



Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DE MODELAGEM DETALHADA VERSUS SIMPLIFICADA DE AEROGERADORES DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIO ELETROMAGNÉTICO

**CARMEM LÚCIA TAVARES (1); DÉIBSON JOSÉ GOMES DE SENA (2);
ANDESA (1); ANDESA (2);**

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem de um Gerador de Indução Duplamente Alimentado no programa ATP considerando a representação dos conversores de duas formas distintas: representação dos conversores como fontes de tensão controlada e representação dos conversores modelados através da utilização de chaves controladas com a rotina TACS do ATP. A partir do modelo desenvolvido foram realizadas simulações em um sistema real analisando os principais eventos associados a surtos de manobra que ocorrem no sistema elétrico e aos quais estão sujeitas as CGE, fazendo-se uma comparação entre dois tipos distintos de modelagem dos conversores sob o ponto de vista sistêmico.

PALAVRAS-CHAVE

ATP, GIDA, Transitórios Eletromagnéticos, Fonte de Tensão Controlada, IGBT.

1.0 - INTRODUÇÃO

O crescente número de parques eólicos previstos para conectarem-se ao sistema elétrico brasileiro exige uma reavaliação a respeito das modelagens dos aerogeradores existentes atualmente. Sabe-se que estes modelos, utilizados nos estudos de transitórios eletromecânicos envolvendo a conexão de parques eólicos, são desenvolvidos para o programa ANATEM/CEPEL. Entretanto, não é possível através deste programa representar todos os componentes reais de um aerogerador. Muitos fabricantes utilizam-se de uma modelagem puramente matemática, ou seja, não há uma preocupação em representar os componentes reais de um aerogerador. Tais aerogeradores são representados em sua maioria como uma fonte de injeção de corrente. No entanto, do ponto de vista das análises de transitórios eletromecânicos esta representação é bastante razoável, uma vez que neste tipo de transitório a duração da perturbação é bastante elevada se comparada à duração dos fenômenos decorrentes de transitórios eletromagnéticos (1).

A avaliação de como se comporta determinado tipo de aerogerador e quais são os seus impactos sobre o sistema elétrico durante a ocorrência de transitórios eletromagnéticos, como por exemplo energização de transformadores, só é possível diante de uma modelagem mais detalhada dos elementos que compõem o aerogerador. O ONS, em busca de conhecer e se preparar para eventuais problemas decorrentes da operação de grandes aglomerados de Centrais de Geração Eólica, vem exigindo dos fabricantes de turbinas eólicas uma representação mais detalhada de seus aerogeradores.

A representação desenvolvida pelos fabricantes para os estudos de regime dinâmico não são mais suficientes. Tendo por base os parâmetros utilizados pelo CEPEL para modelagem de um gerador tipo GIDA, foi desenvolvido um modelo matemático que representa de forma segura os componentes reais de um gerador

eólico. Tal modelo, neste trabalho, foi desenvolvido para o programa ATP, que permite observar os fenômenos reais de um sistema elétrico. O desenvolvimento do modelo matemático é baseado nas variáveis reais do sistema. Através da transformada de *Clarke* é possível transformar um sistema trifásico equilibrado em um sistema bifásico correspondente (2).

Especificamente para a modelagem dos conversores foi considerada duas representações distintas: a representação dos conversores como fontes de tensão controlada e a representação dos conversores através da utilização de chaves controladas (IGBT).

De modo a avaliar os impactos de cada tipo de modelagem dos conversores nos resultados de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos foram consideradas as seguintes manobras na realização deste trabalho:

- Energização de transformadores;
- Defeitos monofásicos.

2.0 - MODELAGEM DOS AEROGERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADOS

2.1 Modelagem do Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA)

A aplicação de Gerador de Indução Duplamente Alimentado na produção de energia elétrica é a tecnologia mais utilizada atualmente, sendo conhecida por muitos como a topologia que apresenta as melhores vantagens. Partindo da topologia dos geradores tipo GIDC foram adicionados conversores conectados aos enrolamentos do rotor da máquina de indução tendo como principal função tornar possível a operação desses sistemas em velocidade variável. Este tipo de topologia já permite a implantação de controles que possibilitem direcionar o fluxo de potência ativa e reativa entre a máquina e a rede elétrica. Como os conversores são conectados apenas no rotor da máquina de indução, sua potência necessita ser no máximo correspondente a 30% da potência nominal do aerogerador, fazendo com que o custo deste tipo de tecnologia seja mais atrativo que o custo com máquinas que são conectadas à rede através de conversores plenos, como será apresentado posteriormente. A topologia deste tipo de aerogerador é apresentada na Figura 1.

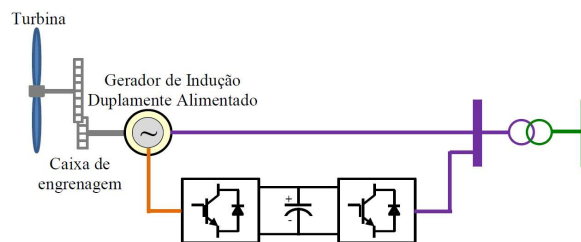


FIGURA 1 – Configuração Gerador de Indução Duplamente Alimentado.

As equações do modelo vetorial de máquina de indução duplamente alimentada são estabelecidas considerando que a mesma será conectada em um sistema trifásico. Deverá também ser estabelecido o sentido das correntes de estator e de rotor. O modelo a ser apresentado considera notação motora, ou seja, as correntes de estator e de rotor são consideradas positivas entrando na máquina. Para que a mesma opere como gerador é considerada a aplicação de um conjugado de carga (T_c) negativo.

Tensões estabelecidas nos terminais do estator:

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} \quad (2.1)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{sq} \quad (2.2)$$

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Tensões estabelecidas nos terminais do rotor:

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \lambda_{rd} + \omega_r \lambda_{rq} \quad (2.3)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \lambda_{rq} - \omega_r \lambda_{rd} \quad (2.4)$$

As equações de fluxo de estator e de rotor são:

$$\lambda_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (2.5)$$

$$\lambda_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (2.6)$$

$$\lambda_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \quad (2.7)$$

$$\lambda_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \quad (2.8)$$

O torque eletromagnético da máquina de indução é definido por:

$$T_e = \frac{3PL_m}{4L_r} (\lambda_{rd} i_{sq} - \lambda_{rq} i_{sd}) \quad (2.9)$$

As equações da mecânica da máquina de indução e da velocidade angular do rotor são:

$$J \frac{2}{P} \frac{d}{dt} \omega_r = T_e - T_c \quad (2.10)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (2.11)$$

2.2 Modelagem dos Conversores

A função dos conversores utilizados na topologia de um aerogerador tipo GIDA é proporcionar uma melhor controlabilidade da máquina. Enquanto o conversor do lado da rede (CLR) tem como principal função controlar a tensão do barramento CC e a potência reativa por ele injetada na rede, o conversor conectado do lado da máquina (CLM) tem por objetivo controlar a velocidade da máquina e a potência reativa que flui do estator do gerador para a rede. A representação do conversor de frequência pode ser feita de duas maneiras:

a. Representação dos conversores como fontes de tensão controlada

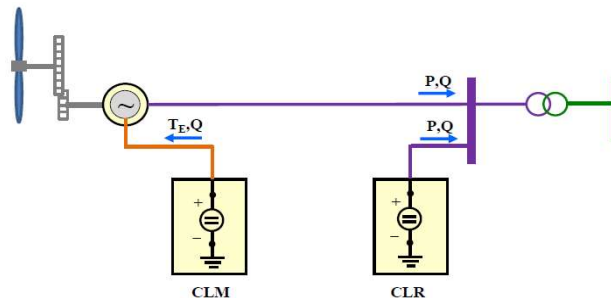


FIGURA 2 – Modelagem dos conversores como fonte de tensão.

b. Representação dos conversores através da utilização de chaves controladas por TACS.

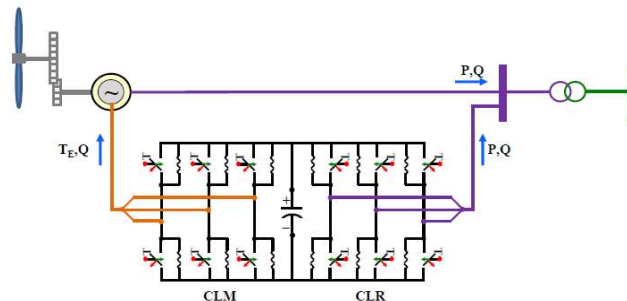


FIGURA 3 – Modelagem dos conversores através de chaves controladas por TACS.

A modelagem dos conversores através de chaves controladas por TACS requer um esforço computacional maior que a representação dos conversores como fonte de tensão. De forma a permitir a utilização de altas frequências de chaveamento é necessário utilizar passo de cálculo da ordem de microssegundos, tornando o tempo de processamento de uma simulação bastante elevado. Neste trabalho são comparados resultados de simulações considerando a modelagem dos conversores através de fontes de tensão e através de chaves controladas. Esta comparação tem por finalidade apontar em quais situações é necessária a utilização da modelagem detalhada dos conversores através de chaves ideais.

Observa-se que a modelagem no programa ATP de grandes fazendas eólicas só é possível caso sejam utilizados modelos mais simplificados. Como foi citado anteriormente, a adoção deste tipo de modelagem para avaliar o impacto de grandes blocos de energia eólica em determinada região do sistema deve permitir observar os impactos reais que tais usinas irão provocar sobre a Rede Básica.

Como o objetivo destas análises são impactos sobre os equipamentos pertencentes à Rede Básica, serão propostas simplificações na modelagem dos aerogeradores tipo GIDA que não comprometam os resultados obtidos utilizando-se modelagem detalhada.

2.3 Estratégias de Controle

As estratégias de controle adotadas no desenvolvimento deste trabalho permitem regular a potência mecânica absorvida do vento pela turbina eólica de modo que, para cada valor de velocidade do vento, a velocidade de rotação da turbina seja regulada no valor que proporcione máxima absorção de potência e, consequentemente, máxima potência ativa injetada na rede. Este controle é realizado pelo conversor do lado da máquina (CLM), o qual também possibilita controlar a potência reativa injetada na rede pelos enrolamentos do estator. Já o conversor do lado da rede (CLR) controla a tensão do barramento CC e a potência reativa por ele injetada na rede. Além disso, realiza-se o controle do ângulo de passo das pás da turbina eólica, de modo que, para velocidades de vento demasiadamente elevadas, a potência absorvida do vento seja reduzida, a fim de evitar sobrevelocidade ou geração de potência ativa acima do valor nominal.

2.3.1 Controle do Conversor do Lado da Máquina (CLM).

Ao conversor do lado da máquina (CLM), são atribuídas as seguintes funções: controlar a velocidade da máquina, para garantir a operação no ponto de máxima potência (MPPT - *maximum power point tracking*), e a potência reativa que flui do estator do gerador para a rede. De modo a facilitar o desenvolvimento das estratégias de controle para o conversor do lado da máquina são utilizadas técnicas de controle vetorial.

A velocidade de referência é determinada a partir da velocidade do vento medida e do valor da velocidade específica λ que proporcione máximo aproveitamento aerodinâmico (máximo C_p). A estratégia de controle é orientada pelo fluxo de estator. Tal premissa é baseada no fato que, estando os terminais do estator da máquina conectados diretamente à rede elétrica, a magnitude do fluxo de estator pode ser considerada aproximadamente constante (3).

Ao considerar o fluxo de estator constante pode-se dizer que para controlar o torque eletromagnético, e assim atuar sobre a potência ativa da máquina, basta-se controlar a corrente de rotor de eixo em quadratura (i_{rq}). Para tal fim é implementado um controle interno de corrente baseado em i_{rq} . A corrente de referência para o controle i_{rq}^* é calculada de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 4.

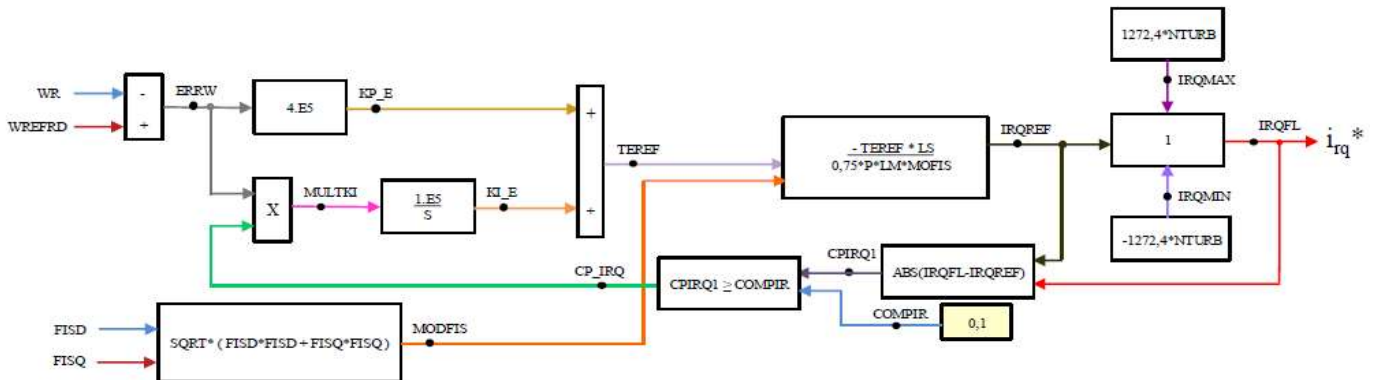


Figura 4 – Diagrama de controle para determinação de i_{rq}^* .

A estratégia adotada para controlar a potência reativa, que flui do estator do gerador para a rede, é realizada tendo como referência a corrente de eixo direto de rotor i_{rd} . Este controle também é orientado pelo fluxo de estator. Através de uma malha interna de controle de corrente é possível controlar i_{rd} , e conseqüentemente a potência reativa de estator. O diagrama de blocos para determinação da corrente i_{rd}^* é apresentado na Figura 5.

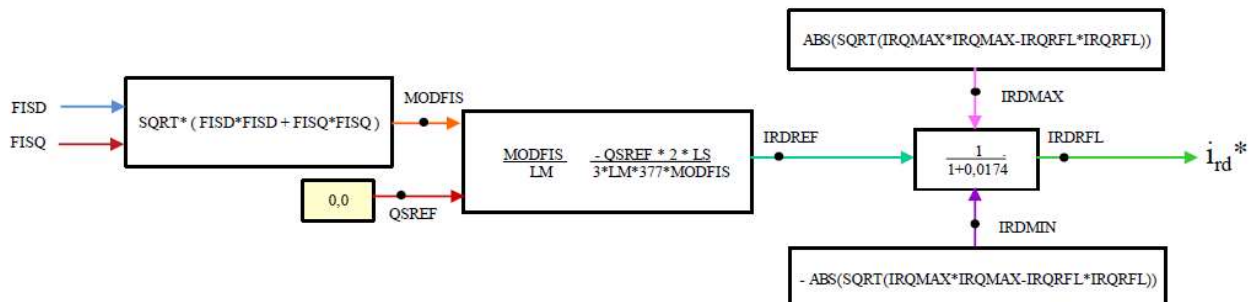


Figura 5 – Diagrama de controle para determinação de i_{rd}^* .

2.3.2 Conversor do Lado do Gerador.

Ao conversor do lado da rede (CLR), são atribuídas as seguintes funções: controlar a potência ativa que flui entre a rede e o conversor do lado da rede, de modo a controlar a tensão do barramento CC, e controlar a potência reativa injetada na rede pelo CLR. Vale salientar que o controle da tensão do barramento CC faz com que a potência ativa entregue pelo rotor da máquina ao CLM seja injetada na rede, pois se não fosse, a tensão do barramento CC tenderia a subir.

A estratégia de controle adotada, considera as tensões de entrada do controle em referencial dq orientado pelo vetor tensão da rede. Esta premissa faz com que a componente de tensão de eixo em quadratura v_{fq} seja nula. O controle da potência ativa, que flui entre o CLR e a rede elétrica, é realizado através do controle da corrente i_{rd} . O controle da potência reativa injetada na rede pelo CLR pode ser realizado através do controle da corrente i_{rq} . O diagrama de controle do conversor CLR é apresentado na Figura 6.

A partir das tensões $VDIREF$ (v_d^*) e $VQIREF$ (v_q^*) são calculadas as tensões de referência em a,b,c utilizadas na técnica de PWM. Foi utilizada a técnica de PWM Regular Trifásico Simétrico proposto por Seixas (4). Esta técnica baseia-se no uso de equações algébricas simples para a determinação das razões cíclicas das chaves de cada braço. Este trabalho considera a utilização de conversores trifásicos com três braços. Em cada braço é considerado um par de chaves ideais em paralelo com uma resistência bastante elevada, a fim de representar o conjunto transistor de potência - diodo em anti-paralelo, componentes característicos deste tipo de equipamento (5).

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Ressalta-se que na modelagem onde os conversores são considerados fontes de tensão ideais, o conversor do lado da rede (CLR) não foi modelado. Foram representadas apenas as correntes que fluem entre os conversores, sendo elas injetadas na rede elétrica através de fontes de corrente controladas por TACS. A Figura 7 apresenta o esquema de controle das correntes injetadas na rede oriundas do conversor do lado da rede.

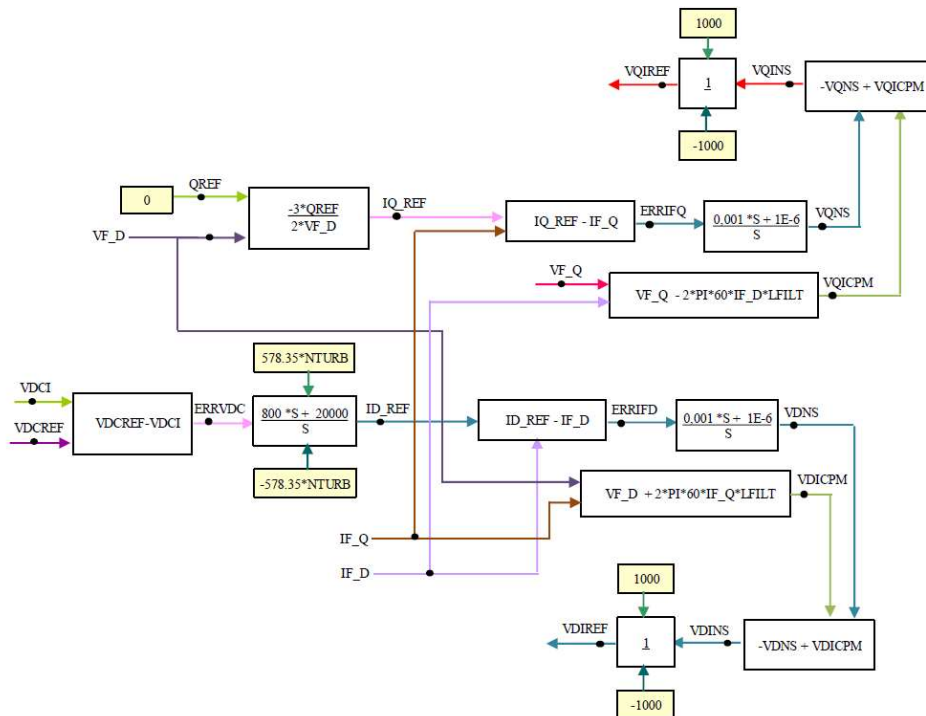


Figura 6 – Diagrama de controle do conversor CLR.

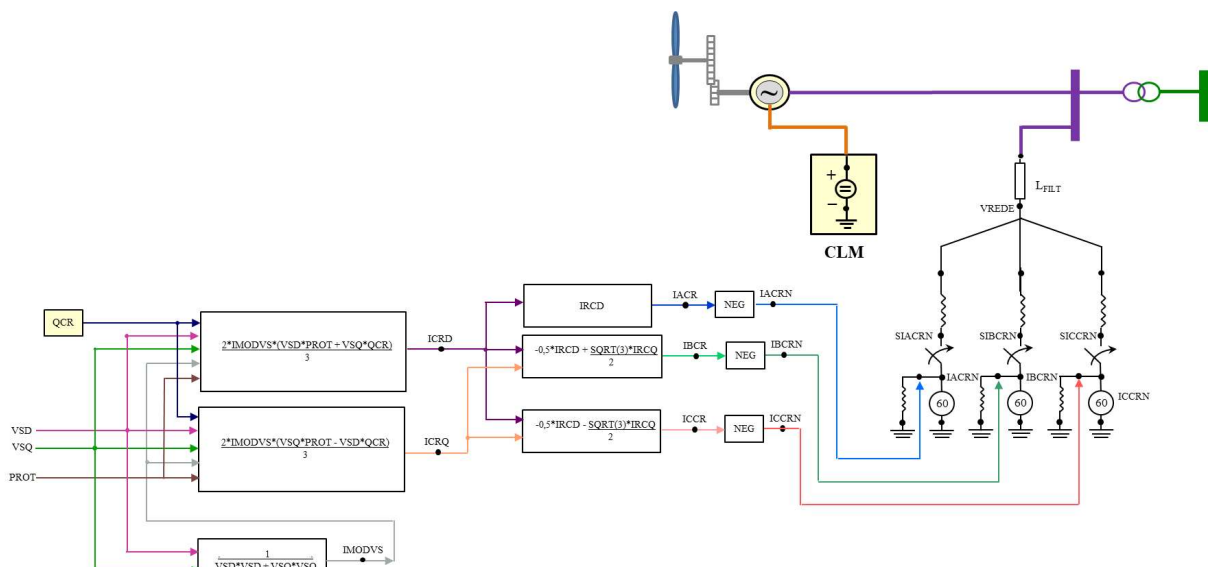


Figura 7 – Esquema de controle das correntes injetadas na rede através do CLR considerando os conversores modelados como fontes de tensão.

3.0 - SISTEMA DE TRANSMISSÃO

A Figura 8 apresenta a configuração do sistema de transmissão no qual irá se conectar o parque eólico TLC. O complexo eólico TLC, com capacidade total instalada de 61,2MW, é composto de 3 parques eólicos: TLC I (20,4MW), TLC II (20,4MW) e TLC III (20,4MW). Cada parque é formado por 24 turbinas eólicas de 0,85MW cada. A conexão deste complexo eólico ao sistema elétrico se dá através de duas linhas de transmissão em 69kV de 11,7km de extensão. Na SE TLC são previstos 3 transformadores 69/13,8kV de 20/33MVA cada, conectados em estrela-aterrada/delta (YNd1). Já os transformadores elevadores dos aerogeradores, 0,6/13,8kV de 0,9MVA cada, são conectados em delta/estrela-aterrada (Dyn1). A representação das 72 unidades geradoras, com despacho pleno, é realizada através de uma máquina equivalente. São desconsiderados os cabos de interligação entre os aerogeradores.

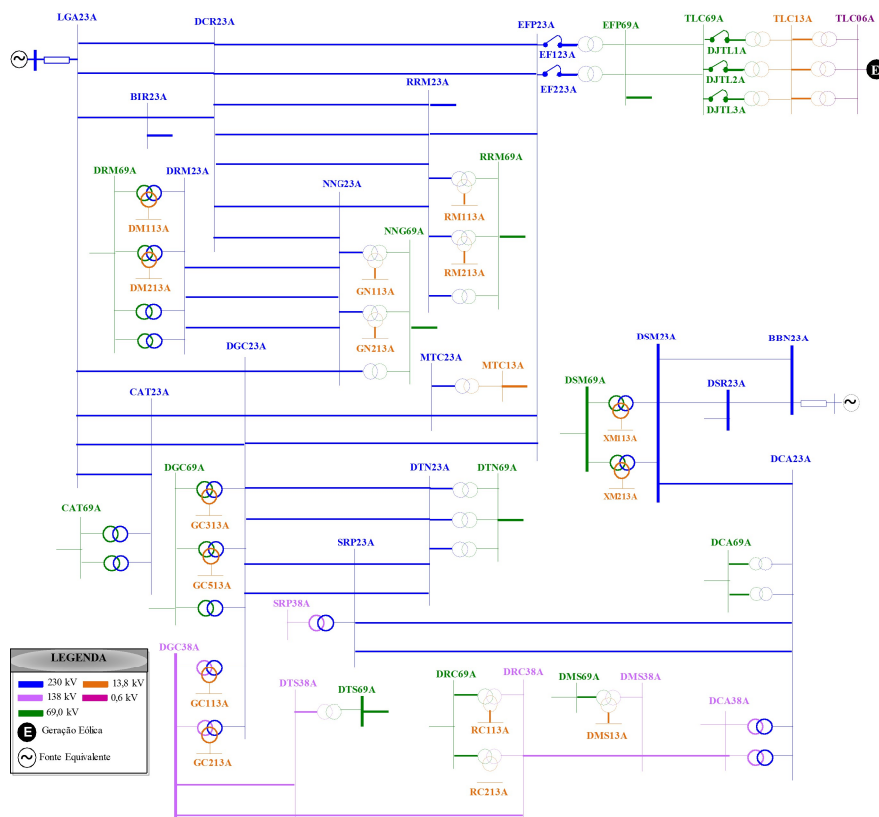


Figura 8 – Configuração do sistema de transmissão.

4.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Análises realizadas nos estudos para a entrada em operação de um novo parque eólico são abordadas neste item. São comparados os resultados diferenciando a modelagem dos conversores. As grandezas apresentadas nas figuras a seguir que possuem o título **CV** correspondem aos resultados obtidos considerando a modelagem física dos conversores. As grandezas que possuem o título **FT** referem-se aos resultados obtidos considerando a modelagem dos conversores como fonte de tensão ideal.

Observou-se que a relação entre a potência instalada da CGE (61,2MW) e a potência de curto-circuito trifásico no barramento 69kV da SE EFP (1716MVA) é de 3,6%. Este valor é considerado muito favorável e reduzido e representa pois, um indicativo de reduzidos impactos no sistema em termos de flutuações de tensão.

Neste trabalho são simuladas as seguintes manobras:

Configuração A - Energização do transformador TR02 230/69kV 100MVA da SE EFP em vazio pelo lado de 230kV, estando o transformador remanescente desta SE em carga com todos os parques eólicos em operação com com geração máxima;

Configuração B - Curto-circuito monofásico no alimentador de 69kV da SE EFP em $t = t_0$, seguido da eliminação do defeito 300ms após sua aplicação, com rejeição de toda a carga da SE EFP 69kV.

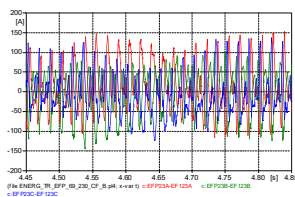
Para a simulação dos casos citados acima foram consideradas simulações determinísticas cujo intervalo de integração é de 5 μ s.

4.1 Configuração A

Nesta configuração é analisada a energização do transformador TR02 230/69kV 100MVA da SE EFP em vazio pelo lado de 230kV, estando o transformador remanescente desta SE em carga. Este tipo de situação ocorre, por exemplo, quando o transformador precisa ser desligado para manutenção. São observados os impactos causados pela CGE durante a ocorrência do transitório nas instalações conectadas ao empreendimento. Foi considerado o fechamento do disjuntor do transformador a ser energizado como uma chave com o tempo de fechamento de cada pólo como uma variável aleatória de distribuição gaussiana. O tempo de fechamento da chave 1 (t_{chv1}) ocorre após 4,5s.

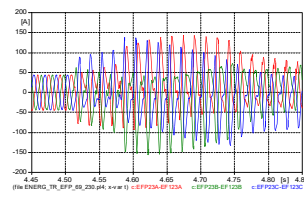
Corrente de Fase (Lado 230kV) do TR1 da SE EFP

CV



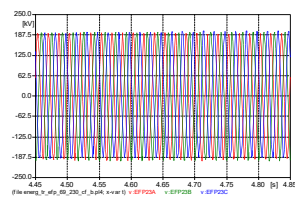
Corrente de Fase (Lado 230kV) do TR1 da SE EFP

FT



Tensão Fase-terra da barra de 230kV da SE EFP

CV



Tensão Fase-terra da barra de 230kV da SE EFP

FT

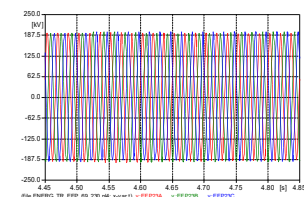


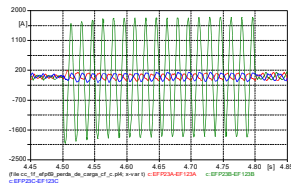
Figura 9 – Formas de onda obtidas na energização do transformador TR02 230/69kV 100MVA da SE EFP.

Observa-se que as tensões dos barramentos da Rede Básica não sofrem oscilações significativas. Ainda em relação às formas de onda das tensões não são observadas diferenças relevantes entre os resultados considerando os dois tipos de modelagem dos conversores. São observadas injeção de correntes harmônicas, resultando na distorção das formas de onda das correntes, sendo observada uma discreta diferença entre os resultados obtidos.

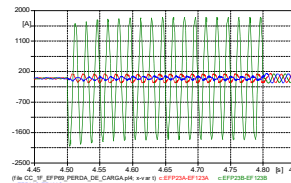
4.2 Configuração B

Neste item é analisada a ocorrência de curto-circuito monofásico no alimentador de 69kV da SE EFP em $t = t_0$, seguido da eliminação do defeito 300ms após sua aplicação, com rejeição de toda a carga da SE EFP 69kV. A aplicação do curto-circuito monofásico, através do fechamento da chave 1 (t_{chv1}), ocorre no instante $t=3.5s$. A eliminação do curto-circuito ocorre 300ms após a aplicação do mesmo ($t_{chv2}=3;8s$), resultando na rejeição de toda carga conectada no barramento EFP 69kV.

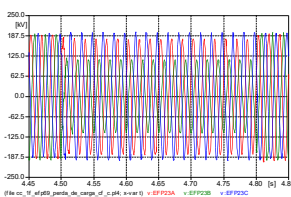
Corrente de Fase (Lado 230kV) do TR1 da SE EFP
CV



Corrente de Fase (Lado 230kV) do TR1 da SE EFP
FT



Tensão Fase-terra da barra de 230kV da SE EFP
CV



Tensão Fase-terra da barra de 230kV da SE EFP
FT

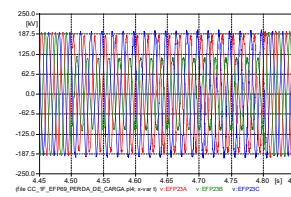


Figura 10 – Formas de onda obtidas durante a ocorrência de curto-circuito monofásico no alimentador de 69kV da SE EFP, com rejeição de toda a carga da SE EFP 69kV.

Observa-se, característica deste tipo de transitório, afundamentos de tensões nos barramentos da Rede Básica. Não são observadas diferenças relevantes entre os resultados considerando os dois tipos de modelagem dos conversores em relação às formas de onda das tensões. Observa-se ainda que as oscilações nas potências de estator e de rotor possuem a mesma característica nas duas modelagens analisadas.

5.0 - CONCLUSÃO

O desenvolvimento do modelo da máquina de indução duplamente alimentada para o programa ATP permite a realização de estudos envolvendo transitórios eletromagnéticos. A realização de tais estudos faz-se necessária devido ao elevado número de Centrais de Geração Eólica a serem conectadas no sistema elétrico brasileiro.

De forma a representar fielmente uma máquina de indução duplamente alimentada, foram consideradas a modelagem da máquina de indução duplamente alimentada, a modelagem aerodinâmica da turbina eólica, a modelagem do sistema de transmissão mecânica e a modelagem dos conversores do lado da rede e do lado da máquina. Buscando minimizar o tempo de simulação, também foi desenvolvida a modelagem dos conversores como fontes de tensão ideais. Tal modelagem representou uma redução de 35% do tempo de simulação quando comparado à modelagem dos conversores baseada na configuração física dos mesmos.

Os resultados obtidos nas análises realizadas, permite afirmar que do ponto de vista dos equipamentos da Rede Básica, não há divergências entre os resultados obtidos considerando a modelagem dos conversores como fonte de tensão ou através da representação física. Como a tendência é a realização de estudos cada vez mais



complexos, considerando a representação de diversos tipos de aerogeradores em um mesmo estudo, o tempo de simulação torna-se um fator de extrema relevância. Sendo assim, torna-se bastante razoável considerar uma modelagem mais simplificada para os aerogeradores tipo GIDA, como proposto neste trabalho, quando as análises visam observar os impactos dos aerogeradores sobre os equipamentos pertencentes à Rede Básica.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) C. L. Tavares, "Modelagem de Aerogeradores de Indução de Dupla Alimentação para Estudos de Transitório Eletromagnético", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2013.
- (2) T. Lipo and D. Novotny, "Vector Control and Dynamics of AC Drives."
- (3) A.C.S.L.Guimarães, F.A.S.Neves, M. Jr., M. Cavalcanti, and D. Lins, "Doubly Fed Induction Generators Active and Reactive Power Control," 11th International Power Electronics and Motion Control Conference - EPE/PEMC, vol. 1, pp. 1–6, 2004.
- (4) P. Seixas, "Comannde Numérique d'une Machine Sincrone Autopilotée," Ph.D. dissertation, Institut National Polytechnique - Toulouse, 1988.
- (5) F. Bradaschia, "Conversores Fonte Z para Sistemas Fotovoltaicos e Monofásicos-Trifásicos," Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, 2012.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Carmem Lúcia Tavares, nascida em 02/03/1984 na cidade de Toritama-PE, Graduada em engenharia elétrica modalidade Eletrotécnica em 2006 pela Universidade de Pernambuco, Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco. Atua na área de estudos elétricos da ANDESA desde 2007.



Dêibson J. G. de Sena, nascido em 24/03/1981 na cidade do Cabo de Santo Agostinho-PE, Graduado em engenharia elétrica modalidade Eletrotécnica em 2007 pela Universidade de Pernambuco, Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco. Atua na área de estudos elétricos da ANDESA desde 2008 e Professor do Centro Universitário – WYDEN UNIFBV desde 2018.