão amostrada tenha seu valor igual à tensão de referência, V_{ref} , adotado em 3 V.

A função de transferência em malha aberta para malha de tensão, $FTMA_v$, feitas simplificações válidas para baixas frequências [15], possui margens de ganho e de fase infinitas. Isto implica que o sistema é estável. Porém, é necessário o aumento do ganho em baixas frequências para diminuir o erro estático da tensão de saída do conversor. Para compensar o sistema em malha aberta e adequar seu comportamento aos padrões exigidos pela teoria de fontes chaveadas, foi projetado um compensador PI. O compensador PI possui um pólo na origem e um zero em uma frequência convenientemente escolhida para compensar um pólo de $FTMA_v$, e garantir a inclinação de -20 dB/dec na frequência de cruzamento.

A frequência de cruzamento da malha de tensão deve ser bem inferior à frequência de cruzamento da malha de corrente por ser a carga do tipo não linear, como foi indicado anteriormente.

Com base no exposto, são adotados os seguintes critérios: $f_{cv}=12\text{Hz}$, frequência de cruzamento da malha de tensão; e $f_z=f_{cv}/10$, frequência do zero do compensador. A partir destes critérios, obteve-se a função de transferência em laço aberto, $FTLA_v$, que apresenta um alto ganho em baixas frequências e uma frequência de cruzamento de 13 Hz a cerca de -20 dB/dec.

Outra possibilidade para a implementação desta técnica é a modificação do hardware de um AVV, utilizando a própria indutância e a ponte retificadora do AVV para construir um estágio *boost*. Neste caso, são necessários apenas a inserção de uma chave eletrônica em derivação e um diodo em série antes do estágio de inversão de frequência [20]. Esta solução apresenta como vantagem a redução do volume do sistema e a economia de componentes eletrônicos, além de dispensar a construção de um indutor. Entretanto, a indutância típica de AVVs é da ordem de μH , bem inferior àquela calculada em (12), que foi de 14 mH. Para que fosse possível o uso da indutância própria do AVV, seria necessário utilizar-se uma frequência de chaveamento da ordem de MHz, muito superior àquela adotada, de modo a evitar uma grande ondulação de corrente. A elevada frequência de chaveamento possibilita o surgimento de problemas relacionados à compatibilidade eletromagnética, exigindo a implementação de uma comutação suave na chave eletrônica, o que aumentaria a complexidade do projeto. Outro problema seria a necessidade da alteração do controle do AVV, o que precisaria ser feita na fábrica, quando se tratar de um equipamento comercial. Seria ainda necessária a verificação da capacidade de condução de corrente no retificador de entrada do AVV, pois uma alteração de hardware como esta poderia proporcionar elevadas correntes no retificador de entrada durante os afundamentos de tensão [15], podendo causar sobreaquecimento e danos ao retificador. Além disso, deveria ser feita uma correção de fator de potência no estágio *boost*, já que o mesmo permaneceria em série com o estágio de inversão em regime permanente. Na estrutura aplicada neste trabalho, com conversor *boost* conectado em paralelo com o elo cc do AVV, o *boost* opera apenas enquanto duram os afundamentos, dispensando uma correção de fator de potência, e podendo trabalhar em frequências de chaveamento bem inferiores àquela que seria usada no caso do conversor *boost* em série com a retificação do AVV. Para a configuração de conversor *boost* em paralelo, a indutância utilizada em seu projeto pode ser escolhida conforme a frequência de chaveamento e a ondulação de corrente que se deseja. No tipo de estrutura utilizada, as possíveis grandes correntes que surgem durante os afundamentos de tensão não passam pelo retificador do AVV, e o retificador em paralelo, na entrada do conversor *boost*, é projetado de modo a suportá-las. Assim, em aplicações em que se deseja aumentar a tolerância a afundamentos de tensão de um AVV comercial já em operação dentro de um processo, a solução do conversor *boost* em paralelo com o estágio de retificação do AVV é mais apropriada, por dispensar modificações de hardware e permitir a operação em frequências da ordem de kHz, evitando maiores problemas de compatibilidade eletromagnética.

V. TESTE E ANÁLISE NO SISTEMA DE ACIONAMENTO

Ensaio de tolerância a afundamentos de tensão foram realizados com um AVV cujas características estão descritas na Tabela II.

Potência (cv)	1/3
Potência (W)	250
Tensão de linha nominal de entrada (V)	230
Corrente nominal (A)	1,7

Para testar a tolerância do sistema de acionamento a afundamentos de tensão, uma fonte de distúrbios foi usada para programação dos afundamentos. Os afundamentos do tipo A, que não sofrem deslocamento angular, foram aplicados conectando-se o AVV diretamente à fonte programável de distúrbios. Em se tratando dos afundamentos dos tipos C e F, onde ocorrem deslocamentos angulares, as fontes programáveis de distúrbio não oferecem recurso para programar variação simultânea na magnitude e no ângulo de fase da tensão. Arranjos e aproximações precisam ser feitos para usar a fonte teste disponível. A fonte programável foi conectada então ao primário de um transformador trifásico com conexão Y-d como ilustrado na Figura 5, e em seu primário foram aplicados afundamentos tipo B e E.

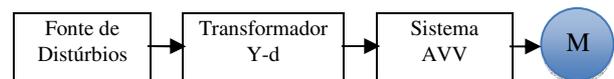


Fig. 5. Layout da Bancada de Teste.

A conexão dos transformadores tem influência no tipo de afundamento de tensão visto pela carga no secundário. Os afundamentos de tensão tipo B e E, que não produzem deslocamento angular, se propagam para o secundário do transformador Y-d como afundamentos tipo C* e F, respectivamente, com deslocamentos angulares conforme mostra a Figura 6.

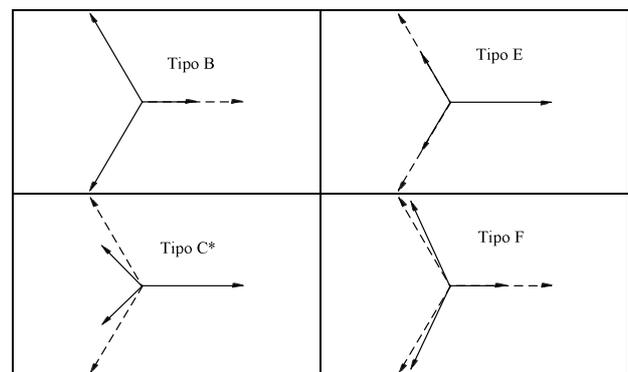


Fig. 6. Características dos afundamentos de tensão tipo B, E, C* e F.

O afundamento de tensão tipo C* é semelhante em padrão ao tipo C, sendo este último mais severo em magnitude. Em ambos os tipos (Figura 1 e Figura 6), uma fase não sofre redução em magnitude e as outras duas reduzem em magnitude e se aproximam uma da outra. Na expressão do afundamento tipo C, o termo h deve ser substituído por

$h' = (1 + 2h)/3$ para definir o afundamento tipo C*. Assim, para $h=0$ enquanto o valor mínimo do afundamento tipo C é 0,5 p.u., o do tipo C* é de 0,56 p.u.

Os testes de avaliação do desempenho do AVV sem e com *boost* foram realizados para os afundamentos tipo A, C* e F. As recomendações em [12] sobre o ponto de aplicação do afundamento e as condições pré-falta foram também observadas.

Os valores de magnitude e duração adotados em cada evento foram tais que proporcionassem uma queda na tensão do elo cc até que fosse sensibilizada sua proteção de subtensão, o que ocorre em 0,7 p.u., i.e., 210 V, no caso do AVV ensaiado.

Durante os testes, a tensão do elo cc e a tensão de saída do AVV sem e com *boost* foram monitoradas. A seguir são apresentados inicialmente os resultados dos testes para os afundamentos tipo A, C* e F para o AVV sem *boost* acionando motor de indução a plena carga.

A. Afundamento de Tensão Tipo A

Os afundamentos de tensão do tipo A são os mais severos, pois afetam com mesma severidade todas as tensões de fase e, por conseguinte, as tensões de linha.

Um afundamento do tipo A para 0,7 p.u. ($h=0,7$) e duração igual ou superior a 200 ms (12 ciclos) leva o AVV a atingir o limite da tensão de *trip*, como pode ser visto na Figura 7.

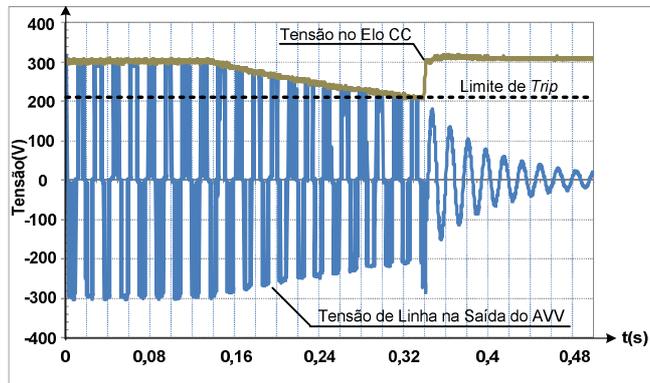


Fig. 7. Atuação da proteção de subtensão do AVV.

A linha tracejada indica o limite de *trip*, i.e., o limite de tensão igual a 210 V para o qual a proteção de subtensão do AVV é sensibilizada. Pode-se observar que no instante em que a tensão do elo cc atinge o limite indicado pela linha tracejada, a tensão de saída do AVV é desenergizada.

O tempo para a atuação da proteção está relacionado ao tempo de descarga da capacitância do elo cc, que é desde o início do evento até a tensão alcançar o nível de *trip*, que equivale a 200 ms para afundamento tipo A para 0,7 p.u. Assim, qualquer afundamento de tensão de duração igual ou superior a 200 ms e intensidade tal que não possa sustentar a tensão do elo cc acima de 0,7 p.u., provocará a ação da proteção de subtensão.

Considerando que a tensão do elo cc é formada a partir de uma retificação trifásica com baixa ondulação, devido à presença de um capacitor de alisamento, em condições normais a tensão no elo cc se aproxima do valor de pico da tensão de linha na entrada do AVV. Durante um

afundamento de tensão simétrico (tipo A), a tensão do elo cc é afetada na mesma proporção das fases. Quando da ocorrência de um evento assimétrico, o valor máximo da tensão do elo cc será o mesmo da amplitude da tensão de linha menos afetada pelo afundamento, com uma ondulação que dependerá das amplitudes das outras tensões de linha. Desta forma, em eventos assimétricos, não há uma relação direta entre a severidade do evento e o nível da tensão do elo cc. Entretanto, pode-se afirmar que um afundamento de tensão de duração igual ou maior que 200 ms poderá levar o AVV a um desligamento por subtensão desde que não haja ao menos uma tensão de linha capaz de manter a tensão do elo cc acima do nível de *trip*.

B. Afundamento de Tensão Tipo C*

A maior severidade do afundamento tipo C* ocorre para $h=0$, levando as magnitudes de V_b e V_c para 0,56 p.u. e V_a permanecendo igual a 1 p.u. As magnitudes de tensões de linha, por sua vez, tornam-se iguais a $V_{ab}=V_{ca}=0,88$ p.u. enquanto $V_{bc}=0,33$ p.u. As duas tensões de linha menos afetadas são suficientes para manter a tensão do elo cc em cerca de 0,87 p.u., i.e., 260 V, valor pouco inferior àqueles das tensões de linha menos afetadas devido a uma breve ondulação. Para uma condição de tensão no elo cc igual 0,87 p.u. mantida por 15 ciclos o AVV foi capaz de suportar o afundamento de tensão como pode ser visto na Figura 8 quando a tensão do elo cc não ultrapassou o limite de *trip*. Observa-se pela Figura 8 que, mesmo que a duração do afundamento seja maior que 15 ciclos, o afundamento de tensão tipo C* não será capaz de desligar o AVV.

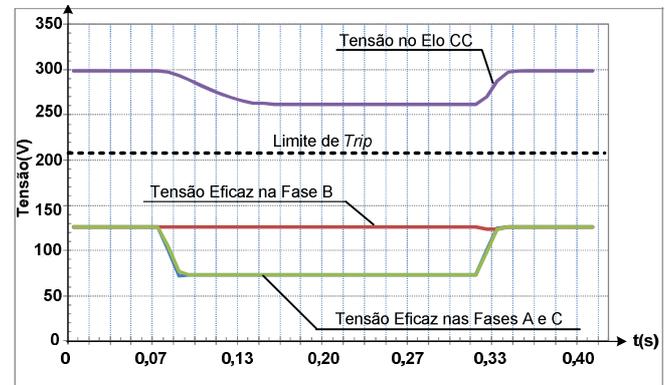


Fig. 8. Curvas de tensão de entrada e tensão no elo cc para afundamento tipo C*.

C. Afundamento de Tensão Tipo F

Um afundamento de tensão assimétrico, tipo F, para $h=0,1$ e duração de 15 ciclos foi testado, o qual leva o AVV sem *boost* a desligar.

A Figura 9 mostra o decaimento da tensão do elo cc até atingir o nível de atuação da proteção de subtensão do AVV.

Como podem ser observadas, as duas tensões de fase menos afetadas, V_b e V_c , atingem o nível de tensão de 77 V, aproximadamente 0,61 p.u., enquanto que a fase mais atingida alcança 13 V, o que equivale a 0,1 p.u.

Em termos de tensões de linha, as tensões com afundamento mais severo chegam a 0,36 p.u., enquanto que a menos atingida chega a 0,7 p.u. Embora uma das tensões de linha se mantenha dentro do patamar de 0,7 p.u., que é o

limite de suportabilidade do AVV, esta não é suficiente para manter a tensão do elo cc dentro dos limites aceitáveis devido à ondulação provocada pela maior queda das outras duas tensões de linha.

Os testes que se seguem são realizados no AVV com *boost* para o qual foi projetado. Os mesmos tipos de afundamentos de tensão A, C* e F foram aplicados na alimentação do sistema de acionamento.

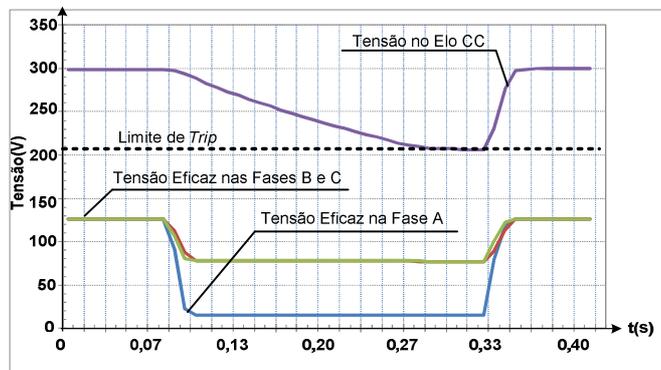


Fig. 9. Curva de tensão do elo cc ultrapassando o limiar de *trip* em afundamento tipo F.

D. Afundamento de Tensão Tipo A

Um afundamento de tensão do tipo A para 0,5 p.u. e 15 ciclos de duração foi aplicado ao AVV, desta feita com o conversor *boost* conectado aos terminais do elo cc do AVV. O limite de 0,5 p.u. ou 150 V de entrada foi escolhido de acordo com a especificação da razão cíclica máxima de 50% do conversor *boost*.

O resultado do teste realizado é mostrado na Figura 10. Verifica-se que a tensão do elo cc atinge seu valor mínimo de aproximadamente 278 V, acima, portanto, do limite para a atuação da proteção de subtensão do AVV, estabelecendo-se, após o transitório, em 280 V, aproximadamente. O conversor *boost* começa a atuar quando a tensão do elo cc atinge 290 V, o que ocorre cerca de 20 ms após o início do evento.

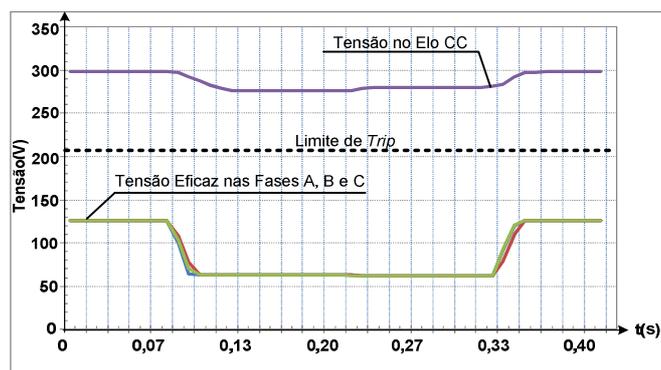


Fig. 10. Afundamento de tensão tipo A para 0,5 p.u. de 15 ciclos.

E. Afundamento de Tensão Tipo C*

Novamente um afundamento de tensão tipo C* de 15 ciclos e $h=0$ foi aplicado, agora com a conexão do conversor *boost* ao AVV. Como é apresentado na Figura 11, assim como no caso anterior, o conversor *boost* começa a atuar após cerca de 20 ms do início do distúrbio, mantendo a tensão do elo cc em um nível de tensão de cerca de 280 V. Embora, mesmo sem a

presença do conversor *boost*, um afundamento de tensão deste tipo não tenha a capacidade de provocar a atuação da proteção do AVV, foi visto que sem a presença do conversor *boost*, a tensão do elo cc atinge 260 V, o que comprometeria o nível da tensão de saída do AVV e conseqüentemente o torque da máquina alimentada. Com o conversor *boost* conectado, a redução da tensão do elo cc é menor, havendo, portanto, menor comprometimento do nível de tensão de saída do AVV e do torque da máquina alimentada.

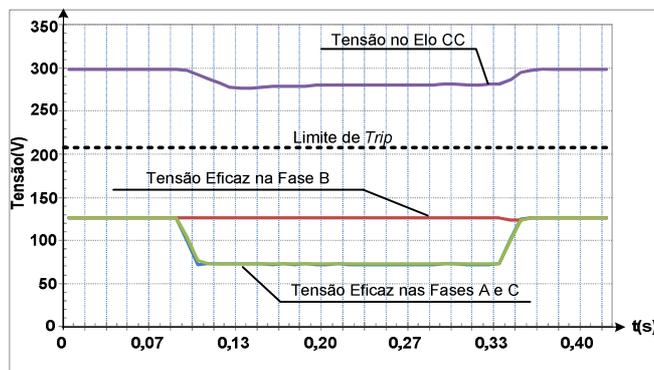


Fig. 11. Afundamento de tensão tipo C* de 15 ciclos.

F. Afundamento de Tensão Tipo F

Novamente, com o conversor *boost* conectado ao elo cc do AVV, foi realizado teste com um afundamento do tipo F de 15 ciclos, desta vez com $h=0$, isto é, em sua máxima intensidade. Os resultados estão apresentados na Figura 12. As fases menos atingidas caem para 0,55 p.u., ao passo que a fase mais atingida sofre um afundamento pleno, para 0 p.u. (interrupção de curta duração). Assim como nos casos anteriores, o conversor *boost* consegue garantir a tensão do elo cc em cerca de 280 V, após um breve transitório. Um evento deste tipo teria levado o AVV a ter sua proteção de subtensão sensibilizada, sem a presença do conversor *boost*. Desta forma, o conversor tem a capacidade de mitigar qualquer afundamento do tipo F, enquanto o mesmo perdurar.

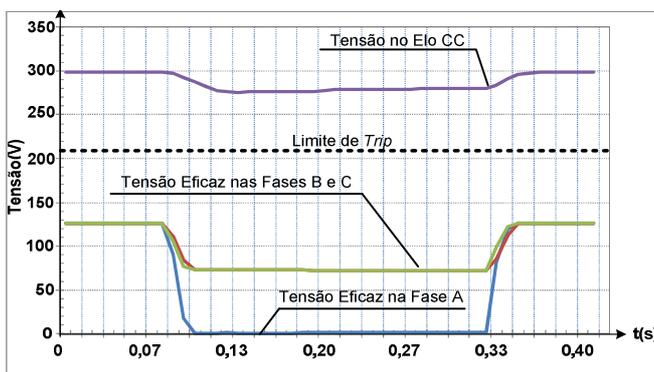


Fig. 12. Afundamento de tensão tipo F de 15 ciclos.

Embora o AVV com *boost* seja capaz de suportar afundamentos de tensão simétrico, tipo A, para 0,5 p.u. e assimétricos, tipo C* para 0,56 p.u. e tipo F para 0,0 p.u., para qualquer duração, o período de 15 ciclos foi considerado nos testes para mostrar a atuação do conversor *boost* sobre a tensão do elo cc cuja tensão é acomodada no patamar de 280

V, equivalente a 0,93 p.u. para todos afundamentos considerados, ao mesmo tempo em que pode ser vista a resposta do sistema de acionamento pós-afundamento de tensão.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um conversor *boost* para aumentar a suportabilidade de AVVs comerciais a afundamentos de tensão. Baseados em resultados experimentais, verificou-se que os AVVs são bastante sensíveis a afundamentos de tensão, podendo alguns tipos e severidade de afundamentos provocarem o desligamento do AVV pela atuação de sua proteção de subtensão, com prejuízos aos processos nos quais estão inseridos. Um conversor *boost* foi projetado usando controle modo corrente média, e todas as etapas do projeto apresentadas de forma sequenciada, sendo possível ser facilmente reproduzidas. O conversor *boost* é simples em sua concepção e robusto em seus resultados. Com os experimentos realizados, pôde-se comprovar a eficácia do conversor *boost* na mitigação de afundamentos de tensão dos tipos A, C* e F, os quais são recomendados para teste de tolerância de equipamentos eletrônicos trifásicos. Os afundamentos tipo C* e F foram aplicados em suas severidades máximas, enquanto que o tipo A para até 0,5 p.u., sem limitação no tempo de duração dos afundamentos. Vale ressaltar, que se o conversor *boost* houvesse sido projetado para razão cíclica maior que 50%, afundamentos de tensão tipo A (os mais críticos) de severidade maior do que 0,5 p.u. poderiam ser mitigados. A razão cíclica de 80% é o valor considerado limite para a estabilidade do conversor *boost*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Finep pelo suporte laboratorial concedido ao Grupo de Processamento e Controle do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS

- [1] A.T. de Almeida, F.J.T.E Ferreira, D. Both, "Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives with Electric Motor Systems", *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 41, n°. 1, Jan/Feb 2005.
- [2] R. Glickman, T. Bernhardt, "Riding Through Unstable Power Conditions With VFDs", *EC&M: Electrical Construction and Maintenance*. June/2005.
- [3] *IEEE Std. 1159-1995 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE PRESS. NOVA IORQUE. 1995, E-ISBN: 0-7381-1114-7.
- [4] K. Stockman, F. D'hulster, M. Didden, R. Belmans. "Embedded Solutions to Protect Textile Processes against Voltage Sags", *37th Annual Meeting of the Industry Applications Conference*. Vol.4, pp. 2561-2566, Oct. 2002.
- [5] P.C.A. Leão, K.D. Rodrigues, J.C. de Oliveira, "Conversores de Frequência VSI-PWM Submetidos a Afundamentos Temporários de Tensão", *Revista Controle & Automação*, Vol.14 no.1, Jan./Mar. 2003.
- [6] I.C. de Albuquerque, R.P.S. Leão, "Evaluating ASD Performance under Short Duration Voltage Variation", *IEEE Transm. & Distr. Conference, IEEE/PES T&D 2002 Latin America*, São Paulo, 2002. v.1. pp.1 – 6.
- [7] M.H.J. Bolen, L.D. Zhang, "Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-Phase Balanced and Unbalanced Sags", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 333, May/June 2000.
- [8] N. X. Melo, R. P. S. Leão, R. P. T. Bascopé, F.L.M. Antunes, "A Boost Converter to Improve the Low Voltage Ride-Through Capability of an Adjustable Speed Drive", in *IX Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, 2007, Blumenau. *COBEP 2007*, 2007.
- [9] C.M.C. de Brito, R.P.S. Leão, F.L.M. Antunes, "Avaliação da Proteção e do Acionamento de um Motor de Indução e de Métodos para Melhoria de sua Suportabilidade sob Afundamentos de Tensão", *Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, v. 1, p. 9-16, 2005.
- [10] A. Von Jouanne, P.N. Enjeti and B. Banerjee, "Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 4, July/August 1999.
- [11] M.H.J Bollen, *Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions*, New York: IEEE Press, 2000.
- [12] Voltage Dip Immunity of Equipment and Installations. *ELECTRA*, n° 249, pp. 51, April 2010.
- [13] M.H.J. Bollen, J.R. Gordon, S.Z. Djokic, K. Stockman, J.V. Milanovic, R. Neumann, G. Ethier, "Voltage-dip immunity: statistics and need for further work", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality; ICREPQ'10*, March 2010, pp.1-6.
- [14] IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. Edition 2.0, 2008.
- [15] N. X. Melo, "Conversor Boost para Mitigação de Afundamentos de Tensão em Acionamentos de Velocidade Variável", Dissertação de mestrado, *Universidade Federal do Ceará – UFC*, Fortaleza, Maio, 2007.
- [16] I. Barbi. "Eletrônica de potência: Projetos de Fontes Chaveadas", *Edição do Autor*, Florianópolis. 2001.
- [17] L.H. Dixon. "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies". *Unitrode Application Note U-140*, Unitrode Power, pp.3-356 to 3-368, 1990.
- [18] G. Garcerá; E. Figueures; A. Mocholí. "Novel Three-Controller Average Current Mode Control of DC-DC PWM Converters with Improved Robustness and Dynamic Response", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, No. 3. May 2000.
- [19] W. Tang, F.C. Lee, R.B. Ridley, "Small-Signal Modeling of Average Current-Mode Control". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 8. no. 2. April 1993.
- [20] C. Klumpner, F. Blaabjerg, P. Thøgersen. "Evaluation of the Converter Topologies Suited for Integrated Motor

Drives". *38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference*. Vol. 02. pp 890-897. Oct. 2003.

DADOS BIOGRÁFICOS

Nelber Ximenes Melo, graduado e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará. Professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – Campus Avançado de Sobral.

Ruth Pastôra Saraiva Leão, graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará, com especialização pela Universidade Estadual de Campinas, doutorado pela University of Technology (Inglaterra) e pós-doutorado por Kassel Universität (Alemanha). É professora no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

René Pastor Torrico Bascope, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidad Mayor de San Simon (Bolívia), com mestrado e doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

Fernando Luiz Marcelo Antunes, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará, com mestrado pela Universidade de São Paulo, doutorado pela University of Technology (Inglaterra) e pós-doutorado por Kassel Universität (Alemanha). É professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

Raimundo Furtado Sampaio, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Fortaleza e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará. Professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – Campus Avançado de Sobral.

Janaína Barbosa Almada, graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará e em mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Ceará.