

Análise de Transitórios de Falta em Linha de Transmissão Considerando Conexão de Parque Eólico Interfaceado por Conversores

Jônatas S. Costa

Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Brasília, Brasil
jonatascosta@lapse.unb.br

Letícia A. Gama

Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Brasília, Brasil
leticciagama@lapse.unb.br

Rodrigo T. Toledo

Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Brasília, Brasil
rodrigotenorio@lapse.unb.br

Gabriel B. Santos

Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Brasília, Brasil
gaabriel.barreto@gmail.com

Felipe V. Lopes

Depto. de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília
Brasília, Brasil
felipevlopes@ene.unb.br

Paulo S. Pereira Jr

CONPROVE
Indústria e Comércio
Uberlândia, Brasil
psjunior@conprove.com.br

Gustavo S. Salge

CONPROVE
Indústria e Comércio
Uberlândia, Brasil
suporte@conprove.com.br

Moisés J. B. B. Davi

CONPROVE
Indústria e Comércio
Uberlândia, Brasil
suporte@conprove.com.br

Resumo—Neste trabalho, apresenta-se uma análise de transitórios de falta em uma linha de transmissão (LT) de 500 kV/60 Hz, a qual conecta um parque eólico interfaceado por conversores a um sistema com geração tradicional baseado em máquinas síncronas. Para tanto, um parque eólico real de aproximadamente 220 MW em operação no sistema elétrico Brasileiro foi modelado em um programa do tipo *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), a saber *Power System Simulator* (PS SIMUL), permitindo a simulação de transitórios de falta na LT analisada já contemplando o comportamento dos conversores existentes nos aerogeradores modelados. Dentre as análises apresentadas, destacam-se estudos sobre o comportamento de tensões e correntes durante faltas na LT, incluindo a análise de transitórios quando da variação dos ângulos de incidência de falta, das resistências de falta e do local do curto-circuito. Por fim, realiza-se uma análise comparativa das variações de tensão e corrente verificadas no lado do parque eólico e no lado do sistema com geração tradicional, demonstrando o impacto da presença dos conversores nas formas de onda monitoradas.

Keywords – Conversores, faltas, geração eólica, linhas de transmissão, transitórios eletromagnéticos.

I. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a crescente penetração de fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira tem sido destaque no setor elétrico. De fato, a evolução tecnológica tem permitido uma maior eficiência de unidades de geração eólica e fotovoltaica, as quais são tradicionalmente classificadas como fontes de energia alternativas às unidades geradoras tradicionais baseadas em máquinas síncronas de grande porte [1], [2]. Tal fato pode ser comprovado pela contribuição dos parques eólicos situados na região Nordeste do Brasil, os quais têm suprido aproximadamente 93% da demanda da região com capacidade instalada da ordem de 11,5 GW, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [3].

Apesar dos benefícios da entrada massiva de fontes renováveis na matriz energética brasileira, alguns cenários desafiadores do ponto de vista de proteção, controle e supervisão dos sistemas elétricos de potência têm chamado a atenção da comunidade científica e das concessionárias de energia elétrica. Isso se deve ao fato de alguns dos tipos mais eficientes de geração de energia elétrica via fontes renováveis serem interfaceados por conversores, tais como os sistemas fotovoltaicos e eólicos com turbinas dos tipos III e IV [4]. Como resultado da operação dos conversores, distorções são induzidas nas formas de onda de tensões e correntes, as quais passam a diferir dos sinais tipicamente verificados em sistemas com geração tradicional baseados em máquinas síncronas de grande porte. De estudos realizados, nota-se que essas distorções podem se mostrar em forma de conteúdo harmônico adicional ou mesmo limitação das variações de tensão e corrente nos terminais de conexão via conversores, o que tem resultado em grande preocupação das empresas proprietárias de ativos desse tipo quanto a um possível comprometimento do funcionamento de tecnologias clássicas de monitoramento e proteção [1], [4].

Diante do contexto supracitado e considerando a crescente inserção de fontes eólicas no Sistema Interligado Nacional (SIN), diversos grupos científicos e empresas do setor elétrico têm envidado esforços para melhor entender as formas de onda de tensão e corrente durante curtos-circuitos quando considerada a presença de fontes eólicas interfaceadas por conversores eletrônicos. Nesse sentido, vários trabalhos têm sido reportados na literatura especializada visando a análise da influência de parques eólicos com interface via conversores sobre as componentes fundamentais de tensão e corrente em situações de curto-circuito [4] [5], sobre o desempenho de funções de proteção [6], bem como voltados para a modelagem de parques eólicos de diferentes tipos [5].

Em decorrência da grande diversidade de topologias das turbinas eólicas, assim como da importância de estudos de transitórios de falta durante a concepção de soluções para proteção e monitoramento de redes elétricas, a análise de transitórios de faltas com foco na demonstração do impacto das características do distúrbio sobre as formas de onda medidas nas proximidades de parques eólicos figuram como tema de grande interesse para a comunidade científica em geral. Assim, apresenta-se nesse trabalho uma análise de transitórios de faltas em um sistema com topologia em concordância com a rede em operação no SIN composto por uma LT de 500 kV/60 Hz, a qual interliga um parque eólico de aproximadamente 220 MW a um sistema com geração baseada em máquinas síncronas de grande porte.

Ao longo dos estudos propostos, diferentes casos de faltas no sistema teste modelado foram simulados por meio do programa PS SIMUL [7], através do qual as características dos transitórios de falta e das variações de tensões e correntes durante curtos-circuitos foram avaliadas quando da variação de alguns parâmetros. Ressalta-se que no processo de modelagem dos conversores dos aerogeradores estudados, contemplaram-se detalhes dos sistemas de controle e dos conversores, de tal forma a permitir simulações mais realísticas do tema em estudo. Por outro lado, na parte do sistema com geração tradicional, a modelagem clássica de unidades de geração com alta inércia foi realizada, tal como tipicamente considerado em estudos elétricos, permitindo a comparação dos efeitos dos conversores nos transitórios de falta.

II. UNIDADES EÓLICAS

No presente trabalho, consideram-se unidades eólicas do tipo *Full-Converter*, as quais são constituídas de máquinas síncronas e conversores, cuja topologia é ilustrada na Fig. 1. Nessa seção, apresentam-se detalhes sobre as unidades eólicas implementadas, descrevendo os fundamentos de suas partes características, tais como: turbina eólica, gerador síncrono, unidade retificadora, unidade inversora e sistema de excitação. Tais fundamentos são necessários para a compreensão tanto da modelagem do sistema teste quanto dos resultados obtidos apresentados nas demais seções.

A. Turbina Eólica

No âmbito da operação de parques eólicos, a turbina eólica, movimentada pelos ventos, tem o papel de gerar energia mecânica, a qual é posteriormente convertida em energia elétrica. Nesse contexto, sabe-se que a potência mecânica produzida pela turbina é expressa por:

$$P_m = 0,5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v_{vento}^3, \quad (1)$$

onde C_p é o coeficiente de potência, ρ é a densidade do ar (kg/m^3), A é a área varrida pelas turbinas (m^2), e v_{vento} é a velocidade do vento (m/s).

O coeficiente C_p expressa a relação entre a potência disponível no vento e aquela extraída pela turbina eólica [1]. A lei de Betz estabelece um máximo valor teórico para esse coeficiente de 0,59, o que significa que apenas 59% da potência total

disponível pode ser convertida em potência mecânica pelas turbinas [2]. A Eq. 2 mostra como C_p pode ser calculado, sendo este dependente do ângulo de passo das pás da turbina β e do coeficiente λ , o qual expressa matematicamente a relação da velocidade da pá com a posição angular das pás [1].

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}}, \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}}. \quad (3)$$

B. Gerador Síncrono

Na configuração do sistema em estudo, considera-se a aplicação de um gerador síncrono (GS), o qual é responsável por converter energia mecânica proveniente das turbinas eólicas em energia elétrica. Ressalta-se que a topologia *Full-Converter* permite a aplicação de máquina síncrona de rotor bobinado ou de imã permanente. A interface do GS com a rede elétrica é feita por um conversor eletrônico de potência, ou seja, o gerador é totalmente desacoplado da rede. Dessa forma, o conversor permite a operação do gerador em uma faixa variável de velocidades e, conseqüentemente, produz potência a partir de tensão e frequência variáveis [2], [8]. Um outro aspecto a ser observado é que o GS com um grande número de polos elimina a caixa de engrenagens mecânica, sendo possível acoplar o rotor da turbina eólica diretamente ao eixo de entrada da máquina síncrona. O modelo de representação do GS adotado possibilita a reprodução de fenômenos de regime permanente, dinâmico e transitório, sendo descrito em maiores detalhes em [1].

C. Unidade Retificadora

A unidade retificadora é ilustrada na Fig. 1. Esta unidade é composta por uma ponte retificadora trifásica não controlada e conversor CC do tipo *boost*, de modo que, do lado do gerador, tem como função converter tensões variáveis em uma grandeza de valor contínuo. Além disso, por meio do algoritmo de controle associado a essa unidade, busca-se extrair a máxima potência possível do GS, dadas as condições de energia fornecida pela turbina eólica, consistindo no chamado rastreamento do ponto de máxima potência [8].

Ainda sobre a operação da unidade retificadora, cabe ressaltar que durante afundamentos de tensão no lado da rede elétrica ou sobretensões no elo de corrente contínua (CC) (ver Fig. 1), o controle dessa unidade reduz o valor de energia extraída, conforme reportado em [1]. Essa estratégia visa limitar a contribuição de uma unidade eólica durante um curto-circuito, reduzindo também sobretensões do elo CC.

D. Unidade Inversora

Na unidade inversora, a tensão CC disponibilizada a partir da unidade retificadora é convertida em uma tensão CA com amplitude e frequência de interesse [8]. Trata-se de um inversor de dois níveis que regula o elo em tensão contínua e controla a injeção de potência reativa na rede. O ajuste do fluxo de potência é feito por meio do controle da corrente produzida

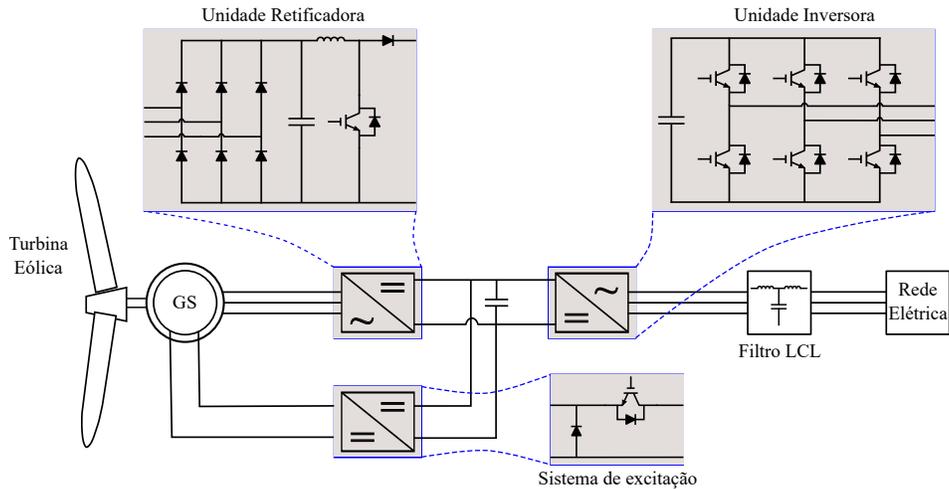


Figura 1. Topologia do aerogerador estudado.

pelo inversor. Ademais, na saída do inversor, associam-se filtros LCL para proporcionar um comportamento indutivo e ainda atenuar componentes de alta frequência produzidas pela *Pulse Width Modulation* (PWM) [1].

E. Sistema de Excitação

Para o suprimento da corrente de excitação do gerador emprega-se um conversor CC do tipo *buck*. Esse conversor possibilita uma tensão média de saída menor do que a tensão de entrada, reduzindo portanto os níveis de tensão do elo de corrente contínua [8].

III. SISTEMA TESTE AVALIADO

A modelagem de aerogeradores para fins de simulações de transitórios eletromagnéticos é uma questão desafiadora, pois requisita a implementação detalhada de conversores e seus respectivos controles. É comum verificar na literatura investigações sobre simplificação de modelos passíveis de utilização em estudos elétricos, sem perda de qualidade na representação do comportamento global de parques eólicos para determinadas faixas de frequência. No entanto, os modelos em simulações computacionais de transitórios eletromagnéticos exigem um maior nível de detalhe e, por consequência, um maior esforço computacional, especialmente em etapas iniciais da simulação, durante a convergência do sistema para o ponto de operação de interesse.

No estudo aqui apresentado, os parques eólicos são compostos por aerogeradores do tipo *Full-Converter*, sendo que, o GS e a unidade retificadora foram modelados como uma fonte de corrente controlada. Já na unidade inversora contemplou-se os elementos não-lineares e pulsos gerados pelo controle. A estratégia de controle e parâmetros dos aerogeradores considerados são descritos em [1].

Dessa forma, utilizou-se o *software* PS SIMUL, o qual consiste em um programa EMTP Brasileiro que permite a modelagem de sistemas de potência/controle e simulação de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos. Esse programa possui ferramentas e diversos componentes que facilitam a

modelagem de sistemas baseados em conversores, os quais otimizam o processo de simulações.

Assim como outros programas do tipo EMTP, o PS SIMUL utiliza o método trapezoidal em seu processo de cálculo numérico de integrais, alterando-o para o método de Euler e interpolações na ocorrência de chaveamentos, o que evita as ocorrências de oscilações numéricas e possibilita chaveamentos precisos durante a simulação. Nesse sentido, é importante frisar que essa característica de amortecimento de oscilações numéricas durante chaveamentos se mostra interessante para a simulação de sistemas com conversores, nos quais se verifica um grande número de mudanças de estado de chaves durante a operação do sistema. Com isso, permite-se representar o sistema de forma realística, sem influência de oscilações numéricas que poderiam eventualmente ser confundidas com transitórios eletromagnéticos provenientes da rede elétrica.

Além dos recursos do PS SIMUL citados até então, destaca-se ainda a ferramenta *Snapshot*, a qual foi empregada no presente trabalho para facilitar a simulação das unidades de geração eólica. Em resumo, por meio de um processo de gerenciamento de variáveis globais que possibilitam a definição de um ajuste comum a vários blocos em um único ponto, essa ferramenta permite a realização de testes múltiplos alterando uma ou mais constantes do sistema, definindo um *script* de diversos cenários, porém possibilitando o congelamento de estados de variáveis pré-definidas do sistema de potência/controle em determinados instantes de tempo de uma simulação. Com isso, ao inicializar uma simulação e, uma vez finalizado o período de estabilização dos controles e conversores no estado de regime permanente esperado, pode-se obter uma "foto" da rede elétrica, aqui denominada de *Snapshot*, a qual pode ser usada posteriormente para iniciar de forma mais rápida as simulações seguintes a partir do ponto onde foi realizada a checagem do estado do sistema. Como resultado, em situações nas quais a convergência de um modelo é lenta, assim como no sistema avaliado nesse trabalho, a ferramenta de *Snapshot* se mostra bastante útil, reduzindo sobremaneira o tempo de simulação e, conseqüentemente, esforço computacional.

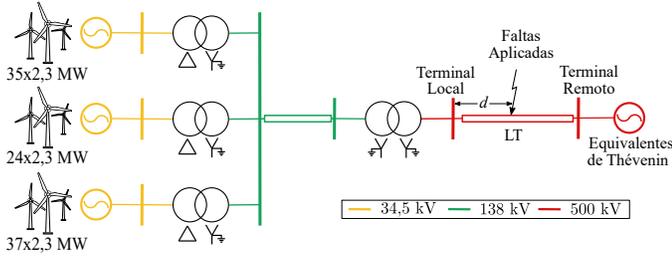


Figura 2. Diagrama unifilar do sistema teste.

O sistema teste modelado no PS SIMUL é ilustrado na Fig. 2, consistindo em uma LT de 500 kV/60 Hz com 239 km de comprimento, a qual foi modelada a parâmetros distribuídos e constantes na frequência como perfeitamente transposta. Essa LT é responsável por conectar três parques eólicos (terminal local) e circuitos equivalentes de Thévenin (terminal remoto), que por sua vez representam um sistema real brasileiro.

A análise de transitórios é realizada mediante o monitoramento dos sinais de tensão e corrente nos terminais local e remoto durante a aplicação de faltas ao longo da LT, conforme indicado na Fig. 2. Os cenários de falta considerados nesse estudo contemplam faltas monofásicas, que consistem no tipo mais comum em LTs, porém considerando diferentes cenários em relação aos parâmetros: ângulo de incidência θ , local da falta d e resistência de falta R_f . Nas simulações, que foram realizadas no domínio do tempo, utilizou-se passo de integração de $1,0 \mu s$, emulando sinais analógicos reais. Ademais, ressalta-se que nenhum filtro adicional e nem processos de subamostragem foram aplicados às oscilografias obtidas das simulações via PS SIMUL, permitindo a visualização das componentes transitórias sem redução da representatividade destas em relação ao passo de integração escolhido. Considerou-se que os sistemas de proteção não atuam.

IV. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados e análises das simulações, as quais estão descritas na Tabela I.

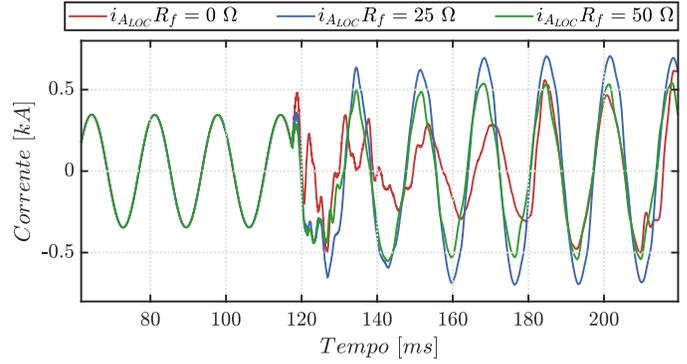
Para o caso 1, os sinais de corrente da fase A em ambos os terminais monitorados da LT são ilustrados na Fig. 3, na qual nota-se que as formas de onda de corrente verificadas diferem significativamente entre si, demonstrando parte dos efeitos da operação dos conversores nas unidades eólicas.

No terminal local, as contribuições são bastante reduzidas em amplitude quando comparadas às do sistema tradicional. Adicionalmente, ao observar as correntes mediante a variação de R_f , verifica-se, nos primeiros ciclos do curto-circuito, um comportamento atípico no terminal local decorrente de um período transitório dos conversores.

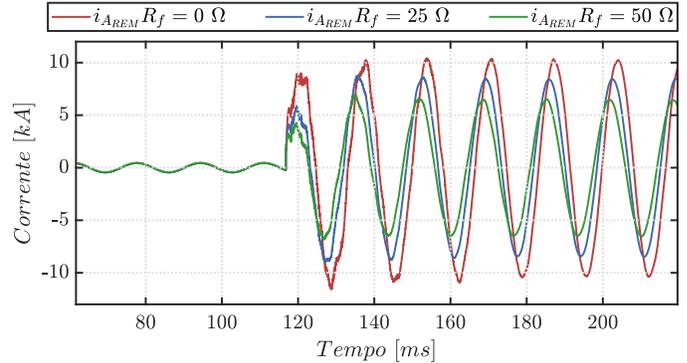
Para faltas monofásicas francas, ou seja, $R_f = 0 \Omega$, usualmente espera-se que as contribuições de correntes sejam superiores do que para faltas com valores de R_f não nulo. No entanto, as contribuições de curto-circuito do terminal local não seguem esse padrão, apresentando comportamento contrário, de modo que em regime transitório a corrente local

Tabela I
LISTA DE CASOS

Caso	Parâmetro	
	Fixo	Variado
1	$d = 90\%$; $\theta = 90^\circ$	$R_f = 0 \Omega, 25 \Omega$ e 50Ω
2	$d = 30\%$; $R_f = 0 \Omega$	$\theta = 0^\circ, 45^\circ$ e 90°
3	$d = 70\%$; $R_f = 0 \Omega$	$\theta = 0^\circ, 45^\circ$ e 90°
4	$R_f = 0 \Omega$; $\theta = 0^\circ$	$d = 10\%, 50\%$ e 90%



(a)



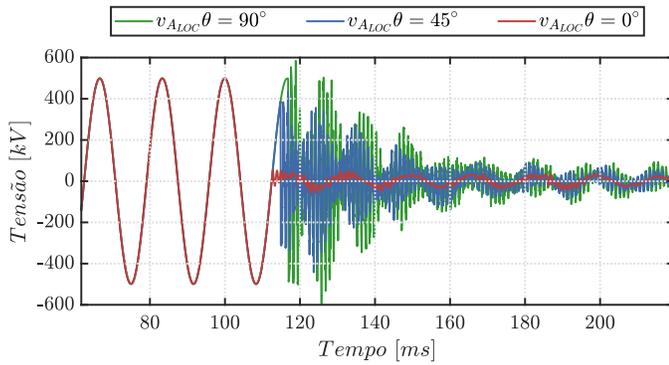
(b)

Figura 3. Caso 1: correntes monitoradas no (a) terminal local e (b) terminal remoto.

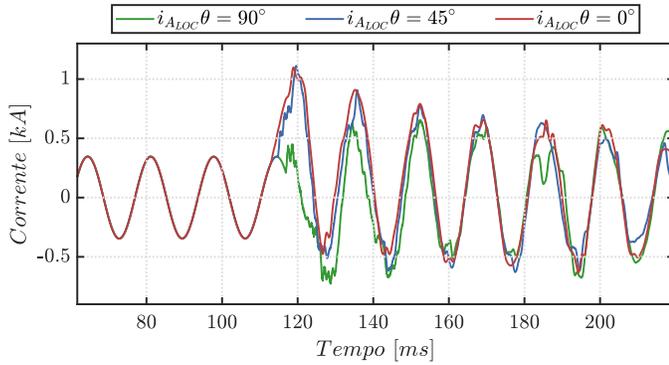
da falta franca apresenta valores de amplitude menores do que para as faltas com $R_f = 25 \Omega$ e $R_f = 50 \Omega$. É importante citar que após o período transitório de falta, as correntes convergem para valores aproximadamente iguais, independentemente da característica da falta.

A influência da variação do ângulo θ é analisada nos casos 2 e 3. Para isso, os ângulos de incidência são variados em $\theta = 90^\circ$ (pico da tensão no ponto de falta), 45° e 0° (zero da tensão no ponto de falta), considerando-se locais de falta descritos na Tabela I.

Das Figs. 4 (a) e 5 (a), percebe-se a influência do ângulo θ nas tensões. Para $\theta = 90^\circ$, conforme esperado, os transitórios verificados são significativos, atenuando ao longo do tempo. Por outro lado, para $\theta = 0^\circ$, os transitórios são mais suaves, se mostrando menos relevantes. Já para $\theta = 45^\circ$, as tensões assumem valores intermediários em relação aos outros dois ângulos, demonstrando que os níveis de transitórios respeitam os conceitos clássicos que indicam maior nível de compo-



(a)



(b)

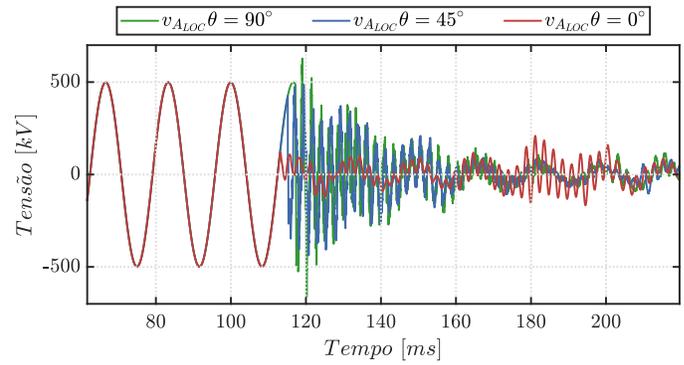
Figura 4. Caso 2: (a) tensões e (b) correntes no terminal local considerando variação de θ , $d = 30\%$.

entes de alta frequência induzidas para faltas iniciadas nas proximidades do pico da tensão.

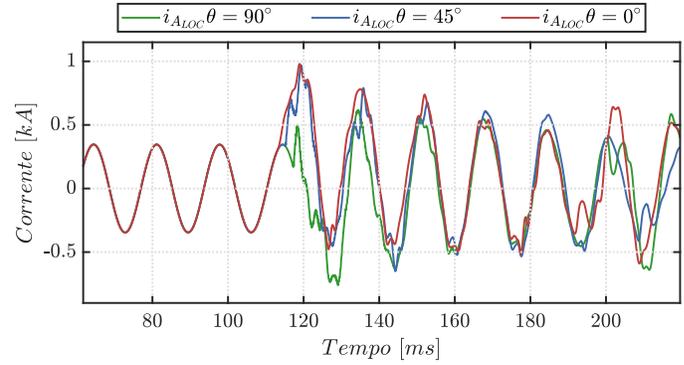
Nota-se que em 30% da LT (mais próximo dos parques eólicos), Fig. 4, as tensões e correntes possuem oscilações com frequências mais elevadas do que quando aplicada uma falta em 70%, Fig. 5, fato este que tem relação não só com o fenômeno de propagação de ondas viajantes em LTs, as quais resultam em frequências características mais elevadas para distúrbios mais próximos do ponto de medição, como também da interação dessas componentes com os conversores das unidades eólicas. De fato, deve-se notar que apesar da falta não ter ocorrido exatamente no ponto de medição, as tensões assumiram valores muito baixos, com conteúdo harmônico elevado, enquanto que as correntes convergiram para valores semelhantes durante o regime de falta, conforme demonstrado nas Figs. 4 (b) e 5 (b), mesmo variando-se o local da falta. Ademais, cabe comentar sobre a influência de θ sobre a componente CC de decaimento exponencial verificada nas correntes, a qual se mostrou mais proeminente em situações de $\theta = 0^\circ$ e 45° .

Por fim, para o caso 4, as tensões e correntes dos terminais local e remoto são ilustrados nas Figs. 6 e 7, respectivamente.

Observa-se que em ambos os terminais ocorrem afundamentos das tensões, independentemente da localização de aplicação da falta. Apesar disso, é importante destacar que no terminal do lado da conexão do complexo eólico, as tensões apresentam níveis de afundamento muito maiores do que os



(a)



(b)

Figura 5. Caso 3: (a) tensões e (b) correntes no terminal local considerando variação de θ , $d = 70\%$.

verificados no terminal de conexão do sistema tradicional. Ainda, nota-se que no terminal remoto, os afundamentos de tensão verificados aumentam de acordo com a aproximação da falta em relação ao ponto de medição. No entanto, no lado do parque eólico, para faltas em 50% e 90% as tensões afundam sem apresentar uma proporcionalidade em relação ao local do distúrbio, recaindo em valores aproximadamente nulos para uma falta em 10%. Tal comportamento é decorrente também dos conversores do parque eólico, cuja estratégia de regulação de tensão por meio da compensação de potência reativa não é realizada.

Uma outra constatação obtida a partir da análise das Figs. 6 e 7 diz respeito ao conteúdo harmônico e inter-harmônico dos sinais. Do exposto, verificam-se oscilações de frequências acima da fundamental nos sinais de tensão do terminal local, estando estas relacionadas à maior proximidade do distúrbio em relação ao complexo eólico, enquanto que no terminal de conexão do sistema tradicional o mesmo não é verificado. Assim, destaca-se também a inserção de conteúdo harmônico e inter-harmônico nos sinais monitorados, o que eventualmente pode ser um problema durante a aplicação de filtros tradicionalmente empregados em sistemas de controle e proteção.

Das Figs. 6 (b) e 7 (b), verifica-se a diferença entre as contribuições de corrente da geração eólica e do sistema tradicional. Nestes casos, é evidente que as correntes locais são limitadas durante a incidência da falta em consequência de controles associados à unidade inversora, mesmo sendo

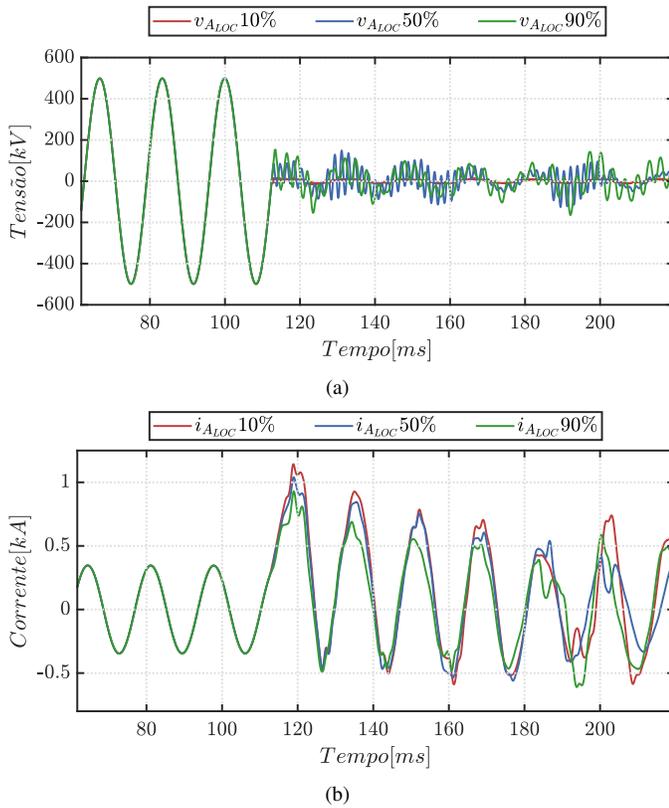


Figura 6. Caso 4: (a) tensões e (b) correntes no terminal local considerando variação do local de falta d .

a falta aplicada em pontos distintos da LT. Por outro lado, no terminal remoto, a depender da localização do ponto de falta, as correntes atingem valores de amplitudes diferentes entre si, apresentando uma proporcionalidade em relação ao local do distúrbio. Ademais, é importante destacar novamente o surgimento de maior conteúdo harmônico e inter-harmônicas nas correntes do terminal local, sendo também oriundas dos conversores das unidades eólicas modeladas.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se uma análise de transitórios de falta em uma LT de 500 kV/60 Hz que conecta um sistema composto por parques eólicos com aerogeradores da topologia *Full-Converter* e um sistema de geração convencional, com foco na avaliação do impacto dos conversores das unidades eólicas. Para tanto, usou-se o programa PS SIMUL, um *software* do tipo EMTP que possui características adequadas para simulação de sistemas baseados em conversores.

A análise de transitórios de faltas foi realizada por meio do estudo das oscilografias geradas via PS SIMUL das tensões e correntes em ambos os terminais da LT monitorada. Dos resultados obtidos, verifica-se um comportamento atípico das correntes e tensões em decorrência da atuação dos conversores, os quais tendem a manter a geração eólica em um mesmo ponto de operação, independentemente dos cenários verificados na rede elétrica externa. Desse modo, transitórios com diferenças significativas foram verificados quando comparados os termi-

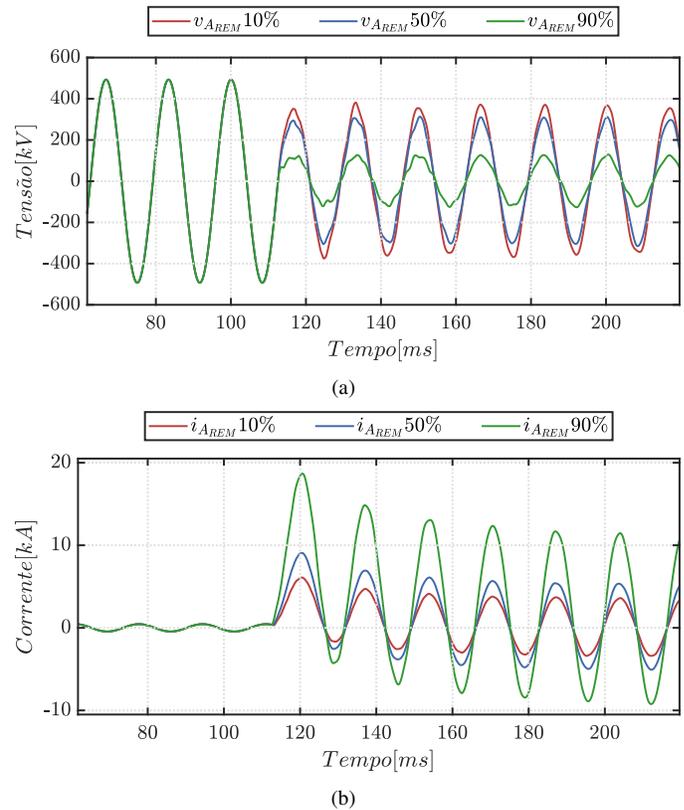


Figura 7. Caso 4: (a) tensões e (b) correntes no terminal remoto considerando variação do local de falta d .

nais do parque eólico e do sistema tradicional, demonstrando a necessidade de modelagem apropriada desses elementos quando da análise de funções de controle e proteção. De fato, a limitação das correntes de falta, falta de proporcionalidade dos afundamentos de tensão em relação ao ponto de falta e inserção de conteúdo harmônico e inter-harmônico nos sinais de tensão e corrente foram comprovados, fatores estes que podem figurar como fontes de erro para soluções de controle, supervisão, proteção e análise de perturbações existentes.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Reis, "Uma contribuição para o controle operativo de unidades eólicas: modelagem, regulação de tensão e minimização das distorções harmônicas," Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- [2] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power conversion and control of wind energy systems*. John Wiley & Sons, 2011, vol. 76.
- [3] *Boletim Mensal de Geração Eólica*, ONS, 2019.
- [4] E. Farantatos, U. Karaagac, H. Saad, and J. Mahseredjian, "Short-circuit current contribution of converter interfaced wind turbines and the impact on system protection," in *2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control-IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid*. IEEE, 2013, pp. 1–9.
- [5] A. Goharrizi, D. Muthumuni, and Y. Pipelzadeh, "Modeling of type-3 wind farm and investigation of fault contribution in power system," in *Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [6] J. Chavez, M. Popov, A. Novikov, S. Azizi, and V. Terzija, "Protection function assessment of present relays for wind generator applications," in *International Conference on Power Systems Transients*, 2019, pp. 1–6.
- [7] *PS SIMUL: Software for Power System Modeling and Simulation of Electromagnetic Transients (in Portuguese)*, Conprove Engenharia, Industry and Commerce, Uberlândia, June 2019. [Online]. Available: http://www.conprove.com.br/pub/i_ps_simul.html.
- [8] M. Rashid, *Power electronics handbook*. Butterworth-Heinemann, 2017.