



ANÁLISE E MELHORIA DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA COM INTEGRAÇÃO DE USINAS EÓLICAS

William Resende Rocha*¹ e Maury Meirelles Gouvêa Jr.¹

¹PPGEE - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Resumo - O rápido crescimento na utilização de energia eólica no Brasil e no mundo tem se mostrado benéfico ambientalmente, porém a adição de novas fontes de energia em linhas existentes é um desafio para os sistemas elétricos de potência. Problemas na estabilidade de tensão são recorrentes em sistemas com grande penetração de energia elétrica, uma vez que a instabilidade se deve em parte aos sistemas operarem perto de seus limites de capacidade, podendo ser agravado pelo tipo de turbina utilizada nas usinas eólicas. Este artigo tem por objetivo investigar a integração de turbinas eólicas de velocidade constante SCIG (Squirrel Cage Induction Generator), velocidade variável DFIG (Doubly Fed Induction Generator) e propor a melhoria do sistema considerando a estabilidade de tensão. A investigação foi realizada em um sistema padrão IEEE 14 barras com auxílio do software MATLAB e pacote MATPOWER. Os resultados mostraram que DFIG e SCIG têm efeitos na margem de estabilidade de tensão em função da curva de capacidade de cada turbina no sistema.

Palavras-Chave- DFIG, Energia Eólica, Estabilidade de Tensão, SCIG, Sistemas Elétricos de Potência.

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF VOLTAGE STABILITY IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS WITH WIND POWER INTEGRATION

Abstract - The quick increase in the use of wind energy in Brazil and the world has been shown to be eco-friendly, but the addition of new energy sources in existing lines is a challenge for power systems. Voltage stability problems often occurs in high energy penetration systems, since instability is due to the systems operating close to their capacity limits, and may be aggravated by the type of turbine used in wind farms. The aim of this paper is to investigate the integration of wind generators fixed speed SCIG (Squirrel Cage Induction Generator), variable speed DFIG (Doubly Fed Induction Generator) and propose the improvement of the system considering the voltage stability. The research was carried out in a standard IEEE 14 bar system with

support of MATLAB and MATPOWER package. The results showed that DFIG and SCIG have effects on the voltage stability margin depending on the capacity curve of each wind turbine in the system.

Keywords - DFIG, Electrical Power Systems, SCIG, Voltage Stability, Wind Energy.

I. INTRODUÇÃO

Com a grande demanda por energia elétrica, aumento dos preços das fontes não-renováveis e pressões ambientais, as fontes de energias renováveis, em especial os parques eólicos, têm sido fonte de atenção nos últimos anos [1]. A capacidade mundial de energia eólica alcançou 539 GW no final de 2017, sendo que 52 GW foi instalada neste mesmo ano [2]. O Brasil possui 13 GW de capacidade instalada e ocupa a oitava posição no ranking mundial [3].

O sistema elétrico de potência tem se tornado extremamente complexo em função da grande quantidade de energia adicionada, tipos de equipamentos e fontes geradoras. Em contrapartida, a construção de novas linhas de transmissão tem enfrentado problemas em função de limitações financeiras e ambientais [4]. Como consequência, algumas linhas de transmissão operam perto de seus limites de capacidade, contribuindo para problemas de estabilidade de tensão [5].

A estabilidade de tensão é definida como a capacidade de um sistema de potência manter os níveis de tensões das barras dentro dos limites operacionais, em regime permanente, em condições normais e após distúrbios de qualquer natureza [1]. Os problemas de estabilidade de tensão estão associados a operação próxima da capacidade máxima de transmissão e em condições limites [6].

Ao contrário de gerações convencionais, por hidrelétricas e térmicas, a energia produzida por usinas eólicas não é constante, pois depende da condição do vento. Além disso, a conexão de turbinas pode ter impacto significativo na estabilidade de tensão, em função do nível de penetração e do tipo de turbina utilizada [7, 8].

As turbinas eólicas podem ter velocidade constante ou variável. Os sistemas eólicos de velocidade constante foram os

*williamresenderocha@gmail.com

primeiros sistemas de grande porte instalados pelo mundo, caracterizados pelo gerador de indução com rotor de gaiola conectado diretamente à rede elétrica por meio de um transformador [5, 9]. Nas turbinas com velocidade variável, a frequência da rede elétrica é desacoplada da frequência do rotor com o uso de conversores estáticos, que possibilitam a operação em velocidade variável do rotor da turbina [10].

Nos últimos anos, vários estudos foram realizados para discutir o impacto da integração de fontes alternativas, como a energia eólica, na estabilidade de tensão do sistema elétrico. Amarasekara et al. [11] mostraram que turbinas de velocidade variável, ao serem adicionadas em barramentos mais sensíveis do sistema, apresentam um ganho superior em sua margem de estabilidade se comparadas com os ganhos de barramentos menos sensíveis. Naser et al. [9] consideraram a integração de turbinas DFIG em múltiplos pontos do sistema. Seus resultados mostraram que a integração em dois ou mais pontos aumentam as margens de estabilidade se comparada a integração de apenas um ponto.

Embora a literatura apresente uma ampla investigação, poucos estudos foram realizados considerando a integração simultânea de turbinas de velocidades constante e variável [5]. Mathe e Folly [5] realizaram estudos das margens de estabilidade das curvas PV e mostraram que a integração de turbinas de velocidade constante provocam uma diminuição da estabilidade do barramento onde ocorre a integração. Enquanto turbinas de velocidade variável têm um impacto positivo nessa margem.

Este estudo tem como objetivo analisar o impacto na estabilidade de tensão a partir da integração de usinas eólicas com turbinas SCIG e DFIG. A integração das turbinas ocorre de forma individual, em uma usina eólica composta por apenas um tipo de turbina; e simultânea, no qual as duas turbinas fazem parte da integração no sistema. A investigação realizada neste artigo foi desenvolvida com base nos métodos de análise estática, que caracterizam um importante estudo em relação à distância do ponto de operação ao limiar de instabilidade. O estudo também prevê a melhoria da margem de estabilidade com a integração dessas turbinas utilizando o método de análise modal, abordando tanto a localização como o nível de penetração no sistema. Vários experimentos foram realizados com o propósito de validar o método proposto. Os resultados mostraram que turbinas DFIG e SCIG têm efeitos positivo e negativo, respectivamente, na margem de estabilidade de tensão do sistema, em função da curva de capacidade de cada turbina.

II. AEROGERADORES

A energia eólica ganhou bastante importância no cenário mundial, alcançando um nível de penetração elevado. Nos anos 80, a concepção dinamarquesa de aerogeradores ganhou bastante popularidade pelo baixo custo de instalação e simplicidade operacional, conquistando grande aceitação no mercado e na indústria [7]. Atualmente, a energia eólica é uma tecnologia com preços competitivos em muitos mercados e o surgimento de parques eólicos tem sido uma tendência no Brasil e no mundo.

Os geradores mais comuns nos parques eólicos são os SCIG e os DFIG, também conhecidos como aerogeradores de velocidade constante e velocidade variável respectivamente [15].

Os aerogeradores equipados com geradores de indução em gaiola de esquilo (SCIG) se mostram bastante simples, robustos e de baixo custo por dispensarem controladores sofisticados. A característica de velocidade constante vem do fato da velocidade do estator do gerador ser mantida pela rede elétrica. Um dos grandes problemas relacionados a estabilidade de tensão se deve à ausência de suporte de potência reativa por parte do SCIG, podendo causar problemas de instabilidade no sistema [16].

Os aerogeradores de indução de rotor bobinado duplamente alimentado (DFIG) vem sendo cada vez mais utilizados na geração eólica [16]. Nesses sistemas eólicos de velocidade variável, a frequência da rede é desacoplada da frequência do rotor devido a utilização de conversores estáticos de eletrônica de potência. Tais conversores possibilitam a operação em velocidade variável do rotor da turbina eólica [7]. A vantagem desse aerogerador se deve ao suporte de potência reativa e por consequência um ganho para a margem de estabilidade do sistema. Os parâmetros e curvas de capacidade dos dois geradores podem ser encontrados em [17].

III. ANÁLISE ESTÁTICA DA ESTABILIDADE DE TENSÃO

A estabilidade de tensão vem sendo estudada sob o ponto de vista estático e dinâmico, sendo que a escolha da abordagem depende da análise a ser efetuada. A análise dinâmica usa técnicas não-lineares de simulação no domínio do tempo ou frequência, proporcionando uma reprodução real da dinâmica da instabilidade de tensão. A análise estática é fundamentada em equações de fluxo de potência, não envolvendo, portanto, equações diferenciais [12]. O estudo realizado neste trabalho foi desenvolvido com base nos métodos de análise estática.

Os métodos de análise estática de estabilidade de tensão utilizam um registro instantâneo do sistema em um certo ponto de sua trajetória no domínio do tempo que pode ser descrito por um modelo linear representado na equação 1, também conhecida como matriz Jacobiana [13].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde,

ΔP - variação incremental de potência ativa

ΔQ - variação incremental de potência reativa

$\Delta\theta$ - variação incremental do ângulo da tensão

ΔV - variação incremental da magnitude da tensão

A avaliação da estabilidade de tensão pode ser feita utilizando diferentes métodos de análise estática. Esses métodos além de fornecerem informações como sensibilidade e margem de estabilidade, fazem uso de apenas equações algébricas, se tornando mais eficientes que as abordagens de análise dinâmica. Os métodos utilizados neste artigo são:

- Curvas PV-VQ
- Análise Modal

As subseções seguintes detalham cada um dos métodos citados em relação a sua estruturação matemática e principais vantagens e desvantagens em sua abordagem no sistema elétrico de potência.

A. Curvas PV-VQ

Os métodos das curvas PV-VQ dão a indicação sobre a proximidade do ponto máximo de carregamento do sistema, como o conceito de margem de estabilidade.

A curva PV é definida como a relação entre a potência de um determinado barramento e a magnitude de tensão do mesmo. Sua construção se dá através de sucessivas soluções de fluxo de potência, aumentando-se gradativamente a demanda do sistema, enquanto o fator de potência é mantido constante.

Na curva PV, para cada nível da demanda (P_o) existem duas soluções em termos de magnitude da tensão (V_{max} e V_{min}), uma que pertence a parte superior da curva e que representa uma região estável, e uma que pertence a parte inferior e que representa uma região instável. Desta forma, essa curva indica a margem de estabilidade de tensão, que corresponde à distância entre um dado ponto de operação e o ponto de máximo carregamento, situado no “nariz” da curva.

A curva VQ é um método simples e rápido de análise estática da estabilidade de tensão, sendo usado para se determinar a sensibilidade e variação de tensão em um barramento com respeito a inserção e absorção de potência reativa. A construção da curva VQ é realizada através da adição de um condensador síncrono fictício à barra em análise, convertendo-a de uma barra PQ para uma barra PV. A seguir, sucessivas soluções de fluxo de potência para diferentes valores de tensão são realizadas e a potência reativa requerida é medida.

Embora os métodos de Curvas PV-VQ sejam amplamente utilizados, eles possuem a desvantagem de trabalhar com apenas um barramento por vez e com grande demanda de tempo para sistemas complexos. Além do mais, esses métodos não dão indicações dos barramentos mais críticos e informações sobre as causas da instabilidade de tensão.

B. Análise Modal

A técnica de análise modal é uma análise estática, proposta por Gao et al. em [14], que por meio da matriz jacobiana reduzida, J_R , permite obter informações das áreas críticas do sistema que estão propensas à instabilidade de tensão.

As informações fornecidas por essa técnica são descritas a seguir e servem para definir qual o tipo de medida resultaria em melhoria na margem de estabilidade do sistema.

De acordo com a teoria da análise modal em [14], J_R é a matriz jacobiana reduzida e a estabilidade de tensão pode ser analisada utilizando os autovalores e autovetores de sua matriz.

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (2)$$

onde,

ξ - autovetor direito da matriz
 Λ - autovetor esquerdo da matriz
 η - diagonal de autovalores da matriz

Das equações 1 e 2

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda^{-1} \eta \quad (3)$$

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (4)$$

ou

$$\Delta V = \sum_i \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \quad (5)$$

onde,

ξ_i - i^{th} coluna do autovetor à direita
 η_i - i^{th} linha do autovetor à esquerda
 λ_i - i^{th} autovalor

Cada autovalor λ_i e os correspondentes autovetores direito e esquerdo, ξ_i e η_i , definem o i^{th} modo pelo qual o sistema pode se tornar instável.

Sabendo que $\xi^{-1} = \eta$, a equação 4 pode ser reescrita como:

$$\eta \Delta V = \eta \Lambda^{-1} \Delta Q \quad (6)$$

ou

$$V = \Lambda^{-1} Q \quad (7)$$

Sendo que $V = \eta \Delta V$ e $Q = \eta \Delta Q$ são definidos como os respectivos vetores de variação modal da potência reativa e da tensão. Para o i^{th} modo,

$$V_i = \frac{1}{\lambda_i} Q_i \quad (8)$$

A relação entre os autovalores e a estabilidade de tensão pode ser explicada utilizando a equação 8. Neste sentido, a magnitude de λ_i determina o grau de estabilidade da i -ésima tensão e verifica-se que se $\lambda_i > 0$, as variações V_i e Q_i se dão no mesmo sentido, indicando que o sistema está estável. Se $\lambda_i < 0$, as variações V_i e Q_i se dão em sentidos contrários, indicando que o sistema está instável em termos de tensão. Quando $\lambda_i = 0$, a i -ésima tensão entra em colapso porque qualquer alteração na potência reativa provoca uma mudança infinita na tensão. Assim, conclui-se que quanto menor a magnitude de λ_i positivo, mais perto de ser instável estará a i -ésima tensão V_i .

O fator de participação da barra k no i -ésimo modo é definido como um produto elemento por elemento dos autovetores direito e esquerdo de J_R .

$$P = \xi_{ki} \eta_{ki} \quad (9)$$

Quando os autovalores são computados para uma certa condição de operação do sistema, o modo com o menor autovalor é considerado o mais crítico. O fator de participação indica a contribuição de cada barramento para esse modo.

IV. ANÁLISE E MELHORIA DA ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM INTEGRAÇÃO DE GERADORES EÓLICOS

A metodologia proposta neste artigo considera as integrações de geradores SCIG e DFIG. Inicialmente, a análise modal, apresentada na Subseção III-B, é utilizada para identificar a participação dos barramentos na estabilidade de tensão. Em seguida, as integrações dos aerogeradores nos barramentos escolhidos são feitas de forma individual e simultânea. As margens de estabilidade obtidas através das curvas PV e VQ, apresentadas na Subseção III-A, mostram o comportamento do sistema após cada integração e em relação ao sistema sem adição das usinas eólicas.

Os diferentes cenários para integrações das usinas eólicas são apresentados a seguir:

1. Integração de usina eólica composta por Geradores de indução com Dupla Alimentação (DFIG);
2. Integração de usina eólica composta por Geradores de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG);
3. Integração de usina eólica composta por Geradores de indução com Dupla Alimentação (DFIG) e Geradores de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG) simultaneamente.

A fim de considerar o nível de penetração e a natureza intermitente do vento, a geração eólica é variada entre 5% e 35% da carga total conectada ao sistema para cada cenário.

Tabela 1: Geração Eólica

| Nível de penetração de usinas eólicas (MW) | 5% | 15% | 25% | 35% |
|--|-------|-------|-------|-------|
| | 12.95 | 38.85 | 64.75 | 90.65 |

V. ESTUDO EXPERIMENTAL

Os métodos de análise modal, apresentados na Seção III, foram aplicados no sistema padrão IEEE 14 de barras utilizando o pacote Matpower [18]. A demanda total desse sistema é de 259 MW e 73,5 MVar, mantida constante durante todos os testes a fim de avaliar corretamente a influência das usinas eólicas. A Tabela 2 apresenta os autovalores extraídos da matriz jacobina reduzida a partir do ponto de operação do sistema.

Tabela 2: Autovalores

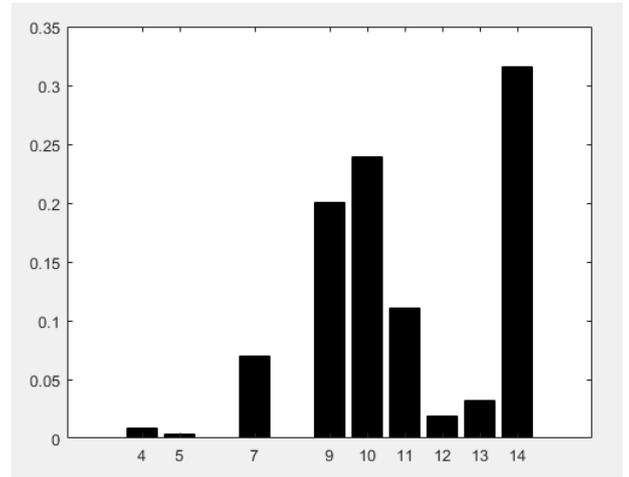
| | |
|-------------|---------|
| λ_1 | 65.4208 |
| λ_2 | 39.9534 |
| λ_3 | 21.9940 |
| λ_4 | 18.9118 |
| λ_5 | 16.4492 |
| λ_6 | 11.3422 |
| λ_7 | 2.7066 |
| λ_8 | 5.5689 |
| λ_9 | 7.6637 |

Os autovalores identificam os diferentes modos pelos quais o sistema pode se tornar instável. Se um autovalor tende a zero, uma pequena variação no perfil de potência reativa do

sistema causará uma variação muito grande na tensão de uma barra, conseqüentemente o menor autovalor ($\lambda_7 = 2.7066$) está associado com o modo mais crítico do sistema.

Apesar do cálculo dos autovalores próximos a zero darem um indicativo da proximidade da instabilidade de tensão, não é possível a localização da área crítica. Com essa finalidade, o fator de participação foi calculado para o menor autovalor e apresentado na Figura 1.

Figura 1: Fator de Participação ($\lambda_7 = 2.7066$)



De acordo com a análise modal, as localizações das barras críticas se dão pela identificação dos maiores fatores de participação, assim os barramentos 14 e 10 são os que mais contribuem para a instabilidade do sistema. De forma inversa, os barramentos 5 e 4 possuem os menores fatores de participação e são os que menos participam na instabilidade.

A. Sistema sem integração de Usinas Eólicas

Neste caso não houve alterações nos parâmetros do sistema. As margens de estabilidade através das curvas PV e VQ, apresentadas na Subseção III-A, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Margens de Estabilidade IEEE 14 - Sem Integração de Usinas Eólicas

| Barramento | Margem PV (MW) | Margem VQ (MVar) |
|--------------|-----------------|------------------|
| 4 | 626.95 | 608.24 |
| 5 | 597.94 | 596.01 |
| 9 | 224.12 | 237.94 |
| 10 | 160.67 | 180.47 |
| 11 | 183.60 | 195.72 |
| 12 | 176.53 | 175.49 |
| 13 | 255.75 | 283.15 |
| 14 | 120.70 | 117.18 |
| Média | 293.2825 | 299.2750 |

Como esperado, o barramento 14, mais sensível, apresenta a menor margem de estabilidade do sistema. De forma oposta, o barramento 4, identificado como o menos sensível pelo fator de participação, apresenta a maior margem de estabilidade.

B. Sistema com integração de Usinas Eólicas

Os diferentes cenários para integrações das usinas eólicas são apresentados a seguir:

1) Cenário I

Uma usina eólica composta por geradores do tipo DFIG foi conectada ao barramento mais sensível do sistema (barramento 14) e a saída da usina eólica foi variada entre 12,95 MW e 90,65 MW. A Tabela 4, apresenta a margem de estabilidade para um nível de penetração de 5% (12,95 MW) da demanda total do sistema.

Tabela 4: Margens de Estabilidade IEEE 14 - Integração de DFIG (5%)

| Barramento | Margem PV (MW) | Margem VQ (MVar) |
|--------------|-----------------|------------------|
| 4 | 642.65 | 624.18 |
| 5 | 612.48 | 606.26 |
| 9 | 275.36 | 310.64 |
| 10 | 184.25 | 208.51 |
| 11 | 192.82 | 204.73 |
| 12 | 183.01 | 181.29 |
| 13 | 310.13 | 331.78 |
| Média | 342.9571 | 352.4843 |

Quando comparados os valores de margens de estabilidade das tabelas 3 e 4, nota-se que a integração de DFIG proporciona elevação das margens do sistema e de forma geral um aumento de aproximadamente 19% em sua média. A ausência das margens do barramento 14 na Tabela 4 se justificam pelo fato da integração de DFIG atuar no controle de tensão do barramento, o transformando de barramento de carga (PQ) em um barramento de tensão controlada (PV).

As margens de estabilidade para penetrações de 15% (38,85 MW), 25% (64,75 MW) e 35% (90,65 MW) também foram calculadas e apresentaram as seguintes médias respectivamente: 354,55 MW e 350,5829 MVar; 356,7057 MW e 355,67 MVar; 361,7071 MW e 355,9614 MVar. O aumento da penetração, para esse cenário, atua de forma positiva nas margens de estabilidade do sistema.

Foram realizados mais dois testes para o cenário com integração de DFIG. A integração em um dos testes foi feita no barramento 5, identificado como o barramento menos sensível do sistema por meio da análise modal. A potência de integração correspondeu a 5% (12,95 MW) da demanda total e os valores médios de margens encontrados foram: 320,2957 MVar e 307,0557 MW. Quando comparados com os valores apresentados na Tabela 3, foi possível perceber que a melhora da margem de estabilidade ainda acontece, porém, de forma menos acentuada se comparada com os valores alcançados após integração no barramento mais sensível (barramento 14).

Por fim, foi considerada a integração de forma simultânea nos dois barramentos mais sensíveis do sistema (barramentos 10 e 14), a integração correspondeu a 5% (12,95 MW) da demanda total, sendo metade para cada barramento. Os valores médios de margens encontrados foram: 440,4633 MVar e 402,5717 MW; proporcionando um aumento da margem de estabilidade de aproximadamente 35% quando comparado com os valores sem integração de usinas eólicas.

2) Cenário II

Uma usina eólica composta por geradores do tipo SCIG foi conectada ao barramento 14 e a saída da usina eólica foi variada entre 12,95 MW e 90,65 MW. A Tabela 5, apresenta

a margem de estabilidade para um nível de penetração de 5% (12,95 MW) da demanda total do sistema.

Tabela 5: Margens de Estabilidade IEEE 14 - Integração de SCIG (5%)

| Barramento | Margem PV (MW) | Margem VQ (MVar) |
|--------------|-----------------|------------------|
| 4 | 636.28 | 610.72 |
| 5 | 606.60 | 599.54 |
| 9 | 222.60 | 233.40 |
| 10 | 159.37 | 178.10 |
| 11 | 182.96 | 194.61 |
| 12 | 175.60 | 174.58 |
| 13 | 253.53 | 279.83 |
| 14 | 67.69 | 107.43 |
| Média | 288.0787 | 297.2762 |

Quando comparados os valores de margens de estabilidade das tabelas 3, 4 e 5, nota-se que a integração de SCIG proporciona uma redução das margens do sistema. Este fato está diretamente relacionado a sua demanda por potência reativa, o que impossibilita sua participação no controle de tensão do barramento.

As margens de estabilidade para penetrações de 15% (38,85 MW), 25% (64,75 MW) e 35% (90,65 MW) apresentaram as seguintes médias respectivamente: 283,6862 MW e 291,0562 MVar; 278,07 MW e 280,4212 MVar; 261,6762 MW e 256,095 MVar. O aumento da penetração, para esse cenário, atua de forma negativa nas margens de estabilidade do sistema.

3) Cenário III

Dois usinas eólicas compostas por geradores do tipo DFIG e SCIG foram conectadas aos barramentos 14 e 10 respectivamente e a saída das usinas eólicas foi variada entre 12,95 MW e 90,65 MW. A Tabela 6, apresenta a margem de estabilidade para um nível de penetração de 5% (12,95 MW) da demanda total do sistema.

Tabela 6: Margens de Estabilidade IEEE 14 - Integração de DFIG e SCIG (5%)

| Barramento | Margem PV (MW) | Margem VQ (MVar) |
|--------------|-----------------|------------------|
| 4 | 641.92 | 623.32 |
| 5 | 611.56 | 605.60 |
| 9 | 273.15 | 306.73 |
| 10 | 118.51 | 203.335 |
| 11 | 191.69 | 203.29 |
| 12 | 183.12 | 181.36 |
| 13 | 308.97 | 331.64 |
| Média | 332.7029 | 350.7536 |

Quando comparados os valores de margens de estabilidade das tabelas 3, 4, 5 e 6, nota-se que a integração simultânea de DFIG e SCIG proporciona um aumento das margens do sistema. Para esse cenário, as perdas na margem de estabilidade devido ao SCIG acabam sendo compensadas pelo suporte de potência reativa do DFIG.

As margens de estabilidade para penetrações de 15% (38,85 MW), 25% (64,75 MW) e 35% (90,65 MW) apresentaram as seguintes médias respectivamente: 330,9429 MW e 349,4579 MVar; 332,8157 MW e 347,2407 MVar; 335,1357 MW e 344,1136 MVar. A demanda por potência reativa exigida por SCIG acaba sendo amenizada pela presença e suporte do

DFIG. Dessa forma, as margens de estabilidade do sistema não sofrem grandes alterações em seus valores com aumento da penetração.

VI. CONCLUSÕES

O objetivo deste artigo foi analisar e propor a melhoria da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência com a integração de usinas eólicas. A utilização de métodos de análise estática, em especial os métodos de análise modal e curvas PV-VQ, foram utilizados para determinar os barramentos de integração. Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que as integrações de DFIG nos barramentos mais sensíveis apresentam um ganho maior para a estabilidade do sistema.

As comparações entre integrações de DFIG e SCIG, de forma individual e simultânea, retrataram impactos positivos e negativos para a estabilidade de tensão, seguindo a característica da curva de capacidade de cada turbina. No que se refere a usinas eólicas composta por DFIG, nota-se melhora na margem de estabilidade em todos os cenários estudados. O oposto foi evidenciado com a presença de SCIG, apresentando, inclusive, margens menores do que para o sistema sem integração de eólica. Para o cenário no qual as turbinas são utilizadas de forma simultânea, as perdas na margem de estabilidade devido ao SCIG acabam sendo compensadas pelo suporte de potência reativa do DFIG.

Por fim, as integrações de DFIG em múltiplos barramentos apresentaram as melhores margens de estabilidade do estudo, e o aumento das penetrações de usinas eólicas, seguiram as características de cada tipo de aerogerador e sua capacidade de potência reativa.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Sharma and M. G. Ganness, "Determination of Power System Voltage Stability Using Modal Analysis," *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Setubal, Portugal, 2007, pp. 381-387.
- [2] "Global Wind Report 2017," *Global Wind Energy Council (GWEC)*, 2017.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS (2018). *Carga e Geração*. Acessado em 20 de Julho de 2018, em <http://ons.org.br/pt/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>
- [4] S. Azzam, E. Feilat and A. Al-Salaymeh, "Impact of connecting renewable energy plants on the capacity and voltage stability of the national grid of Jordan," *8th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Amman, 2017, pp. 1-6.
- [5] R. M. Mathe and K. A. Folly, "Impact of large scale grid-connected wind generators on the power system network," *IEEE PES PowerAfrica*, Accra, 2017, pp. 328-333.
- [6] M. A. Djari, L. Benasla and W. Rahmouni, "Voltage stability assessment using the V-Q sensitivity and modal analysis methods," *International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes*, Boumerdes, 2017, pp. 1-6.
- [7] R. R. Londero, C. d. M. Affonso and J. P. A. Vieira, "Long-Term Voltage Stability Analysis of Variable Speed Wind Generators," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 439-447, Jan. 2015.
- [8] M. S. Rawat and S. Vadhera, "Analysis of wind power penetration on power system voltage stability," *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, New Delhi, 2016, pp. 1-6.
- [9] I. S. Naser, A. Garba, O. Anaya-Lara and K. L. Lo, "Voltage stability of transmission network with different penetration levels of wind generation," *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC*, Cardiff, Wales, 2010, pp. 1-5.
- [10] T. M. Masaud, G. Nannapaneni and R. Chaloo, "Optimal placement and sizing of distributed generation-based wind energy considering optimal self VAR control," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 3, pp. 281-288, 22 2017.
- [11] H. W. K. M. Amarasekara, A. P. Agalgaonkar, S. Perera and L. Meegahapola, "Placement of variable-speed wind power generators in power systems considering steady-state voltage stability," *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Wollongong, NSW, 2016, pp. 1-6.
- [12] C. M. Reddy, "Power System Voltage Stability Analysis" *Indian Institute of Technology Hyderabad*, 2011.
- [13] P. Kundur, B. Gao and G. K. Morison, "Practical Application of Modal Analysis for Increasing Voltage Stability Margins," *Proceedings. Joint International Power Conference Athens Power Tech.*, 1993, pp. 222-227.
- [14] B. Gao, G. K. Morison and P. Kundur, "Voltage stability evaluation using modal analysis," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 1529-1542, Nov. 1992.
- [15] L. S. Pereira, J. C. P. Suni "Um Estudo da Geração Eólica a partir do Gerador de Indução com Dupla Alimentação (DFIG) e do Gerador de Indução Gaiola de Esquilo (SCIG)," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2016.
- [16] J. L. B. Zamperin, "Método Analítico para análise da Estabilidade do Gerador Assíncrono Através do Monitoramento da Tensão," *Universidade Estadual Paulista*, 2011.
- [17] M. A. El-Sharkawi, "Wind Energy - An Introduction" *University of Washington*, Seattle, USA, 2016.
- [18] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, "Matpower 6.0 User's Manual," 2016.