

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE  
POTÊNCIA - GPC**

**CONTROLE DE INJEÇÃO DE CORRENTES ASSIMÉTRICAS POR FONTES CONECTADAS VIA  
CONVERSOR PARA FUNÇÃO DE DIRECIONALIDADE DE RELÉS**

**VICTOR ALVES FREITAS DE ALMEIDA(1); GLAUCO NERY TARANTO(1); JOSÉ MAURO TEIXEIRA  
MARINHO  
COPPE/UFRJ(1)**

**RESUMO**

Este artigo apresenta um modelo de controle de injeção de correntes assimétricas para fontes conectadas via conversor adequado para ferramentas de simulação dinâmica trifásica no domínio fasorial (RMS). A aplicabilidade do controlador proposto é mostrada em simulações de um sistema tutorial e um sistema equivalente de parte do Sistema Interligado Nacional. As simulações focam na operação de proteção de relés que usam grandezas de sequência negativa em elementos direcionais. O artigo também apresenta uma estratégia para limitar as correntes reativas de sequência negativa e as correntes ativa e reativa de sequência positiva.

**PALAVRAS-CHAVE**

Proteção, Função Direcional, Falta Assimétrica, Fontes Conectadas via Conversor, Controle de Correntes Assimétricas.

**1.0 INTRODUÇÃO**

O mundo, em geral, e o Brasil, em particular, estão testemunhando o rápido crescimento das fontes conectadas via conversor (FCVC), como é o caso da energia eólica e a energia solar. No Brasil, segundo informações do Plano Decenal de Energia (PDE), a energia solar deverá superar 8 GW de capacidade instalada e a eólica de 32 GW em 2030 (1), o que corresponderá a aproximadamente 20% da capacidade instalada de todas as fontes somadas. Um quinto da conversão de energia primária sendo feita via chaves eletrônicas ao invés das tradicionais máquinas síncronas cria grandes mudanças na concepção de operação elétrica dos grandes sistemas, além da questão de menor previsibilidade e maior variabilidade dessas fontes.

Dentre os vários aspectos de natureza elétrica que são impactados pela adição dessas FCVC, o presente informe técnico foca nos impactos causados nos sistemas de proteção pela ausência de fornecimento de correntes de sequência negativa FCVC Full-converter, proveniente da forma convencional de controle dos inversores (2). Os controles convencionais dos inversores proveem apenas componentes de sequência positiva, fazendo, portanto, com que essas fontes sejam um caminho de impedância aproximadamente infinita para as correntes de sequência negativa e zero. A utilização de componentes simétricas para a proteção dos sistemas de transmissão é muito útil pelo fato da sequência negativa e zero não estarem presentes na operação normal (a menos de pequenos desequilíbrios na rede). Assim, durante uma falta assimétrica, a grandeza de pick-up pode possuir valores menores que no caso da proteção por sequência positiva. Grandezas direcionais de sequência negativa e zero também podem ser utilizadas na supervisão de loops de funções de distância de fase. (3-5)

No caso das FCVC, a referência (6) apresenta o modo de controle do inversor que suprime a corrente de sequência negativa e suas consequências. A supressão da corrente de sequência negativa é o principal fator que altera o comportamento do FCVC em relação às fontes síncronas na contribuição de curto-circuito em faltas desequilibradas. Isso causa uma redução na magnitude da corrente de sequência negativa, bem como problemas na direcionalidade dos relés que utilizam sequência negativa.

As referências (7-9) destacam o impacto dos FCVCs na proteção de sistemas elétricos, especialmente em relés de sobrecorrente, distância e seus elementos direcionais de sequência negativa. Ao contrário do comportamento das máquinas síncronas para faltas assimétricas, o controle do modo FCVC de injetar apenas correntes de sequência positiva pode alterar drasticamente a relação entre a corrente e tensão de sequência negativa, possivelmente causando a falha da proteção, como já ocorreu no sistema canadense, conforme (7). Tendo em vista esse problema de proteção, os trabalhos (10-14) apresentam estratégias para injeção de corrente de sequência negativa durante

faltas assimétricas utilizando simulações EMT de sistemas de pequena escala. O presente informe técnico realiza simulações em modelagem fasorial dinâmica trifásica (TP-RMS) de sistemas de transmissão.

Atualmente, o código alemão VDE-AR-N 4130 (15) exige a injeção de correntes reativas de sequência negativa para evitar os problemas de proteção mencionados. A referência (9) também comenta o código alemão, afirmando que as injeções assimétricas devem ocorrer ao identificar as tensões de sequência negativa no terminal do conversor da FCVC.

O controle de injeção de correntes assimétricas de FCVC proposto neste trabalho é modelado no domínio fasorial trifásico da frequência fundamental para simulação de dinâmica eletromecânica (16). O modelo de simulação dinâmica TP-RMS tem algumas vantagens em comparação com a simulação dinâmica RMS de sequência positiva mais convencional (PS-RMS) e aos modelos de curto-circuito em estado estacionário, pois pode representar relés envolvidos em circuitos neutro/terra, enquanto captura a dinâmica do sistema. Além disso, podem estar presentes desequilíbrios de carga e faltas assimétricas. Apesar de ser computacionalmente mais lenta do que a simulação PS-RMS, é significativamente mais rápida do que as ferramentas de transientes eletromagnéticos (EMT).

Dada a capacidade limitada de fornecimento de corrente do conversor (em geral entre 1,1 pu a 1,3 pu), o informe técnico também apresentará uma proposta de lógica de limitação de corrente para evitar sobrecorrente nos dispositivos semicondutores.

## 2.0 - MODELO DINÂMICO TP-RMS DE UMA FONTE CONECTADA VIA CONVERSOR

O modelo dinâmico FCVC usado neste artigo é baseado nos modelos genéricos do Western Electricity Coordinating Council (WECC) apresentados em (17) e (18) para geração eólica e fotovoltaica, respectivamente. A diferença é a representação trifásica dos modelos (19-20) utilizados neste informe. O modelo utilizado nas simulações realizadas é adequado para fotovoltaicas e eólicas tipo IV (Full converter).

O presente modelo dinâmico visa analisar problemas na rede elétrica, desconsiderando os fenômenos de dinâmica muito rápida inerentes ao conversor. A Figura 1 apresenta o modelo de diagrama de blocos simplificado do modelo dinâmico trifásico baseado nos modelos WECC. Uma fonte controlada fornecida pelos módulos REPC (opcional), REEC e REGC injeta uma corrente de sequência positiva no barramento do terminal. Sem injeções de corrente de sequência negativa e zero, essas duas sequências têm uma fonte controlada de magnitude zero. O modelo trifásico pode injetar indiretamente correntes assimétricas por uma fonte de impedância shunt não controlada proveniente do equivalente de Norton.

Para a fonte de impedância shunt não controlada,  $Y_1$  é nulo devido ao comportamento da FCVC Full-converter na sequência positiva ser dado por uma fonte de corrente controlada ideal (impedância interna infinita), com regulação no terminal de nível de barramento ou remoto.  $Y_0$ , a admitância de sequência zero, é nula, pois os inversores são geralmente construídos em uma ponte de três pernas, o que aniquila o caminho para fluir corrente de sequência zero. Por fim,  $Y_2$  depende da filosofia do fabricante, que pode ou não ter um valor zero ideal.

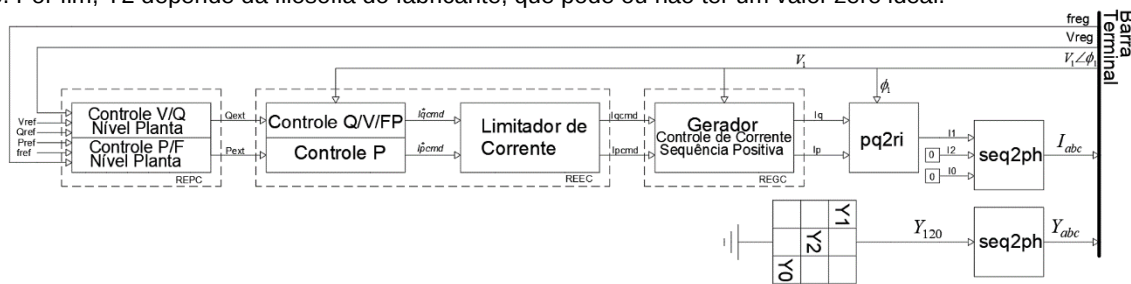


FIGURA 1 – Modelo WECC generalizado para o ambiente trifásico.

## 3.0 - CONTROLE DE CORRENTES ASSIMÉTRICAS PARA FONTES CONECTADAS VIA CONVERSOR

A principal diferença entre o FCVC e as fontes geradoras síncronas convencionais, que causa diferentes relações angulares entre a corrente e a tensão de sequência negativa, é a alta impedância de sequência negativa das fontes geradoras. Em máquinas síncronas, a impedância de sequência negativa é predominantemente indutiva, fazendo com que a corrente fornecida por esta fonte de sequência negativa esteja aproximadamente  $90^\circ$  à frente da tensão de sequência negativa. No caso do FCVC, a corrente de sequência negativa pode ser zero ou ter comportamento resistivo, indutivo ou capacitivo, dependendo dos controles do inversor.

A FIGURA 2 ilustra um esquema de um sistema tutorial com 2 geradores. No barramento 1, está conectado uma FCVC, enquanto no barramento 5, um gerador síncrono. Um curto-circuito monofásico é aplicado na LT 02 a uma distância  $x$  do terminal do barramento 3. Na representação das sequências positiva, negativa e zero,  $I_{2FCVC}$  (corrente negativa) e/ou  $Z_{2FCVC}$  (impedância negativa) são variáveis dependentes do controle do inversor. Em

geral,  $I2FCVC = 0$  e  $Z2FCVC \rightarrow \infty$ , não fornecendo corrente de sequência negativa para a falha. As linhas de transmissão (LT) são modeladas como um modelo PI, mas por uma questão de clareza, suas capacitâncias foram omitidas.

A estratégia de injeção de correntes de sequência negativa segue alguns princípios adotados em (10-13). Correntes reativas de sequência negativa são injetadas através da detecção de uma tensão de sequência negativa no terminal do conversor, o que pode indicar a existência de uma falta desbalanceada na rede. Injeta-se valores proporcionais a essa tensão com um ganho  $K_{neg}$  a menos de uma banda morta necessária para evitar a injeção de corrente de sequência negativa durante a operação normal do sistema, como desequilíbrios de carga.

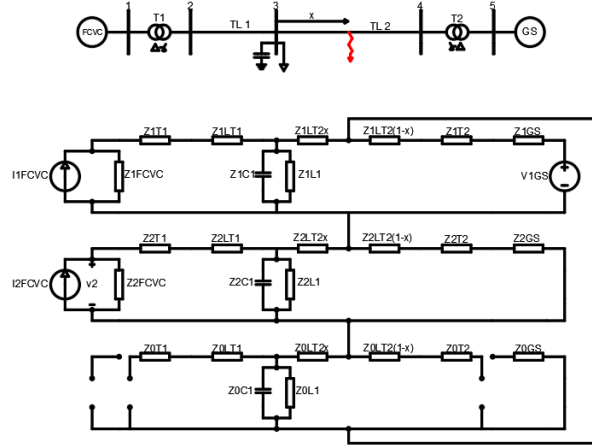


FIGURA 2 – Curto-circuito monofásico em sistema tutorial.

No modelo TP-RMS adotado, a injeção de correntes de sequência negativa pode ser feita seja através da fonte de injeção de corrente de sequência negativa, ou da mudança da admitância shunt de sequência negativa. Neste informe, optamos por alterar a fonte de corrente de sequência negativa  $I_2$ . A corrente de referência de sequência negativa é dada de modo que esteja  $90^\circ$  à frente da tensão de sequência negativa.

A FIGURA 3 Figura 3 apresenta a inclusão do modelo de injeção de correntes reativas de sequência negativa na Figura 1. A Figura 4 FIGURA 4 mostra o diagrama de blocos da injeção de corrente de sequência negativa e é parcialmente baseado em (10). O sinal de tensão de sequência negativa deve passar por um bloco de filtro de sequência. A partir daí, segue a filosofia dada pela banda morta com uma injeção proporcional  $K_{neg}$ . O bloco avanço-atraso, junto com o bloco Proporcional-Integral (PI) com limitação de estado dinâmico possuem os parâmetros de controle ajustáveis. O inversor é modelado como um bloco de primeira ordem com uma constante de tempo  $T_g$  da ordem de 20 ms.

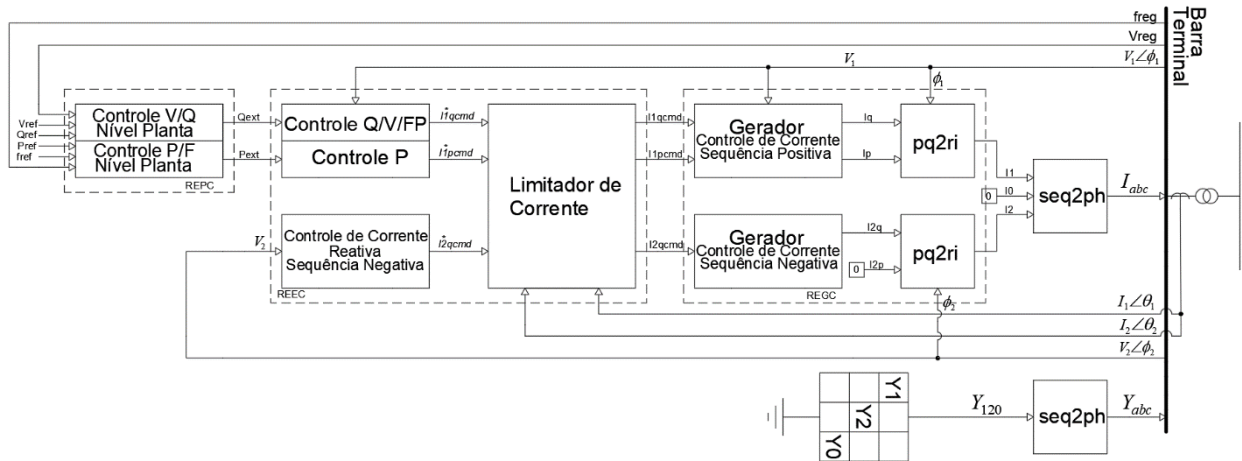


FIGURA 3 - Modelo WECC trifásico com injeção de correntes de Sequência Negativa.

Uma vez dado o controle, é necessário estipular uma lógica de limitação de corrente para evitar sobrecorrente nos dispositivos semicondutores. Essa lógica é baseada na Equação [1], que apresenta a equação de limitação da corrente no conversor considerando correntes em sequência positiva e negativa, dada pelo trabalho (14) e a lógica de limitação é baseada também parcialmente pelo trabalho (21). Na Equação [1],  $\alpha$  é a diferença angular entre o ângulo da corrente de sequência negativa  $\theta_2$  e de sequência positiva  $\theta_1$ . A variável  $k$  pode possuir valores iguais a

0, -1 ou 1 a depender do valor de  $\alpha$ . Por exemplo, se  $-60^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ ,  $k = 0$ . Se  $60^\circ \leq \alpha < 180^\circ$ ,  $k = 1$  e se  $-180^\circ \leq \alpha < -60^\circ$ ,  $k = -1$ . Para a lógica de limitação de corrente, as correntes de comando reativas de sequência positiva e negativa possuem a mesma prioridade. Se a soma dessas duas correntes de comando for inferior a corrente máxima do conversor, elas não são limitadas conforme Equações [2-3]. A corrente ativa de sequência positiva é limitada pela capacidade restante de condução do conversor pela Equação [4]. Se a soma das correntes reativas de sequência positiva e negativa forem superiores à capacidade do conversor, elas são limitadas proporcionalmente conforme Equações [5,6] e a corrente ativa de sequência positiva é igual a zero pela Equação [7]. As correntes de comando  $I^*_{1qcmd}$ ,  $I_{1qcmd}$ ,  $I^*_{2qcmd}$ ,  $I_{2qcmd}$ ,  $I^*_{1pcmd}$  e  $I_{1pcmd}$  são mostradas na Figura 3.

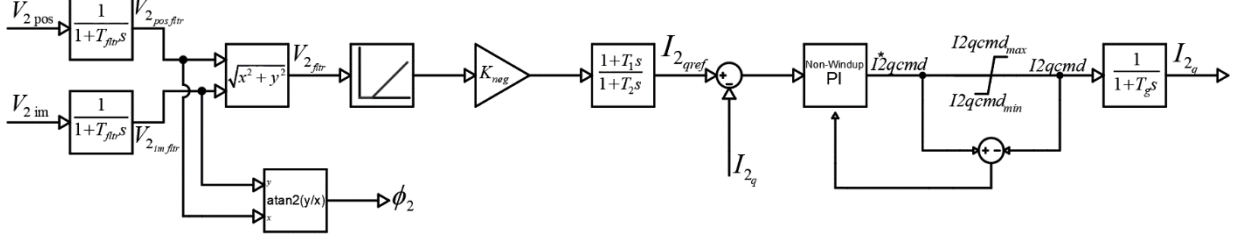


FIGURA 4 – Diagrama de Blocos de Injeção de correntes de sequência Negativa.

$$\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos(\alpha + 4 \cdot \pi \cdot k / 3)} \leq I_{\max} \quad [1]$$

Se  $\sqrt{I_{1qcmd}^{*2} + I_{2qcmd}^{*2} + 2 \cdot I_{1qcmd}^* \cdot I_{2qcmd}^* \cos(\alpha + 4 \cdot \pi \cdot k / 3)} \leq I_{\max}$ :

$$I_{1qcmd} = I_{1qcmd}^* \quad [2]$$

$$I_{2qcmd} = I_{2qcmd}^* \quad [3]$$

$$I_{1pcmd \max} = \sqrt{\left(-|I_{2qcmd}| \cdot \cos(\alpha + 4 \cdot \pi \cdot k / 3) + \sqrt{I_{\max}^2 - |I_{2qcmd}|^2 \cdot \sin^2(\alpha + 4 \cdot \pi \cdot k / 3)}\right)^2 - I_{1qcmd}^2} \quad [4]$$

Do contrário:

$$I_{1qcmd} = I_{1qcmd}^* \cdot \frac{I_{\max}}{\sqrt{I_{1qcmd}^{*2} + I_{2qcmd}^{*2} + 2 \cdot I_{1qcmd}^* \cdot I_{2qcmd}^* \cos(\alpha + 4 \cdot \pi \cdot k / 3)}} \quad [5]$$

$$I_{2qcmd} = I_{2qcmd}^* \cdot \frac{I_{\max}}{\sqrt{I_{1qcmd}^{*2} + I_{2qcmd}^{*2} + 2 \cdot I_{1qcmd}^* \cdot I_{2qcmd}^* \cos(\alpha + 4 \cdot \pi \cdot k / 3)}} \quad [6]$$

$$I_{1pcmd \max} = 0 \quad [7]$$

#### 4.0 - MODELO MULTIFUNÇÃO DO RELÉ UTILIZADO

A proteção, envolvendo elementos de sequência positiva, negativa, zero, de linha e de fase podem ser modeladas em softwares TP-RMS. No presente informe técnico, relés multi funções foram utilizados, ou seja, que possuem funções de diferentes modelos de relés agregados. A Figura 5 (a) apresenta um exemplo desse relé multifunção que foi utilizado no presente trabalho e que agrega os seis loops de falta de um relé de distância 21 com a função direcional de sequência negativa 67Q. Nesse relé, as grandezas medidas são obtidas através de um transformador de corrente e um transformador de potencial. O TC obtém os fasores de corrente  $I_a, I_b$  e  $I_c$ , bem como o ângulo da fase de corrente de sequência negativa  $\theta_2$ . O TP obtém os fasores de corrente  $V_a, V_b$  e  $V_c$ , bem como o ângulo da fase de corrente de sequência negativa  $\phi_2$ . Para o relé atuar, pelo menos um dos seis loops de falta deve ser sensibilizado durante o tempo de atuação t-trip e a falta deve ser declarada como direta (forward) pelo relé 67Q. Mesmo que a impedância de algum loop esteja dentro da zona de proteção, se o relé 67Q, que supervisiona a função de proteção 21 declarar a falta como reversa, não há operação da proteção. A Figura 5 (b) apresenta uma configuração típica do elemento direcional da função 67Q.

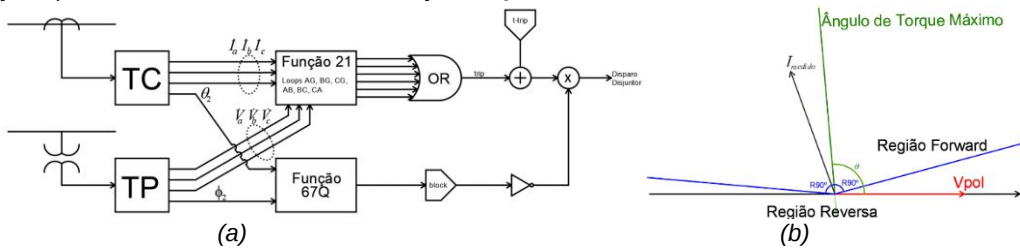


FIGURA 5 - Relé multi função utilizado no informe técnico: (a) Relé Multi função; (b) Região Forward de Relé 67Q.

## 5.0 - SIMULAÇÕES REALIZADAS

### 5.1 - Sistema Tutorial

As primeiras simulações realizadas foram realizadas no sistema Tutorial da Figura 2. Casos foram gerados em que o gerador na barra 1 é uma máquina síncrona ou uma FCVC com controle de tensão local e controle de nível planta de frequência. No caso da simulação com FCVC, o parâmetro  $K_{neg}$  foi variado para obter uma análise de sensibilidade, partindo de 0 (supressão de correntes de sequência negativa) a 6. Em regime permanente, o gerador conectado à barra 1 fornece 50 MW com fator de potência unitário. A capacidade nominal dessa planta é de 55 MVA. A barra 3 tem carga de 100 MW com fator de potência indutivo de 0,95 e banco de capacitores para manutenção do perfil de tensão. O gerador no barramento 5 é uma máquina síncrona. No caso de uma FCVC, a corrente máxima nos inversores é de 1,2 pu. Uma falta monofásica (fase A) no meio da LT 02 foi aplicada por 100 ms. Esta LT possui relés de distância de fase em seus dois terminais com tempo de atuação de 50ms. A direcionalidade desses relés é dada pelas componentes de sequência negativa e pode bloquear a atuação do elemento de distância. Nas simulações TP-RMS, o relé é configurado no modo monitoração, ou seja, informa se o relé teria operado ou não, não desarmando o disjuntor.

A Figura 6 (a) apresenta o resultado da corrente de saída de sequência negativa do gerador G1 enquanto a Figura 6 (b) apresenta a corrente de sequência negativa no terminal da barra 3 da LT02. Conforme aumenta-se  $K_{neg}$ , aumenta-se o valor da corrente de sequência negativa gerada, conforme Figura 6 (a). Na LT 02, inicialmente, o aumento de  $K_{neg}$  reduz a magnitude da corrente de sequência negativa devido a redução da tensão de sequência negativa que o controle proporciona. No entanto, com  $K_{neg} = 4$  a corrente de sequência negativa já é superior ao caso de supressão de correntes de sequência negativa.

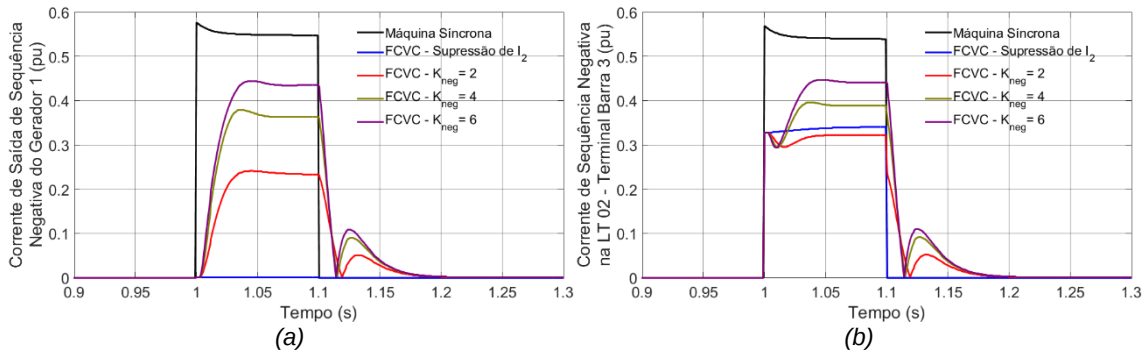


FIGURA 6 - Correntes de Sequência Negativa: (a) Saída do Gerador 1; (b) Terminal da barra 3 – LT 02.

A Figura 7 (a) mostra as tensões de sequência positiva das simulações. Observa-se que, conforme aumenta-se  $K_{neg}$ , o suporte de tensão de sequência positiva é reduzido devido à lógica de limitação de corrente. A Figura 7 (b) apresenta a tensão de sequência negativa. Sem injeção de correntes de sequência negativa, observa-se um alto valor de tensão de sequência negativa. Conforme aumenta-se o valor de  $K_{neg}$ , essa tensão é mitigada. O controle, portanto, também auxilia na redução do desequilíbrio nos terminais do conversor.

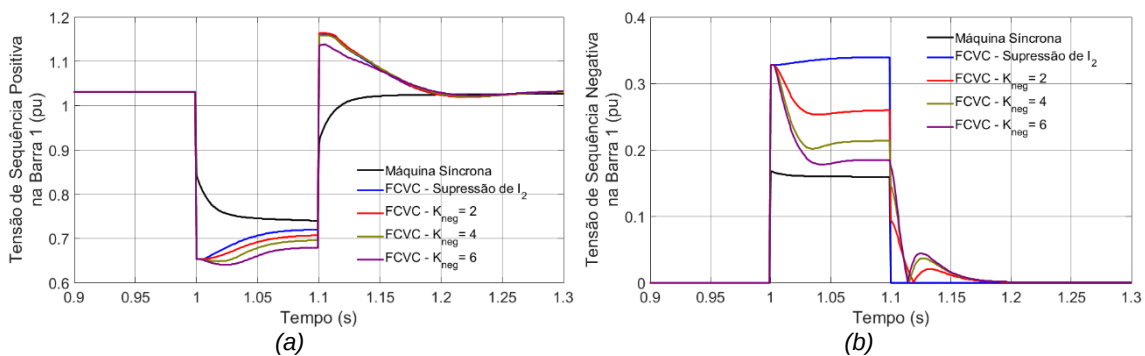


FIGURA 7 - Tensões na barra 1: (a) Sequência Positiva; (b) Sequência Negativa.

A Figura 8 apresenta o resultado da diferença angular entre corrente e tensão de sequência negativa no terminal da barra 3 da LT02. Observa-se que, sem injeção de correntes de sequência negativa, essa diferença angular é de aproximadamente  $200^\circ$  (corrente  $160^\circ$  atrasada da tensão), uma relação altamente desfavorável que faz com que a função 67Q declare a falta reversa. Com injeção de correntes de sequência negativa, a falta é declarada direta.

Sendo assim, com supressão de correntes de sequência negativa, a proteção **NÃO** atuaria, enquanto que atuaria para os casos com injeção de correntes de sequência negativa, igual ao caso com máquina síncrona.

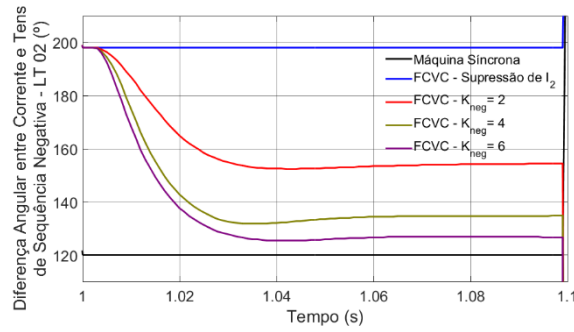


FIGURA 8 - Diferença angular entre corrente e tensão de sequência negativa no terminal da barra 3 da LT 02.

## 5.2 - Equivalente de parte do Sistema Interligado Nacional

O segundo sistema de teste representa uma pequena área do SIN, principalmente em 230kV, conforme mostrado na Figura 9, representando um caso de outubro de 2016, obtido em (22). Nos barramentos de interface (SE # 4, SE # 5 e SE # 6) da área estudada com o restante do SIN, modelamos equivalentes dinâmicos representados por modelos de máquinas síncronas clássicas trifásicas (23). A área estudada contém uma usina termelétrica de cinco unidades geradoras conectadas na SE # 7, denominada Willian Arjona (WA). Três casos foram criados, o primeiro caso considera WA com seus dados originais como máquina síncrona. O segundo caso considera WA como uma usina fotovoltaica FCVC com a mesma capacidade da usina térmica, com supressão das correntes de sequência negativa. O terceiro caso considera a mesma planta fotovoltaica, mas com injeção de correntes de sequência negativa com  $K_{neg} = 2,5$ . Observa-se que, para avaliar e comparar claramente as grandezas de sequência negativa nos três casos, aumentamos as impedâncias de sequência negativa das máquinas equivalentes de interface.

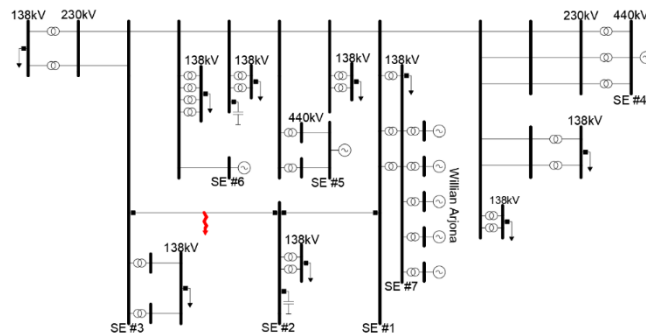
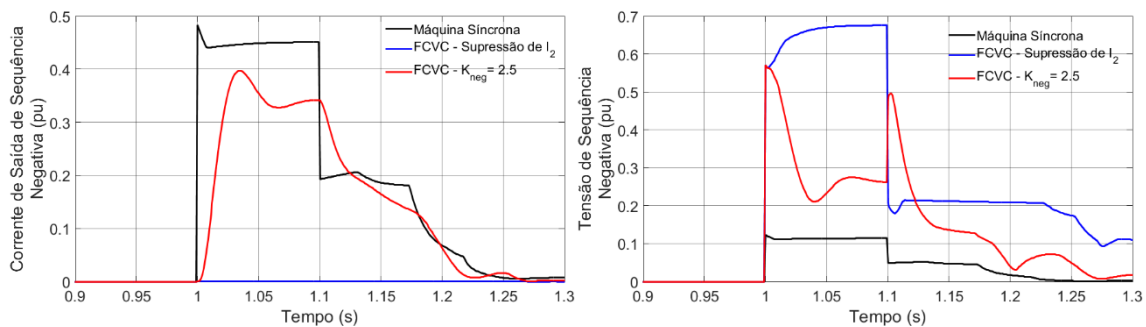


FIGURA 9 - Sistema Equivalente de parte do SIN.

A proteção de distância de LT SE#2 - SE#3 emprega um esquema de três zonas com uma característica quadrilateral, usando grandezas de sequência negativa para a função direcional da linha protegida, conforme FIGURA 5. Uma falha monofásica de 100 ms foi aplicada na fase A de LT SE # 2 - SE # 3.

A Figura 10 (a) mostra a corrente de sequência negativa de uma das plantas de WA. Constata-se que, no caso de FCVC com supressão de correntes de sequência negativa, não há fornecimento de correntes dessa sequência. A Figura 10 (b) mostra a tensão de sequência negativa no barramento do terminal WA. Sem a injeção de correntes de sequência negativa, ocorreram grandes valores de tensões de sequência negativa, o que é mitigado quando há injeção de correntes reativas de sequência negativa.



(a) (b)  
FIGURA 10 - Grandezas de Sequência Negativa em um dos terminais da barra de WA. (a) Corrente (b) Tensão

A Figura 11 (a) mostra a diferença angular entre tensões e correntes dos componentes de sequência negativa da LT SE # 2 - SE # 3 no lado SE # 2. Observa-se que, no caso de supressão de corrente de sequência negativa, a diferença angular de corrente e tensão, no lado SE # 2, permanece maior que  $180^\circ$ , o que significa que a tensão está adiantada da corrente. Com essa discrepância na relação angular, NÃO haveria atuação do relé. Com o controle de correntes assimétricas, o relé volta a atuar de forma correta. No lado da SE # 3, o relé opera em todos os 3 casos, conforme Figura 11 (b). No entanto, no lado SE # 2, devido ao bloqueio da função 67Q, o relé não operaria com supressão de correntes de sequência negativa, mas operaria com a injeção de correntes reativas de sequência negativa durante a falha na LT.

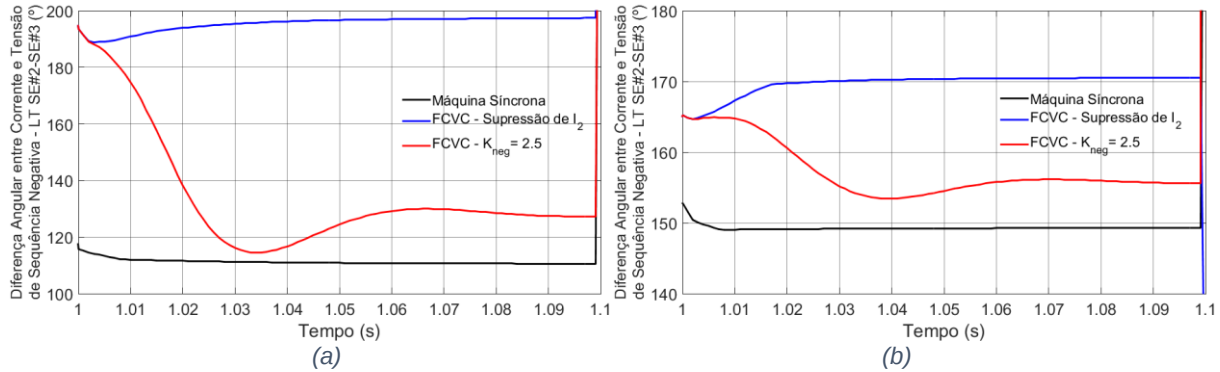


FIGURA 11 - Diferença Angular de Corrente e Tensão de Sequência Negativa da LT SE#2-SE#3. (a) Terminal SE#2 (b) Terminal SE#3

### 5.3 - Comparação do desempenho de modelagem TP-RMS x EMT

Nessa seção, é comparado o tempo computacional do sistema Tutorial numa ferramenta EMT com o controle feito na ferramenta TP-RMS numa simulação do sistema tutorial da seção 5.1. Na ferramenta EMT, foi utilizado o modelo descrito em (24) como “Average Model”, onde a FCVC é modelada como uma fonte de corrente nas três fases, cuja magnitude e fase das correntes são modeladas pelos loops de controle de potência ativa e controle de tensão/potência reativa/fator de potência. O gerador da barra 1 é uma planta fotovoltaica com controle local de potência reativa e controle local de potência ativa. O parâmetro  $K_{neg}$  tem valor igual a 5. O evento aplicado nessa seção é o mesmo da seção 5.1.

Pela Figura 12 (a) e Figura 12 (b), que apresentam grandezas em valor RMS de sequência negativa do harmônico de frequência fundamental como corrente e diferença angular entre corrente e tensão, observa-se que o modelo TP-RMS apresenta uma boa aproximação dos resultados do modelo EMT. O modelo EMT, apesar de ser mais preciso por utilizar formas de onda e não fasores, é muito mais custoso computacionalmente. Nessa simulação, enquanto o modelo EMT levou 36.51s (passo típico de simulação EMT de  $50\mu s$ ), a simulação TP-RMS levou 1.54s (passo de 1ms) para finalizar a simulação (um tempo 24 vezes menor). Esse resultado confere a modelagem TP-RMS uma vantagem na representação de sistemas de grande porte.

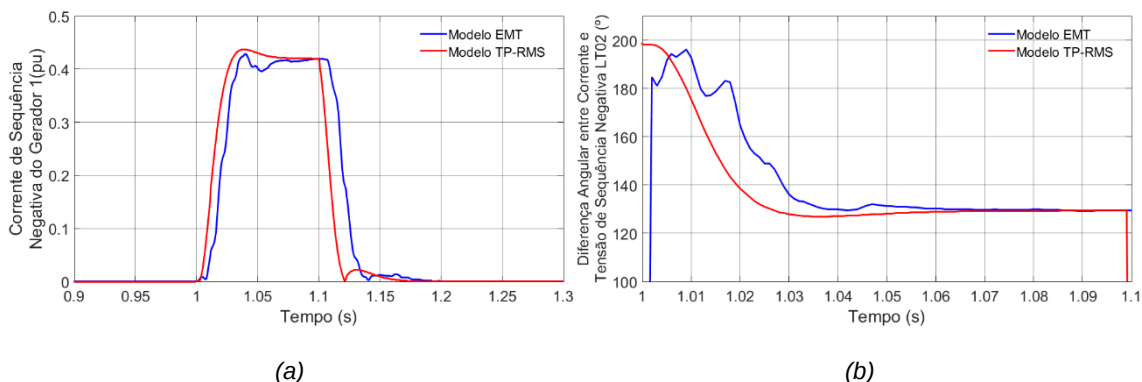


FIGURA 12 - Grandezas de Sequência Negativa: (a) Corrente de saída da FCVC; (b) Diferença Angular de Corrente e Tensão de Sequência Negativa na LT 02 - Terminal da barra 3.

## 6.0 - CONCLUSÕES

O informe técnico apresentou simulações em modelagem fasorial dinâmica trifásica para identificar e solucionar um problema de proteção causado pelas fontes conectadas via conversores eletrônicos. A representação do sistema em modelagem dinâmica TP-RMS permite:

- Uma proposta de controlador de injeção de correntes assimétricas para FCVC Full-converter que faz com que erros de operação de relés direcionais sejam resolvidos;
- Uma representação de proteções multi funções em simulações TP-RMS, incluindo relés de proteção envolvidos nos circuitos de fase e terra além de uma representação mais realista de faltas assimétricas em modelagem fasorial dinâmica trifásica;
- Uma simulação mais rápida do que a simulação do tipo EMT.

Além disso, o informe técnico propôs uma lógica de limitação de corrente do conversor para evitar sobrecorrente nos dispositivos semicondutores. Sendo assim, o presente informe técnico trouxe uma plataforma de simulação que permite a identificação de problemas de proteção na presença de FCVC e um controle que soluciona o problema.

## 7.0 – AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), além da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. Brasília, 2021. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/>>. Acessado em 14 de junho de 2021.
- (2) 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.
- (3) ANDERSON, P.M., *Power System Protection*, IEEE Press, 1999.
- (4) BLACKBURN, J.L., DOMIN, T.J. *Protective Relaying – Principles and Applications*, CRC Press, 2007.
- (5) CALERO, F., "Rebirth of Negative-Sequence Quantities in Protective Relaying With Microprocessor-Based relays". 30th Annual Western Protective Relay Conference, pp. 190-219 Out. 2003.
- (6) TEODORESCU, R., LISERRE, M., RODRÍGUEZ, P., "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems", IEEE Wiley Press, 2010.
- (7) IEEE PES, "Protection Challenges and Practices for Interconnecting Inverter Based Resources to Utility Transmission Systems". Technical Report PES-TR81, IEEE Power System Relaying and Control Committee, Jul. 2020.
- (8) 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, Fev. 2018.
- (9) HADDADI, A., KOCAR, I., FARANTATOS, E., "Impact of inverter-based resources on protection schemes based on negative sequence components", EPRI, Technical Brief - Bulk Power System Integration of Variable Generation, July 2019.
- (10) HADDADI, A. et al., "Negative sequence quantities-based protection under inverter-based resources - Challenges and impact of the German grid code", Electric Power Systems Research, Vol 188, 2020.
- (11) NEUMANN, T. et al., "Enhanced Dynamic Voltage Control of Type 4 Wind Turbines During Unbalanced Grid Faults". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 4, pp. 1650-1659, Dez. 2015.
- (12) ERLICH, I. et al., "Wind turbine negative sequence current control and its effect on power system protection," 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, pp. 1-5, 2013.
- (13) WIJNHOF, T. et al., "Control aspects of the dynamic negative sequence current injection of type 4 wind turbines," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, pp. 1-5, 2014.
- (14) CHOU, S. et al., "A reactive current injection technique for renewable energy converters in low voltage ride-through operations," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 2011.
- (15) Technical connection rules for Extra-High Voltage, VDE-AR-N 4130, Berlin, Outubro de 2018.
- (16) TARANTO, G.N., ASSIS, T.M.L., MARINHO, J.M.T., "Integrating Relay Models in Three-Phase RMS Dynamic Simulation," in IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 36, No. 5, Setembro de 2021.
- (17) WECC Renewable Energy Modeling Task Force, "WECC Wind Power Plant Dynamic Modeling Guide", USA, Abril de 2014.
- (18) WECC Renewable Energy Modeling Task Force, "WECC PV Power Plant Dynamic Modeling Guide", USA, Abril de 2014.
- (19) TARANTO, G.N., MARINHO, J.M.T., "Simulation of Integrated Transmission and Distribution Networks with a Hybrid Three-Phase/Single-Phase Formulation", Proc. Bulk Power System Dynamics and Control X, IREP Symposium, Espinho, Portugal, Ago. 2017.
- (20) TARANTO, G.N. et al., "Impactos Negativos das Fontes Conectadas Via Inversores em Relés de Proteção", XXV SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Minas Gerais, Nov. 2019.
- (21) KAUFFMANN, T. et al., "Short-Circuit Model for Type-IV Wind Turbine Generators With Decoupled Sequence Control". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 34, no. 5, pp. 1998-2007, Out. 2019.
- (22) ONS – Operador Nacional do Sistema, disponível em <[www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)>.
- (23) KUNDUR, P., *Power System Stability and Control*, New York, USA, McGraw-Hill, 1994.

(24) MULJADI, E., SINGH, M., GEVORGIAN, V., "User Guide for PV Dynamic Model Simulation Written on PSCAD Platform", Relatório Técnico, NREL/TP-5F00-62053, National Renewable Energy Laboratory, Nov. 2014.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



Victor Alves Freitas de Almeida possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2019). Ele está atualmente cursando mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é pesquisador da COPPE / UFRJ e suas áreas de interesse são dinâmica, controle e proteção de sistemas de potência, simulações fasoriais no domínio do tempo e energias renováveis.

#### (2) GLAUCO NERY TARANTO

Glauco N. Taranto obteve a graduação na UERJ em 1988, o mestrado na PUC/RJ em 1991, e o doutorado no Rensselaer Polytechnic Institute, EUA em 1994, todos em Engenharia Elétrica. Em 2006, foi visitante em estágio pós-doutoral no Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, Milão, Itália. É Professor Titular do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ. Presidente do Subcomitê de Estabilidade de Sistemas de Potência do IEEE PES, e coordenador da Força-Tarefa "Integração de modelos de relé com simulação dinâmica RMS". Foi editor do IEEE Transactions on Power Systems (2016-2020).

#### (3) 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) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2008). Atualmente é engenheiro de equipamentos da Petróleo Brasileiro S. A. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: geração e distribuição de energia elétrica, análise de sistemas de potência e industriais.