

Sistema Elétrico de Potência composto por Aero geradores: Região de Estabilidade sob a Restrição *Low-Voltage Ride-Through*

Alexandre P. Sohn, Adriano L. Abrantes, Luís F. C. Alberto
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de São Paulo
São Carlos, Brasil
alexandresohn@usp.br, adriano.abrantes@usp.br, lfcalberto@usp.br

Abstract—Com a crescente penetração de fontes renováveis, o problema de estabilidade transitória mudou e novos cenários de instabilidade surgiram. Consequentemente, os fundamentos de métodos diretos precisam ser revistos para a correta avaliação da estabilidade do sistema elétrico. Modos de instabilidade desencadeados pela desconexão de fontes renováveis estão comumente relacionados à violação de limites e não ao problema de sincronismo entre os geradores síncronos. Neste trabalho, o conceito de região de estabilidade restrita é utilizado para iniciar o estudo de estabilidade transitória de um sistema elétrico de potência na presença de um aerogerador, sob a curva *low-voltage ride-through* como restrição. A região de estabilidade restrita é estudada através de um sistema auxiliar, que possui sua região de estabilidade irrestrita igual à região de estabilidade restrita do sistema de equações que modela o sistema elétrico de potência em estudo.

Index Terms—Aerogerador, *low-voltage ride-through*, métodos diretos, região de estabilidade restrita.

I. INTRODUÇÃO

O modelo tradicional de geração de energia elétrica na maioria dos países é bem conhecido: a energia elétrica é produzida principalmente por grandes e centralizadas plantas de energia, a exemplo das usinas hidrelétricas e termelétricas. Especialmente nos últimos anos, os sistemas elétricos ao redor do mundo têm experimentado consideráveis penetrações de fontes renováveis. Projeções indicam a crescente penetração destas fontes em vários países. As tecnologias envolvidas referem-se às energias eólica, hidráulica, geotérmica, solar, marinha e proveniente da biomassa [1]. Com o crescimento da demanda por energia elétrica, os avanços técnicos conquistados, a desregulação dos mercados e a crescente atenção à sustentabilidade ambiental, uma nova matriz energética é estimulada. Esta nova matriz implica em um novo modelo de sistema elétrico de potência. Este modelo apresenta agora uma variedade maior de sistemas de geração, notadamente renováveis, concentrados em grandes plantas ou distribuídos pelo sistema.

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo N° 2014/01158-0) pelo suporte financeiro.

Apesar dos benefícios proporcionados pela introdução de fontes renováveis nos sistemas elétricos, um novo grau de complexidade se estabeleceu. Consequentemente, surgiram inúmeros desafios relacionados à segurança e à confiabilidade destes sistemas. Neste contexto, um planejamento detalhado da operação, um sistema de proteção bem projetado e ferramentas confiáveis para a avaliação correta e rápida da estabilidade transitória do sistema elétrico, são indispensáveis.

Métodos diretos evoluíram significativamente nos últimos 30 anos, permitindo o desenvolvimento de ferramentas para avaliações em tempo real da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência de grande porte [1]. Considerando o novo modelo de sistema elétrico, as análises de estabilidade transitória e os métodos diretos associados devem ser revistos, contemplando agora fontes renováveis de energia elétrica.

Os fundamentos relacionados às análises de estabilidade transitória e em particular aos métodos diretos, foram desenvolvidos sob a suposição de que os modos de instabilidade de interesse são aqueles associados à perda de sincronismo entre os geradores síncronos do sistema. A perda de sincronismo é matematicamente associada à trajetória do sistema em falta que abandona a região de estabilidade (RE) do ponto de equilíbrio estável do sistema pós-falta. Entretanto, os sistemas elétricos de potência modernos, que apresentam grandes penetrações de fontes renováveis, exibem diferentes tipos de geradores e novos cenários de instabilidade. Um novo cenário de instabilidade, que é investigado neste trabalho, está relacionado à violação de limites, que podem causar a desconexão destas unidades de geração e consequentemente, causar interrupções no fornecimento de energia elétrica e um eventual colapso do sistema elétrico como um todo.

Os limites de operação não são usualmente considerados em modelos dinâmicos de sistemas elétricos de potência e a violação destes limites podem ocorrer antes que a trajetória do sistema dinâmico abandone a RE do ponto de equilíbrio estável do sistema pós-falta. Este fenômeno ocorre, por exemplo, quando a tensão do aerogerador viola a curva de suportabilidade a afundamentos de tensão ou curva *low-voltage ride-through* (LVRT), interpretada como uma restrição

referente aos limites operacionais do sistema de geração. Este novo cenário de instabilidade justifica a necessidade de revisar o problema de estabilidade transitória e em particular, os fundamentos de métodos diretos.

O principal objetivo deste trabalho é estudar a RE de um sistema elétrico de potência na presença de um aerogerador sob a curva LVRT como restrição e contribuir para o desenvolvimento de métodos diretos para análises futuras de estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência que contemplem grandes penetrações de fontes renováveis. A região de estabilidade restrita (RER) é estudada através de um sistema auxiliar irrestrito que possui sua RE irrestrita igual à RER do sistema restrito. A caracterização desta região é discutida neste trabalho.

Este artigo é organizado pelas seções seguintes: a seção II exibe uma breve descrição da teoria referente à RER; a seção III introduz o sistema teste usado para validar a teoria exposta previamente e descreve a restrição LVRT; a seção IV resume os principais resultados e as discussões pertinentes; a seção V sugere trabalhos futuros; a seção VI apresenta as conclusões.

II. REGIÃO DE ESTABILIDADE RESTRITA

No contexto de estudos de estabilidade, os sistemas elétricos de potência são usualmente modelados por (1):

$$\begin{pmatrix} \text{Sistema} \\ \text{original} \end{pmatrix} \begin{cases} \dot{x} = f(x, y), & f : \mathbb{R}^{n+m} \rightarrow \mathbb{R}^n \\ 0 = g(x, y), & g : \mathbb{R}^{n+m} \rightarrow \mathbb{R}^m \end{cases} \quad (1)$$

onde $x \in \mathbb{R}^n$ é o vetor das variáveis dinâmicas de estado, $y \in \mathbb{R}^m$ é o vetor das variáveis algébricas e $f(x, y)$ e $g(x, y)$ são funções suaves.

As trajetórias do sistema estão restritas ao subconjunto de $\mathbb{R}^{n+m}$, definido por (2):

$$L = \{(x, y) \in \mathbb{R}^{n+m} : 0 = g(x, y)\} \quad (2)$$

O subconjunto L contém os pontos singulares e a sua coleção é denominada de superfície singular, definida por (3):

$$S = \{(x, y) \in L : \det g_y(x, y) = 0\} \quad (3)$$

onde $g_y(x, y)$ é a derivada das equações algébricas com respeito às variáveis algébricas [2].

A caracterização da fronteira da RE do sistema de equações diferenciais e algébricas (EDAs) é relevante para o desenvolvimento de métodos diretos. A caracterização desta fronteira pode ser explorada para estimar a RE através de uma função energia. Neste contexto, foi desenvolvida em [3] e [4] a teoria fundamental relacionada aos sistemas não-lineares restritos, que modelam sistemas elétricos de potência. Foi mostrado que sob certas condições, a fronteira da RE é formada por variedades estáveis de pontos de equilíbrio na fronteira e pela união de variedades estáveis de pseudo-equilíbrios e pontos semi-singulares na fronteira, além de partes da superfície singular.

A. Ilustração da RER

A RER de um ponto de equilíbrio assintoticamente estável x_s , é o conjunto de pontos cujas trajetórias iniciam e permanecem dentro da região factível de operação X para todo $t \geq 0$ e convergem para o ponto de equilíbrio estável quando $t \rightarrow \infty$. A região factível de operação X é definida como o conjunto cujas trajetórias não violam os limites de operação do sistema físico. Qualquer trajetória que atinja a fronteira de X e então viole qualquer limite de operação, é considerada infactível e instável.

A Fig. 1 mostra uma abordagem conceitual da RE de um ponto de equilíbrio estável x_s e sua RER:

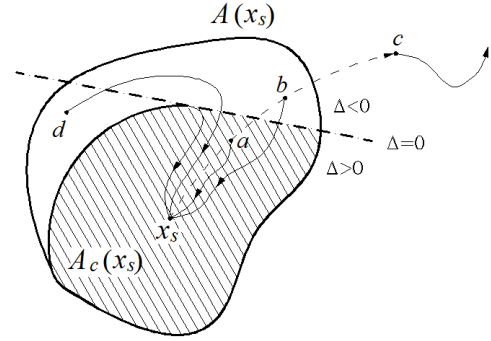


Fig. 1. Região de estabilidade restrita (área hachurada).

A RE do ponto de equilíbrio estável x_s para o sistema original (1) é representada por $A(x_s)$. A RER do ponto de equilíbrio estável x_s para o sistema EAD com a adição da restrição de desigualdade é representada por $A_c(x_s)$. Cinco condições iniciais e suas trajetórias são mostradas na Fig. 1. Os pontos a , b , c e d referem-se às condições iniciais do pós-falta. A trajetória começando no ponto a converge para x_s e não viola a fronteira, que representa o limite de operação, porque este ponto está dentro da RER. O ponto b converge para x_s , mas viola o limite de operação. O ponto c não pertence à RE de x_s , então c também não pertence à RER. O ponto d converge para x_s , mas sua trajetória viola o limite de operação. Estas situações serão ilustradas na seção IV para o caso particular de um sistema elétrico de potência na presença de um aerogerador.

B. Caracterização da RER

Considere o sistema (1) e $X \subseteq \mathbb{R}^{n+m}$ como um conjunto aberto e conexo, representando a região factível de operação. Suponha que esta região possa ser representada pela função $\Delta(x, y)$ (4):

$$\Delta(x, y) : \mathbb{R}^{n+m} \rightarrow \mathbb{R}^1 \begin{cases} \Delta(x, y) > 0, & x, y \in X \\ \Delta(x, y) = 0, & x, y \in \partial X \\ \Delta(x, y) < 0, & x, y \in \bar{X}^c \end{cases} \quad (4)$$

onde ∂X é a fronteira de X e $\bar{X}^c$ é o complemento do fecho de X .

O sistema original é representado por (1). O sistema com a restrição de desigualdade (4) é definido aqui como o sistema restrito (5):

$$\left(\begin{array}{l} \text{Sistema} \\ \text{restrito} \end{array} \right) \begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ 0 = g(x, y) \\ \Delta(x, y) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

onde $\Delta(x, y)$ é negativo se a restrição é violada.

A teoria da RE de sistemas dinâmicos possuindo restrições de desigualdade foi verificada em [5]. Explorando a teoria desenvolvida em [3] e [4], a RER de um sistema EAD, que modela um sistema físico com um limite de operação, foi caracterizada em termos da RE de um sistema auxiliar irrestrito (6):

$$\left(\begin{array}{l} \text{Sistema auxiliar} \\ \text{irrestrito} \end{array} \right) \begin{cases} \dot{x} = f(x, y)\Delta(x, y) \\ 0 = g(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

A construção deste sistema auxiliar irrestrito proporciona um sistema de EDAs autônomo, cuja RE irrestrita é igual à RER do sistema restrito (5). O campo vetorial de (6) é pontualmente escalonado por $\Delta(x, y)$, resultando em uma mudança da escala de tempo. Apesar desta mudança, as trajetórias de (5) e (6) são as mesmas quando $\Delta(x, y) > 0$. Portanto, a RER de (5) é igual à RE de (6).

III. APLICAÇÃO

A. Sistema teste

O sistema elétrico de potência sob análise é retratado na Fig. 2. Ele é composto por três barras, uma linha de transmissão equivalente, um transformador e um gerador de indução.

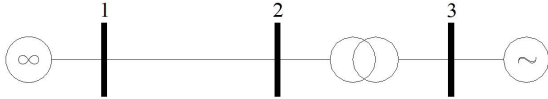


Fig. 2. Sistema elétrico com gerador de indução.

O aerogerador é representado por um gerador de indução e por razões de simplificação, o torque mecânico é considerado constante. Este tipo de gerador é comumente encontrado em aerogeradores de velocidade fixa (tipo A) e velocidade variável (tipo C) [6].

O sistema teste é modelado pelas equações (7) a (18), que representam o sistema original (1). O modelo do gerador de indução corresponde ao modelo em regime permanente, compreendendo as equações (7) a (14) [7]. A tensão do barramento infinito é $v_{x1} = 1$ (pu). Todos os parâmetros estão em (pu), quando não especificado.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} [T_e - T_m] \quad (7)$$

$$T_e = \frac{(v_{x3}^2 + v_{y3}^2)X_m^2 \frac{R_r}{s}}{[(R_1 + \frac{R_r}{s})^2 + (X_1 + X_r)^2][R_s^2 + (X_s + X_m)^2]} \quad (8)$$

$$R_1 = \frac{R_s X_m^2}{R_s^2 + (X_m + X_s)^2} \quad (9)$$

$$X_1 = \frac{R_s^2 X_m + X_m X_s^2 + X_m^2 X_s}{R_s^2 + (X_m + X_s)^2} \quad (10)$$

$$i_{x3} = -\frac{v_{x3}(R_s + R_e) + v_{y3}(X_s + X_e)}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (11)$$

$$i_{y3} = -\frac{-v_{x3}(X_s + X_e) + v_{y3}(R_s + R_e)}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (12)$$

$$R_e = \frac{R_r X_m^2 s}{R_r^2 + (X_m + X_r)^2 s^2} \quad (13)$$

$$X_e = \frac{R_r^2 X_m + X_m X_r (X_m + X_r) s^2}{R_r^2 + (X_m + X_r)^2 s^2} \quad (14)$$

$$0 = G_{12} + (-G_{s12} - G_{s23} - G_{12} - G_{23})v_{x2} + (B_{s12} + B_{s23} + B_{12} + B_{23})v_{y2} + G_{23}v_{x3} - B_{23}v_{y3} \quad (15)$$

$$0 = B_{12} + (-B_{s12} - B_{s23} - B_{12} - B_{23})v_{x2} + (-G_{s12} - G_{s23} - G_{12} - G_{23})v_{y2} + B_{23}v_{x3} + G_{23}v_{y3} \quad (16)$$

$$0 = i_{x3} + G_{23}v_{x2} - B_{23}v_{y2} + (-G_{s32} - G_{23})v_{x3} + (B_{s32} + B_{23} + B_{s3})v_{y3} \quad (17)$$

$$0 = i_{y3} + B_{23}v_{x2} + G_{23}v_{y2} + (-G_{s32} - G_{23})v_{y3} + (-B_{s32} - B_{23} - B_{s3})v_{x3} \quad (18)$$

A variável $\omega_r = 1 - s$ é a velocidade angular elétrica, T_e é o torque eletromagnético, i_{x3} e i_{y3} são as partes real e imaginária da corrente do gerador, v_x e v_y são as partes real e imaginária da tensão de cada barra, R_s {0.005}, R_r {0.059} são as resistências do estator e do rotor, X_s {0.091}, X_r {0.071}, X_m {2.23} são as reatâncias do estator, do rotor e magnetizante, H {0.342 (s)} é a constante de inércia, T_m {-0.9} é o torque mecânico, B_{12} {-10} é a susceptância série da linha de transmissão, B_{23} {-10} é a susceptância do transformador e B_{s3} {0.65} é a susceptância do capacitor. Todas as outras susceptâncias B_s e todas as condutâncias G são consideradas aqui como parâmetros nulos.

B. A restrição LVRT

A crescente introdução de fontes renováveis para a produção de eletricidade introduziu novos desafios para o gerenciamento dos sistemas elétricos. No passado, permitia-se que estes sistemas de geração fossem desconectados durante contingências. Devido à significativa penetração de plantas renováveis, requisitos de conexão à rede foram criados para garantir que tais sistemas de geração permaneçam conectados à rede elétrica [8]. A curva de suportabilidade a afundamentos de tensão ou curva LVRT, especifica o seguinte requisito: sistemas de geração renováveis devem permanecer conectados à rede durante períodos de baixa tensão, estes ocasionados

por perturbações no sistema elétrico. Tais períodos e limites de tensão são pré-determinados pelo órgão responsável pela operação do sistema elétrico de cada país, assim como pelo fabricante do aerogerador. A curva LVRT é comumente aplicada aos aerogeradores, mas também verifica-se sua utilização em sistemas fotovoltaicos, dentre outros sistemas de geração. A Fig. 3 mostra a curva LVRT utilizada neste trabalho [9]:

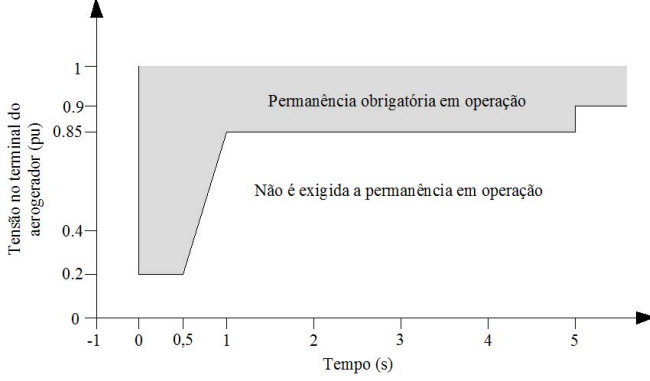


Fig. 3. Padrão da curva LVRT proposto pelo ONS.

Está claro que a curva LVRT foi criada no sentido de evitar desconexões precipitadas de fontes renováveis durante contingências que eventualmente ocorram. Desconexões de tais fontes poderiam causar o colapso do sistema elétrico. Portanto, se os sistemas de geração renováveis respeitarem os limites impostos pela curva LVRT, os mesmos podem contribuir para a estabilidade do sistema e consequentemente, a sua segurança e confiabilidade.

É observado que a curva LVRT é dada em função do tempo. Esta curva pode ser interpretada como uma restrição dependente do tempo. No sentido de evitar campos vetoriais dependentes do tempo, uma variável auxiliar c é introduzida, transformando a restrição dependente do tempo em uma restrição que depende somente das variáveis de estado e das variáveis algébricas do sistema. Mais especificamente, a curva LVRT é formulada por (19):

$$\begin{aligned} \dot{c} = & \frac{k_0}{\pi} \{ \arctan[k_1(c - c_0)] - \arctan[k_1(c - c_1)] \} \\ & + \frac{k_2}{\pi} \{ \arctan[k_1(c - c_2)] \\ & - 2 \times \arctan[0.2 \times k_1(c - c_3)] \} + k_3 \end{aligned} \quad (19)$$

onde k_0 (1.3), k_1 (10000), k_2 (2), k_3 (-1.004), c_0 (0.2), c_1 (0.845), c_2 (0.85676) e c_3 (0.9) são parâmetros que foram ajustados para proporcionar uma boa aproximação da curva LVRT quando $c(0) = 0.2$, como pode ser visto na Fig. 4.

A comparação retratada na Fig. 4 mostra a acurácia entre a curva LVRT real mostrada na Fig. 3 e a aproximação por (19). Com esta nova variável c , a restrição deste problema é dada por (20):

$$\Delta(v_{x3}, x_{y3}, c) = \sqrt{(v_{x3}^2 + v_{y3}^2)} - c \geq 0 \quad (20)$$

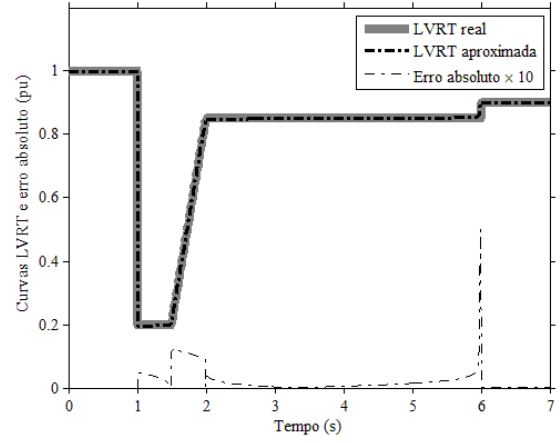


Fig. 4. Curva LVRT real e sua aproximação.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações computacionais foram realizadas no programa computacional MATLAB. Ao todo, 5 perturbações foram aplicadas ao sistema teste a fim de verificar suas respostas dinâmicas. A Fig. 5 mostra as trajetórias citadas na abordagem conceitual da Fig. 1, com a adição de mais uma trajetória.

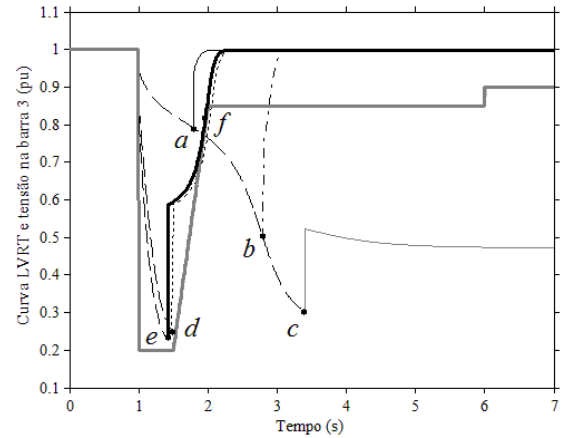


Fig. 5. LVRT e trajetórias representando os pontos da Fig. 1. Trajetórias até os pontos a , b , c , d e e referem-se à trajetória em falta (linha tracejada). A partir destes pontos tem-se as trajetórias pós-falta: a (linha sólida); b (ponto tracejado); c (linha cinza); d (pontos); e (linha grossa).

As trajetórias em linha tracejada até cada ponto referem-se ao sistema em falta. Para os pontos a , b e c , as trajetórias até cada ponto correspondem à mudança de B_{12} para -2.6 por 0.8 s, 1.8 s e 2.4 s, respectivamente. Para o ponto d , a trajetória até este ponto corresponde à mudança de B_{12} para -1.5 por 0.48 s. Para o ponto e , a trajetória até este ponto corresponde à mudança de B_{12} para -1.3 por 0.42 s. A partir de cada ponto, exceto o ponto f , que tangencia a curva LVRT, a perturbação é eliminada, isto é, B_{12} retorna para -10 e a trajetória resultante refere-se ao pós-falta. Todas as trajetórias partem do mesmo ponto inicial ($s = -0.0581$, $c = 0.2$). As perturbações são equivalentes à redução da capacidade de

transferência de potência à rede elétrica, o que justifica os distúrbios de um ponto de vista prático.

Neste exemplo, o sistema de EDAs que modela o sistema teste 1 tem uma RE de dimensão 1, identificada pelo intervalo $(-0.481, +\infty)$ no eixo horizontal, isto é, o ponto $(s = -0.481)$ corresponde ao ponto de equilíbrio instável deste sistema. Considerando a inclusão da variável c , a RER se estabelece em $\mathbb{R}^2$, visto que agora esta região depende das variáveis s e c . Desta forma, a partir do sistema de EDAs que modela o sistema teste 1, o sistema original (1) terá uma RE de dimensão 1, o sistema restrito uma RER de dimensão 2 e o sistema auxiliar uma RE de dimensão 2. Qualquer ponto (s, c) cujo s não está dentro da RE de (1) está também fora da RER de (5), como sugere a Fig. 1. Neste sentido, a Fig. 6 mostra a RE do sistema auxiliar irrestrito (6), além da RER do sistema restrito (5). A RER é composta pelo conjunto de pontos que estão dentro da RE de (1) e cujas trajetórias não violam a restrição de desigualdade para todo $t > 0$. A reta vertical em $(s = -0.481)$ representa a fronteira do sistema original (1).

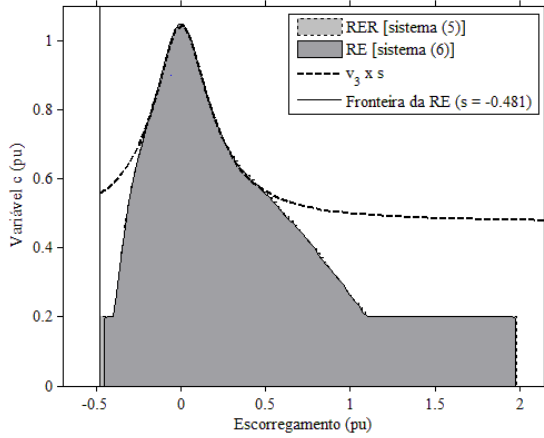


Fig. 6. RER para o sistema restrito (5), RE para o sistema auxiliar irrestrito (6) e a tensão na barra 3 em função do escorregamento.

Em virtude de problemas numéricos, verifica-se que a RE de (6) tornou-se ligeiramente menor que a RER de (5). No entanto, pode-se considerar satisfatória a aproximação entre as regiões. Assim, constata-se que a RE de (6) representa a RER de (5), validando a teoria introdutória exposta na seção II. A curva da magnitude de tensão na barra 3 em função do escorregamento é também apresentada. Esta curva, quando plotada no plano $s \times c$, corresponde à curva onde $\Delta(x, y) = 0$, isto é, onde a tensão na barra 3 é igual ao valor da variável c . Evidentemente, qualquer ponto acima desta curva não pertenceria à RER, visto que a tensão na barra 3 violaria a restrição imposta pela curva LVRT.

A Fig. 7 apresenta as trajetórias exibidas na Fig. 5 no plano $s \times c$. As trajetórias em falta até os pontos a, b, c, d e e são indicadas por $x_{f1a}, x_{f1b}, x_{f1c}, x_{f2d}$ e x_{f3e} , respectivamente. As trajetórias pós-falta para os mesmos pontos são indicadas por $x_{pa}, x_{pb}, x_{pc}, x_{pd}$ e x_{pe} , respectivamente. As análises são realizadas verificando-se a convergência da variável escorregamento s para o respectivo valor de equilíbrio ($s = -0.0581$),

constatando se ocorre ou não a violação da fronteira da RER. Como se está no plano $s \times c$, a trajetória pós-falta retornará à RER no ponto $(s = -0.0581, c = 0.9)$.

O ponto a está dentro da RER, então a trajetória do pós-falta iniciando em a não viola a restrição. As trajetórias do pós-falta iniciando em b e c violam a restrição, então estes pontos não pertencem à RER. Também, o ponto c está fora da RE. Os pontos que estão dentro da RE, abaixo da curva $\Delta(x, y) = 0$ e acima da RER são pontos cujas trajetórias violarão a restrição. O ponto d representa esta condição. O ponto f é um ponto particular, denominado ponto de tangência ou *grazing point*. A trajetória tende a tangenciar a restrição neste ponto antes de retornar à RER. Para o sistema auxiliar, o ponto f é um pseudo-equilíbrio cuja variedade estável é parte da fronteira da RER sob estudo.

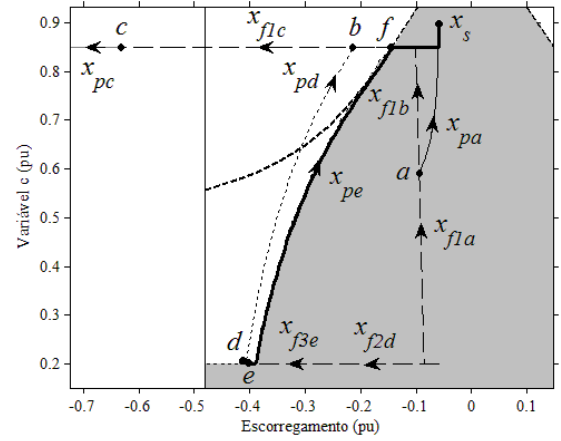


Fig. 7. RER e trajetórias representando os pontos da Fig. 5. Trajetórias até os pontos a, b, c, d e e referem-se à trajetória em falta (linha tracejada). A partir destes pontos tem-se as trajetórias pós-falta: a (linha sólida); b (ponto tracejado); c (linha cinza); d (pontos); e (linha grossa).

No sentido de tornar mais claro o entendimento das trajetórias, a Fig. 8 destaca as trajetórias em falta $x_{f1a}, x_{f1b}, x_{f1c}$ e pós-falta x_{pa}, x_{pb} , referentes às condições dos pontos a, b e c :

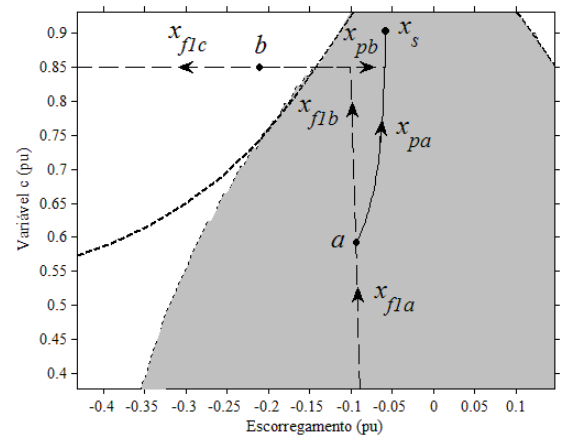


Fig. 8. RER e trajetórias da Fig. 5. Destaque para as trajetórias referentes aos pontos a, b e c .

A trajetória em falta caminha até cada um destes pontos e corresponde à mesma redução de susceptância da linha, porém cada ponto é determinado para diferentes tempos de eliminação da perturbação. Os pontos *d* e *e* referem-se a outra perturbação. O método de análise segue o mesmo raciocínio exposto para as condições anteriores.

Outro resultado importante é apresentado na Fig. 9, que mostra mais um *grazing point*, representado pelo ponto *h*. A trajetória inicia no ponto *g*, ($s = 1.98$, $c = 0.2$) e caminha para o ponto de convergência, permanecendo na fronteira da RER até o *grazing point* *h*. A presente figura também mostra o ponto *d* deslocado, a fim de evidenciar a sua posição no plano $s \times c$. Na Fig. 7, a visualização da posição deste ponto se confunde com a fronteira da RER, embora o mesmo esteja na região compreendida entre a RER, a curva da tensão em função do escorregamento e a fronteira da RE de (1). Para melhor observar este ponto, também através da Fig. 9, mostra-se a trajetória que passa pelo ponto *d*, agora a partir do ponto ($s = -0.0581$, $c = 0.3$).

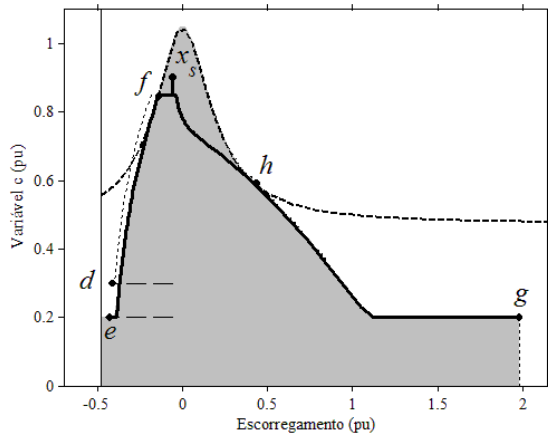


Fig. 9. RER e trajetória representando outro *grazing point*.

A partir das figuras anteriores, constata-se que a fronteira ∂X da RER é composta por pseudo-equilíbrios, isto é, pontos que percentem à $\Delta(x, y) = 0$, além das variedades estáveis referentes aos próprios *grazing points* *f* e *h*, que são também pseudo-equilíbrios.

V. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, uma função energia para o sistema auxiliar será investigada para estimar a região de estabilidade restrita obtida. Esta estimativa permitirá a implementação de métodos diretos para análises de estabilidade de sistemas elétricos de potência que incluam fontes renováveis e seus limites operacionais. Modelos mais completos de várias unidades de geração e sistemas elétricos de maior porte farão parte de futuras pesquisas e implementações.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi explorada a caracterização da região de estabilidade de um sistema elétrico de potência na presença de um aerogerador, considerando a curva LVRT como restrição.

A curva LVRT utilizada, referente ao padrão determinado pelo ONS, foi aproximada pela solução de uma equação diferencial autônoma, no sentido de eliminar a dependência do tempo e assim, obter uma restrição dependente unicamente das variáveis de estado e das variáveis algébricas do modelo do sistema. Os resultados indicam que o sistema teste apresenta uma região de estabilidade restrita pela curva LVRT, que pode ser estudada com boa acurácia pela região de estabilidade de um sistema auxiliar proposto.

A trajetória em falta de sistemas elétricos de potência tradicionais, isto é, na presença de fontes compostas por geradores síncronos, tipicamente abandona a região de estabilidade do sistema pós-falta antes de violar quaisquer limites operacionais. Entretanto, para os sistemas elétricos de potência na presença de fontes alternativas, a trajetória do sistema em falta pode abandonar a região de estabilidade do sistema pós-falta após já ter violado algum limite operacional, a exemplo da curva LVRT. Este trabalho mostrou uma solução para representar a curva LVRT e a região de estabilidade restrita por este limite operacional, sugerindo um método de representar tal limite e todo o sistema dinâmico, através de um sistema autônomo de equações. Assim, permite-se a futura utilização das teorias de estabilidade para a implementação de métodos diretos em análises de estabilidade de modelos dinâmicos restritos, de forma que desconexões impróprias de aerogeradores da rede elétrica sejam evitadas.

Dada a crescente penetração de fontes renováveis no sistema elétrico de potência, os limites operacionais inerentes a estas fontes e a necessidade de considerar tais limites como restrições à região de estabilidade do sistema elétrico, a caracterização da região de estabilidade restrita obtida neste trabalho contribui para o desenvolvimento de métodos diretos.

REFERÊNCIAS

- [1] H.-D. Chiang, *Direct methods for stability analysis of electric power systems: theoretical foundation, BCU methodologies and applications*, 1.^a ed. John Wiley & Sons, Dezembro 2010.
- [2] H.-D. Chiang e L. F. C. Alberto, *Stability regions of nonlinear dynamical systems: theory, estimation, and applications*, 1.^a ed. Cambridge University Press, Outubro 2015.
- [3] V. Venkatasubramanian, H. Schättler e J. Zaborszky, "Stability regions for differential-algebraic systems," in *Systems, Models and Feedback: Theory and Applications*, A. Isidori e T. J. Tarn, Eds. Birkhauser Boston, Junho 1992, pp. 385–402.
- [4] V. Venkatasubramanian, H. Schättler e J. Zaborszky, "Dynamics of large constrained nonlinear systems - a taxonomy theory," *Proceedings of IEEE*, vol. 83, no. 11, pp. 1530–1561, Novembro 1995.
- [5] K. L. Prapost e K. A. Loparo, "A stability theory for constrained dynamic systems with applications to electric power systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 41, no. 11, pp. 1605–1617, Novembro 1996.
- [6] T. Ackermann, Ed., *Wind power in power systems*, 2.^a ed. John Wiley & Sons, Maio 2012.
- [7] T. V. Cutsem e C. Vournas, *Voltage stability of electric power systems*, 1.^a ed. Springer, 1998.
- [8] F. Iov, A. D. Hansen, P. Sørensen e N. A. Cutululis, "Mapping of grid faults and grid codes," Risø National Laboratory, Technical University of Denmark, Julho 2007.
- [9] "Procedimentos de rede - submódulo 3.6, rev. 1.1, 2010," Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2010.