



Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC

Impactos Negativos das Fontes Conectadas Via Inversores em Relés de Proteção

**GLAUCO N. TARANTO JOSÉ MAURO T. MARINHO TATIANA M. L. ASSIS ROBERTO C. DE CARVALHO
COPPE/UFRJ**

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise baseada em simulação computacional do impacto das fontes conectadas à rede via inversores, particularmente aquelas exclusivamente conectadas, como a fonte solar fotovoltaica e a fonte eólica do Tipo IV (do inglês *full converter*).

O artigo mostra que relés de proteção cuja função direcional é baseada nas grandezas de sequência negativa, tem seu desempenho degradado ou até mesmo errôneo, em situações onde o circuito da sequência negativa tem uma elevada impedância do lado da fonte. O artigo sugere que a injeção de correntes assimétricas pelos inversores durante curto-circuito pode resolver o referido problema.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção, Função Direcional, Fontes Conectadas Via Inversores, Simulação da Proteção.

1.0 - INTRODUÇÃO

A adição de fontes geradoras conectadas via inversores (FGCVI) aos sistemas de energia elétrica (SEE), como é o caso da geração eólica e solar fotovoltaica, está apresentando desafios cada vez maiores à maneira como os relés de proteção são aplicados. SEE em todo o mundo estão passando por uma mudança significativa na matriz de geração, de máquinas síncronas rotativas para tecnologias baseadas em inversores. Práticas operativas convencionais devem ser adaptadas aos benefícios e desafios trazidos por esta nova tecnologia. Uma questão que é cada vez mais aparente com o aumento da penetração das FGCVI, é a redução das correntes de curto-circuito dos sistemas [1-3].

As máquinas síncronas são capazes de fornecer uma quantidade significativa de corrente durante condições de curto-circuito. Muitos sistemas de proteção da transmissão são projetados com este conceito em mente, e, portanto, dependem dessa corrente elevada para diferenciar as condições de defeito das condições normais de operação. Por outro lado, recursos baseados em inversores eletrônicos não fornecem esta corrente de curto-circuito elevada, uma vez que seus rápidos controles limitam a corrente injetada. As correntes de curto-circuito das FGCVI podem variar de zero (quando o inversor é bloqueado para defeitos próximos ou em seus terminais) até a capacidade térmica dos elementos semicondutores, normalmente um pequeno percentual acima da corrente nominal.

Ao contrário das máquinas síncronas, onde a impedância de sequência negativa é inerentemente baixa, a FGCVI é tipicamente programada para produzir grandezas de sequência positiva e suprimir as grandezas de sequência negativa, tornando-se, portanto, um circuito de alta impedância para a corrente de sequência negativa. Percebe-se então, que relés de proteção que utilizam grandezas de sequência negativa para detecção e determinação do defeito requerida pela função direcional [4], podem ser dessensibilizados ou até mesmo serem levados a operar

erroneamente [5]. No entanto, a impedância de sequência negativa da FGCVI pode ser alterada, uma vez que os inversores podem ser programados para injetar na rede correntes assimétricas, criando assim um caminho de impedância finita para a corrente de sequência negativa.

Em um sistema de transmissão com fontes convencionais (máquinas síncronas), as impedâncias de sequência negativa são indutivas e, portanto, as correntes de sequência negativa estão avançadas em relação a tensão de sequência negativa, que em alguns relés digitais multifuncionais é usada como elemento de polarização da função direcional em defeitos desequilibrados. No caso da FGCVI esta relação entre a corrente e tensão de sequência negativa pode ser capacitiva, resistiva, indutiva ou simplesmente não existir, uma vez que é definida pela filosofia do controle do inversor dada pelo fabricante.

O trabalho apresenta, via simulação computacional, um estudo de sensibilidade da injeção de correntes assimétricas produzidas por uma FGCVI, para avaliar o impacto nos relés digitais que utilizam as grandezas de sequência negativa como função direcional de curtos desequilibrados. A análise de sensibilidade é feita em um sistema teste tutorial através de uma análise estática simplificada. Para confirmar os estudos realizados na análise estática, é apresentado um modelo genérico dinâmico e trifásico com representação fasorial na frequência fundamental para a FGCVI. A análise dinâmica é feita em uma parte do sistema interligado nacional (SIN) dominado por linhas de 230 kV. Neste sistema é feita uma comparação de um caso onde todos os geradores são máquinas síncronas convencionais, com um outro caso onde parte dos geradores síncronos são substituídos por FGCVI.

O artigo é organizado da seguinte maneira: a Seção 2.0 mostra uma base teórica resumida e uma análise de sensibilidade em um sistema tutorial; a Seção 3.0 apresenta o modelo dinâmico trifásico da FGCVI utilizado; a Seção 4.0 mostra os resultados em um sistema equivalentado extraído do SIN e a Seção 5.0 apresenta as conclusões do artigo.

2.0 - CONCEITOS BÁSICOS E ANÁLISE ESTÁTICA

2.1 Conceitos Básicos

Os relés direcionais de corrente de fase e de terra são de longa data amplamente utilizados nos esquemas de proteção dos sistemas elétricos de potência, seja na configuração básica como proteção de sobrecorrente (funções ANSI 67 e 67N) ou como parte da proteção de distância (função ANSI 21) [6]. Na sua versão clássica os relés direcionais de fase (função ANSI 67) empregavam majoritariamente correntes e tensões de fase (as tensões de polarização geralmente ligadas em quadratura) e os relés direcionais de terra (função ANSI 67N) empregavam correntes e tensões de sequência zero [6] e [7].

Com o desenvolvimento dos relés numéricos, ampliou-se a possibilidade de utilizar a proteção direcional baseada em sequência negativa para defeitos desequilibrados [8] e [9]. A utilização de tensões e correntes de sequência negativa apresenta diversas vantagens, tais como [4] e [8]:

- Possibilita cobertura mais flexível para diversos tipos de faltas, uma vez que as componentes de sequência negativa estão presentes nos defeitos fase-fase, fase-terra e fase-fase-terra.
- As componentes de sequência negativa não são influenciadas pelo fenômeno da indução de sequência zero por corrente de falta fase-terra em linhas de transmissão.
- As tensões de sequência negativa apresentam valores maiores do que as tensões de sequência zero nas barras com fontes fortes de sequência zero, como por exemplo grandes transformadores com neutro solidamente aterrado.
- As correntes esperadas de carga de sequência negativa são reduzidas, possibilitando usar ajustes mais sensíveis nas proteções de sobrecorrente para defeitos fase-fase.
- Podem ser usadas como proteção de retaguarda para defeitos fase-terra no lado secundário de transformadores com ligação delta-estrela.

A contribuição para curto-circuito das FGCVI, como por exemplo, as usinas eólicas Tipo III-DFIG e Tipo IV-*Full Converter* e as usinas fotovoltaicas, depende do modo de controle do inversor e não da impedância à jusante, como nas fontes convencionais com máquinas síncronas [1].

Os inversores normalmente funcionam em modo de controle de corrente (fonte de tensão com corrente controlada) e consideram a injeção de correntes equilibradas na rede (apenas sequência positiva). As fontes com inversores de grande porte geralmente empregam transformadores de acoplamento com ligação delta (lado da fonte) – estrela aterrada (lado da rede), o que prevê contribuição de sequência zero no lado do sistema externo. Esta característica das FGCVI influencia na resposta dos relés direcionais que utilizam correntes e tensões de sequência negativa e/ou sequência zero no seu funcionamento.

Com o intuito de explorar os conceitos básicos envolvidos num caso tutorial, a Figura 1 mostra os componentes de sequência positiva, negativa e zero que circularão para um curto-circuito monofásico (a uma distância (m) conforme indicado na figura) em um sistema com presença de fontes convencionais (lado direito da figura), suprido majoritariamente por máquinas síncronas, e de FGCVI (lado esquerdo da figura).

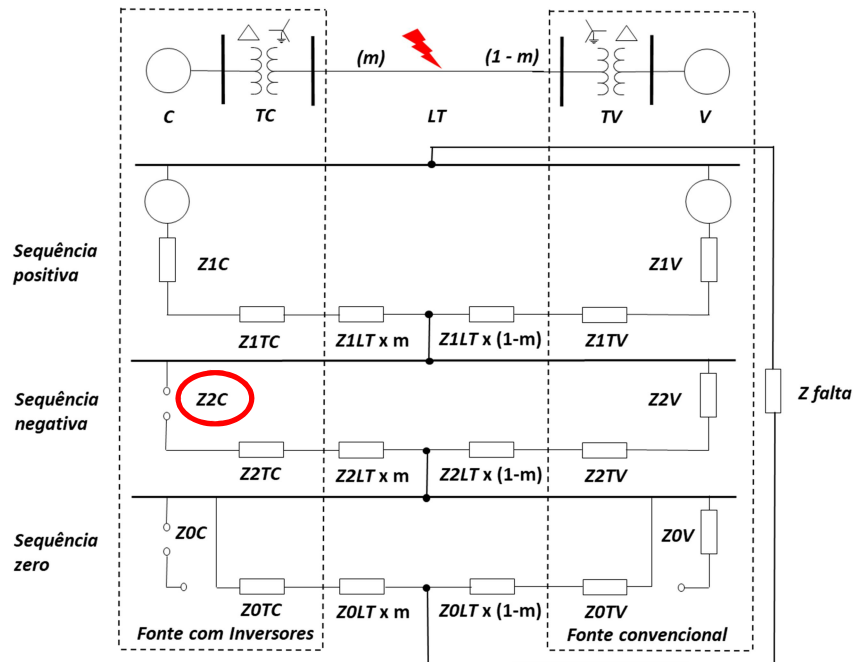


FIGURA 1 – Curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão interligando um sistema com fontes geradoras conectadas à rede via inversores (FGCVI) e um sistema convencional com máquinas síncronas

Analisando a Figura 1 constatamos que do lado da fonte com inversores temos circuito aberto de seqüência negativa (impedância $Z2C$ infinita) e de seqüência zero (impedância $Z0C$ infinita). Em consequência, não haverá contribuição de seqüência negativa para o defeito deste lado, mas haverá contribuição de seqüência zero por causa da ligação do transformador elevador. Do lado da fonte convencional há caminho para circulação de correntes de seqüência negativa e de seqüência zero. Em consequência haverá contribuição de seqüência negativa (impedância $Z2V$ finita) e de seqüência zero deste lado.

2.2 Análise Estática Tutorial

Para avaliação dos efeitos potenciais da presença de FGCVI nas proteções direcionais empregadas em linhas de transmissão foi montado e simulado no programa PTW-Power*Tools um sistema de teste baseado no caso relatado em [5]. A Figura 2 mostra o sistema de teste utilizado.

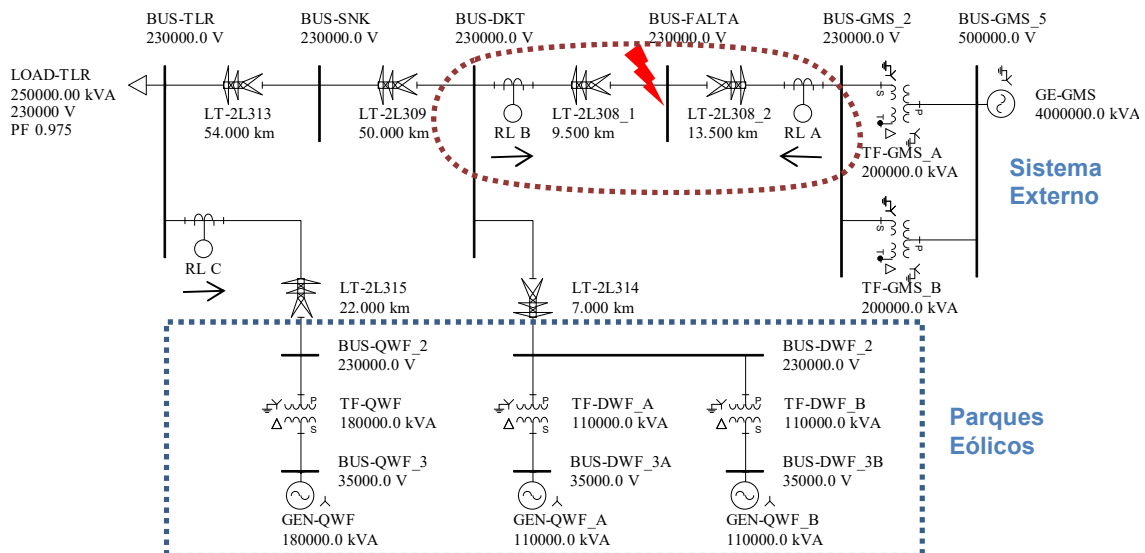


FIGURA 2 – Sistema simplificado de teste para avaliação das componentes de seqüência vistas pelos relés direcionais de corrente empregados nas linhas de transmissão

O sistema de teste consiste de três parques eólicos de grande porte conectados por meio de uma linha de transmissão a uma subestação de interligação com sistema externo convencional. Foi simulada a aplicação de uma falta fase-terra no trecho da linha de transmissão entre as usinas e a subestação de interligação (barra fictícia BUS-FALTA). Foram avaliadas as componentes de seqüência vistas pelos relés direcionais instalados nos terminais da

linha de transmissão em falta e do relé da linha de interligação de um dos parques eólicos.

Para reproduzir de forma aproximada a característica da contribuição para curto-circuito das usinas eólicas, estas fontes foram modeladas com circuito aberto de sequência negativa e de sequência zero (impedâncias de valor muito elevado). A Figura 3 mostra os valores (magnitude e ângulo) das correntes de fase e de sequência obtidas nos diversos trechos do sistema.

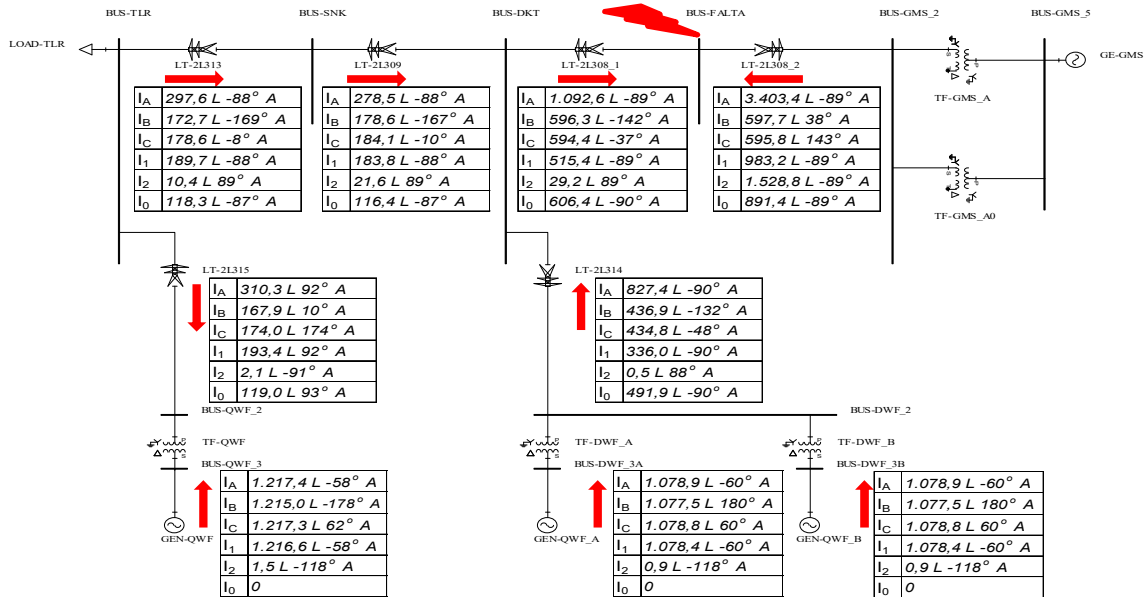


FIGURA 3 – Correntes de fase e de sequência circulantes no sistema de teste para curto-circuito fase-terra na linha de transmissão entre as usinas eólicas e o sistema convencional

A Figura 4 mostra os valores das correntes e tensões de sequência positiva, negativa e zero vistas por alguns relés direcionais ilustrativos considerados no sistema.

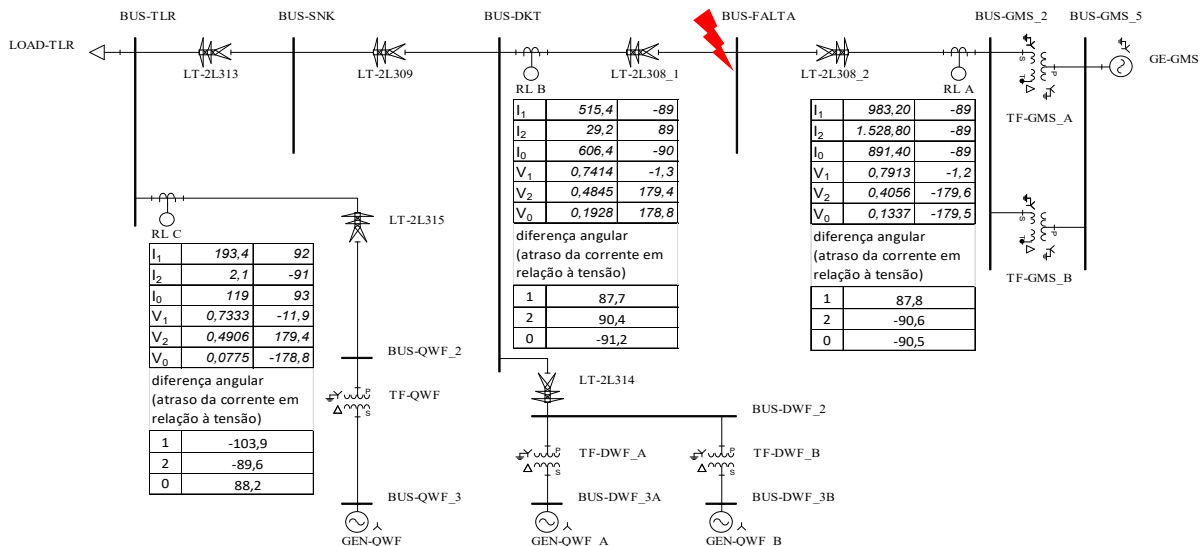


FIGURA 4 – Correntes e tensões de sequência vistas pelos relés direcionais para curto-circuito fase-terra na linha de transmissão entre as usinas eólicas e o sistema convencional

Da análise das Figuras 3 e 4 constamos que foi confirmado que a resposta de sequência negativa das fontes com conversores eletrônicos é diferente das fontes convencionais. A contribuição de corrente de sequência negativa e zero nas usinas eólicas é praticamente inexistente. A contribuição de corrente de sequência negativa destas usinas eólicas do lado da linha continua muito reduzida, mas a contribuição de corrente de sequência zero é significativa, por causa da presença dos transformadores elevadores ligados em delta-estrela.

Em um sistema de transmissão convencional, com suprimento por máquinas síncronas, as impedâncias são

fortemente indutivas. Por consequência, analisando as componentes de sequência para um defeito fase-terra, as correntes de sequência positiva resultam atrasadas das tensões de sequência positiva, enquanto as correntes de sequência negativa e zero resultam adiantadas das correntes de sequência negativa e zero [10]. Analisando a Figura 4 observamos que as correntes de sequência negativa se atrasam em relação às tensões de sequência negativa nos relés direcionais do lado das usinas eólicas, enquanto do lado convencional elas se adiantam. As correntes de sequência zero se adiantam em relação às tensões de sequência zero nos relés direcionais do lado das usinas eólicas, da mesma forma que do lado convencional.

Constatamos destes resultados que os relés de sequência negativa não seriam portanto adequados para proteção deste tipo de evento pelo lado das usinas eólicas. Da mesma forma, não seriam adequados para defeitos entre fases envolvendo a terra. Os relés de sequência zero, face à presença dos transformadores elevadores das usinas eólicas, seriam mais adequados para esta proteção, mas os valores das tensões de polarização durante a falta, especialmente onde próximo de um transformador com neutro solidamente aterrado, eventualmente podem ser muito reduzidos.

3.0 - MODELO TRIFÁSICO DA FGCVI

O modelo adotado para a FGCVI é uma extensão para a representação trifásica do modelo dinâmico de geração fotovoltaica do Western Electricity Coordinating Council (WECC) [11], que é o órgão responsável pela regulação do setor elétrico na Costa Oeste dos Estados Unidos. Dois tipos de modelo são apresentados pelo WECC: para sistemas distribuídos de pequeno ou médio porte, tipicamente conectados em nível de distribuição, e para sistemas concentrados de grande porte, adotado neste trabalho, tipicamente conectados em nível de transmissão. Cabe ressaltar que outra publicação do WECC é um guia para modelagem de sistemas de geração eólica [12], onde no caso acoplamento via conversor de frequência (sistemas tipo IV), os modelos indicados são idênticos ou muito similares aos apresentados para os sistemas fotovoltaicos.

Os modelos WECC são voltados para simulação de problemas na rede elétrica, não se preocupando com os fenômenos de dinâmica muito rápida internos ao conversor, tais como o controle da tensão do link de corrente contínua, e o MPPT (maximum power-point tracking) dos painéis fotovoltaicos. É assumido que estes controles são rápidos o suficiente e resolvidos para uma condição de equilíbrio a cada passo de integração na simulação da rede elétrica em representação fasorial, que neste caso pode atingir valores de 1 a 10ms. Uma consequência direta das simplificações adotadas nesta abordagem é que os conversores tipo fonte de tensão (VSC) são modelados como uma fonte de corrente controlada, e não se faz necessária a representação da impedância do filtro de acoplamento ou mesmo dos circuitos de controle de sincronismo (PLL) do conversor.

A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos macro do modelo dinâmico trifásico para a FGCVI. Uma fonte controlada, representada pelo conjunto de submodelos em cascata REGC_A, REEC_B e REPC_A, injeta na barra terminal uma corrente de sequência positiva I^+ , convertida para componentes de fase I^{abc} pelo bloco $sq2ph$. Esta injeção controlada é complementada por uma parcela de injeção não controlada, proveniente do ramo shunt de um equivalente Norton com admitâncias $[Y^0 \ Y^+ \ Y^-]$.

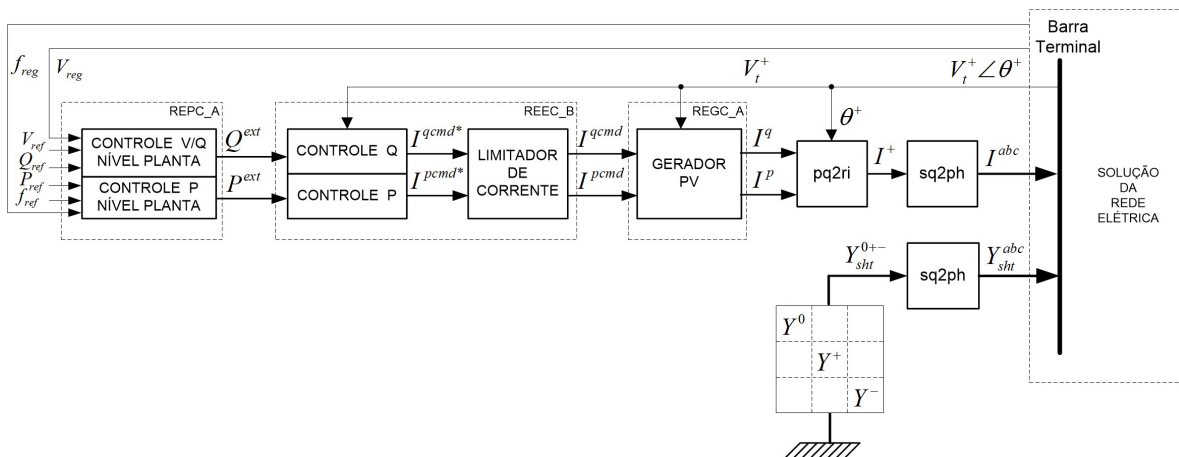


FIGURA 5 – Diagrama de Blocos do Modelo Trifásico para o Gerador PV Concentrado

Idealmente, Y^+ é nulo porque na sequência positiva o comportamento da FGCVI é o de uma fonte de corrente ideal, com regulação a nível de barra terminal ou remota e impedância interna infinita. Na sequência zero, Y^0 também é nulo porque usualmente os inversores são de construção em ponte trifásica de três pernas, sem caminho para correntes de sequência zero. Ressalta-se que transformadores de acoplamento com conexão DYg são modelados em separado da FGCVI neste trabalho. No caso da sequência negativa, o valor de Y^- traduz a filosofia de controle do fabricante, podendo assumir um valor nulo (injeção puramente simétrica), ou não-nulo e de valor compatível com a capacidade de corrente assimétrica do conversor, objeto de análise deste trabalho.

4.0 - ESTUDO DE CASO

Nesta seção são apresentados resultados de simulações realizadas em um sistema equivalente reduzido que modela parte do sistema elétrico do Mato Grosso do Sul, majoritariamente em 230 kV. A Figura 6 mostra o diagrama unifilar do sistema estudado. Para elaboração do sistema equivalente foi utilizado como referência o arquivo da base de dados mensal do ONS relativo ao patamar de carga pesada de outubro de 2016, disponível em [13].

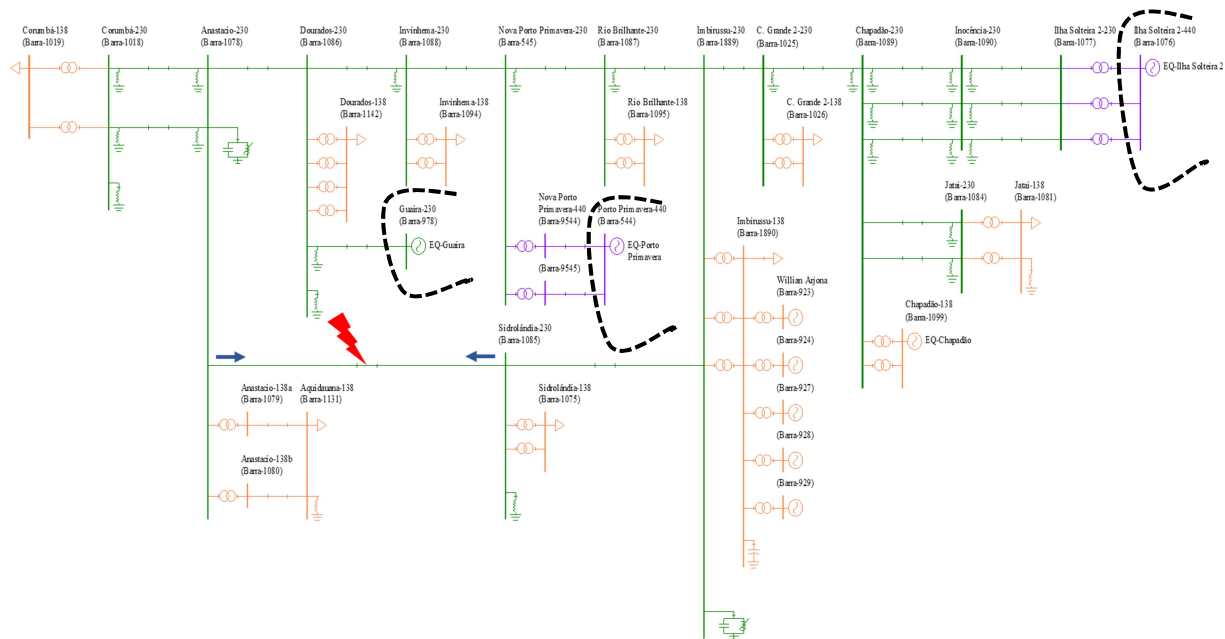


FIGURA 6 – Sistema equivalente reduzido do Mato Grosso do Sul

As barras de fronteira do sistema reduzido com o SIN são representadas por equivalentes dinâmicos de inércia elevada e correspondem à Barra de 230 kV da SE Guaíra e às Barras de 440 kV das SEs Ilha Solteira 2 e Porto Primavera, conforme destacadas na Fig.6. O valor da geração de cada equivalente foi obtido através do somatório dos fluxos em linhas de transmissão e transformadores localizados entre as barras de fronteira e as barras fora da área de estudo. Além disso, os sistemas de 138 kV da região analisada foram representados por cargas nas respectivas subestações da Rede de Operação. O ponto de operação calculado com o sistema reduzido foi validado com o ponto de operação obtido com a base de dados original completa, sendo as diferenças encontradas inferiores a 1% no módulo das tensões nas barras. Para a representação dos equivalentes dinâmicos das barras de fronteira foi utilizada a modelagem clássica de máquinas síncronas, onde as reatâncias transitórias de eixo direto foram determinadas com base na potência de curto-circuito de cada barra, calculadas a partir da base de dados de estudos de curto-circuito do ONS. A UTE William Arjona, conectada à subestação de Imbirussu 138 kV, foi representada em detalhes, seguindo a modelagem disponível na base de dados dinâmicos do ONS.

4.1. Modelagem Trifásica do Sistema Estudado

O sistema equivalente foi elaborado com base no banco de dados do ONS, que utiliza a representação equilibrada da rede, com parâmetros de sequência positiva. Entretanto, para análise da proteção baseada em medidas de sequência negativa, é mandatória a representação trifásica do sistema. Assim, o sistema teste desenvolvido foi transformado em um equivalente trifásico, sendo adotados os seguintes procedimentos:

- Representação trifásica dos transformadores, levando em consideração o tipo de ligação e os enrolamentos terciários indicados na base de dados de estudos de curto-circuito do ONS;
- Utilização de valores de impedâncias de sequência zero dos transformadores iguais aos de sequência positiva;
- Utilização de valores de impedâncias de sequência negativa dos geradores das barras de fronteira iguais aos de sequência positiva;
- Obtenção das impedâncias de sequência zero das linhas de transmissão a partir da base de dados de estudos de curto-circuito do ONS.

4.2. Resultados

O estudo desenvolvido considera um defeito monofásico na fase “c” da LT 230 kV Anástácio – Sidrolândia, conforme indicado na Fig.6. O objetivo é ilustrar o impacto da inserção das FGCVI na proteção direcional baseada em grandezas de sequência negativa. Assim, são avaliadas as grandezas medidas no terminal Sidrolândia da linha estudada (Barra #1085), considerando o sentido da corrente para dentro da LT protegida. O defeito é simulado no meio da linha, conforme ilustrado na Fig. 6. Todas as simulações foram realizadas com o programa Simulight [14],

desenvolvido pela COPPE/UFRJ.

As seções seguintes apresentam os resultados das simulações considerando dois cenários distintos, a saber:

- Caso Base: considera o sistema equivalente ilustrado na Figura 6;
- Caso Eólica: considera o sistema equivalente ilustrado na Figura 6, sendo a UTE Willian Arjona substituída por uma fazenda eólica de mesma potência.

De forma a permitir uma interpretação mais clara dos resultados, tanto no “Caso Base”, quanto no “Caso Eólica”, as reatâncias de sequência positiva, negativa e zero dos equivalentes de Porto Primavera (Barra #544) e Ilha Solteira (Barra #1046) foram modificadas para reduzir as respectivas contribuições para o defeito estudado. Assim, procurou-se dar maior foco no impacto da inserção da geração renovável nas correntes de defeito.

4.2.1. Caso Base

A Figura 7 mostra as defasagens entre os fasores de tensão e corrente de sequência negativa e zero, medidos no terminal Sidrolândia 230 kV, 50 ms após a aplicação do defeito. Como as proteções modeladas no sistema não estão habilitadas durante a simulação (modo monitoração), a escolha do instante de tempo adotado para a medição tem pouca influência na medida. Os módulos dos fasores estão fora de escala, servindo apenas para a visualização das posições angulares.

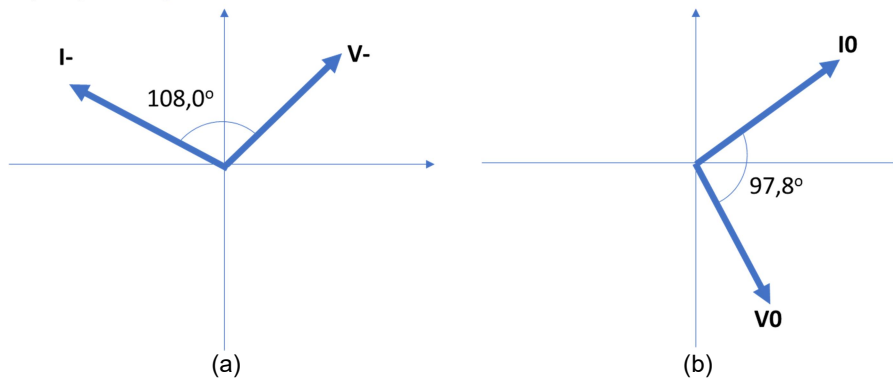


FIGURA 7 – Caso Base: Defasagem angular entre tensões e correntes medidas em Sidrolândia para um defeito monofásico na LT 230 kV Anastácio – Sidrolândia: (a) Sequência negativa; (b) Sequência zero

A Figura 7 (a) indica que, durante o defeito, a corrente de sequência negativa se adianta em relação à tensão de sequência negativa de um ângulo da ordem de 90° . Tal comportamento é esperado em redes de natureza predominantemente indutiva, como é o caso do sistema de transmissão. Vale lembrar que a corrente é medida na direção do ponto de falta. Na Figura 7 (b), comportamento semelhante é observado para a corrente de sequência zero. A posição angular relativa entre a corrente e a tensão de sequência negativa tem o comportamento esperado para um defeito monofásico. Esse comportamento é então utilizado, com sucesso, na sensibilização de relés direcionais de sequência negativa. Os módulos das correntes de curto-circuito de sequência negativa e sequência zero foram de 1,746 pu e 1,635 pu, respectivamente. Note-se que a magnitude da corrente de sequência negativa é significativa, não havendo qualquer dificuldade de detecção da falta.

4.2.2. Caso Eólica

Neste cenário, a UTE Willian Arjona é integralmente substituída por uma fazenda eólica de mesma potência equivalente. O modelo dos geradores eólicos é aquele descrito na Seção 3.0. Considera-se que os geradores eólicos não permitem a circulação de correntes desbalanceadas, de forma que as impedâncias de sequência negativa e zero do equivalente Norton do modelo trifásico são muito elevadas. A Figura 8 mostra as defasagens entre os fasores de tensão e corrente de sequência negativa e zero, medidos no terminal Sidrolândia 230 kV, 50 ms após a aplicação do defeito.

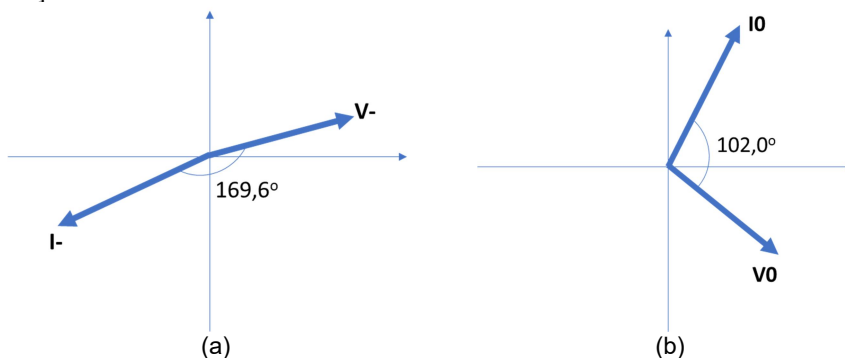


FIGURA 8 – Caso Eólica: Defasagem angular entre tensões e correntes medidas em Sidrolândia para um defeito monofásico na LT 230 kV Anastácio – Sidrolândia: (a) Sequência negativa; (b) Sequência zero

A Figura 8 (a) mostra que a corrente de sequência negativa fica praticamente em anti-fase com a tensão de sequência negativa, afastada da defasagem típica de 90° esperada. Embora o módulo da corrente de sequência negativa deste caso seja significativo (1,131 pu) devido a contribuição das máquinas equivalentes, um relé direcional de sequência negativa instalado nesse terminal da linha poderia não atuar, sendo bloqueado pela posição fasorial desfavorável da corrente de sequência negativa. É interessante notar que a corrente de sequência zero (1,164 pu) mostrada na Figura 8 (b) mantém a defasagem esperada em relação à respectiva tensão, não sendo afetada pela presença da usina eólica. Embora o controle dos inversores não produza propositalmente correntes desbalanceadas, é possível projetá-los para este fim, muito embora isso possa representar uma redução na capacidade de condução de correntes de sequência positiva. Neste caso, haverá caminho para a circulação de correntes desbalanceadas. Para ilustrar tal situação, é simulado um degrau na reatância de sequência negativa do equivalente Norton do modelo trifásico descrito na Seção 3.0. A Figura 9 (a) mostra o degrau simulado. Inicialmente, a reatância é muito elevada, impedindo a circulação de correntes de sequência negativa. Em $t = 2$ s, é forçado um valor nulo de reatância, sendo o circuito novamente aberto após 1 segundo.

A Figura 9 (b) apresenta a defasagem entre a corrente e a tensão de sequência negativa medidas no terminal Sidrolândia da linha estudada. A corrente é medida no sentido para dentro da LT. Inicialmente, o sistema é perfeitamente balanceado e não há corrente de sequência negativa. Em $t = 1$ s, é simulado um curto-circuito na fase “c” da LT. Após a aplicação do defeito, a corrente e a tensão de sequência negativa ficam defasadas de cerca de 170° . Em $t = 2$ s, a reatância de sequência negativa do gerador eólico é subitamente reduzida, permitindo a circulação de correntes desbalanceadas pelo inversor. Note-se que, para fins ilustrativo, o defeito é mantido durante toda a simulação.

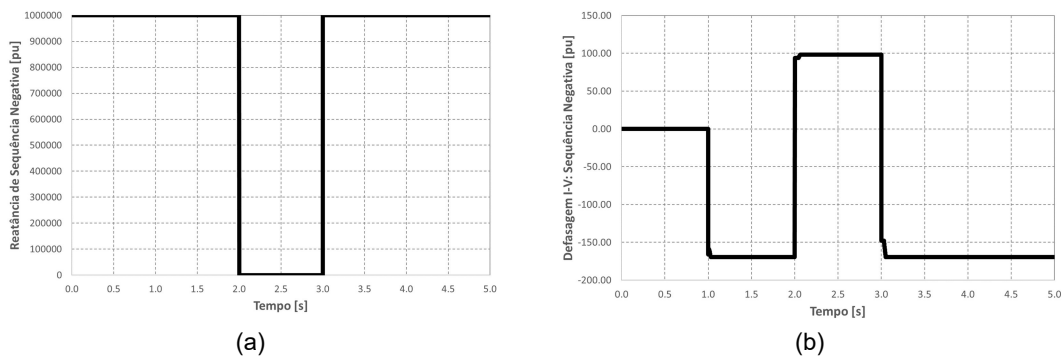


FIGURA 9 – (a) Degrau na reatância de sequência negativa do equivalente Norton do modelo do gerador eólico. (b) Defasagem correspondente entre a corrente de sequência negativa.

Com a redução da reatância de sequência negativa do gerador eólico, a corrente de sequência negativa na linha sob falta se adianta da respectiva tensão em cerca de 100° , o que corresponde a um resultado semelhante ao esperado em sistemas apenas com geração síncrona convencional. Quando o valor da reatância de sequência negativa é restaurado em $t = 3$ s, a corrente volta a ficar em anti-fase com a tensão.

A Figura 10 (a) mostra a defasagem da corrente de sequência zero em relação à respectiva tensão, indicando um valor aproximadamente constante e da ordem de 90° . Na Figura 10 (b), são apresentadas as magnitudes das correntes de sequência negativa e zero, indicando que as duas correntes apresentam valores significativos, não havendo problemas de sensibilidade em relação à detecção da presença do defeito. Quando a reatância de sequência negativa do gerador eólico é reduzida em $t = 2$ s, há um aumento significativo das correntes de sequência negativa e zero, já que a impedância equivalente de sequência negativa vista da barra em estudo é consequentemente diminuída.

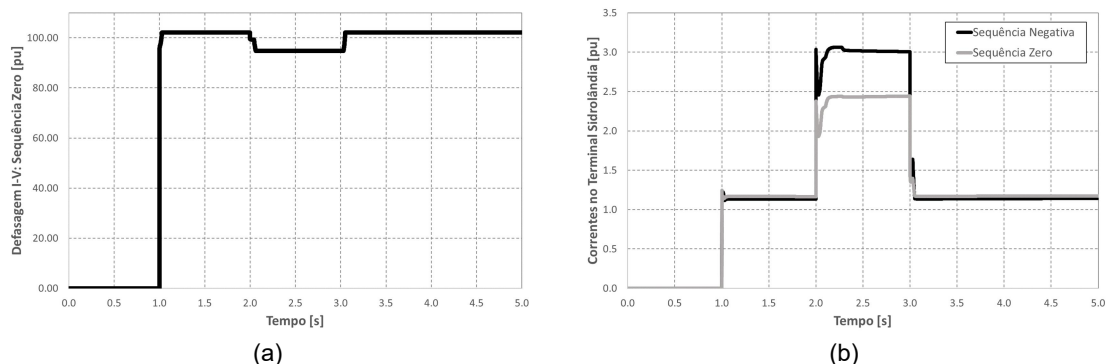


FIGURA 10 – (a) Defasagem entre a corrente e a tensão de sequência zero para um degrau na reatância de sequência negativa do gerador eólico. (b) Magnitude das correntes de sequência negativa e zero para um degrau na reatância de sequência negativa do gerador eólico.

5.0 - CONCLUSÕES

O artigo mostrou detalhadamente que as FGCVIs, quando injetando somente correntes equilibradas, são um caminho de alta impedância para a corrente de sequência negativa. Com isso, os relés que utilizam as grandezas de sequência negativa na função direcional podem ser dessensibilizados ou até mesmo operarem erroneamente. O artigo mostrou que as grandezas de sequência zero na função direcional são menos sensíveis às FGCVIs em função da ligação dos transformadores elevadores normalmente empregados (Δ -Yg), mas são efetivos somente nos curtos envolvendo a terra. Uma possível solução para manutenção das grandezas de sequência negativa na função direcional seria a injeção de correntes assimétricas pelas FGCVIs durante o curto-circuito.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE PES, Impact of Inverter Based Generation on Bulk Power System Dynamics and Short-Circuit Performance, Technical Report PES-TR68, IEEE PES Industry Technical Support Task Force & IEEE/NERC Task Force on Short-Circuit and System Performance Impact of Inverter Based Generation, 2018.
- (2) IEEE PES, "System Neutral Grounding Considerations for Inverter-Interfaced Distributed Energy Resources", Technical Report PES-TR21, December 2016.
- (3) E. Quitmann, M. Fischer, A. El-Deib & S. Engelken, "Anticipating Power System Needs in Response to the Global Energy Transition", CIGRÉ Session, Paper C2-114, Paris, 2016.
- (4) ROBERTS J.; GUZMAN A. Directional Element Design and Evaluation, 21st Annual Western Protective Relay Conference, 1994.
- (5) NAGPAL, M.; HENVILLE, C. Impact of Power-Electronic Sources on Transmission Line Ground Fault Protection. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 33, No. 1, pp. 62-70, February 2018.
- (6) MASON, C.R. The Art and Science of Protective Relaying, John Wiley & Sons, 1956.
- (7) BLACKBURN, J.L.; DOMIN, T.J. Protective Relaying – Principles and Applications, CRC Press, 2007.
- (8) FERRER, H.J.A.; SCHWEITZER III, E.O. Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010.
- (9) HORAK, J. Directional Overcurrent Relaying (67) Concepts, Georgia Tech Protective Relaying Conference, 2005.
- (10) GRAINGER, J. J., STEVENSON JR, W. D., Power System Analysis, IEEE Press, 1995.
- (11) WECC Renewable Energy Modeling Task Force, "WECC PV Power Plant Dynamic Modeling Guide", USA, April 2014.
- (12) WECC Renewable Energy Modeling Task Force, "WECC Wind Power Plant Dynamic Modeling Guide", USA, April 2014.
- (13) ONS – Operador Nacional do Sistema, disponível em www.ons.org.br
- (14) G. N. Taranto, J. M. T. Marinho, D. M. Falcão, T. M. L. Assis, *et al.*, "Simulador de Redes de Distribuição Ativas com Modelagem Monofásica/Trifásica", *Anais do XII SEPOPE*, Rio de Janeiro, RJ, Maio 2012.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Glauco Nery Taranto possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (1988), mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1991), doutorado em Engenharia Elétrica pelo Rensselaer Polytechnic Institute, EUA (1994) e pós-doutorado pelo Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, Milão (2006). Professor Titular do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. É Senior Member do IEEE e membro da CIGRÉ. Desde 2016 é Editor da revista *IEEE Transactions on Power Systems*.



José Mauro Teixeira Marinho possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1990), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1998), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2008). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente em aplicações computacionais em sistemas de potência e industriais.



Tatiana Mariano Lessa Assis possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1998), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2007). Realizou pós-doutorado no Imperial College London em 2015, junto ao Control & Power Research Group. Já trabalhou no CEPEL (1998-2001), no ONS (2001-2003) e foi professora da UFF entre 2006 e 2011. Atualmente é professora associada da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de planejamento da operação de sistemas interligados, dinâmica, proteção e controle de sistemas de potência. Atua como voluntária do IEEE desde 2010, sendo, desde 2015, editora da revista *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. É membro do CIGRÉ e Senior Member do IEEE.



Roberto Cunha de Carvalho possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1988), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2015). Trabalhou por sete anos na CERJ – Cia de Eletricidade do Estado do Rio de Janeiro e desde o início dos anos 2000 tem trabalhado com consultoria em sistemas elétricos industriais e de potência. É Senior Member do IEEE e membro da CIGRÉ.