

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

ANÁLISE E PROJETO DE CONTROLE DE STATCOM EM SISTEMAS ELÉTRICOS COM PARTICIPAÇÃO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

RAFAEL COUTINHO PINTO(1); PAULO CÉSAR PELLANDA(1); MARCOS VINÍCIUS PIMENTEL TEIXEIRA(1)
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA(1)

RESUMO

O aumento da geração fotovoltaica pode ser desafiador quando observado pela perspectiva do desempenho elétrico. Isso ocorre devido à baixa capacidade de regulação proveniente desse tipo de fonte. Existem estudos sobre técnicas mitigadoras desse problema, como a utilização de arranjos PV-STATCOM, porém esses estudos são majoritariamente elaborados utilizando análises de transitórios eletromagnéticos. Neste trabalho, apresenta-se uma síntese dos modelos presentes na literatura, a fim de obter uma modelagem eletromecânica mais simples que permita analisar sistemas elétricos de potência de grande porte, e, além disso, aborda-se a teoria necessária para utilização eficiente dos modelos propostos.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas Elétricos de Potência. Geração Fotovoltaica. Estabilidade Transitória. STATCOM.

1.0 INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira é majoritariamente hídrica, entretanto, nos últimos anos, a utilização de fontes alternativas, como a eólica e a fotovoltaica (FV), têm apresentado um aumento expressivo de participação na matriz. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020 (3), as parcelas dessas fontes somadas representavam cerca de 9,6% da matriz elétrica brasileira. A partir de 2016, entraram em operação as primeiras grandes geradoras fotovoltaicas no Sistema Interligado Nacional (SIN). Um ponto importante que pode ser observado nos últimos BENs é que, apesar de ainda não possuir uma parcela significativa na matriz elétrica, cerca de 1,0% em 2019, a geração FV vem apresentando um crescimento expressivo, atingindo a marca de crescimento de 316,1% no ano de 2018 em relação ao ano de 2017. Já em 2019 a geração fotovoltaica dobrou em relação a 2018.

Atualmente, os trabalhos sobre sistemas fotovoltaicos e STATCOMs são majoritariamente apresentados nos estudos de transitórios eletromagnéticos que são limitados no tempo de simulação e no tamanho do sistema a ser analisado, como consequência de seus pequenos passos de integração e do nível de detalhamento do equipamento. A despeito dos dispositivos eletrônicos associados aos sistemas FV e STATCOM serem temas frequentes na literatura, estudos com foco na modelagem eletromecânica são pouco explorados. Por isso, a proposta deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica dos principais modelos eletromecânicos desses dispositivos. A partir de uma síntese de modelos presentes no estado da arte, este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma abordagem simples de arranjos PV-STATCOM que permita analisar sistemas elétricos de potência de grande porte, isto é, com 1.000 barras ou mais.

2.0 MODELOS

Essa seção tem por objetivo explicar as características dos modelos de STATCOM e FV adotados.

2.1 Representação elétrica

A representação do STATCOM adotada foi o modelo de tensão controlada. Esta escolha se justifica por ser o modelo mais comum na literatura e o modelo implementado no ANATEM, programa computacional utilizado nas simulações. Apesar de haver na literatura um modelo de susceptância controlada que apresenta bons resultados, esta abordagem ainda foi pouco explorada. Na Figura 1, apresenta-se o circuito do STATCOM.

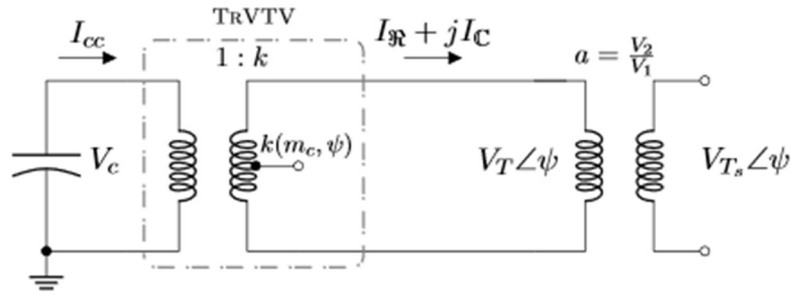


Figura 1 - Representação da relação do lado CC com o lado CA do conversor e transformador de conexão.

A relação de transformação do TrVTV (indicado na Fig. 1) é dada pela Equação (1), em que m_c e ψ são variáveis de controle e $\sqrt{\frac{3}{8}}$ é o fator de forma da modulação. Na Equação (2) representa-se a tensão terminal do STATCOM.

$$k = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot n_c \cdot m_c \cdot e^{j\psi} \quad (1)$$

$$V_T = V_c \cdot k = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot V_c \cdot n_c \cdot m_c e^{j\psi} \quad (2)$$

2.2 Malha de controle

O sistema de controle do STATCOM pode ser dividido em duas malhas, conforme apresentado na Figura 2. A dinâmica da regulação de corrente é muito mais rápida do que a da regulação de tensão e pode, portanto, ser negligenciada, conforme citado na referência (4). Abordagens similares podem ser encontradas nas referências (5, 6, 7). Ademais, a remoção de uma malha de dinâmica rápida simplifica o modelo sem perda de representatividade na faixa de frequência de interesse. Além disso, é colocado um filtro passa baixa para remover dinâmicas indesejadas na regulação tensão CC.

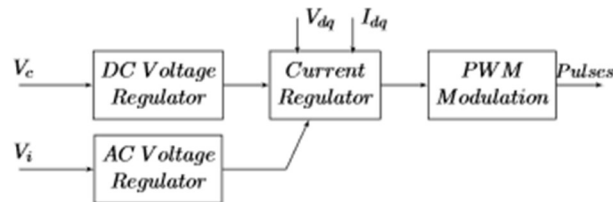


Figura 2 - Diagrama de controle simplificado do STATCOM.

As variáveis elétricas do modelo do STATCOM podem ser expressas em componentes de eixo direto e em quadratura, onde a tensão terminal se relaciona com as variáveis de saídas dos controladores. O diagrama simplificado de um STATCOM pode ser visualizado na Figura 3.

As variáveis são saídas dos reguladores e representam um vetor cujo módulo é menor ou igual a 1, paralelo às componentes em eixo direto e em quadratura da tensão terminal. A variável é um escalar que envolve a tensão CC e parâmetros do STATCOM. As variáveis de saídas dos reguladores e a tensão terminal se relacionam através da Equação (3).

O fluxo de potência é função da diferença angular entre as barras. Desconsiderando as perdas resistivas e a modelagem do PLL, os fluxos de potência ativa e reativa entre o STATCOM e a barra podem ser determinados pelas Equações (5) e (6).

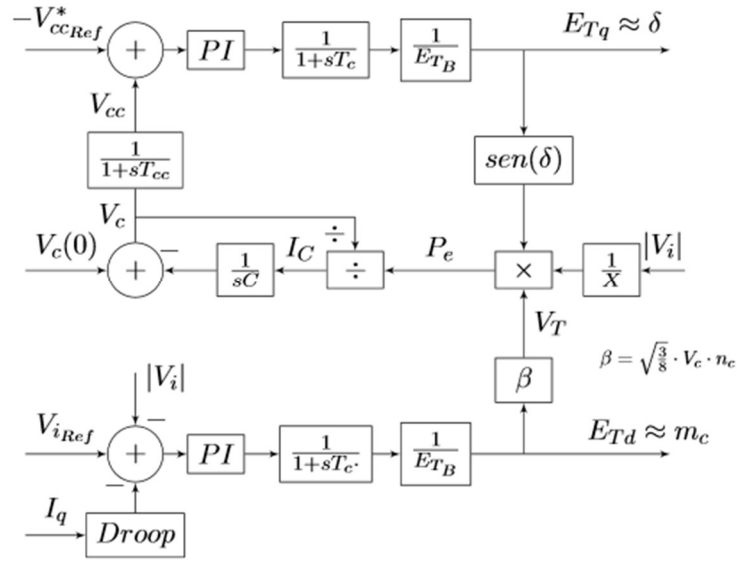


Figura 3 - Diagrama simplificado de um STATCOM para análise.

$$\left| \frac{V_{Td}}{V_{Tq}} \right| = \beta \left| \frac{E_{Td}}{E_{Tq}} \right| \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{3}{8}} \cdot V_c \cdot n_c \quad (4)$$

$$P \approx \frac{1}{X} |V_T| |V_i| \sin(\delta + \theta - \theta) \approx \frac{1}{X} |V_T| |V_i| \sin(\delta) \quad (5)$$

$$Q \approx \frac{1}{X} [|V_T|^2 + |V_T| |V_i| \cos(\delta + \theta - \theta)] \approx \frac{1}{X} [|V_T|^2 + |V_T| |V_i| \cos(\delta)] \quad (6)$$

Ao observar a Equação (5), nota-se que só há fluxo de potência ativa caso $\delta \neq 0$, sendo que δ depende da saída da regulação CC. Nessa condição, o capacitor só é descarregado quando há alteração na referência da tensão CC. Por isso, quando não há estratégia inercial, a malha de regulação nem sempre é representada.

2.3 Ajustes de Parâmetros de Controladores

Os ganhos foram obtidos por meio de otimização por algoritmo genético, disponível na referência (8), levando-se em consideração as análises feitas na Seção 2.2. A função objetivo definida pela Equação (7) segue os critérios definidos a seguir. A regulação de tensão CC atua em δ , logo valores elevados de ganho na regulação de tensão CC geram respostas oscilatórias. Isto ocorre por estarem associadas a termos seno e cosseno e, como consequência, dificultam a estabilização da regulação de tensão CA. Para evitar esse problema, os ganhos da regulação CC devem ser menores que os da regulação CA. Isso foi observado primeiramente nos padrões de ganhos obtidos via otimização e coincide com o que foi apresentado nas referências (9, 10, 11, 12).

$$\begin{aligned} \min_K \quad & \int E_{cc}(K_{P_{cc}}, K_{I_{cc}}) dt + \int E_{ca}(K_{P_{ca}}, K_{I_{ca}}) dt \\ \text{sujeito a:} \quad & K_{min} < K_{cc} < K_{ca} < K_{max} \end{aligned}$$

$$\text{em que: } E_{ca} = V_{iRef} - |V_i(K_{P_{ca}}, K_{I_{ca}})| - droop \cdot I_q \text{ e } E_{cc} = V_c^*(K_{P_{cc}}, K_{I_{cc}}) - V_{ccRef}. \quad (7)$$

2.4 Ajuste do Droop

A malha de *droop* atua fazendo um pequeno desvio na referência da regulação de tensão CA em função da corrente e, por consequência, altera-se o fluxo de potência reativa. Um *droop* adequado é fundamental para o funcionamento do STATCOM, pois proporciona uma curva característica $V \times I$ adequada ao equipamento.

Um valor muito elevado de *droop* reduz o fluxo de potência reativa e dificulta a regulação de tensão. Um valor muito baixo de *droop* pode elevar muito o nível de corrente, o que viola saturações impostas aos modelos e, com isso, tem-se uma operação fora dos limites operacionais. Esse cenário de violação não permite que a convergência da simulação seja alcançada.

Quando não se tem um valor de *droop* previamente, esse pode ser calculado considerando o fluxo de potência reativa do STATCOM para um determinado nível de tensão da barra. Considerando que a injeção de potência reativa é nula quando a tensão da barra acompanha a referência e que o erro em regime estacionário da regulação CA é nulo, o *droop* pode ser obtido a partir da Equação (8). A Equação (9) é dada rearranjando-se a Equação (8) em função da potência reativa.

$$V_{iRef} - |V_i|_{esp} - droop \cdot I_q = 0 \quad (8)$$

$$-\frac{|V_i|_{esp}(V_{iRef} - |V_i|_{esp})}{Q_{esp}} = droop \quad (9)$$

2.5 Definição de Limites Operacionais

O STATCOM é um dispositivo composto por componentes eletrônicos. Esses dispositivos são sensíveis a sobrecorrentes devendo haver limitações para garantir a integridade do equipamento. Essas limitações reduzem o fluxo de potência transitório e de regime do equipamento e devem ser consideradas nas simulações.

No modelo completo do STATCOM, a malha de regulação de corrente fica responsável por fazer o ajuste da corrente, mantendo-a sempre dentro dos limites adequados ao equipamento. No modelo eletromecânico do STATCOM não há a presença da malha de regulação de corrente e, devido a isso, os limites da corrente do equipamento são impostos através de saturações nas malhas de regulação de tensão CA e CC. A partir da lei de Kirchhoff das tensões chega-se à Equação (10).

$$V_d + jV_q = V_i + (I_d + jI_q)jX \quad (10)$$

Definindo-se valores limites de correntes, os valores limites das saídas dos reguladores são expressos pelas Equações (11) e (12).

2.6 Fotovoltaica

Neste trabalho, escolheu-se analisar o modelo GE LV5E, que representa os inversores LV5- 1511 da *General Electric* (GE) (13). Este modelo utiliza controle de tensão em barra remota e controle de potência ativa, com estratégia com regulação de tensão terminal (conforme a Figura 4).

$$E_{dmax} = \frac{(V_i - I_{qmax} \cdot X) \cdot a}{\sqrt{\frac{3}{8}}} \quad e \quad E_{dmin} = \frac{(V_i + I_{qmin} \cdot X) \cdot a}{\sqrt{\frac{3}{8}}} \quad (11)$$

$$E_{qmax} = \frac{I_{dmax} \cdot X \cdot a}{\sqrt{\frac{3}{8}}} \quad e \quad E_{qmin} = \frac{-I_{dmin} \cdot X \cdot a}{\sqrt{\frac{3}{8}}} \quad (12)$$

Para utilização em conjunto com o STATCOM, são definidos ganhos pequenos ou remoção da malha de tensão do modelo GE LV5E. Assim, o STATCOM fica responsável por fazer o controle de tensão.

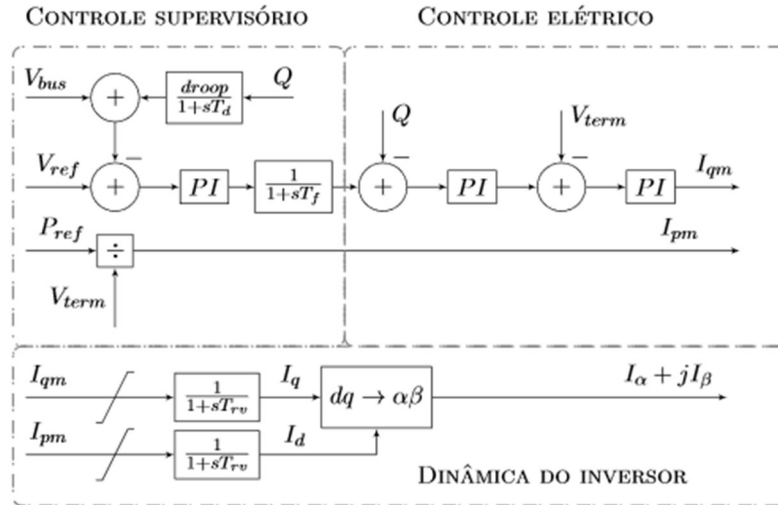


Figura 4 - Malha de controle do sistema FV na configuração adotada. Adaptado de (14).

3.0 SIMULAÇÕES

Nesta seção, são apresentadas simulações utilizando dois sistemas distintos. Um sistema de 2 áreas clássico da literatura e um caso do SIN obtido do plano de ampliações e reforços 2023 (PAR 2023).

3.1 Sistema de 2 Áreas

Essas simulações têm por finalidade mostrar como o STATCOM pode auxiliar uma usina FV do ponto de vista da eficiência do controle de tensão. Durante uma perturbação que causa grande variação de tensão, o gerador FV entra em um modo em que o equipamento prioriza a geração de potência ativa ou potência reativa. Isso é configurado previamente no modelo do equipamento e esta configuração é abordada detalhadamente em (15). Nos testes desta seção, a FV prioriza a injeção de potência reativa.

As simulações são realizadas utilizando o sistema clássico de 2 áreas de (16) exibido na Figura 5. O evento escolhido é um curto-circuito com afundamento de tensão de 50% na barra #7 e com duração de 200 ms. Somente o gerador síncrono da barra #1 possui regulação de tensão. Os demais não apresentam malhas de regulação de tensão ou velocidade. Os dados dos geradores são exibidos na Tabela 1.

3.1.1 Análise

A análise da Figura 6 permite concluir que o caso com gerador síncrono (SINC) apresenta maior oscilação de potência ativa se comparado aos demais casos. Além disso, apresenta um comportamento instável como consequência da ausência das malhas de regulação.

No caso com a FV, houve uma queda de tensão para 0,9 pu durante o curto-circuito. Porém, essa queda foi atenuada pois, durante o evento, a usina FV reduziu a injeção de potência ativa para 500 MW e aumentou instantaneamente a geração de potência reativa para 500 Mvar que se mantém durante o período do evento. Após a eliminação do curto, a potência ativa e reativa retornam para valores próximos aos pré-falta, porém, observa-se uma sobre-frequência de 61 Hz evidenciando um desbalanço entre carga e geração após o distúrbio.

No caso do arranjo FV-STATCOM ocorreu uma queda de tensão para 0,95 pu durante o evento, ficando acima do valor de 0,9 pu do caso em que há somente a FV. A injeção de potência reativa foi menor (400 Mvar) se comparado com o caso da FV (500 Mvar). Além disso, como o STATCOM é um equipamento independente, não houve redução significativa na geração de potência ativa da FV. Em virtude disso, o desbalanço entre carga e geração após a falta foi menor e, por conseguinte, a sobre-frequência foi menor, atingindo 60,5 Hz, se comparado com os 61 Hz do caso em que há somente a FV.

Comparando o caso do arranjo PV-STATCOM com o caso de FV, pode-se concluir que o primeiro teve um desempenho superior em virtude da elevação do suporte de potência reativa sem redução de injeção de potência ativa. Além disso, as variáveis apresentam comportamento oscilatório, que é justificável pelos modos de oscilação entre áreas característicos desse sistema. Todavia, observa-se que a contribuição gerada pelo STATCOM fez com que as variáveis apresentassem oscilações de menor amplitude se comparado com os outros casos.

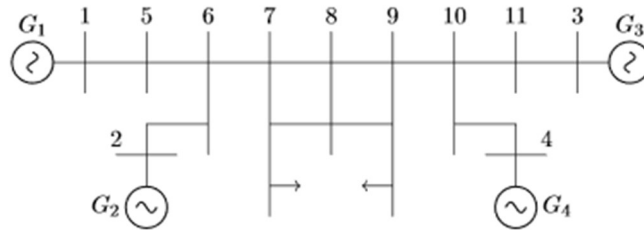


Figura 5 - Sistema de 2 áreas. Fonte: (16).

Tabela 1 - Dados dos geradores para o sistema de 2 áreas. (*FV, ** PV-STATCOM)

Gerador	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)	Constante de inércia (s)	Potência Nominal (MVA)
G1	700	185	6,5	900
G2	700	234	6,5	900
G3	719,1	176,4	6,175	900
G4	700	202	6,175	900/735*/794**

Tabela 2 - Parâmetros de Simulação.

Dado	Valor
Programa Computacional	ANATEM Ver. 11.04.01-2018
Passo de Integração	5 ms
Tempo de Simulação	30 segundos
Ganhos do STATCOM	$K_{I_{cc}}=0,1 / K_{P_{cc}}=0,01$ $K_{I_{ca}}=100 / K_{P_{ca}}=0,05$

3.2 Sistema Interligado Nacional

Essas simulações têm por objetivo verificar a eficácia do arranjo PV-STATCOM e das estratégias inerciais em um sistema de grande porte. Para isso, foi escolhida uma das usinas FV da região Nordeste. A usina escolhida foi a FV de Bom Jesus da Lapa (barra 6084), sendo adicionado um STATCOM de 25 MVA na barra. O sistema foi simulado para o caso de carga média do PAR 2023 e, para manter as características originais do caso em regime permanente, o STATCOM não tem participação no fluxo de potência reativa. O evento simulado foi o aumento de carga em 350 MVA na área da FV, cujos parâmetros adotados são apresentados na Tabela 3.

3.2.1 Análise do EVENTO

A análise dos resultados, apresentados na Figura 7, indica que o caso da FV operando em modo de prioridade de potência ativa (FV-P) tem o inversor mantendo a injeção de potência ativa constante, ou seja, não há compensação de potência reativa devido à queda de tensão ocasionada pelo aumento de carga. Em virtude disso, o gerador passa a operar abaixo do limite de variação de tensão de 10% (descrito na especificação técnica (13)) e dos requisitos mínimos exigidos nos Procedimentos de Rede (17). Como consequência, ocorre o desligamento da FV em análise após 5 segundos, tempo mínimo especificado nos Procedimentos de Rede (17), e o desligamento de uma FV próxima (barra 6090). Esses desligamentos resultam em uma variação rápida de frequência de 0,25 Hz.

Para o caso da FV operando em modo de prioridade de potência reativa (FV-Q), o inversor reduz a injeção de potência ativa a 37 MW para realizar a regulação de tensão através da injeção de 3 Mvar de potência reativa. Entretanto, o inversor injeta o mínimo de potência reativa para operar dentro do limite de desvio de tensão pós distúrbio de 10% e minimiza a redução da potência ativa. Transitoriamente, há um pico de potência inicial de

potência relativa de 12 Mvar e um vale de potência ativa de 33 MW. Nesse caso, também ocorre o desligamento FV (barra 6090) após 5 segundos, o que causa uma variação rápida de frequência de 0,13 Hz. Com isso, o gerador analisado (barra 6084) tem que aumentar ainda mais a geração de potência reativa e reduzir a geração de potência ativa a 36 MW para sustentar o nível de tensão mínimo pós distúrbio. Ademais, é especificado nos Procedimentos de Rede (17) que, em regime permanente, a FV não deve produzir variações de tensão superior a 5%, logo o gerador necessitará de uma regulação adicional para elevar o nível de tensão para 0,95 pu (patamar mínimo).

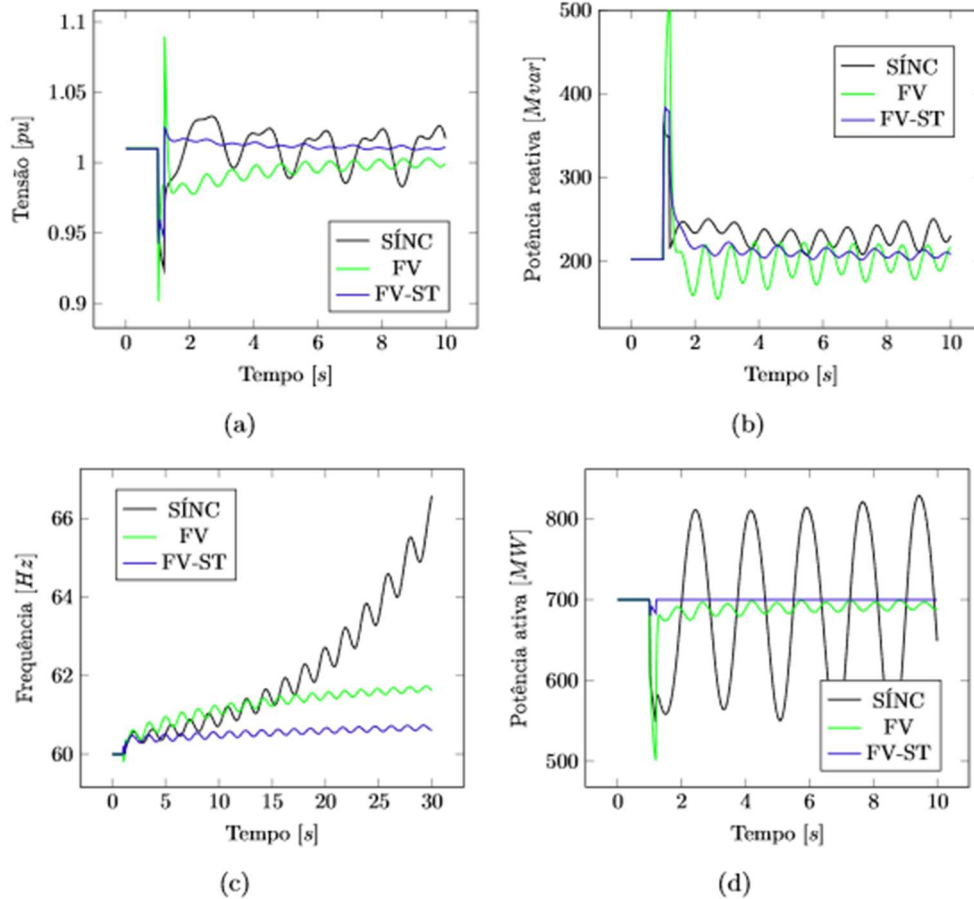


Figura 6 - Resultados para o sistema de 2 áreas : (a) Tensão na barra; (b) Fluxo de potência reativa; (c) Frequência na barra; (d) Fluxo de potência ativa.

Para o caso do arranjo FV-STATCOM, o STATCOM fica responsável por fazer a regulação de tensão sem ocasionar redução de potência ativa para injetar potência reativa, tendo como limite apenas o fator de potência exigido nos Procedimentos de Rede. Nesse caso, a regulação de tensão foi mais eficiente, mantendo-a próximo de 0,95 pu, ficando acima do limite de tensão pós distúrbio de 0,9 pu. Não houve o desligamento da FV da barra 6090 devido à subtensão, pois uma regulação eficiente nessa FV auxilia também as geradoras próximas. Ademais, não há necessidade de uma regulação adicional para atender o critério de variação de tensão de 5 % em regime permanente, pois consegue-se manter o nível de tensão próximo ao limite mínimo de 0,95 pu.

Pode-se verificar que a adição do STATCOM foi benéfica para FV, mantendo o nível de tensão sem onerar a injeção de potência ativa. Além disso, o dispositivo contribui para o sistema pois ele foi capaz de manter um nível de tensão mais elevado na barra, isto é, 0,95 pu contra 0,87 pu e 0,90 pu dos outros casos, o que evitou o desligamento de uma usina próxima que ocorria nos outros casos simulados.

Tabela 3 - Parâmetros de simulação.

Dado	Valor
Programa Computacional	ANATEM Ver. 11.04.01-2018
Passo de Integração	0,1 ms
Tempo de Simulação	30 segundos
Ganhos do STATCOM	$K_{I_{cc}}=0,1$ / $K_{P_{cc}}=0,01$ $K_{I_{ca}}=50$ / $K_{P_{ca}}=0,07$

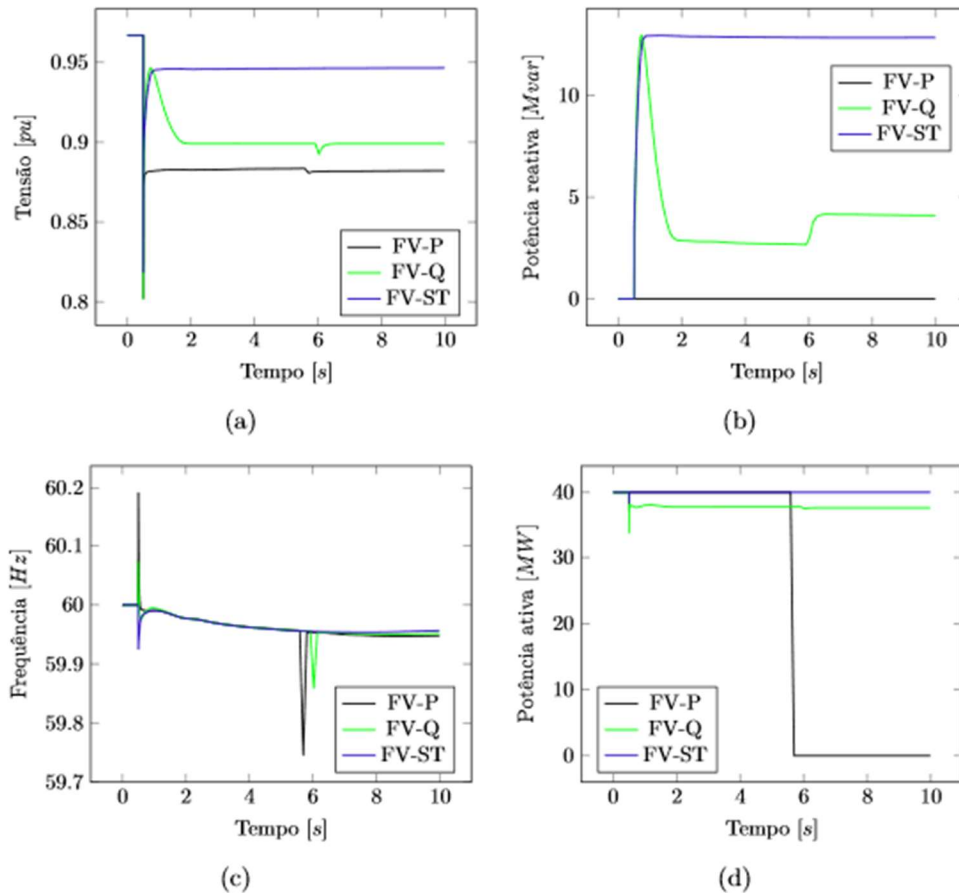


Figura 7 - Grandezas elétricas na barra #6084 : (a) Tensão na barra; (b) Fluxo de potência reativa; (c) Frequência na barra; (d) Fluxo de potência ativa.

4.0 CONCLUSÃO

Os modelos de arranjos PV-STATCOM propostos neste trabalho foram elaborados a partir de modelos disponíveis e implementados para simulações em programas computacionais de ampla utilização pelos agentes do setor elétrico. Os resultados obtidos através dessas simulações permitem concluir que a utilização dos arranjos supracitados proporciona benefícios/ganhos relevantes sob a ótica da estabilidade transitória, principalmente do ponto de vista da tensão. No caso de 2 áreas, a adoção do arranjo resultou no excursionamento menor das grandezas elétricas em relação aos valores em regime. No caso do SIN, a FV em análise manteve a operação dentro dos limites exigidos pelo ONS, o que evitou o desligamento de uma usina próxima.

REFERÊNCIAS

- (1) UNFCCC. Adoption of the paris agreement. In: FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>>.

- (2) MMA. Acordo de Paris. 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>.
- (3) EPE. Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. [S.l.], 2020. Citado na página 1.
- (4) RONCERO-SÁNCHEZ, P. et al. VSC-FACTS-HVDC: Analysis, Modelling and Simulation in Power Grids. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2019.
- (5) CANIZARES, C. A. Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies. In: 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077). [S.l.: s.n.], 2000. v. 2, p. 1447–1454 vol.2. ISSN null.
- (6) CASTRO, L. M.; ACHA, E.; FUERTE-ESQUIVEL, C. R. A novel STATCOM model for dynamic power system simulations. IEEE Transactions on Power Systems, v. 28, n. 3, p. 3145–3154, Aug 2013. ISSN 1558-0679.
- (7) SILVA, M. P. et al. Evaluation of STATCOM model for electromagnetic and electromechanical transients. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN null.
- (8) MATHWORKS. Genetic Algorithm. 2021. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html>>.
- (9) PENG, Q. et al. Maximum virtual inertia from DC-link capacitors considering system stability at voltage control timescale. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, v. 11, n. 1, p. 79–89, 2021.
- (10) ELETRICAS, D. D. R. Análise de Transitórios Eletromecânicos. 11.04.01. [S.l.], 2018.
- (11) GIROUX, P.; SYBILLE, G. D-STATCOM (Detailed Model) Matworks Documentation. 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/d-statcom-detailed-model.html>>.
- (12) BAO, L.; FAN, L.; MIAO, Z. Comparison of synchronous condenser and STATCOM for wind farms in weak grids. In: 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS). [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.
- (13) GE POWER CONVERSION. LV5-1511-30-IEC-SLR : 1.1 MW Inverter DataSheet. [S.l.], 2017.
- (14) PINTO, R. C.; TEIXEIRA, M. V. P.; PELLANDA, P. C. Transitórios eletromecânicos em sistemas elétricos com forte geração fotovoltaica e STATCOMs para suporte de resposta inercial. In: 2020 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition- Latin America (T D LA). [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- (15) HAUSER, D. Impacto de centrais geradoras fotovoltaicas na estabilidade a pequenas e grandes perturbações. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, jun 2019.
- (16) KUNDUR, P.; BALU, N. Power System Stability and Control. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. (EPRI power system engineering series). ISBN 9780780334632.
- (17) ONS. Submódulo 2.10 Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. 2020.12. ed. [S.l.], 2020.

DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Veiga de Almeida (2018) e mestrado em Engenharia Elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia (2021). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica atuando principalmente nos seguintes temas: inércia virtual, estabilidade transitória, sistemas elétricos de potência, geração fotovoltaica e STATCOM.

(2) PAULO CÉSAR PELLANDA, Coronel Engenheiro Militar da reserva do Exército Brasileiro e Professor de Carreira do Magistério Superior Federal. Engenheiro Eletricista pela UTFPR; Engenheiro Militar e Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Controle pelo Instituto Militar de Engenharia (IME); Mestre em Ciências Militares pela Escola de Comando e Estado-Maior do Exército; e Doutor em Controle Automático pelo Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE-França). Membro titular da Academia Nacional de Engenharia e Membro do IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. Atua no IME, na docência em Engenharia Elétrica e de Defesa e na pesquisa científica nas áreas de sistemas de controle com aplicações em sistemas elétricos e aeroespaciais.

(3) **MARCOS VINÍCIUS PIMENTEL TEIXEIRA**
Doutor e mestre em engenharia elétrica pela PUC-Rio, graduado em engenharia elétrica pela UFF e técnico em eletrônica pela FAETEC. Atualmente é professor de magistério superior do departamento de engenharia elétrica do Instituto Militar de Engenharia - IME. Possui experiência como engenheiro de sistemas elétricos de potência do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e realiza pesquisa nas áreas de análise de redes elétricas em regime permanente, análise eletromecânica e serviços auxiliares à operação elétrica.