

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

DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMO DE UNIDADE DE MEDIÇÃO SINCROFASORIAL MAIS RÁPIDA VISANDO DETECÇÃO DE EVENTOS E HARMÔNICOS

**JOSÉ EDUARDO DA ROCHA ALVES JUNIOR(1); GLAUCO NERY TARANTO(2); TIAGO FERNANDES MORAES(1); JOSÉ RENATO COZZOLINO RODRIGUES DE SOUZA(2)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA CEPEL(1); COPPE/UFRJ(2)**

RESUMO

A crescente presença de recursos de interface de eletrônica de potência na geração e transmissão do sistema de potência está tornando a dinâmica do sistema mais rápida. Este artigo apresenta a investigação de um algoritmo de medição fasorial visando PMUs mais rápidas, baseado em DFT de Ciclo Fracionário (FC-DFT), que fornece estimativas de fasores múltiplos durante um ciclo de sinal. Ele foi testado por meio de simulações numéricas de um sistema HVDC de alimentação múltipla (multi-infeed) aplicando-se falha de válvulas tiristorizadas e falha CC. O algoritmo fornece informações benéficas para o operador do sistema de controle e para análises forenses iniciais.

PALAVRAS-CHAVE

Medição fasorial, Equipamentos de registro contínuo, Sistemas de CCAT "Multi-infeed".

1.0 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as redes elétricas têm incorporado um número crescente de conversores eletrônicos de potência, como HVDC, SVC e, mais recentemente, geração com interface de conversor e armazenamento de energia. A presença de todos esses dispositivos trouxe muitas vantagens para todos os níveis do sistema de potência, mas também aumentou significativamente a complexidade de monitoramento e operação do sistema [1,2]. Atualmente, os sistemas SCADA têm a responsabilidade de monitorar e operar a rede, usando intervalos de tempo em torno de alguns segundos entre medições consecutivas. Porém, a resolução temporal desses sistemas é insuficiente para detectar algumas ocorrências como, por exemplo, oscilações eletromecânicas. A rede de sincrofasores composta por PMUs e PDCs oferece melhor resolução e medições sincronizadas, permitindo assim que novos aplicativos aumentem a capacidade de observação do sistema.

Com relação a este contexto, as PMUs não foram projetadas principalmente para rastrear fenômenos mais rápidos devido à presença de eletrônicos de potência na rede. Esses eventos podem ser devido a várias causas, como por exemplo falha de comutação nos conversores de CCAT (corrente contínua em alta tensão). Além disso, PMUs não são capazes de detectar harmônicos, devido a limitações de sua banda de frequência. A detecção de fenômenos de ressonâncias sub-síncronas, geralmente relacionados à compensação de capacitores em série e inércias reduzidas [3,4], pode não ser bem detectada dependendo da banda de frequência de ressonância. Além disso, PMUs não foram originalmente concebidos para reproduzir eventos eletromagnéticos, uma vez que relatam fasores a uma taxa de até um por ciclo.

Para rastrear eventos mais rápidos, existem gravadores digitais de faltas (DFRs) que fornecem taxas de amostragem de até 20kHz, o que é considerado suficiente para analisar perturbações após sua ocorrência [5]. No entanto, não são equipamentos de reportagem contínua de dados, uma vez que normalmente são acionados sob demanda e gravam sinais por janelas de tempo curtas.

Verifica-se a necessidade de equipamentos de armazenamento e transmissão contínua de dados para descrever ocorrências mais rápidas que não são detectáveis pelos equipamentos de monitoramento contínuo existente. O conceito de monitores ponto-na-onda com sincronização de tempo contínuo ("continuous point-of-wave CPOWs") é apresentado em [6], ou seja, um equipamento capaz de registrar continuamente as medições em uma alta taxa de amostragem. Os dados do CPOW podem revelar mais sobre as condições de áreas amplas sem filtragem das PMUs tradicionais, mas exigem um fluxo maior de dados associado a uma grande capacidade de armazenamento. Portanto, para relatar continuamente as medições, a largura de banda de comunicação necessária deve ser muito maior, em certos casos não disponível. Por exemplo, a banda de comunicação necessária para seis sinais (três tensões e três correntes) em 256 amostras/segundo e frequência fundamental de 60 Hz requer pelo menos 1,4 Mbps (dois bytes

para uma amostra em estrutura em ponto fixo). Essa banda ainda não considera os cabeçalhos inerentes ao protocolo de transporte [7].

Na literatura existem estudos mostrando estratégias voltadas para o aumento da largura de banda das PMU. Esses algoritmos estão intimamente relacionados à função específica relacionada aos equipamentos. Algumas linhas de pesquisa têm foco na detecção de harmônicos, como em [8] que propôs uma análise fasorial multifrequencial para PMUs baseada no filtro de Kalman, a fim de rastrear taxas específicas de interferências harmônicas. Um monitoramento de múltiplos harmônicos de alta precisão é apresentado em [9], baseado também na transformada de Taylor-Fourier, embora a banda harmônica possa ser modificada por um ajuste nos coeficientes do algoritmo.

Este trabalho apresenta um estudo de um modelo de medição fasorial baseado em Fractional-Cycle DFT (FC-DFT), para aprimorar a capacidade do algoritmo convencional de PMUs de rastrear eventos rápidos na rede e ao mesmo tempo detectar harmônicos e outras frequências presentes no sistema elétrico. A ideia por trás do algoritmo é aumentar a observabilidade do sistema de monitoramento, embora com um fluxo de dados razoável proporcionando disponibilidade para o equipamento. Esse tipo de algoritmo foi sugerido inicialmente em [10]. Nesta referência, os autores não descreveram uma análise detalhada do algoritmo, comparando-o com equipamentos PMU convencionais e outros propostos na literatura. Além disso, neste trabalho, algumas aplicações são sugeridas e uma aplicação HVDC de alimentação múltipla (multi-infeed) é examinada.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: No capítulo 2, o método proposto é apresentado teoricamente e é feita uma comparação com algoritmos convencionais de PMU. No capítulo 3, discute-se a banda de comunicação associada ao algoritmo desenvolvido. O capítulo 4 apresenta resultados do algoritmo em relação a aplicações como HVDC multi-infeed. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do artigo.

2.0 ALGORITMO DE PMU DE CICLO FRACIONÁRIO

Conforme mencionado na introdução, existe a necessidade de se obter PMUs com banda de frequência alargadas, mas associados a banda de comunicação viável. Este artigo propõe um Algoritmo PMU de Ciclo Fracionário (FC-DFT), a fim de atender a esses requisitos. A seguir apresenta-se a teoria base do algoritmo.

2.1 Aplicação da solução por Mínimos Quadrados para ciclo fracionário

Para obter janelas DFT menores que meio ciclo, o algoritmo de transformada de Fourier (DFT) pode ser reavaliado usando-se o método dos mínimos quadrados (LMS). O conceito é encontrar a melhor função cossenoidal de frequência fundamental que poderia interpolar os sinais amostrados dentro da fração da janela. A função objetivo aplicada pelo método LMS pode ser definida por (1). O objetivo principal do algoritmo é estimar $|\hat{X}|$ e $\hat{\phi}$:

$$\hat{x}(t) = \sqrt{2} |\hat{X}| \cdot \cos(2\pi f_0 t + \hat{\phi}) \quad (1)$$

A expressão (1) poderia ser reescrita de forma que se tornasse função dos coeficientes reais e imaginários do fasor estimado correspondente, \hat{X}_r e \hat{X}_i , conforme mostrado em (2).

$$\hat{x}(t) = \hat{X}_r \cos(2\pi f_0 t) - j \cdot \hat{X}_i \sin(2\pi f_0 t), \quad (2)$$

No domínio do tempo discreto e considerando N como o número de amostras em um ciclo (por exemplo, 256 amostras por ciclo), a solução LMS é obtida resolvendo o sistema linear mostrado em (3):

$$[x] = [\Phi][\hat{X}] \quad (3)$$

Onde:

$$[x] = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \vdots \\ x(N-1) \end{bmatrix} \text{ é o sinal amostrado de entrada,}$$

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \cos(0) & -\sin(0) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (1)\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (1)\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (2)\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (2)\right) \\ \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (3)\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (3)\right) \\ \vdots & \vdots \\ \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (M-1)\right) & -\sin\left(\frac{2\pi}{N} \cdot (M-1)\right) \end{bmatrix}$$

e $[\hat{X}] = \begin{bmatrix} \hat{X}_r \\ \hat{X}_i \end{bmatrix}$ é o vetor fasorial e M é o número de amostras dentro da janela estudada (por exemplo, para uma seção 1/8 do ciclo e 256 amostras em todo o ciclo, M seria 32).

Os valores de \hat{X}_r e \hat{X}_i , são calculados por:

$$[\hat{X}] = [H]^{-1}[\Phi]^T[x] \quad (4)$$

A matriz H é obtida e seus coeficientes são apresentados em (5), sendo formados pelas somas das séries de seno e cosseno.

$$[H]_M = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Onde:

$$\begin{aligned} A &= M + \sum_{n=0}^{M-1} \cos\left(2 \cdot n \frac{2\pi}{N}\right) \\ B &= \sum_{n=0}^{M-1} \sin\left(2 \cdot n \frac{2\pi}{N}\right) \\ C &= M - \sum_{n=0}^{M-1} \cos\left(2 \cdot n \frac{2\pi}{N}\right) \end{aligned}$$

No caso em que as janelas fracionárias são múltiplas do ciclo fundamental ou metade de um ciclo, ($M = k \cdot N$ para $k = 1, 2, \dots$), os principais elementos da diagonal da matriz H tornam-se N e os elementos de fora da diagonal tornam-se nulos. Portanto, o inverso de H nesses casos tem uma estrutura ortogonal dada por (6):

$$[H]^{-1} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Neste artigo, o tamanho das janelas é caracterizado por D seções dentro de um ciclo e M é dado por N / D . A Fig. 1 ilustra os casos para $D = 1$ (1 fasor / ciclo ou nenhuma divisão), $D = 2$ (dois fasores / ciclo) e $D = 4$ (quatro fasores / ciclo). Como pode ser visto, conforme D é aumentado, eventos mais rápidos podem ser modelados pelo algoritmo. Os fasores relatados são representados por setas coloridas.

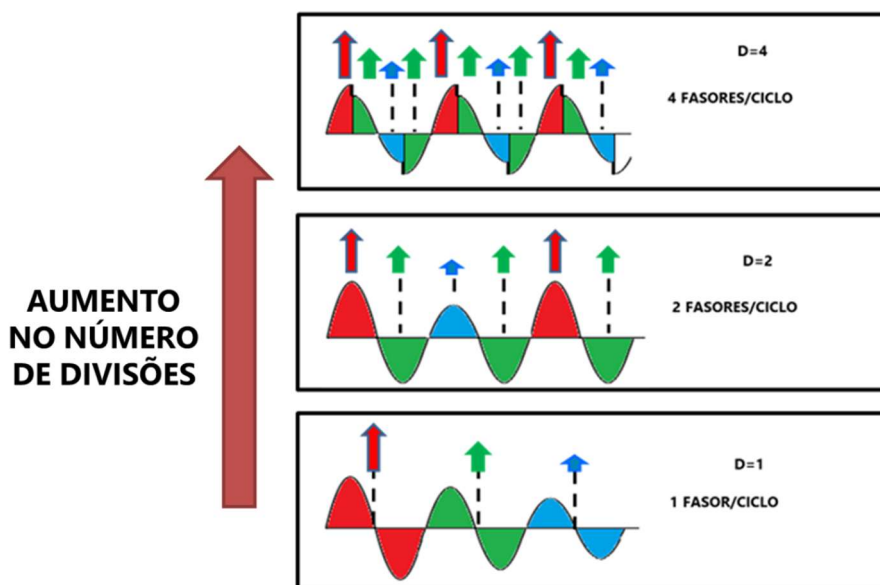


FIGURA 1 – Resposta da PMU Classe P para diferentes taxas de reportagem

2.2 Resposta em frequência

A resposta em frequência do algoritmo FC-DFT é apresentada na Fig. 2. A avaliação foi feita aplicando-se a modulação de amplitude em um sinal trifásico balanceado com frequência variando de 1Hz a 120Hz. O algoritmo FC-DFT e os resultados das PMUs das classes P e M foram obtidos usando MatLab / Simulink. Foi verificado que a banda passante (limite de -3dB) aumenta à medida que D é mais alto.

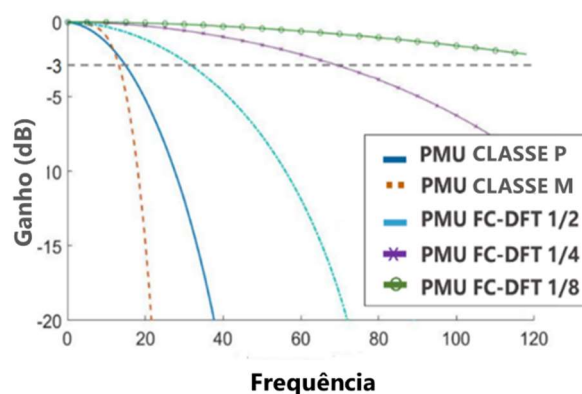


FIGURA 2 – Resposta em frequência de PMUs

2.3 Desempenho do algoritmo

Para destacar as principais contribuições fornecidas pelo algoritmo FC-DFT, alguns recursos são apresentados nesta seção, em relação ao desempenho de rastreamento de eventos mais rápido e desempenho de largura de banda de frequência.

2.3.1. Desempenho para detecção de eventos

Em relação ao desempenho do rastreamento de eventos, é apresentada uma comparação entre o algoritmo FC-DFT e um modelo PMU convencional da classe P. O sinal reconstruído no tempo para ambos os modelos é apresentado na Fig. 3.a para um degrau de fase. O modelo FC-DFT com 1/8 de ciclo foi capaz de rastrear a mudança de fase próximo ao momento em que ocorreu. A PMU classe P rastreou apenas cerca de metade de um ciclo. Além disso, a PMU classe P apresenta um comportamento não causal, devido à compensação interna da etiqueta de tempo. O exemplo da figura 3.b apresenta um caso de sinal com presença do 3º harmônico considerando sistema 60Hz. Esta

figura mostra o sinal reconstruído usando fasores obtidos através do algoritmo FC-DFT e de uma PMU classe P. O sinal reconstruído gerado a partir de 1/8 de ciclo FC-DFT está muito mais próximo do sinal original. Observe que a PMU da classe P não detecta o terceiro harmônico.

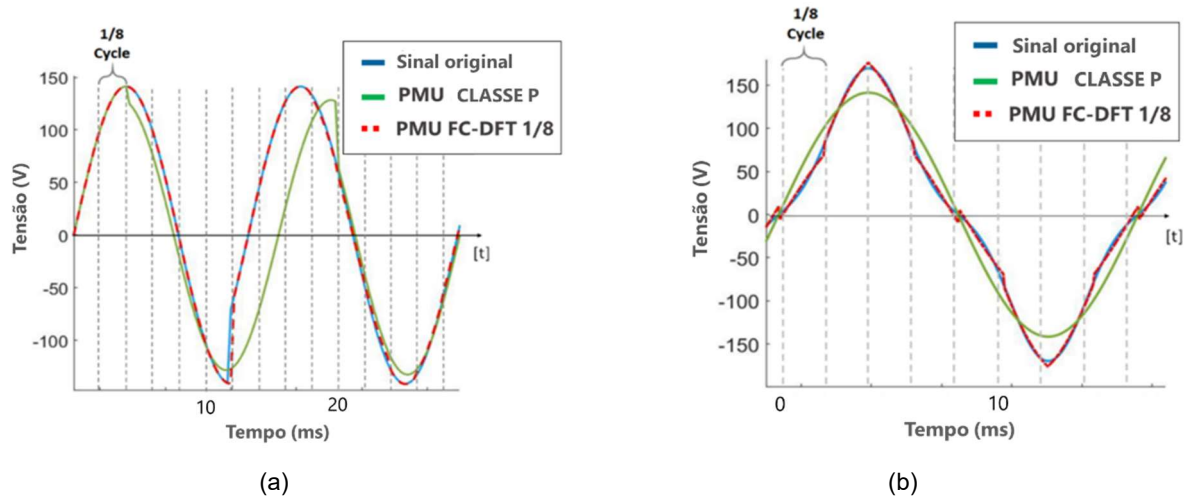


FIGURA 3 – (a) Desempenho do algoritmo para detecção de eventos (b) Detecção de harmônicos

3.0 BANDA DE COMUNICAÇÃO

Conforme apresentado anteriormente, quando o número de seções dentro do ciclo é aumentado, eventos mais rápidos podem ser modelados pelo algoritmo. Entretanto, a quantidade de informação gerada também é aumentada, levando a uma utilização maior da banda de comunicação. Para ilustrar esse problema, a Tabela 1, baseada na *IEEE Communication Standard C37.118.2*, mostra a banda de comunicação demandada em função do coeficiente D, considerando o envio de seis fasores após o processamento de cada seção. Cumpre ressaltar que há um compromisso na escolha do valor de D de forma a ponderar o grau de observabilidade desejada e a taxa de reportagem.

Tabela 1 – Largura de banda de comunicação
Para FC-DFT PMU.

D	Reportagem [fps]	Largura de banda [kbit/s]	
		Ponto fixo	Ponto flutuante
4	240	88	139
8	480	173	278
16	960	345	555

Duas abordagens podem ser implementadas para restringir ou controlar o uso da banda de comunicação.

1. O FC-DFT PMU poderia ser instalado somente em determinadas localizações da rede, seguindo um critério de observabilidade, assim o aumento da largura de banda seria restringido.
2. The FC-DFT PMU poderia variar o parâmetro D em tempo real dependendo do grau de estacionaridade do sinal de entrada. Isso poderia controlar a banda consumida, aumentando-a apenas quando houver necessidade.

Em relação ao protocolo de transporte, o desenvolvimento do STTP (Streaming Telemetry Transport Protocol) é uma abordagem promissora para reduzir o uso da banda de comunicação [16].

4.0 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Esta seção apresenta dois testes para avaliar o desempenho do algoritmo proposto, com relação à detecção de eventos e à detecção de harmônicos. A detecção de eventos tem como objetivo fornecer informações úteis em tempo real para o operador da sala de controle sobre as ocorrências na rede. A detecção de frequência avalia os componentes de frequência de um sinal elétrico, possivelmente com harmônicos. Para ilustrar ambos os testes, a Fig. 4 apresenta o sistema de teste CCAT multi-infeed adotado simulado com a plataforma HYPERSIM™ [27]. Cada linha DC transmite 1000MW a 500kV de fontes de geração AC independentes de 345kV a 60Hz para um sistema de 230kV também com 60Hz. Existem conversores de 12 pulsos em ambos os lados da linha CC usando dois blocos de pontes conectados em série. Será apresentada a implementação de medidas AC do modelo FC-DFT com 1/8 de

ciclo instalado no lado AC de ambos os barramentos do inversor HVDC, Barramento L2 e Barramento L4. Duas ocorrências serão apresentadas: uma falha na válvula do inversor e uma falha no barramento CC.

4.1 Falta em válvula inversora

Uma falha de 100ms é aplicada a 0,4s na válvula 2 do inversor, que está conectado no barramento L2. A Fig. 5 apresenta a tensão CC em ambos os links. Logo após a falha, o link do Barramento L2 HVDC é desligado. Este evento influencia a tensão no link inferior, provocando falha de comutação no outro inversor. A Fig. 6 mostra ainda que o intervalo de tempo entre as quedas de tensão DC de cada terminal HVDC leva em torno de 20ms do início do evento e sua influência no outro enlace. Esta mesma figura apresenta os sinais de potências trifásicas (as potências somadas das três fases) obtidas a partir dos sinais de PMUs rápidas, hipoteticamente instaladas nos barramentos L2 e L4. O mesmo intervalo de tempo (aproximadamente 20ms) pode ser identificado entre dois dos cruzamentos de zero das potências. Isso significa que, caso o operador do sistema CA receba os fasores FC-DFT em tempo real, as características da ocorrência podem ser reveladas e alarmadas imediatamente.

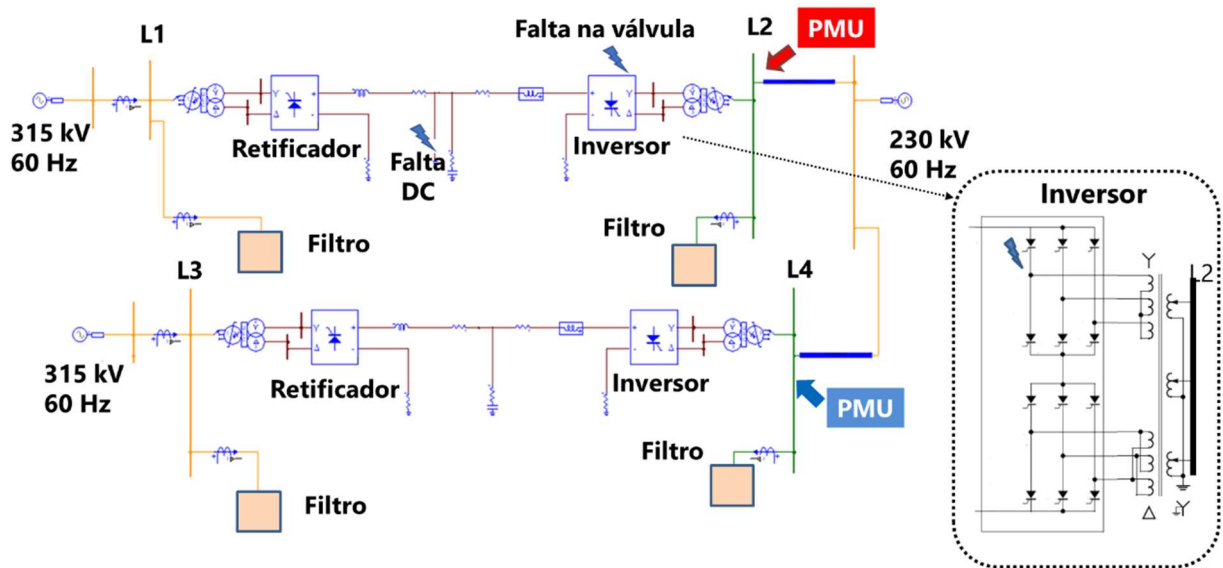


FIGURA 4 – Sistema CCAT Multi-infeed

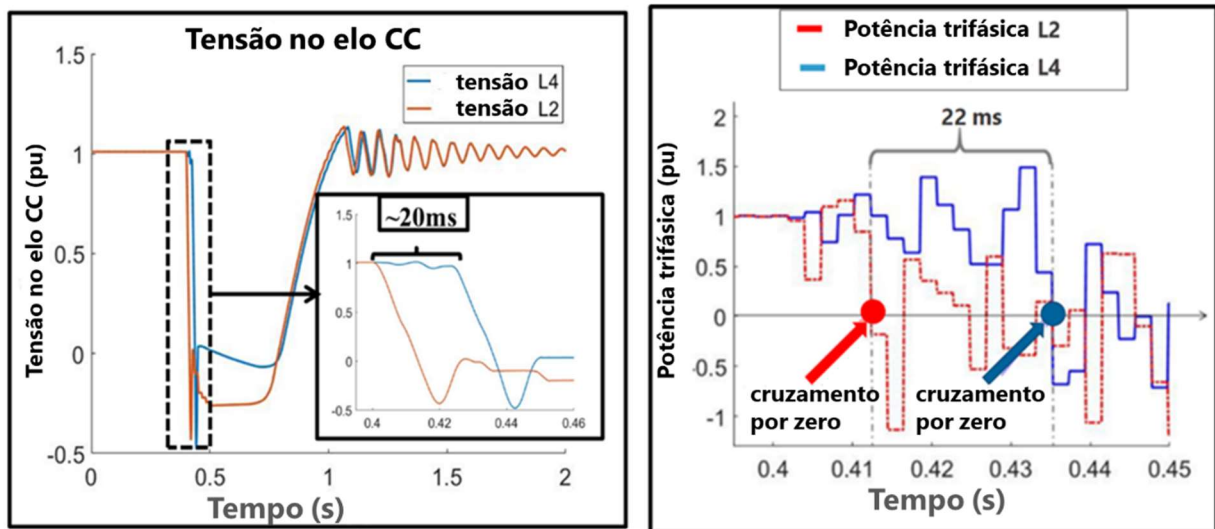


FIGURA 5 – Caso de falha na válvula inversora

A Fig. 6 mostra novamente o valor da potência ativa na fase "A" do barramento L2. Pode-se observar um comportamento oscilatório e após a primeira mudança do sinal, existe um atraso de 12ms entre aquele evento e o primeiro cruzamento por zero. Esta é uma característica foi notada nos eventos que ocorrem nas válvulas do inversor.

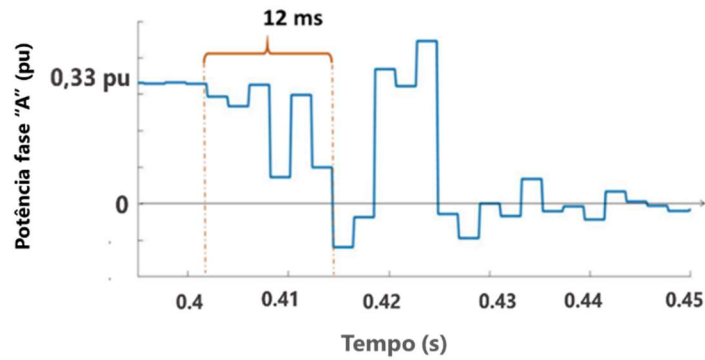


FIGURA 6 – Potência na fase “A” para falha na válvula inversora

4.2 Falta elo CCAT superior

Uma falha no lado CC afeta todas as três fases no lado CA e interrompe imediatamente o fluxo de energia no elo CC associado. A falha foi aplicada no elo CCAT conectado ao terminal do barramento L2 no tempo de 200ms. A Fig. 7 mostra a tensão em ambos os links CC durante o evento. Pode ser visto que neste caso o outro link HVDC não desliga. A potência ativa obtida no modelo FC-DFT de 1/8 de ciclo é apresentada na Fig. 8. Não existe a componente oscilatória antes do cruzamento por zero, como visto antes na falha da válvula apresentada na Fig. 6. Além disso, o cruzamento por zero ocorre apenas em 2ms após a primeira mudança de potência. Esse comportamento foi identificado em duas outras fases e verificou-se estar associado a falhas DC. Esse fato sugere que é possível realizar uma classificação de padrões de eventos a partir dos sinais obtidos da PMU rápida.

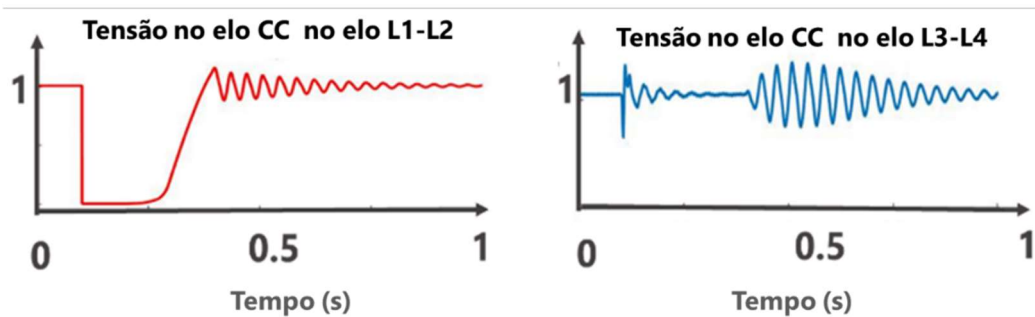


FIGURA 7 – Tensões CC para o caso de curto no elo CC superior

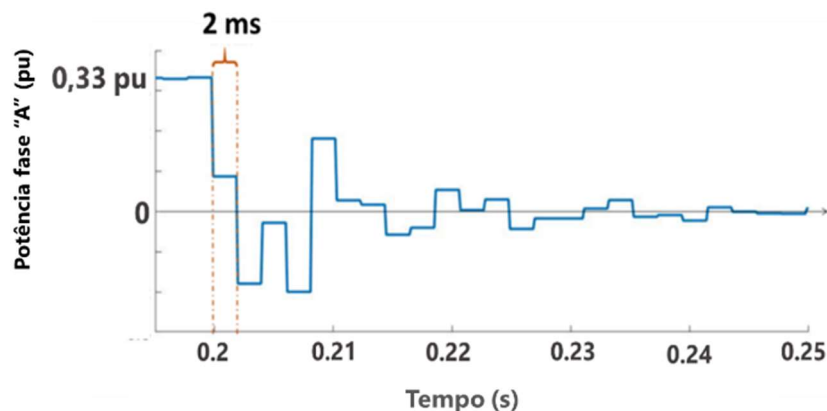


FIGURA 8 – Potência na fase “A” para falha no elo CC superior

4.3 Detecção de harmônicos

Com o objetivo de mostrar a capacidade do algoritmo FC-DFT para detecção de harmônicos, o filtro de harmônicos do inversor LP foi dessintonizado da filtragem de 11 e 13 harmônicos. Como consequência, essas harmônicas aparecem nos sinais de tensão. Para detectar isso, o parâmetro D de FC-DFT teve que ser aumentado para 32 (1/32 de ciclo) para lidar com a ordem harmônica superior. A Fig. 9 ilustra um sinal de tensão e o sinal construído pelo algoritmo FC-DFT. Pode-se ver que eles combinam quase perfeitamente com pequenas diferenças. O espectro de ambos os sinais (original e FC-DFT reconstruído) é apresentado na Fig. 10 e mostra a mesma conclusão no domínio da frequência.

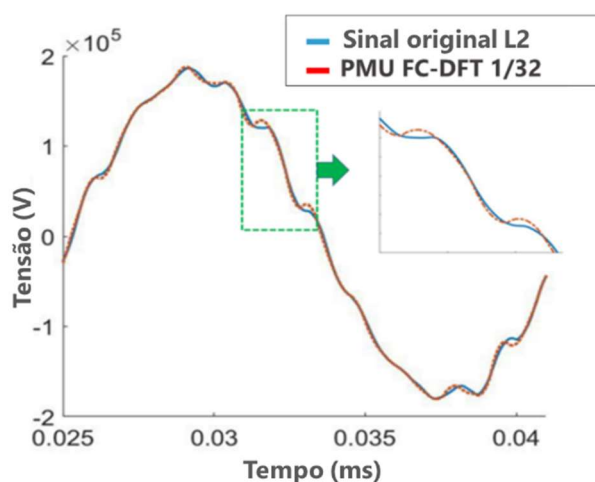


FIGURA 9: Sinal reconstruído a partir da PMU rápida FC-DFT.

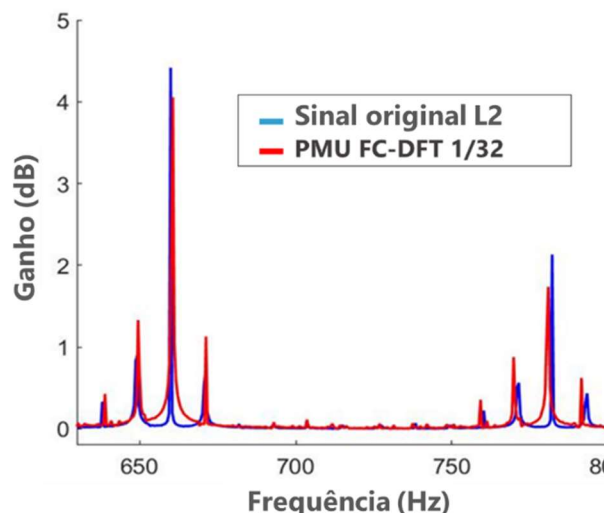


FIGURA 10: Frequência do sinal reconstruído a partir da PMU rápida FC-DFT.

5.0 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a investigação do algoritmo FC-DFT (Fractional Cycle DFT) para ser aplicado em equipamentos de reporte contínuo, como PMUs. Esse algoritmo amplia a largura de banda das PMUs, permitindo assim novas aplicações, como detecção de eventos e detecção de harmônicos. Esse equipamento pode ser usado para rastrear ocorrências rápidas que não são detectáveis pelo equipamento de monitoramento contínuo existente. Além disso, pode ser usado para detectar frequências mais altas presentes na rede. A base teórica foi apresentada e a comparação com PMUs convencionais das classes P e M foi apresentada. Os benefícios do algoritmo foram apresentados por meio de um exemplo de simulação de alimentação múltipla HVdc de falhas da válvula de comutação e falhas CC. Foi demonstrado que o algoritmo fornece informações úteis para o operador do sistema de controle e para análises forenses iniciais. No entanto, existem muitas outras aplicações previstas para o algoritmo, como as informações iniciais visando no monitoramento do centro de controle. Além disso, o novo equipamento pode ser usado em esquemas especiais de proteção e controle (WAMPC). Para trabalhos futuros, os autores consideram a construção de um protótipo e a investigação da conformidade do novo equipamento com as normas IEEE e IEC.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Gevorgian, Y. Zhang, and E. Ela, "Investigating the impacts of wind generation participation in interconnection frequency response," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 1004-1012, Jul. 2015.
- [2] S. You, Y. Liu, Y. Liu, A. Till, H. Li, Y. Su, J. Zhao, J. Tan, Y. Zhang, and M. Gong, "Energy storage for frequency control in high photovoltaic power grids," in *IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*, 2019, pp. 1-6.
- [3] T. Rauhala, A. M. Gole, and P. Järventausta, "Detection of subsynchronous torsional oscillation frequencies using phasor measurement," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, pp. 11-19, Feb. 2016.
- [4] P. Wall et al., "Deployment and Demonstration of Wide Area Monitoring System in Power System of Great Britain", *J. Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 506-18, 2016.
- [5] Hunt, R.; Oliveira, L. B., "The return of the dedicated DFR how IEC 61850 process bus simplifies DFR installation", *Annual CPRE Ed 71*, April 2018.
- [6] Silverstein, Alison, "HIGH-RESOLUTION, TIME-SYNCHRONIZED GRID MONITORING DEVICES", NASPI Technical Report, March 2020. Evaluable in: https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/pnml_29770_naspi_hires_synch_grid_devices_20200320.pdf
- [7] IEEE Standard - C37.118.2: "Synchrophasor Communication over Internet", 2011.

- [8] M. Chakir, I. Kamwa, and H. Le Huy, "Extended C37.118.1 PMU algorithms for joint tracking of fundamental and harmonic phasors in stressed power systems and microgrids," IEEE Trans. Power Del., vol. 29, no. 3, pp. 1465–1480, Jun. 2004.
- [9] M. Bertocco, G. Frigo, C. Narduzzi, C. Muscas and P. Pegoraro, "Compressive Sensing of a Taylor-Fourier Multifrequency Model for Synchrophasor Estimation", Instrumentation and Measurement IEEE Transactions on, vol. 64, no. 12, pp. 3274-3283, Dec 2015.
- [10] Phadke, A. G.; Thorp, J. S., "Synchronized Phasor Measurements and Their Applications" Springer Editor, 2ed Ed., 2017.
- [11] IEEE, C37.118.1-2011, "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems", Dec. 2011.
- [12] IEEE, C37.118.1a-2014, "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems—Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements", Apr. 2014.
- [13] C. Narduzzi, M. Bertocco, G. Frigo and G. Giorgi, "Fast-TFM—Multifrequency phasor measurement for distribution networks", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 67, no. 8, pp. 1825-1835, Aug. 2018.
- [14] "IEEE Standard C37.118.2-2011", IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems.
- [15] HYPERSIM Real-Time Simulation. [Online]. Available in: <https://www.opal-rt.com/systems-hypersim/HYPERSIM>.
- [16] Advanced Synchrophasor Protocol (ASP) Development and Demonstration Project [Online]. Available in: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1597102>.

7.0 DADOS BIOGRÁFICOS



Possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1987), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1991) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1999). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica e professor associado da Universidade Federal Fluminense. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: medição para automação e medição fasorial. É responsável pelo LabPMU (Laboratório de PMUs) no Cepel.

(2) GLAUCO NERY 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) TIAGO FERNANDES MORAES, nascido no Rio de Janeiro em 1988, é graduado em engenharia elétrica com ênfase em eletrônica em 2011 pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Obteve seu mestrado no ano de 2014 em engenharia eletrônica com ênfase em sistemas inteligentes, controle e automação, na Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Trabalha no CEPEL desde 2015, onde atualmente atua como Pesquisador. Suas principais áreas de interesse são qualidade de energia e medição fasorial sincronizada.

(4) JOSÉ RENATO COZZOLINO RODRIGUES DE SOUZA, Engenheiro Eletricista formado pela UFF em 2012, Mestre em Engenharia Elétrica e Telecomunicações pela UFF em 2016 na área de medição sincrofasorial. Atualmente é Doutorando na área de Sistemas Elétricos pela COPPE e bolsista pelo Cepel. Sua área de interesse é processamento de sinais e medições sincronizadas.