

AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO DO ACIONAMENTO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO E DE MÉTODOS PARA MELHORIA DE SUA SUPORTABILIDADE SOB AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Claudio Marzo Cavalcanti de Brito, Ruth Pastôra Saraiva Leão e Fernando Luiz Marcelo Antunes

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará
CEP 60455-769, C.P.6001, Fortaleza - CE
Brasil

e-mail: marzo@dee.ufc.br; rleao@dee.ufc.br; fantunes@dee.ufc.br

Resumo - Este artigo avalia o ajuste de um sistema de proteção de um acionamento de velocidade variável de um motor de indução trifásico submetidos a afundamentos de tensão simétricos e assimétricos. Testes foram realizados para avaliar o comportamento da tensão no elo CC e da corrente de alimentação do acionamento de velocidade variável sob afundamentos de tensão com o intuito de estabelecer seus limites de tolerância. São analisadas as técnicas de regeneração de energia, adição de neutro, e aplicação de conversor *boost* para aumento da suportabilidade do acionamento aos afundamentos de tensão. Resultados de testes em laboratório e de simulação são apresentados.

Palavras-Chave – Acionamento de velocidade variável, afundamentos de tensão, métodos de mitigação para acionamento CA, motor de indução.

EVALUATION OF THE PROTECTION OF AN INDUCTION MOTOR DRIVE AND APPROACHES TO IMPROVE ITS RIDE THROUGH UNDER VOLTAGE SAGS

Abstract – This paper evaluates the settings of the protection system of an adjustable speed drive of a three phase induction motor under symmetrical and asymmetrical voltage sags. Tests were accomplished to evaluate the behavior of the voltage at the DC bus and of the current of the drive under voltage sags with the purpose of establishing the limits of tolerance of it. Techniques such as energy regeneration, addition of neutral and boost converter to improve the drive ride through are evaluated. The results of tests in laboratory and of simulation are presented.

Keywords – Adjustable speed drive, induction motor, mitigation methods for ac drives, voltage sags.

Artigo Submetido em 31/05/2005. Primeira revisão em 12/08/2005. Aceito sob recomendação do Editor Especial Prof. Edson H. Watanabe.

NOMENCLATURA

AVV	Acionamento de velocidade variável.
MIT	Motor de indução trifásico.

I. INTRODUÇÃO

De todos os problemas relacionados à qualidade de energia elétrica, os afundamentos de tensão e as interrupções são responsáveis por mais de 80% dos problemas causados a sistemas produtivos que envolvem motores de indução e seus dispositivos de acionamentos [1]. Um afundamento de tensão é uma redução rápida na tensão, para valor inferior a 90% e igual ou superior a 10% da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto [2]. Se, para o mesmo intervalo de duração, o valor eficaz da tensão é inferior a 0,1 pu da tensão nominal, então o distúrbio é considerado uma interrupção. Os afundamentos de tensão, em geral, estão associados a faltas, manobra de grandes cargas, e partida de grandes motores. A variação abrupta de corrente ao interagir com a impedância equivalente do sistema provoca afundamento de tensão cuja duração depende da causa do afundamento.

Os afundamentos de tensão causados por faltas têm duração que, em geral, depende do tempo de atuação do sistema de proteção para eliminação da falta. Estudos mostram que, dependendo da magnitude da corrente de falta e do tipo de proteção utilizada, os afundamentos de tensão com magnitude entre 70 e 90% e duração entre 3 e 30 ciclos respondem pela grande maioria dos desligamentos de acionamentos de velocidade variável [3].

O crescente interesse no estudo de afundamentos de tensão deve-se, principalmente, ao aumento, a partir dos anos 1970, da utilização de equipamentos eletrônicos, a exemplo dos computadores, nos vários setores da economia, e dos acionamentos de velocidade variável (AVV) no setor industrial, os quais são equipamentos muito sensíveis a variações de tensão de curta duração [4].

A Figura 1 mostra um diagrama de blocos simplificado de um AVV trifásico. A tensão da fonte trifásica é retificada, em geral, por uma ponte a diodo de seis pulsos; a tensão retificada é mantida praticamente constante, com *ripple* que depende da capacitância C do elo CC, sendo invertida por um conversor CC-CA de ponte completa, com chaves

semicondutoras controladas à alta frequência. A indutância L limita as variações abruptas de corrente, decorrentes do carregamento do capacitor, e reduz as distorções harmônicas na corrente de alimentação fornecida pela fonte.

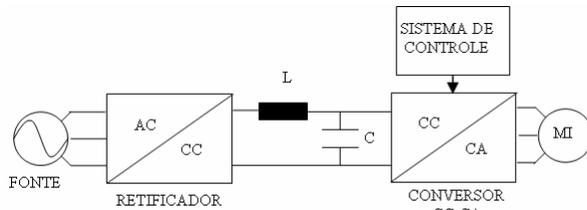


Fig. 1. Esquema simplificado de um AVV.

O AVV normalmente não sofre danos ao ser submetido a afundamentos de tensão, no entanto pode sofrer desligamento devido à atuação de relés de subtensão e de sobrecorrente ou à operação indevida de seu sistema de controle, provocando uma interrupção no processo produtivo no qual está inserido.

Este artigo apresenta o resultado de um estudo com testes realizados em laboratório e por simulação computacional em um acionamento de velocidade variável utilizando um motor de indução trifásico (MIT) de 0,25 hp, 220 V, 60 Hz, 4 pólos. Os testes em laboratório foram realizados para determinar as curvas de tolerância do AVV e as simulações computacionais para avaliar o comportamento da tensão no elo CC e da corrente de alimentação do AVV sob afundamentos de tensão e assim permitir um ajuste adequado do seu sistema de proteção contra subtensão e sobrecorrente. A partir do modelo computacional são propostas e analisadas técnicas para elevar a tensão do elo CC para melhoria da suportabilidade do AVV a afundamentos de tensão.

II. CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Os afundamentos de tensão são designados por A, B, C, D, E, F, e G, cuja disposição fasorial é mostrada na Figura 2 [5].

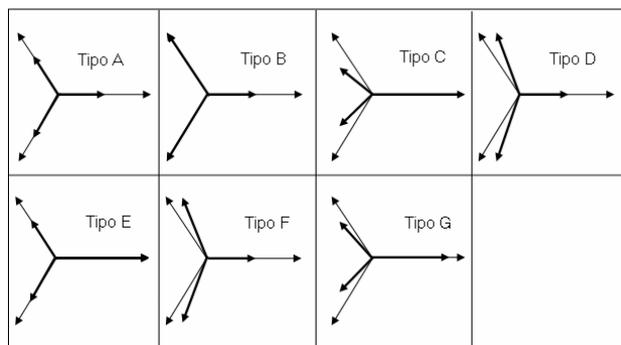


Fig. 2. Classificação de afundamentos de tensão vistos nos terminais da carga.

O afundamento de tensão do tipo A é balanceado, causado por faltas simétricas e partida de grandes motores trifásicos, e os demais por faltas assimétricas.

A Tabela 1 apresenta as equações das tensões fasoriais em pu para cada tipo de afundamento. O valor assumido por h

define a magnitude e o ângulo de abertura das tensões para cada tipo de afundamento e varia entre zero e um ($0 \leq h \leq 1$).

TABELA I
Representação Matemática para cada Tipo de Afundamento de Tensão

<p>Tipo A</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{\sqrt{3}}{2}h$ $V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{\sqrt{3}}{2}h$	<p>Tipo B</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ $V_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$
<p>Tipo C</p> $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}h$ $V_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}h$	<p>Tipo D</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ $V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{\sqrt{3}}{2}$
<p>Tipo E</p> $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{\sqrt{3}}{2}h$ $V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{\sqrt{3}}{2}h$	<p>Tipo F</p> $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)$ $V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)$
<p>Tipo G</p> $V_a = \frac{1}{3}(2+h)$ $V_b = -\frac{1}{6}(2+h) - j\frac{\sqrt{3}}{2}h$ $V_c = -\frac{1}{6}(2+h) + j\frac{\sqrt{3}}{2}h$	

A magnitude de um afundamento de tensão é definida pelo menor valor de tensão remanescente dentre as fases. Para os tipos A, B, D, E, e F, o valor atribuído a h define diretamente a magnitude do afundamento, pois a menor magnitude do fasor é estabelecida por h. Para os tipos C e G, a magnitude do afundamento de tensão difere do valor de h. A Figura 3 mostra as magnitudes dos fasores de tensão em função da variação de h para os afundamentos do tipo C e G.

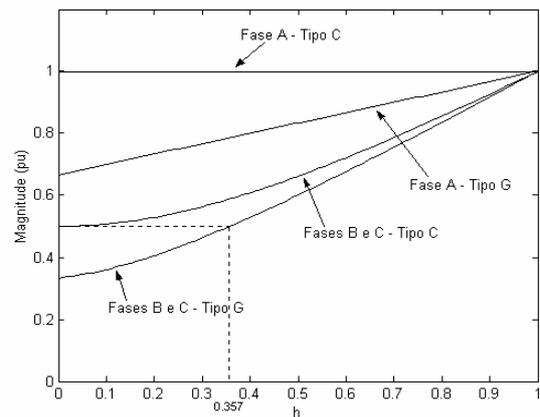


Fig. 3. Magnitude dos afundamentos do tipo C e G em função de h.

Pode ser observado que as magnitudes das fases B e C definem a severidade em magnitude do afundamento, pois são menores que a magnitude da fase A. Um afundamento de tensão para 50% corresponde a $h = 0$ para o afundamento do tipo C, e $h = 0,357$ para o afundamento do tipo G, de tal forma que os tipos C e G possam ser classificados com severidade para 50%.

III. SUPORTABILIDADE DO ACIONAMENTO DE VELOCIDADE VARIÁVEL

Testes em laboratório foram realizados para estabelecer as curvas de tolerância do AVV para três tipos de afundamentos de tensão, A, B e E, gerados por uma fonte trifásica de distúrbios. Utilizando as curvas de tolerância é possível determinar a mínima tensão suportável no elo CC do AVV e, desta forma, considerar este valor como referência para determinar a variável h de um afundamento de tensão que o AVV suportaria com uma duração específica. As curvas de tolerância foram comparadas à SEMI F47, do instituto norte-americano EPRI, que estabelece, basicamente, para equipamentos eletrônicos com dispositivos semicondutores, a tolerância a afundamentos de tensão para 50% por 200 ms, 70% por 500 ms e 80% por 1000 ms. Os resultados dos testes em laboratório são mostrados na Figura 4.

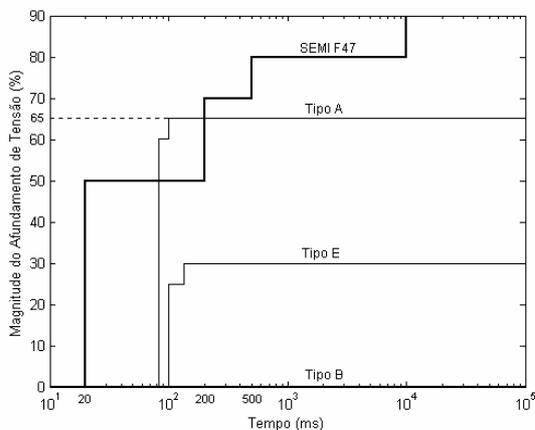


Fig. 4. Curvas de tolerância do AVV.

Para o afundamento tipo A o limite de tolerância do sistema AVV-MIT-carga é de 0,65 pu. Entretanto, no intervalo de 83,33 a 200ms o sistema sob teste apresenta tolerância menor do que a estabelecida pela curva SEMI F47, que é de 0,5 pu. Para o afundamento do tipo E a tolerância é de 0,3 pu, e para o afundamento do tipo B, h foi levado a seu extremo de severidade, que é a condição de interrupção, e o AVV suportou a falta de uma fase mesmo em regime permanente.

A. Limite de Tensão Suportável

Baseado nas curvas de tolerância do AVV para os afundamentos de tensão do tipo A e E, e utilizando um modelo para simulação do AVV, é possível encontrar o limite de tensão média suportável no elo CC para o qual a proteção contra subtensão atua, caso o AVV seja submetido aos sete tipos classificados de afundamentos de tensão. Como mencionado anteriormente, os afundamentos de tensão com duração entre 3 e 30 ciclos respondem pela grande maioria dos desligamentos de AVV, assim, definiu-se na simulação computacional por afundamentos com duração média de 12 ciclos (200 ms).

A modelagem do AVV no Simulink/Matlab, mostrada na Figura 5, considerou um retificador de 6 pulsos, um conversor CC-CA com três braços e 6 chaves ideais com frequência de chaveamento de 2,5 kHz, um capacitor de 660 μ F, e uma indutância de 1mH. O valor da capacitância foi obtido diretamente do AVV utilizado no laboratório (dois capacitores de 330 μ F em paralelo). A indutância e a frequência de chaveamento foram estabelecidas por meio de comparação entre os resultados de tensão de saída do conversor CC-CA e correntes de alimentação do AVV obtidos por meio de ensaios em laboratório e de simulação.

Nas simulações computacionais foi possível monitorar a tensão no elo CC do AVV, a fim de avaliar o nível de tensão que leva a atuação da proteção por subtensão. A Figura 6 mostra que, para os afundamentos de tensão do tipo A e E para 65 e 30%, respectivamente, com duração de 12 ciclos, a tensão média no elo CC é de aproximadamente 0,65 pu, sendo este, portanto, o limite de tensão suportável do AVV, para o qual a proteção contra subtensão atuou no teste em laboratório (ver Figura 4).

Para o afundamento do tipo B, com $h=0$, a tensão média no elo CC permanece próxima ao seu valor de regime permanente, pois a tensão fase-fase, representada pelo afundamento tipo C (ver Tabela 1), garante uma tensão de saída no retificador próxima de 1 pu. Sob condição de afundamento, o *ripple* da tensão retificada aumenta, o que contribui para a diminuição do valor médio da tensão CC durante o afundamento.

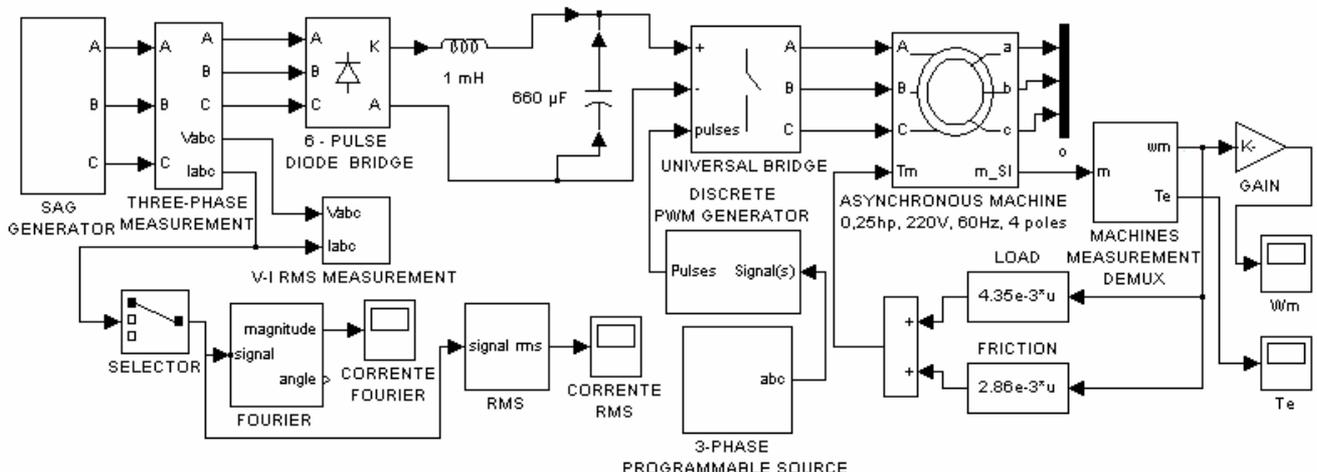


Fig.5. Diagrama de simulação do AVV no Simulink/MATLAB.

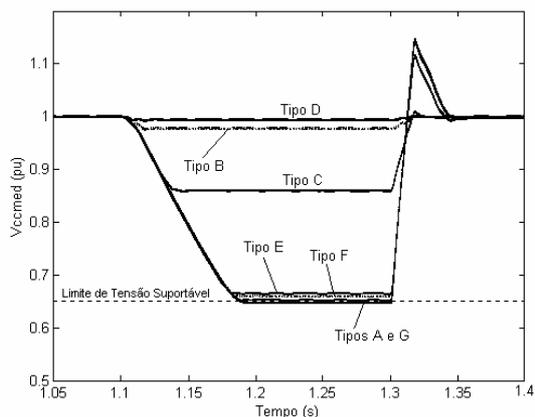


Fig. 6. Tensão média no elo CC obtida por simulação para afundamentos de tensão do tipo A com $h=0,65$, tipos B, C, D e F com $h=0$, tipo E com $h=0,3$ e tipo G com $h=0,22$, durante 12 ciclos.

Para $h=0$, os afundamentos de tensão do tipo C, D e F não provocam o desligamento do AVV pela atuação de sua proteção contra subtensão, pois a magnitude da tensão média do elo CC, em pu, fica acima do limite de tensão suportável de 0,65 pu. Para $h=0,22$ o afundamento do tipo G reduz a tensão do elo CC para o limite de tensão suportável. Portanto, para o AVV estudado, somente os afundamentos de tensão do tipo A, E e G são capazes de provocar desligamento por subtensão no elo CC.

O não-desligamento do AVV pela atuação de sua proteção contra subtensão para quaisquer severidades de afundamentos de tensão do tipo B, C, D e F pode ser explicado se for considerado que a tensão remanescente no elo CC dependerá da característica da curva de maior tensão fase-fase retificada durante o afundamento de tensão. As curvas da Figura 7, baseadas na Tabela 1, mostram o comportamento da magnitude das tensões fase-fase, em pu, para todos os tipos de afundamentos de tensão classificados, em função da variável h .

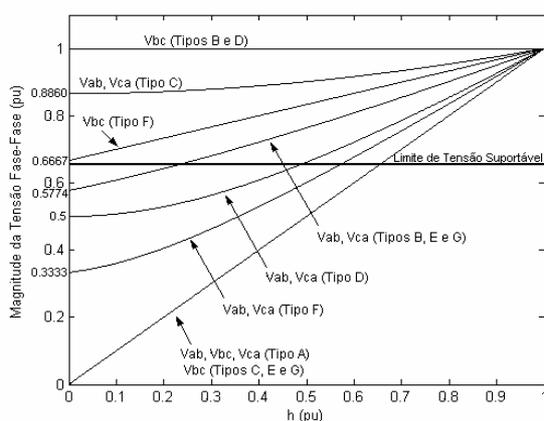


Fig. 7. Magnitude da tensão fase-fase em função da variável h , para os afundamentos de A a G.

Pode ser observado que os afundamentos de tensão do tipo B, C, D e F possuem pelo menos uma tensão fase-fase com magnitude igual ou superior à tensão média suportável no elo CC, não sendo, portanto, capazes de provocar o desligamento do AVV. Portanto, para o AVV estudado, somente os

afundamentos de tensão do tipo A, E e G são capazes de provocar desligamento por subtensão no elo CC. Assim, a magnitude de uma tensão fase-fase de alimentação maior ou igual à menor tensão média CC suportável pelo AVV garante a sua suportabilidade a afundamentos de tensão. Considerando que o afundamento do tipo A é o mais severo, o valor mínimo de tensão média CC suportável para esse afundamento pode ser adotado como referência para estabelecer um limite de tensão suportável no elo CC.

A Tabela 2 apresenta o sumário dos valores mínimos de h para os quais existe tolerância do AVV ao afundamento de tensão. $|V_{\min}|$ e a menor magnitude entre as tensões fase-neutro de alimentação do AVV, e o limite de tensão suportável no elo CC é de 0,65 pu. Para quaisquer valores de h , os afundamentos de tensão do tipo B, C, D e F não causam desligamento do AVV pela atuação do relé de subtensão. Pode ser verificado que, para $h=0$, a magnitude do afundamento de tensão do tipo C é para 50%. Para $h=0,22$, o afundamento do tipo G possui magnitude para 42%. Já a magnitude dos afundamentos do tipo A, B, D, E, e F é determinada diretamente pelo valor de h .

TABELA II

Afundamentos de Tensão com Valores Mínimos de h Tolerados pelo AVV

Tipo	A	B	C	D	E	F	G
h	0,65	0	0	0	0,30	0	0,22
$ V_{\min} $	0,65	0	0,5	0	0,30	0	0,42

B. Limite de Corrente Suportável

De uma forma geral, o desligamento do AVV ocorre para uma corrente eficaz acima de 1,2-1,5 pu [6]. O limite de corrente suportável foi considerado igual a 1,5 pu. A Figura 8 mostra a maior elevação de corrente do AVV sob afundamentos de tensão de A a G, durante 12 ciclos.

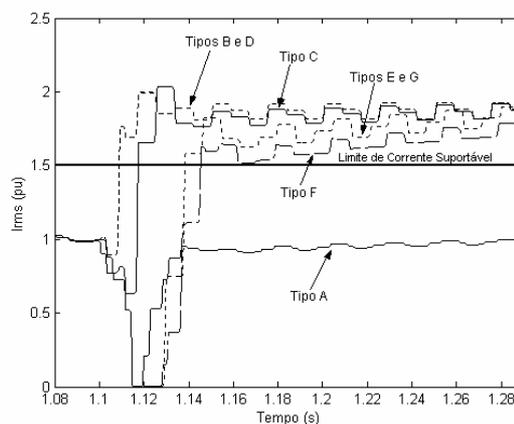


Fig. 8. Maior elevação de corrente do AVV obtida por simulação para afundamentos de tensão do tipo A com $h=0,9$, tipos B, C e D com $h=0$, tipos E, F e G com $h=0,7$, durante 12 ciclos.

Pode ser verificado que para os afundamentos de tensão do tipo B, C e D, para $h=0$, embora não haja desligamento do AVV pela atuação da proteção contra subtensão, ocorreria a atuação da proteção contra sobrecorrente. Vale lembrar que no afundamento tipo C, $h=0$ corresponde a um afundamento para 50%. Somente o afundamento de tensão do tipo A não faz atuar a proteção contra sobrecorrente.

Para evitar um desligamento do AVV para quaisquer severidades de afundamentos de tensão, a proteção contra sobrecorrente deveria ser ajustada para 2 pu.

IV. MITIGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

A mitigação de afundamentos de tensão consiste de técnicas utilizadas para reduzir os efeitos dos afundamentos sobre o AVV. O método mais utilizado é simplesmente desabilitar a operação do conversor CC-CA, retirando a alimentação do motor de indução, para evitar principalmente problemas de sobrecorrente e oscilações do torque, sendo o motor realimentado automaticamente logo após a extinção do afundamento de tensão [5]. A grande desvantagem deste método é a elevada perda de velocidade do motor, que, dependendo da duração do afundamento, pode sofrer uma parada.

Métodos de mitigação mais sofisticados aumentam o tempo de tolerância do AVV pela elevação da tensão média do elo CC, evitando que o processo produtivo no qual está inserido seja interrompido. Os principais métodos de elevação de tensão do elo CC são avaliados neste artigo. Não são previstos, para os métodos de mitigação estudados, uma capacidade de tolerância do AVV para afundamentos de tensão com magnitudes abaixo de 50%. Para esses distúrbios, a utilização de uma UPS (*Uninterruptable Power Supply*) é mais interessante, pois permite, por meio de uma fonte paralela e contínua de energia (bateria), uma tolerância não somente para afundamentos de grande severidade, mas também para interrupções.

A seguir são apresentadas três técnicas de aumento de tolerância do AVV ao afundamento de tensão, avaliadas com base em simulação computacional.

A. Mitigação Regenerativa

A mitigação regenerativa consiste em aproveitar a energia cinética das partes móveis do motor de indução para transformá-la em energia elétrica que será armazenada no capacitor do elo CC. A Figura 9 mostra como funciona o método regenerativo analisando as curvas de torque-velocidade nas frequências de 50 e 60 Hz em regime permanente.

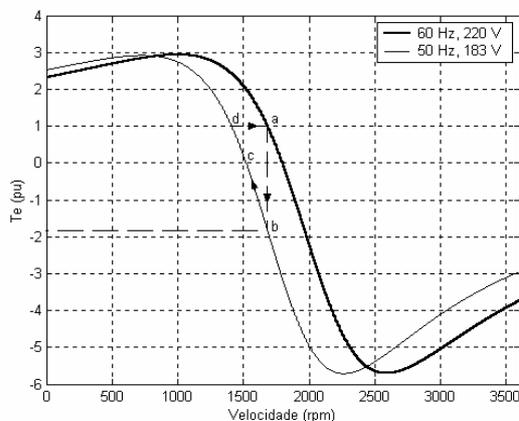


Fig. 9. Curvas de torque-velocidade do MIT com variação de frequência e tensão de alimentação para manter o fluxo magnético constante.

O motor funciona na frequência de 60 Hz e tensão fase-fase de 220 V e, subitamente, passa a operar com 50 Hz e 183 V. A relação entre tensão e frequência é mantida constante para que o fluxo magnético por pólo não sofra alteração. No ponto “a” da curva de torque-velocidade, o motor opera em regime permanente, alimentado por 220 V e 60 Hz, com velocidade de 1686 rpm e torque eletromagnético de 1 pu (valor de base, 1,36 N.m). Como o motor não pode mudar sua velocidade instantaneamente (devido à inércia), passa então a operar no ponto “b”, na nova curva de torque-velocidade, alimentado por uma tensão fase-fase de 183 V e uma frequência de 50 Hz, com um torque negativo de aproximadamente -1,8 pu. Por ser o torque negativo, a velocidade do motor é reduzida muito rapidamente, até atingir o ponto “d”, onde novamente o motor passa a operar com o torque de regime permanente de 1 pu. O deslocamento, na curva de torque-velocidade em 50 Hz, do ponto “b” para o ponto “c”, constitui o processo regenerativo, em que a energia cinética do motor é convertida em energia elétrica e transferida para o elo CC do AVV, configurando o funcionamento do motor como um gerador assíncrono [7].

A técnica de mitigação regenerativa é muito útil principalmente em processos produtivos não contínuos, tais como processos que utilizam ventiladores, em que a pequena variação de velocidade não compromete o desempenho da produção na qual estão inseridos. Acionamentos de velocidade variável podem ser encontrados no mercado com capacidade de manter a tensão CC em seu valor de regime permanente por 2 segundos, para afundamentos de tensão com magnitude acima de 80% [6].

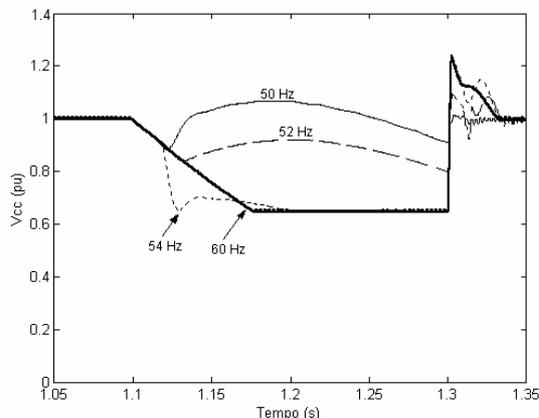


Fig. 10. Tensão do elo CC com conversor CC-CA controlado para diferentes frequências, com AVV sob afundamento do tipo A para 65% e duração de 12 ciclos.

Uma pequena modificação no diagrama do AVV da Figura 5 permite que, um ciclo após a aplicação de um afundamento de tensão, quando a tensão média CC atinge 90% de seu valor de regime permanente, a frequência do sinal da moduladora, aplicado ao conversor CC-CA, seja alterada para um valor menor que 60 Hz, reduzindo, desta forma, a velocidade do motor. A Figura 10 mostra o comportamento da tensão do elo CC ao ser o AVV submetido a um afundamento do tipo A para 65% durante 12 ciclos, para quatro diferentes frequências.

As frequências menores (50 e 52 Hz) conseguem uma elevação maior de tensão CC durante o afundamento, sustentando uma tensão maior que 0,65 pu (limite de tensão suportável) durante todo o distúrbio.

A mitigação regenerativa deve prever não somente que a tensão CC permaneça acima do limite suportável pelo AVV, mas também a possibilidade de torná-la o mais constante possível, para que, durante o afundamento, não ocorra variação na tensão de alimentação do motor, a qual provocará oscilação no torque. Uma das grandes desvantagens desse método é justamente o fato de que, no instante em que ocorre a modificação instantânea da frequência de alimentação do motor, o torque sofre uma inversão, conforme mostra a Figura 9, que não somente reduz a velocidade do motor, mas que também pode estressá-lo dinamicamente.

B. Mitigação por Adição de Neutro

A mitigação com adição de neutro, proposta por Raju [8], consiste em conectar, por meio de uma chave controlada, o neutro da fonte de alimentação em estrela (Y) ao ponto em comum existente entre capacitores conectados em série no elo CC do AVV. Esta técnica modifica a configuração existente do retificador de 6 pulsos em uma conexão em série de dois retificadores trifásicos de ponto médio ou meia onda, pois a configuração resultante pode ser considerada como duas associações de três retificadores monofásicos de meia-onda. A Figura 11 ilustra a técnica de mitigação por adição de neutro. O ramo sombreado, com uma chave estática formada por dois tiristores em antiparalelo, representa a conexão com adição de neutro.

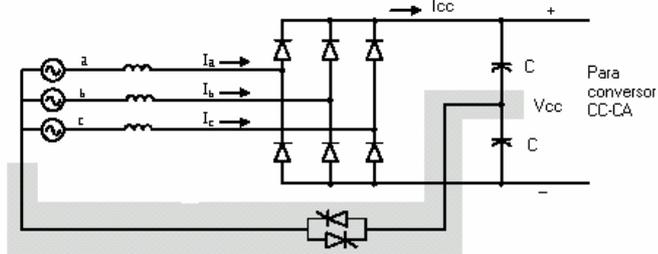


Fig. 11. AVV com método de adição de neutro

Desprezando-se a queda de tensão no filtro indutivo L, o valor médio da tensão do elo CC, V_{cc} , pode ser determinado aproximadamente como sendo o valor de pico do envelope de 6 pulsos obtido por meio da retificação trifásica. Sendo V a tensão fase-neutro de alimentação do AVV, então:

$$V_{cc} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot V \quad (1)$$

Com a mitigação por adição de neutro, a soma dos picos de cada retificação monofásica de meia onda determina a nova tensão média (V_{ccN}) no elo CC:

$$V_{ccN} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot V \quad (2)$$

Portanto, a adição de neutro permite um aumento de aproximadamente 15% da tensão no elo CC.

A mitigação com adição de neutro tem a vantagem da simples implementação, pois praticamente não necessita de adição de novos componentes, e a possibilidade da

manutenção da tensão no elo CC muito próxima ao valor de regime permanente para afundamentos de tensão até um minuto. No entanto, possui a desvantagem de gerar, temporariamente, aumento na corrente do neutro e harmônicas triplas. A Figura 12 mostra a aplicação do método de adição de neutro ao diagrama da Figura 5.

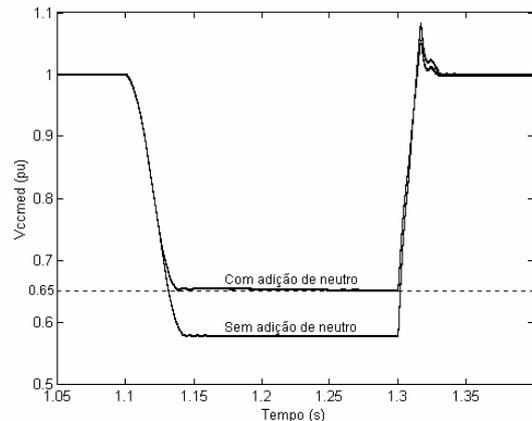


Fig. 12. Tensão no elo CC do AVV sob afundamento de tensão simétrico para 58% durante 12 ciclos, com e sem a mitigação por adição de neutro.

Os dois capacitores de $330\mu\text{F}$ foram conectados em série, formando uma capacitância equivalente de $165\mu\text{F}$. Pode ser observado que, com a utilização da técnica, o AVV passa a suportar uma redução em sua tensão média CC até 0,58 pu, ou seja, suporta afundamentos de tensão simétricos com magnitude de até 58%. Portanto, houve um aumento da tolerância de aproximadamente 11%, em relação ao limite de tensão suportável, durante o afundamento de tensão. Esta elevação na tensão do elo CC poderia ser maior, se for considerado que a redução da capacitância do elo CC para um quarto de seu valor provoca um aumento do ripple e, conseqüentemente, uma diminuição da tensão média CC.

A Figura 13 mostra as componentes harmônicas no neutro I_n durante a ocorrência do afundamento simétrico para 58% com duração de 12 ciclos. As harmônicas triplas de 3ª e 6ª ordem são as componentes de maior grandeza.

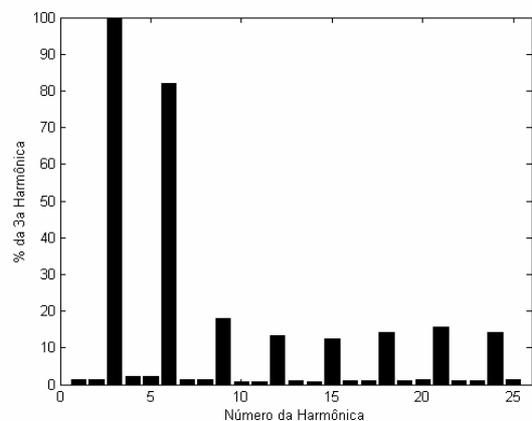


Fig. 13. Componentes harmônicas da corrente de neutro durante o afundamento de tensão ($I_{3rms}=2,8A$).

A técnica de mitigação por adição de neutro permite manter a tensão no elo CC acima do valor do limite de tensão

suportável enquanto durar o afundamento de tensão, pois a abertura da chave que realiza a conexão do neutro pode ser programada para acontecer somente após a tensão no elo CC atingir um valor próximo ao de regime permanente.

Embora o método de mitigação por adição de neutro provoque o aparecimento de harmônicas na fonte de alimentação do AVV, deve ser considerado que, como os afundamentos de tensão são de curta duração, as conseqüências na rede de alimentação ou em equipamentos alimentados pela mesma fonte do AVV muitas vezes poderão ser desprezadas [8]. Portanto, a utilização desse método depende de uma avaliação de como será a influência das harmônicas geradas pela corrente no neutro na rede de alimentação da fonte e do AVV.

C. Mitigação com Conversor Boost

A mitigação com conversor *Boost* permite manter a tensão do elo CC praticamente em seu valor de regime permanente, mesmo sendo o AVV submetido a afundamentos de tensão para 50% por até um minuto [6]. O conversor *Boost* é conectado à mesma linha de alimentação do AVV e sua tensão de saída CC é aplicada diretamente ao elo CC do AVV, como mostra a Figura 14. A sua atuação é iniciada no momento em que sensores percebem que a magnitude da tensão no elo CC atingiu um determinado valor pré-estabelecido (em geral, 90% da tensão de regime permanente), sendo a sua razão cíclica determinada de acordo com a severidade do afundamento [6]. Em um conversor *Boost*, a razão cíclica é dada pela relação entre a tensão CC de saída e a tensão CC de entrada, e, do ponto de vista de controle, é a relação entre o tempo de condução das chaves controladas do conversor CC-CA e o período total de chaveamento. Quanto maior a razão cíclica, maior a tensão CC de saída. A tensão CC de entrada do inversor é obtida por meio de retificação direta da tensão trifásica que alimenta o AVV. Quanto maior a severidade do afundamento de tensão, menor a tensão retificada e, portanto, maior a razão cíclica necessária para que a tensão de saída no elo CC possa atingir um valor próximo ao de regime permanente. Como o conversor *Boost* é colocado em paralelo ao elo CC, seu projeto é independente do AVV, logo pode ser adquirido a partir da especificação da potência do motor e da tensão no elo CC de regime permanente. Por isso, a mitigação com conversor *Boost* torna-se uma das mais interessantes técnicas aplicadas a AVV.

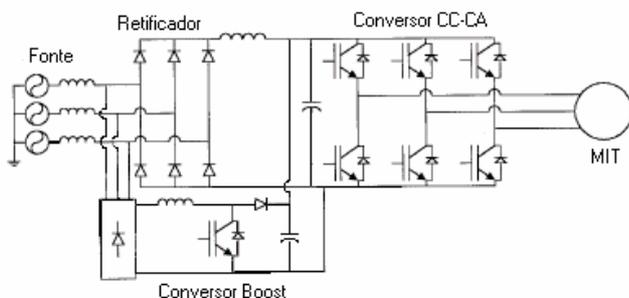


Fig. 14. AVV com técnica de mitigação utilizando conversor *Boost*.

O projeto do conversor *Boost* utilizado na simulação considerou uma frequência de comutação de 5 kHz e razão

cíclica de 50%. No dimensionamento da indutância L e da capacitância C do conversor, foram utilizadas fórmulas desenvolvidas a partir do limiar existente entre condução contínua e descontínua da topologia de fontes chaveadas aplicada ao conversor *Boost* [9]. A mínima corrente de saída admitida foi de 50% da corrente máxima, e a ondulação da tensão de saída foi de 1V. A Tabela 3 apresenta as características de projeto do conversor. A Figura 15 mostra a tensão no elo CC durante um afundamento simétrico para 50% durante 12 ciclos.

TABELA III

Especificações e Dimensionamento do Conversor Boost

Especificação do Conversor Boost			
Potência de saída (P_o)	200 W	Frequência de comutação (f_s)	5 kHz
Tensão de entrada (V_i)	150 V	Mínima corrente de saída (I_{omin})	50% da corrente máxima
Tensão de saída (V_o)	300 V	Ondulação da tensão de saída (ΔV)	1 V
Dimensionamento dos componentes			
Indutância (L)	10 mH	Capacitância (C)	67 μ F

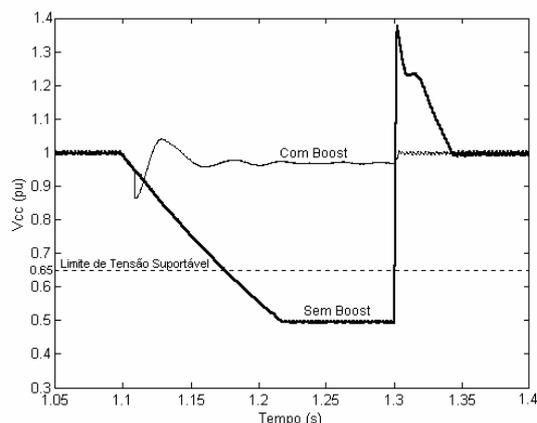


Fig. 15. Tensão do elo CC do AVV sob afundamento simétrico para 50% durante 12 ciclos com e sem utilização do conversor *Boost*.

V. CONCLUSÕES

Com base em testes de laboratório e simulações computacionais foi verificado que o afundamento de tensão do tipo A é o mais severo quanto ao limite de tensão suportável no elo CC, no entanto o menos severo quanto ao limite de corrente suportável de alimentação do AVV. Por outro lado, o afundamento de tensão do tipo B é o menos severo quanto ao limite de tensão no elo CC e o mais severo quanto ao limite de corrente suportável. Assim, pode-se concluir que testes com afundamentos de tensão do tipo A podem definir o ajuste da proteção contra subtensão, e testes com afundamento de tensão do tipo B podem definir o ajuste da proteção contra sobrecorrente do AVV.

Três técnicas de mitigação de afundamentos de tensão foram aplicadas ao AVV para verificar as suas vantagens e desvantagens. A mitigação regenerativa requer somente uma modificação na programação do sistema de controle do conversor CC-CA, deve prever mecanismos que permitam sustentar a tensão no elo CC aproximadamente constante

durante o afundamento de tensão para evitar uma variação na tensão fundamental de alimentação do motor. A grande desvantagem do método regenerativo é a inversão do torque eletromagnético do motor, que ocorre no instante em que a frequência de alimentação é alterada para redução da velocidade, e a incapacidade de sustentar afundamentos severos em magnitudes e duração acima de alguns ciclos, pois, quanto menor a potência do motor, menor a sua inércia e, portanto, a energia cinética disponível para a realização da mitigação é somente suficiente para a manutenção da tensão no elo CC por uns poucos ciclos. A mitigação por adição de neutro, possível de ser realizada para afundamentos que estejam aproximadamente 15% abaixo do limite de tensão suportável no elo CC do AVV, é um método eficiente que garante uma tolerância para afundamentos de tensão de duração até um minuto. No entanto, sua implementação depende de uma avaliação da influência das harmônicas geradas pela corrente no neutro na rede em que está conectado o AVV. Há de se notar que os harmônicos gerados são de curta duração. A mitigação utilizando conversor *Boost* independente, conectado em paralelo com o elo capacitivo, mostrou ser o método mais interessante, pois permite uma tolerância a afundamentos de tensão com severidade relativamente alta e duração até um minuto, sem necessidade de modificação da estrutura do AVV.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pela FUNCAP – Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.C. Gomez, M.M. Morcos, C. Reineri, G. Campetelli, “Induction Motor Behavior Under Short Interruptions and Voltage Sags”, *IEEE Power Engineering Review*, February 2001.
- [2] R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, Nova Iorque, 1996.
- [3] IEEE Std 1159-1995, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Press, Nova Iorque, 1995.
- [4] A. von Jouanne, P. Enjeti, B. Banerjee, “Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives”, *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 35, no. 2, pp. 980-916, July./August 1999.
- [5] M.H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press, Nova Iorque, 2000.
- [6] J.L. Duran-Gómez, P.N. Enjeti, B.O. Woo, “Effect of Voltage Sags on Adjustable-Speed Drives: A Critical Evaluation and an Approach to Improve Performance”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no.6, November/December 1999.
- [7] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*. Prentice-Hall, 3ª Edição, Nova Jérsei, 1997.
- [8] N.R. Raju, “Improving Voltage Sag Tolerance of Three-Phase ASDs Through Addition of a Neutral Connection”, in *IEEE 37th Industry Application Conference*, 2002.
- [9] N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley and Sons, Nova Iorque, 1989.

DADOS BIBLIOGRÁFICOS

Claudio Marzo Cavalcanti de Brito é Engenheiro Eletricista (1995) e Especialista (1996) pela Universidade Federal da Paraíba e Mestre em Engenharia Elétrica (2005) pela Universidade Federal do Ceará. Foi, de 1997 a 2002, Oficial-Engenheiro da Marinha do Brasil. Atualmente é Professor Substituto na Universidade Federal do Ceará.

Ruth Pastora Saraiva Leão é professora da Universidade Federal do Ceará desde 1981, com PhD pela Loughborough University of Technology (Inglaterra). Suas áreas de interesse são Qualidade de Energia Elétrica, Automação Elétrica e Fontes Renováveis de Energia Elétrica.

Fernando Luiz Marcelo Antunes é professor da Universidade Federal do Ceará desde 1979, mestre pela Universidade de São Paulo e PhD pela Loughborough University of Technology (Inglaterra). Sua área de interesse é Eletrônica de Potência e sua aplicação em Fontes Renováveis de Energia Elétrica.