

Análise do Cumprimento dos Requisitos LVRT sobre Condições de Operação Desbalanceadas

Rafael C. Borges, Rodrigo A. Ramos

Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo (USP)

São Carlos, SP

rcruzborges@gmail.com, ramos@sc.usp.br

Romeu Reginatto

Centro de Engenharia e Ciências Exatas

Universidade do Oeste do Paraná (UNIOESTE)

Foz do Iguaçu, PR

romeu@unioeste.br

Resumo—A medida que a conexão da geração eólica aumenta, as turbinas eólicas são requeridas a cumprirem os requisitos da curva de suportabilidade a afundamentos de tensão, *Low Voltage Ride-Through* (LVRT), assim novos códigos de redes são estabelecidos para a conexão das turbinas eólicas à rede. A maioria dos códigos de rede possuem a curva LVRT apenas para a conexão ao sistema de transmissão. Apenas alguns deles incluem o sistema de distribuição e ainda, a medição da tensão terminal não consideram as condições de operação desbalanceadas. Este artigo analisa o cumprimento dos requisitos LVRT em condições de tensão desbalanceadas para turbinas eólicas equipadas com gerador de indução duplamente alimentados (DFIG) conectados ao sistema de distribuição. Três esquemas diferentes de medição da tensão terminal são utilizados e analisados. As simulações são realizadas no *software* EMTP-RV e os resultados indicam que para sistemas altamente desequilibrados todas as três fases devem ser analisadas de forma independente.

Palavras-chave-- Geração Distribuída, *Low Voltage Ride-Through* (LVRT), Condições de Desbalanceamento Trifásicos, Afundamentos de Tensão, Geração Eólica.

I. INTRODUCTION

O crescimento da demanda do Sistema Elétrico de Potência (SEP) a cada ano, exige o aumento na produção de energia elétrica para garantir a operação segura do sistema. Como resultado, uma alternativa que vem crescendo atualmente é a utilização das fontes alternativas de energia, como, por exemplo, a geração eólica e fotovoltaica conectadas às redes de subtransmissão e de distribuição.

O aumento da inserção de geração eólica no SEP nos últimos anos propiciou que os operadores dos sistemas reformulassem os códigos de redes em vários países, como em Portugal e Dinamarca [1], [2]. Um dos objetivos desses códigos de rede é o cumprimento dos requisitos da curva de suportabilidade a afundamentos de tensão *Low Voltage Ride-Through* (LVRT) ou *Fault Ride Through* (FRT). O atendimento da curva LVRT significa que os geradores

eólicos deve permanecer conectados à rede durante a ocorrência de curto-circuitos.

Em [3], foi proposto uma topologia baseada em *Static Var Compensator* (TSC) para analisar a capacidade LVRT de geradores eólicos de velocidade fixa e suas características transitórias com e sem a topologia LVRT, durante aplicação de falta assimétrica na rede. Os estudos mostraram que com a ajuda da topologia LVRT, as características transitórias e a curva LVRT dos geradores são melhoradas. Nesta topologia proposta, o reator em série poderia aumentar a tensão terminal da turbina eólica, enquanto a resistência em paralelo poderia absorver, em vez de consumir o excesso de potência ativa, de modo a melhorar a capacidade LVRT da turbina.

Em [4], foi utilizada uma estratégia de controle para o dispositivo de proteção do tipo crowbar (comumente usado para proteger os conversores de potência durante afundamentos de tensão) no Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG), reduzindo assim sua perda de controlabilidade por um curto espaço de tempo. Além disso, a potência reativa é fornecida para ajudar na recuperação da tensão da rede.

Em [5], apresenta um método sistemático para estabelecer critérios LVRT através de um conjunto de análises envolvendo análise de contingência, cenários estático e dinâmico baseados em simulações. Algumas considerações são discutidas, como tipos de faltas e esquemas de proteção, para empregar a metodologia. A tecnologia de turbinas eólicas também é discutida no contexto de desenvolvimento do critério de LVRT para grandes fazendas eólicas. O desenvolvimento do envelope de tensão para o critério LVRT é mostrado através de um estudo de caso no sistema de transmissão da Nova Zelândia. Três cenários foram apresentados e a filosofia de proteção foi selecionada. Os resultados mostraram diferentes envelopes de tensão que poderiam ser combinados para encontrar um único perfil de duração de tensão para a rede.

Em [6], foi discutido como melhorar a capacidade de fornecimento de potência reativa através de uma estratégia de

controle do conversor durante faltas na rede de transmissão, como, por exemplo, faltas trifásicas. A estratégia é baseada no controle da tensão transitória no conversor lado do rotor (RSC) que pode fazer com que a potência reativa de saída do DFIG participe do controle dessa tensão durante os afundamentos de tensão da rede e durante o processo de recuperação após a falta, assegurando que o valor da tensão terminal do gerador se mantenha no mesmo patamar antes da falta. As simulações mostraram que essa estratégia de controle pode produzir uma grande quantidade de potência reativa durante a falta e assim melhorar a tensão da rede assegurando sua rápida recuperação.

A maioria dos trabalhos pesquisados analisam o atendimento da curva LVRT dos geradores eólicos para a conexão com o sistema de Transmissão. Uma suposição implícita em tais casos é que o sistema opera com tensão e corrente equilibrada. Além disso, a grande maioria das análises sobre a inserção deste tipo de energia renovável no sistema de distribuição são feitas para o sistema trifásico em condições balanceadas, embora seja um fato conhecido que o desequilíbrio de fase do sistema de distribuição é muito maior se comparado ao o sistema de transmissão.

Sob condições de tensão balanceadas é fácil determinar se a curva LVRT está ou não sendo violada, usando a medição da tensão terminal. Quando as condições de tensão desbalanceadas estão presentes, a medição da tensão terminal tem que ter uma definição clara, pois diferentes esquemas de medição pode ser empregado. Além disso, códigos de rede não abrangem explicitamente a exigência LVRT em condições de tensão desbalanceadas.

A principal contribuição deste trabalho é fazer as análises do cumprimento dos requisitos LVRT sobre diferentes esquemas de medição da tensão terminal do gerador eólico conectado ao sistema de distribuição sob condições de desbalanço de carga. Este trabalho considera que a tensão terminal é a tensão medida do lado de alta tensão do transformador conectado ao gerador eólico, que coincide com a tensão do ponto de acoplamento comum (PCC).

O trabalho esta organizado da seguinte forma: a seção II apresenta a declaração do problema para o cumprimento da curva LVRT juntamente com os esquemas de medição da tensão terminal, enquanto que na seção III os modelos do desbalanço de carga, DFIG e turbina são apresentados. Os resultados e discussões são apresentados na seção IV e por fim, as conclusões são apresentadas na seção V.

II. DECLARAÇÃO DO PROBLEMA

A. Curva LVRT

A operação dos primeiros parques eólicos permitia a sua desconexão do sistema sempre que a tensão no PCC caísse para valores abaixo de 0,8 p.u. Tais condições operativas eram possíveis devido à pequena quantidade desse tipo de geração e, consequentemente, baixo impacto desta desconexão [7].

Como a conexão de geração eólica no SEP vem crescendo rapidamente, novos códigos de rede estão sendo estabelecidos para esse tipo de geração. Esses novos códigos de rede requerem que os geradores eólicos permaneçam em operação

contínua mesmo que a tensão remanescente no PCC for até 15% da tensão terminal. Em alguns países, essa tensão remanescente pode chegar à zero por um período de tempo de até 150 ms como é o caso da Alemanha [7]. O cumprimento de tais requisitos é muitas vezes referido como a característica LVRT de turbinas eólicas.

O cumprimento da curva LVRT significa que os geradores eólicos deve permanecer conectados à rede e manter sua operação sob afundamentos de tensão no PCC causados por faltas na rede e, podem fornecerem potência reativa para o sistema a fim de suportar a tensão terminal [3].

A ocorrência de curto-circuito pode colocar em risco a segurança da operação dinâmica do SEP se os requisitos LVRT não forem cumpridos, em decorrência de perdas significativas de geração eólica, que resultariam na incapacidade de alguns geradores eólicos em continuar em funcionamento durante distúrbios na rede. Por esta razão, os códigos de rede que tomaram forma nos últimos anos requerem que os parques eólicos (especialmente aqueles ligados a redes de alta tensão) a suportarem as quedas de tensão até uma certa percentagem da tensão nominal (0% em alguns casos) durante um certo período de tempo [1].

A maioria dos códigos de rede dos países da Europa incluem somente o sistema de Transmissão, tais como, Alemanha, Espanha, Itália e Canadá [8]. Poucos deles contemplam o sistema de distribuição, como o da Dinamarca, Irlanda e Portugal [8], [1].

No Brasil, os procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS) definem a curva LVRT para o sistema de transmissão, enquanto os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional (PRODIST) não contemplam a curva LVRT.

A curva LVRT adotada nesse trabalho, para análise dos esquemas de medição da tensão terminal foi a mesma utilizada no código de rede de Portugal para a conexão com o sistema de distribuição, como mostra a Fig.1.

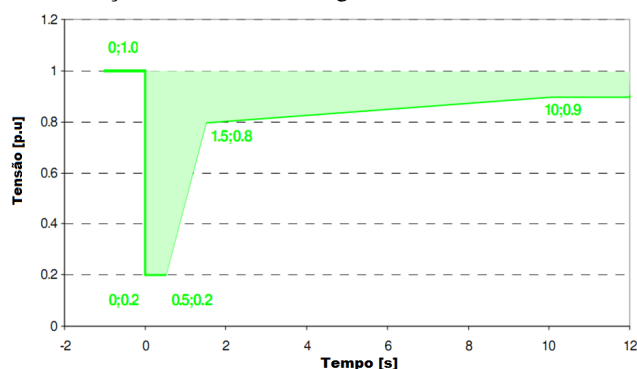


Figura 1: Curva LVRT de Portugal usado no sistema de distribuição.

Em geral, podemos dizer que os requisitos de LVRT especificam tempos mínimos durante os quais um gerador eólico deverá permanecer em operação, sendo esses tempos de acordo com o valor do afundamento de tensão causado por qualquer falta no sistema. Na Fig.1, a região sombreada indica que os geradores eólicos deve permanecer em operação conectados à rede durante a ocorrência de um curto-circuito

no sistema, desde que a tensão medida no PCC permaneça dentro da região sombreada.

Sempre que, o gerador eólico opera sobre condições de tensão balanceadas, determinar se a curva LVRT está ou não sendo violada usando a medição da tensão terminal é uma questão clara. Isto não é assim, no entanto, quando as condições de tensão desbalanceadas estão presentes. A medição de tensão em si torna-se um problema e, além disso, códigos de rede não abrangem explicitamente tal caso. A fim de analisar os requisitos LVRT sobre condições de tensão desbalanceadas, a próxima seção apresenta diferentes esquemas de medição de tensão.

B. Esquemas de Medição da Tensão Terminal

Os esquemas de medição da tensão terminal variam de acordo com o transdutor do fabricante. Esse trabalho mostra três tipos de esquemas de medição da tensão terminal [9], [14], [15]:

$$\text{Tipo 1} \rightarrow V_t = \frac{V_{Arms} + V_{Brms} + V_{Crms}}{3} \quad (1)$$

$$\text{Tipo 2} \rightarrow V_t = \frac{V_A + aV_B + a^2V_C}{3} \quad (2)$$

$$\text{Tipo 3} \rightarrow V_t = \sqrt{\frac{V_{Arms}^2 + V_{Brms}^2 + V_{Crms}^2}{3}} \quad (3)$$

Nas expressões Tipo 1 e Tipo 3 as tensões são valores rms medidos nas fases A, B e C. Já a expressão Tipo 2 se traduz na componente de sequência positiva, onde V_A , V_B e V_C são os vetores tensões das fases A, B e C, respectivamente; a e a^2 são operadores que valem $1 \angle 120^\circ$ e $1 \angle -120^\circ$, respectivamente.

A maioria dos códigos de rede, não especificam o tipo de esquema de medição da tensão terminal que dever ser feito na presença de desbalanço de tensão. Este trabalho mostra que, dependendo do tipo de medição, a tensão terminal assume valores diferentes na ocorrência de curto-circuitos, refletindo diretamente no cumprimento da curva LVRT.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

A fim de analisar a curva LVRT no sistema de distribuição com operação de carga desbalanceada, esta seção apresenta o modelo do sistema utilizado para as simulações.

A. Modelo do DFIG

A Fig.2 mostra a estrutura do gerador DFIG utilizada nesse trabalho e seus dados são apresentados na tabela 1 do apêndice. As equações de tensão do estator e rotor do gerador DFIG nos eixos d e q são dadas por [10]:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \quad (4)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \quad (5)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{dr}}{dt} \quad (6)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (7)$$

Nessas equações R_s e R_r são as resistências dos enrolamentos do estator e rotor, v_{ds} , v_{qs} , v_{dr} , v_{qr} , i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} , ψ_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{dr} e ψ_{qr} são as componentes d e q das tensões do estator e rotor, correntes e fluxos, ω_r é a velocidade do rotor, ω_b é a velocidade base e ω_s é a velocidade síncrona.

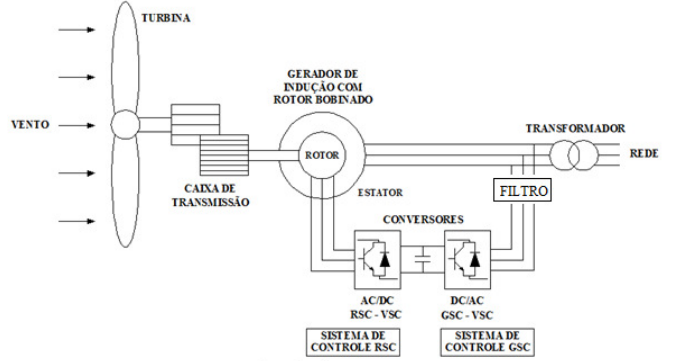


Figura 2: Estrutura do DFIG com turbina eólica.

A conexão de geradores de indução com a rede tipicamente não empregam a ligação Y aterrada, o que significa que a corrente de sequência zero não se encontra presente. Como resultado, o modelo do DFIG apresentado nesta seção, mesmo na ausência do eixo zero, representam os fenômenos de tensão desbalanceadas típicos de parques eólicos, introduzidas por componentes de sequência negativa de tensão e corrente. É importante ressaltar que a estratégia de controle é padrão, assim todas as malhas de controle (potência ativa, tensão terminal, e tensão no link DC) não contêm ações de controle para neutralizar os efeitos da operação de tensão desbalanceada da turbina eólica.

No RSC as variáveis de controle utilizadas foram a potência ativa e tensão terminal e no conversor lado da rede (GSC) foram a tensão do link DC e a potência reativa trocada com a rede, conforme mostra os diagramas das Fig. 3 e Fig.4.

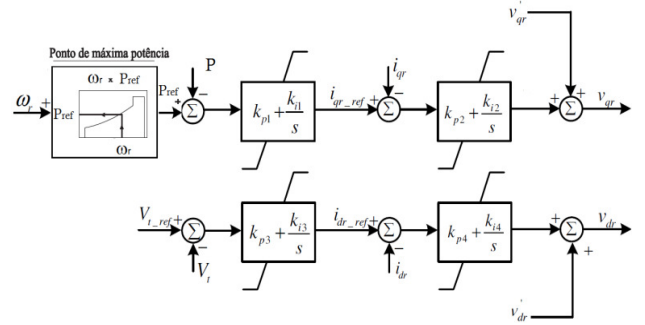


Figura 3: Diagrama de blocos do RSC.

Nas Figs. 3 e 4 os sinais v_{qr} , v_{dr} , v_{dc} e v_{qc} , são transformados para as coordenadas abc e, adotados como sinais modulantes para o controle de conversores *Pulse Width Modulation (PWM)*, que quando comparados com as tensões triangulares, geram os sinais elétricos para a comutação das

chaves eletrônicas. Nessas figuras os sinais v'_{qr} , v'_{dr} , v'_{dc} e v'_{qc} , são dados por:

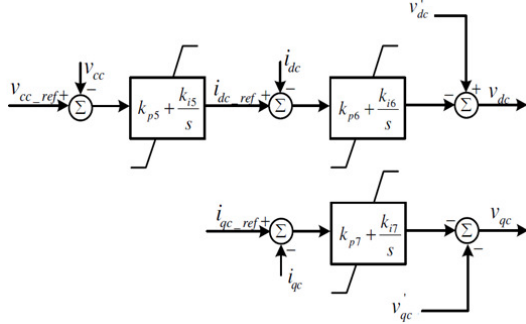


Figura 4: Diagrama de blocos do GSC.

$$v'_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) L_m i_{qs} - (\omega_s - \omega_r) L_{rr} i_{qr} \quad (8)$$

$$v'_{qr} = R_r i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) L_m i_{qr} - (\omega_s - \omega_r) L_{rr} i_{dr} \quad (9)$$

$$v'_{dc} = -R_L i_{dc} + X_L i_{qc} + v_{ds} \quad (10)$$

$$v'_{qc} = -R_L i_{qc} - X_L i_{dc} + v_{qs} \quad (11)$$

$$L_{rr} = L_m + L_{1r} \quad (12)$$

onde L_{rr} , L_m , L_{1r} são as indutâncias própria, mútua e de dispersão do rotor, respectivamente; R_L e X_L são a resistência e reatância do filtro, respectivamente e i_{dc} e i_{qc} , são as correntes dos eixos d e q do GSC.

B. Modelo da Turbina

O sistema mecânico é representado pelo modelo padrão de duas massas, conforme Fig. 5.

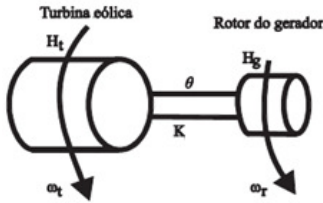


Figura 5: Sistema mecânico de duas massas.

Matematicamente, o modelo da turbina da Fig. 5 é dado por (13) – (15), como apresentado em [12]:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_g} (K\theta + D\omega_b(\omega_t - \omega_r) - T_e) \quad (13)$$

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t} (T_m - K\theta - D\omega_b(\omega_t - \omega_r)) \quad (14)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_b(\omega_t - \omega_r) \quad (15)$$

onde ω_t é a velocidade da turbina; H_g e H_t são as constantes de inércia do gerador e turbina, respectivamente; θ é o ângulo de torção do eixo; T_m e T_e são os torques mecânico e eletromagnético, respectivamente.

C. Modelo do Desbalanço de Carga

Seguindo a convenção proposta em [11], o modelo de desbalanço de carga foi considerado da seguinte forma:

$$S_A = (1 + \mu) \frac{L}{3} \quad (16)$$

$$S_B = (1 - \mu) \frac{L}{3} \quad (17)$$

$$S_C = \frac{L}{3} \quad (18)$$

onde $L/3$ é a potência da carga por fase no caso balanceado e S_A , S_B e S_C são as potências aparentes nas fases A, B e C, respectivamente. O parâmetro μ varia entre 0 e 1 e, com essa definição, pode ser claramente observado de (16) e (17) que a quantidade de potência aumenta na fase A e diminui na fase B, enquanto de (18) pode ser visto que a potência permanece constante.

É importante ressaltar que a definição dada por (16), (17) e (18) implica que, para qualquer nível de desequilíbrio aplicado, a potência trifásica é mantida constante, o que permite uma comparação do sistema equilibrado com o sistema desequilibrado.

Outra forma de medir o fator de desbalanço ($F_D(\%)$), normalmente utilizada pelas concessionárias de energia, é através da relação da tensão de sequência negativa (V_-) pela tensão de sequência positiva (V_+):

$$F_D(\%) = \frac{V_-}{V_+} \quad (19)$$

O parâmetro μ utilizado nesse trabalho é de 0,5, o que corresponde a um $F_D(\%)$ na barra de conexão do gerador eólico de 1,94 %.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações foram realizadas no software *EMTP-RV The Reference for Power Systems Transients* [13] com todo o sistema modelado na forma trifásica.

O diagrama unifilar do modelo do sistema teste é mostrado na Fig.6. Este sistema de distribuição está localizado no interior do Estado de São Paulo, e seus dados podem ser obtidos em [9]. Com exceção dos nós 603, 293 e 291 que tem o nível de tensão de 2,4 kV, 11,5 kV e 138 kV, respectivamente, todas os demais nós operam com um nível de tensão de 13,8 kV. O sistema consiste de 32 nós, 5 transformadores e 27 seções de linha, totalizando 51 km em linhas de distribuição.

Dois gerações distribuídas são conectadas ao sistema da Fig.6. Uma é o gerador eólico (G1) do tipo DFIG com potência nominal de 9 MVA (representando um parque eólico com 6 geradores de 1,5 MVA cada) conectado ao nó 801. A

outra é um gerador solar fotovoltaico (G2) de 4,5 MW que foi representado por uma injeção de potência ativa constante no nó 905. As cargas totais do sistema corresponde a 10,48 MW e 2,51 MVar.

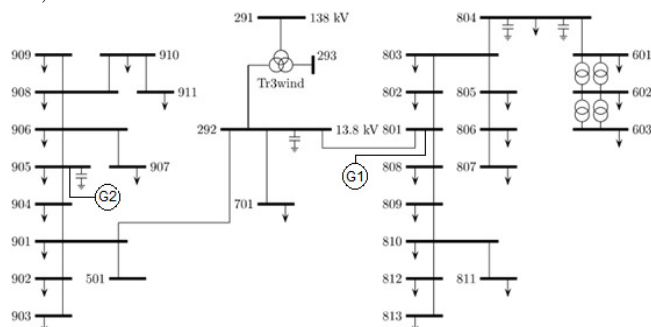


Figura 6: Sistema teste estudado.

Para avaliar o cumprimento dos requisitos LVRT do gerador eólico, um curto-circuito fase-fase-terra foi aplicado nas fases A e C do nó 801 do sistema teste com resistência de falta $R_f = 200\text{m}\Omega$. A falta foi aplicada no instante $t = 8\text{s}$ e removida 0,5s depois.

A Fig.7 mostra o comportamento da tensão terminal medida através do transdutor Tipo 1. É possível observar que a tensão terminal teve um afundamento de aproximadamente 55% da tensão nominal, não violando a curva LVRT.

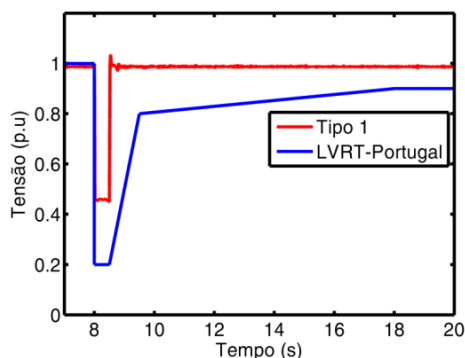


Figura 7: Tensão Terminal do transdutor Tipo 1.

Na Fig.8 é possível observar a resposta da tensão terminal medida através do transdutor Tipo 2. A tensão terminal teve um afundamento de aproximadamente 63% da tensão nominal, permanecendo ainda dentro da curva LVRT.

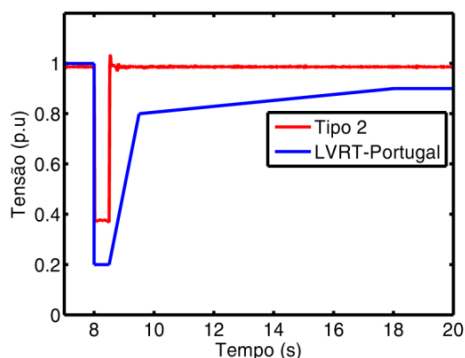


Figura 8: Tensão Terminal do transdutor Tipo 2.

A Fig.9 mostra a resposta da tensão terminal medida através do transdutor Tipo 3. Nesse caso a tensão terminal teve um afundamento de 40% da tensão nominal, respeitando os requisitos da curva LVRT.

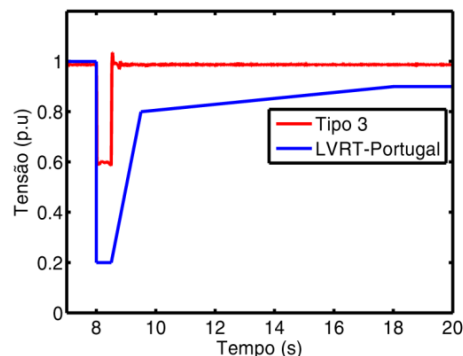


Figura 9: Tensão Terminal do transdutor Tipo 3.

Analizando as Figuras 7, 8 e 9 é possível notar que de acordo com o transdutor utilizado, o afundamento de tensão assume valores diferentes, embora nestes casos todas as medições cumprem os requisitos da curva LVRT e assim, o gerador eólico permanece em operação.

Quando o sistema está sobre condições desbalanceadas, os transdutores apresentados podem não ser adequados, porque eles acabam fazendo uma média das tensões de fase e, portanto, não é possível avaliar o comportamento individual de cada fase do sistema perante os afundamentos de tensão.

Para contornar essa situação, este trabalho propõem como medida alternativa para avaliar o cumprimentos dos requisitos da curva LVRT no sistema desbalanceado, que a medição da tensão terminal seja feita individualmente nas três fases do sistema, como mostra a Fig.10.

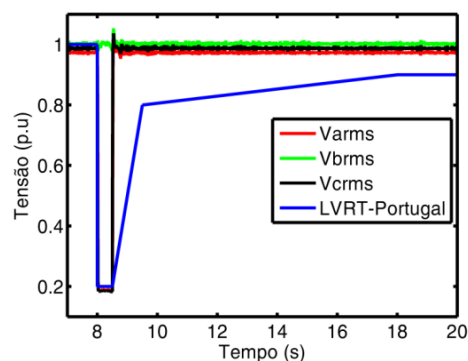


Figura 10: Medida da tensão terminal rms por fase.

A Fig.10 mostra que medindo a tensão terminal rms individualmente por fase, a tensão no PCC viola a curva LVRT nas fases A e C, devido a ocorrência do curto-circuito nessas fases. É possível observar também que a tensão terminal nas fases A e C tiveram um afundamento de aproximadamente 82 % da tensão nominal. Diante dessa situação, o gerador eólico deve desligar-se do sistema.

V. CONCLUSÃO

A maioria dos códigos de rede indicam o cumprimento da curva LVRT apenas para conexões com o sistema de transmissão. Além disso, os requisitos LVRT para geração de energia eólica no sistema de distribuição não abrangem explicitamente o caso da operação em condições desbalanceadas.

Sob condições desbalanceadas, a medição da tensão terminal pode ser realizada por diferentes esquemas. O afundamento de tensão atinge valores diferentes de acordo com o esquema de medição, levando a possíveis conclusões diferentes sobre a violação dos requisitos LVRT para a mesma condição de falta. Além disso, como a medição da tensão terminal é feita individualmente para cada fase, em casos desbalanceados pode-se observar a curva LVRT sendo violada por uma ou mais tensões de fase.

Já quando o esquema de medição trifásico é utilizado, o exemplo mostrado no artigo demonstra claramente que existem condições de falta o qual a violação monofásica é observada, mas o indicador trifásico gerado pelo medidor não identifica essa condição. Uma vez que o gerador pode sofrer a violação da curva LVRT em qualquer uma das tensões de fase, estes resultados indicam que, para condições desbalanceadas, todas as três fases deve ser analisada individualmente.

VI. APÊNDICE

TABELA I. DADOS DO GERADOR DFIG

Parâmetros	Descrição	Valores
R_s	Resistência do estator	0,0076 p.u
L_{ls}	Indutância de dispersão do estator	0,171 p.u
R_r	Resistência do rotor	0,005 p.u
L_{lr}	Indutância de dispersão do rotor	0,156 p.u
L_m	Indutância mútua	3,5 p.u
p	Número de pólos	6
V_t	Tensão terminal	1,0 p.u
H_g	Constante de inércia do gerador	0,5 s
H_t	Constante de inércia da turbina	3,0 s
K_{opt}	Constante ótima da turbina	0,579
f_s	Frequência de chaveamento dos conversores	3,0 kHz
K	Coefficiente de rigidez elástica	0,5 p.u/rad
D	Coefficiente de amortecimento	0,01 p.u/rad
C_{dc}	Capacitância do link CC	0,06 F
R_L	Resistência do filtro	0,003 p.u
L_L	Indutância do filtro	0,3 p.u
V_{ccref}	Tensão de referência do link CC	1200 V
P_{nom}	Potência Nominal do gerador	1,5 MW
V_w	Velocidade do vento	11,24 m/s
ω_{base}	Velocidade angular base	377 rad/s
S_{base}	Potência base	1,5 MW
V_{base}	Tensão base	575 V

REFERÊNCIAS

- [1] N. J. P. O. Barros, "Análise do impacto da integração de energias renováveis em redes distribuição". Dissertação, Dept. Eng., Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [2] "Wind turbines connected to grids with voltages above 100 kV"- Technical regulations for the properties and the control of wind turbines, Energinet.dk, Transmission System Operator of Denmark for Natural Gas and Electricity, Technical Regulations TF 3.2.5, 2004.
- [3] J. Ren, Y. Hu, W. Ji, and C. Liu, "Low Voltage Ride-through Control for Fixed Speed Wind Generators under Grid Unbalanced Fault," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE*, pp. 686-689
- [4] L. Peng, B. Francois, and Y. Li, "Improved Crowbar Control Strategy of DFIG Based Wind Turbines for Grid Fault Ride-Through," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*, pp. 1932-1938.
- [5] W. A. Qureshi, and N. C-K. Nair, "Systematic Development of Low Voltage Ride-Through (LVRT) Envelope for Grids," in *TENCON 2010-2010 IEEE Region 10 Conference*, pp.574-579.
- [6] B. Wei, and Y. Zhongdong, "Research on Low-voltage Ride-through Technology of Doubly-fed VSCF Wind Power Generation System," in *Energy and Environment Technology, 2009. ICEET '09. International Conference on*, pp.228-231.
- [7] S. L. A. Ferreira, A. S. Neto, R. F. Dias, J. P. Arruda, P. A. C. Rosas, F. A. S. Neves, F. C. Medeiros, D. O. C. Brasil, and S. R. Silva, "Análise de critérios de suportabilidade de centrais eólicas durante afundamentos momentâneos de tensão," in *Segundo Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, vol. 1, pp. 1-6, 2008.
- [8] F. Iov, A. D. Hansen, P. Sorensen, and N. A. Cutululis, "Mapping of grid faults and grid codes," Risø National Laboratory and Technical University of Denmark., Roskilde, Denmark, Tech. Rep. Risø-R-1617(EN), Jul. 2007.
- [9] R. H. Salim, "Uma Nova Abordagem para a Análise da Estabilidade a Pequenas Perturbações em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geradores Síncronos Distribuídos," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. São Paulo, São Carlos, 2011.
- [10] L. Lin, L. Song, W. Li and S. Jing, "Modal analysis concerning the control mode of doubly-fed induction generator," in *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09*, pp. 1-6.
- [11] R. H. Salim, and R. A. Ramos, "A Model-Based Approach for SmallSignal Stability Assessment of Unbalanced Power Systems," *Transactions on Power Systems*, vol. 27, n. 4, pp. 2006-2014, 2012.
- [12] Zamadei, J. A. "Projeto de controladores de amortecimento para unidades eólicas de geração baseadas em gerador de indução uplamente alimentado". Dissertação, Dept. Eng., UTFPR, Pato Branco, PR, 2012.
- [13] "EMTP-RV The Reference for Power Systems Transients". Disponível em: www.emtp-software.com.
- [14] Hydro-Québec TransÉnergie – Transmission Provider Technical Requirements for the connection of power plants to the Hydro-Québec Transmission System, March 2006.
- [15] R. Reginatto, D. Sonoda and B. Nascimento. "Influence of Unbalanced Operation on the Minimum SCR for Grid Interconnection of Wind Farms with Doubly-Fed Induction Generators," in *9Th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission-Clagtee, 2011*, pp. 1-9.