

UMA ANÁLISE PARA A ESTIMAÇÃO DE ESTADO HARMÔNICO TRIFÁSICO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO UM NÚMERO REDUZIDO DE CANAIS DE MEDIÇÃO DE CORRENTE

JÁDER F. D. BREDÁ, JOSÉ C. M. VIEIRA JR, MÁRIO OLESKOVICZ

Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 – CEP: 13566-590 – São Carlos-SP
E-mails: jader.breda@usp.br, jcarlos@sc.usp.br, olesk@sc.usp.br

Abstract— This paper proposed an analysis of the number of three-phase current measurement channels necessary to ensure full observability of the distribution system, concerning the three-phase harmonic state estimation problem using the Singular Value Decomposition technique. Several papers in the literature consider nodal current injection measurements or unlimited number of line current measurements as input data for the harmonic three-phase state estimation; however this scenario is not realistic due to economic issues and because the number of three-phase current channels can be limited in each meter. The analyses were performed in the IEEE distribution test feeders: 13, 34 and 37 bus and show the efficiency of the harmonic state estimator even in cases where there is a limitation in the number of three-phase current channels in the meters.

Keywords— Current measurement, efficient measurement, harmonic state estimation, power distribution system, power quality.

Resumo— Este artigo propõe a análise do número de canais trifásicos de medição de corrente utilizado na formulação do problema de estimação de estado harmônico trifásico usando Decomposição em Valores Singulares e voltado para sistemas de distribuição. Diversos trabalhos da literatura consideram como dados de entrada medidas de injeção de correntes nas barras ou um número ilimitado de medidas de corrente de linha que chegam na barra, contudo este cenário não é realista já que o número de canais trifásicos de medição de corrente é limitado para cada medidor instalado. A análise foi realizada nos alimentadores do IEEE de 13, 34 e 37 barras e mostram a eficiência do estimador de estado harmônico mesmo nos casos em que há a limitação do número de canais trifásicos de medição de corrente.

Palavras-chave— Estimação de estado harmônico, medição de corrente, medição eficiente, sistemas de distribuição de energia elétrica, qualidade da energia elétrica.

1 Introdução

A estimação de estado vem sendo utilizada em sistemas de transmissão de energia elétrica desde a década de 60, juntamente com os estudos de fluxo de potência para a frequência fundamental (Arrilaga, et al., 2000), (Larson, et al., Mar. 1970), (Schweppe, et al., Jan. 1970). Em relação à estimação de estado voltada para sistemas de distribuição, a aplicação de técnicas já utilizadas em sistemas de transmissão não tem se mostrado eficiente visto que os sistemas de distribuição possuem características bastante particulares (sistemas desequilibrados com cargas desbalanceadas, topologia variável, diferentes tipos de conexão de cargas e transformadores, entre outros) que inviabilizam este processo (Arrilaga, et al., 2000). Desta forma, há a necessidade de se desenvolver métodos específicos de estimação para este tipo de sistema.

Já, nas últimas décadas devido, principalmente, a proliferação de equipamentos eletrônicos, com até mesmo áreas residenciais introduzindo níveis significativos de harmônicos na rede, faz com que um novo conceito venha sendo desenvolvido em relação à estimação das distorções harmônicas. Porém, a dificuldade retratada por poucas medidas harmônicas acessíveis (relacionada ao custo da infraestrutura necessária) e nem sempre realizadas no ponto em que a fonte harmônica está conectada persiste, ainda é motivo de pesquisa em várias áreas. Assim, as medidas devem ser complementadas por algum sistema de estimação de estados (Arrilaga, et al., 2000).

Vários trabalhos abordam o problema de estimação de estado harmônico assumindo que o número de canais de medição de corrente dos medidores de qualidade da energia elétrica é ilimitado levando em consideração na formulação o valor da corrente injetada na barra (Madtharad, et al., 2003), (Nguyen, et al., 2010), (Lin, et al., 2014), (Bhujel, et al., 2017) ou que o número de canais de medição pode variar de acordo com o número de seções da barra em que está sendo realizada a medição (Du, et al., 1996), (Du, et al., 1999), (Watson, et al., Mar 2000), (Marín, et al., 2003), (Yu, et al., 2005), (Madtharad, et al., 2005), (Hou, et al., 2006), (Liao, 2006), (Eldery, et al., 2006), (Reis, et al., 2008), (Bahabadi, et al., 2011), (Ketabi, et al., 2012), (Rakpenthai, et al., 2013), (Molina-Moreno, et al., 2014), (Melo, et al., 2016). Contudo, estas abordagens não são realistas, uma vez que o número de canais de medição de corrente dos medidores é limitado, em sua grande maioria, apresentando apenas um canal trifásico de corrente por medidor.

Desta forma, como principal contribuição, este trabalho busca realizar uma análise para o problema de estimação de estado harmônico trifásico em sistemas de distribuição de modo a ilustrar como a utilização de algumas medidas de correntes em várias (ou todas) seções das barras muitas vezes não são necessárias para tornar o sistema completamente observável assim como sugerem vários trabalhos. Ou seja, mostrar a maior eficiência para os métodos que utilizam em sua formulação as correntes das seções das linhas e não os valores de injeções de corrente nas barras para a maioria dos medidores que apenas apresentam um canal de medição trifásico de corrente associado. E, além disso,

mostrar que mesmo nos casos que haja a disponibilidade de se ter mais de um canal trifásico por medidor não há necessidade de se medir as correntes trifásicas de todas as seções que chegam a barra.

2 Análise Proposta

2.1 Formulação do Estimador de Estado Harmônico Trifásico

Com base na topologia da rede, um estimador de estado é formulado por meio da matriz de admitância trifásica do sistema e do local dos pontos de medição.

Considerando as tensões nas barras como sendo as variáveis de estado do sistema, os valores estimados das tensões nas barras (v), o vetor de medidas (z) e vetor de erros (ε) se relacionam da seguinte forma (Madtharad, et al., 2003):

$$\begin{bmatrix} z_v \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_M \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_v \\ \varepsilon_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em que, I é a matriz identidade, z_v e z_i são os vetores de medidas de tensão e injeção de corrente (e/ou corrente de linha), respectivamente, Y_{IM} e Y_{IC} são os elementos da matriz admitância referentes às barras com tensões medidas e calculadas relacionadas à z_i , respectivamente; v_M e v_C são vetores de tensões nas barras medidas e calculadas, respectivamente; ε_v e ε_i são vetores de erros das medidas das tensões e das injeções de corrente (e/ou correntes de linha), respectivamente.

Ressalta-se que o objetivo deste trabalho está focado em analisar os resultados obtidos pelo estimador de estado quando o vetor z_i é composto apenas por medições de injeção de corrente comparando os casos em que o vetor é composto apenas por medições de corrente de linha.

Assim, pode-se definir uma matriz de medidas H como sendo:

$$H = \begin{bmatrix} I & 0 \\ Y_{IM} & Y_{IC} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Devido a H ser numericamente muito próxima a uma matriz singular, o método de solução escolhido neste trabalho é a técnica Decomposição em Valores Singulares (DVS) (Madtharad, et al., 2003), (Breda, et al., 2016). Esta representa a matriz H ($m \times n$) como o produto de três matrizes, em que m é o número e pontos de medição e n é o número de variáveis de estado:

$$H = UWV^T \quad (3)$$

Na qual, W é uma matriz diagonal ($n \times n$) com elementos positivos ou nulos, que são os valores singulares de H . As matrizes U e V^T são ortogonais, sendo que U é uma matriz coluna ortogonal ($m \times n$) e V^T é a matriz transposta da matriz ortogonal ($n \times n$). Contudo, à medida que os sistemas considerados neste trabalho são trifásicos desbalanceados, torna-se necessário adequar esta formulação. Assim, a matriz H terá ordem $3m \times 3n$, a matriz W terá ordem $3n \times 3n$, a matriz U terá ordem $3m \times 3n$ e, por fim, a matriz V^T terá ordem $3n \times 3n$.

No contexto deste trabalho, o emprego da DVS para a estimação de estado em sistemas elétricos apresenta a vantagem de não necessitar de uma análise de observabilidade prévia, tal como nos métodos de estimação de estado clássica (Marín, et al., 2003), (Eldery, et al., 2006), (Reis, et al., 2008), (Almeida & Kagan, 2011), (Almeida & Kagan, 2011). Assim, para um dado conjunto de medidas disponíveis, sempre haverá uma solução e nos casos em que o sistema elétrico não seja completamente observável, o método baseado em DVS indica pontos não observáveis do sistema (barras cujos valores das tensões trifásicas não podem ser estimados). Isto é feito analisando-se as matrizes da equação (3), conforme explicado a seguir (Breda, et al., 2016):

- Após a execução do algoritmo da DVS, buscam-se os valores singulares nulos (zeros na diagonal principal) presentes na matriz W ;
- Se não existe nenhum valor singular nulo, o sistema é completamente observável, e o processo é finalizado. Caso contrário, armazenam-se as posições das colunas de W em que se encontram os valores singulares nulos;
- Por fim, checam-se as colunas de V correspondentes às posições armazenadas previamente no passo anterior. Nestas colunas, as linhas que contenham valores não nulos indicam as barras não observáveis que necessitam ser monitoradas.

Maiores informações sobre esta técnica aplicada a estimação de estado em sistemas parcialmente observáveis podem ser encontradas em (Yu & Watson, 2004).

2.2 Análise do Número de Canais Trifásicos de Medição de Corrente

Em relação aos medidores de QEE, na sua grande maioria existe uma limitação sobre o número de canais de corrente possíveis de se realizar medição. Para efeito de ilustração, utilizando como exemplo um sistema hipotético de cinco barras mostrado na Figura 1, no caso em que a barra 2 apresenta um medidor alocado, existe a possibilidade de medição de corrente em 4 linhas que chegam a esta barra. Contudo, além de ser improvável que o medidor tenha todas essas canais de medição, pode ser que para o método garantir a observabilidade completa do sistema não seja necessária a medição de todos esses ramais, como seria o caso da medição da injeção de corrente na barra. Pode ser que, apenas um canal trifásico de medição (ramo 2-5, no exemplo), seja suficiente para garantir esta observabilidade completa.

É este tipo de análise que será feita na seção seguinte, a partir de uma configuração que garanta a observabilidade completa do sistema sugerida, até que ponto é necessário levar em consideração todos os ramais de corrente conectados a barra (vetor z_i composto apenas por elementos de medição da injeção de corrente na barra) assim como fazem alguns trabalhos. E esta economia é de grande valia, ainda mais quando se trata de medições harmônica que ainda são escassas devido ao custo de sua implementação.

3 Resultados

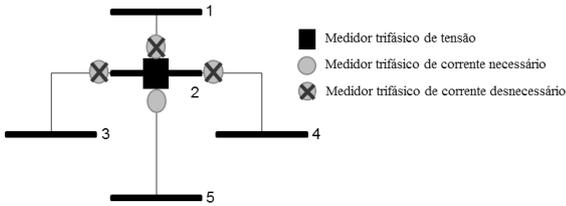


Figura 1. Número de canais de medição de corrente (possíveis e desnecessários).

2.3 Sistemas Elétricos Utilizados

Esta análise referente ao número de canais de medição de corrente será realizada em três alimentadores do IEEE de 13, 34 e 37 barras. Os dados de todos os componentes destes sistemas podem ser encontrados em Kersting (2001). Estes sistemas foram modelados no programa DIgSILENT PowerFactory (DIgSILENT, 2010), que permite simular a medição de tensões e correntes harmônicas por meio de sua ferramenta de fluxo de carga harmônico, que foi empregado para validar os resultados obtidos pelo estimador de estado harmônico.

2.4 Perfil de Carga Harmônico Utilizado

Neste trabalho, por questão de simplificação, o mesmo perfil harmônico será adotado para cada barra de carga dos sistemas, como mostrado na Tabela 1. Este perfil foi apresentado em Pires (2006) e representa um perfil obtido de medições reais realizadas num sistema de distribuição brasileiro.

Tabela 1. Perfil Harmônico por fase das cargas dos sistemas.

Ordem Harm.	Fase A		Fase B		Fase C	
	Amp. (%)	Ângulo (°)	Amp. (%)	Ângulo (°)	Amp. (%)	Ângulo (°)
1	100,00	329,04	100,00	207,36	100,00	78,90
3	10,77	168,17	9,74	229,72	8,01	163,46
5	6,45	15,65	5,66	214,73	4,09	270,48
7	2,16	189,58	1,27	226,67	0,85	357,25
9	0,56	326,80	1,02	308,35	0,94	178,79
11	0,62	26,26	0,33	301,55	0,82	216,83

2.5 Cenários Simulados

Para cada um dos três alimentadores do IEEE em análise, dois cenários serão levados em consideração. O cenário 1 de cada sistema foi obtido a partir de uma alocação na qual se sabe que há a observabilidade completa do sistema e foi-se retirando um por um os ramais de medição de corrente no sentido de verificar se este canal era mesmo necessário ou não para manter a observabilidade.

Já no cenário 2 também se partiu do resultado obtido para o cenário 1, porém foi imposta uma restrição de no máximo um canal de medição de corrente por medidor instalado, isto fez com que algumas barras do sistema se tornassem não observáveis. Desta forma, medidores foram instalados nestas barras e o número de medidores trifásicos de tensão aumentou em comparação com o cenário 1, no intuito de manter a observabilidade completa do sistema.

Nas Figuras 2-4 estão representadas as configurações de alocação de medidores sugeridas para os sistemas do IEEE de 13, 34 e 37 barras, respectivamente para os cenários 1 e 2. Nestas figuras observam-se os locais de instalação dos medidores de QEE e seus respectivos canais de medição de corrente associados. Todos os possíveis de canais de medição de corrente são representados, porém apenas alguns são necessários para garantir a observabilidade completa do sistema, sendo os demais desnecessários e que podem ser economizados desde que não se queira redundância de medidas.

Para o sistema do IEEE de 13 barras, como esperado há uma redução do número de canais utilizados para alcançar a observabilidade completa quando comparado a métodos que utilizam a injeção de corrente como entrada do algoritmo ao invés das correntes nos ramais. No cenário 1, seria necessário levar em consideração a medição de 15 canais de correntes (que se trata da soma de todos os canais de corrente conectados às barras com medição de tensão sugeridas para este caso), ou seja, o método utilizando apenas os ramais de corrente necessários utilizou apenas 46,7% deste valor (7 medidores). Já no cenário 2, devido à restrição imposta houve a necessidade de instalação de medidores de tensão nas barras 652 e 675 para garantia da observabilidade completa e desta forma seria necessária a medição em 17 canais de corrente, enquanto que a análise realizada mostrou que são necessários apenas 5 medidores, o que diz respeito a 29,4% do total de canais de correntes possíveis de medição, como mostrado na Tabela II.

Como no caso do sistema de 13 barras, para o sistema de 34 barras, no cenário 1, seria necessário levar em consideração a medição de 33 canais de correntes (que se trata da soma de todos os canais de corrente conectados às barras com medição de tensão sugeridas para este caso), desta forma, a análise mostrou que são necessários apenas 42,4% deste valor (14 medidores). Agora, no cenário 2, devido à restrição imposta houve a necessidade de instalação de medidores de tensão nas barras 806, 814, 834 e 890; e assim seria necessária a medição em 42 canais de corrente, enquanto a análise mostrou que são necessários apenas 10 medidores, que se trata de 24,4% do total de canais de correntes possíveis de medição, como ilustrado na Tabela II.

Como nos demais sistemas abordados, a eficiência quanto à redução do número de canais utilizados para se alcançar a observabilidade completa quando comparado a métodos que utilizam a injeção de corrente como entrada do algoritmo ao invés das correntes nos ramais também foi constatada pela análise para o sistema de 37 barras. Para o cenário 1 seria necessário levar em consideração a medição de 36 canais de correntes (que se trata da soma de todos os canais de corrente conectados às barras com medição de tensão sugeridas para este caso), contudo, a análise mostrou que são necessários apenas 61,1% deste valor (22 medidores). Já no cenário 2, devido à restrição imposta houve a necessidade de instalação de medidores de tensão nas barras 720, 724, 729, 730, 731, 735, 738, 741 e 742, e seria necessária a medição em 49 canais de corrente, enquanto análise mostrou que são necessários apenas 13 medidores, o que diz respeito a 26,5% do total de canais de correntes possíveis de medição (Tabela II).

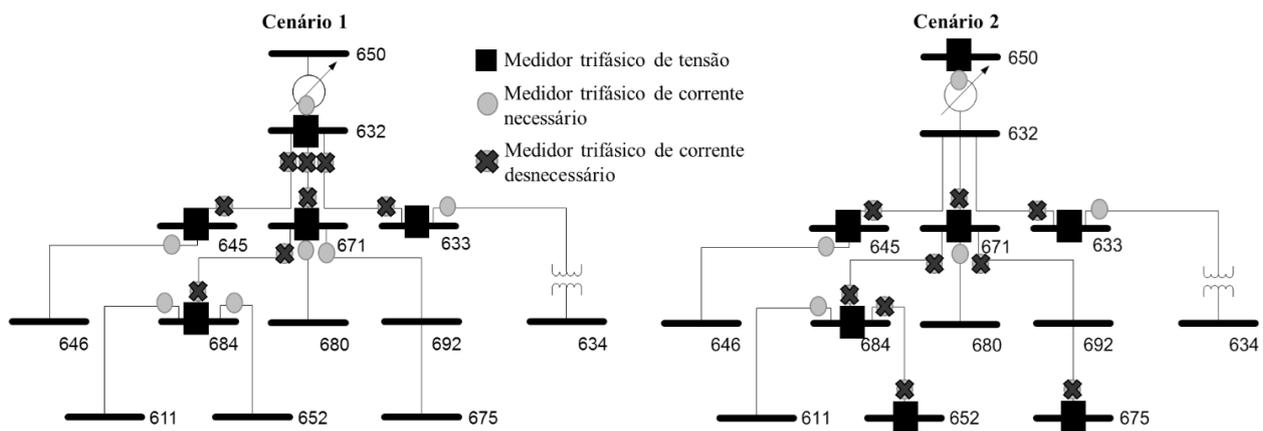


Figura 2. Cenários 1 e 2 para o sistema IEEE de 13 barras.

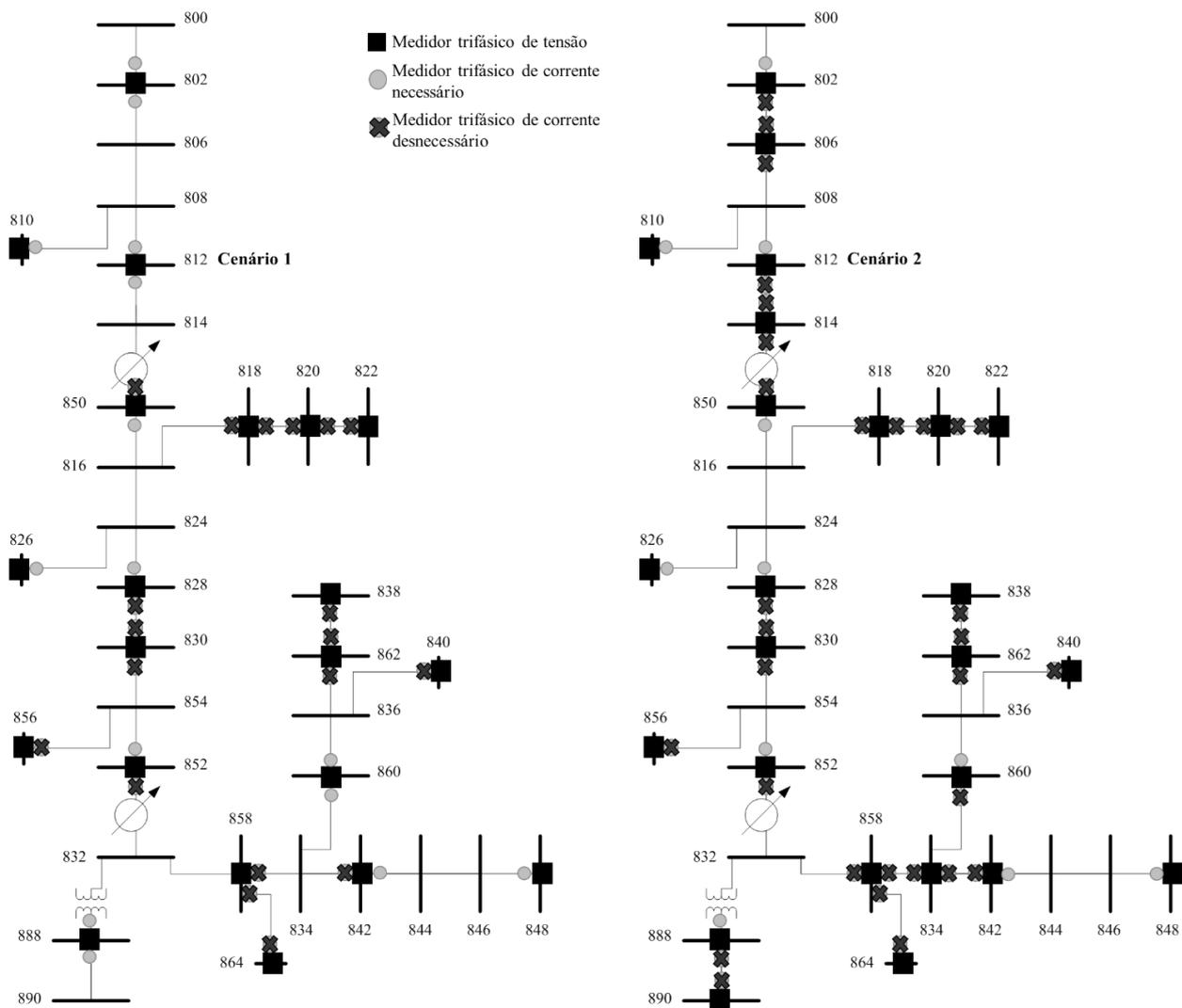


Figura 3. Cenários 1 e 2 para o sistema IEEE de 34 barras.

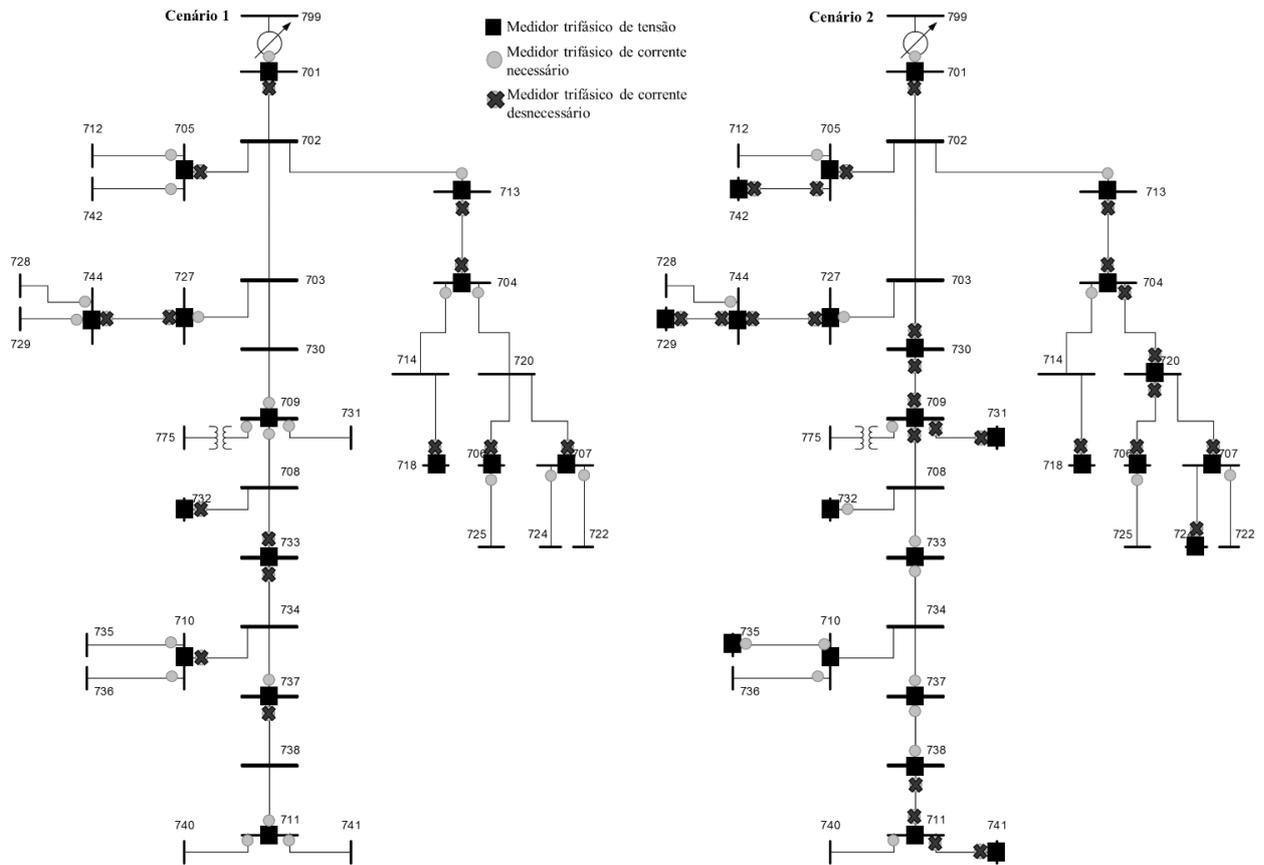


Figura 4. Cenários 1 e 2 para o sistema IEEE de 37 barras.

Tabela 2. Resultado Obtido pela Análise nos Cenários 1 e 2 para os Alimentadores do IEEE.

Sistema IEEE	Cenário	Número de medidores trifásicos de tensão	Número de medidores trifásicos de corrente possíveis	Número de medidores trifásicos de corrente necessários	Percentual de medidores trifásicos de corrente necessários
13 barras	1	5	15	7	46,7%
	2	7	17	5	29,4%
34 barras	1	20	33	14	42,4%
	2	24	41	10	24,4%
37 barras	1	15	36	22	61,1%
	2	24	49	13	26,5%

Vale ainda destacar que, para os três sistemas analisados, o somatório do número de medidores trifásicos de tensão (terceira coluna da Tabela 2) e o número de medidores trifásicos de correntes necessários (quinta coluna da Tabela 2) é igual ao número de barras de cada sistema (primeira coluna da Tabela 2). Isto ocorre porque para que haja a garantia da observabilidade completa do sistema é necessário que o número de medidas realizadas seja, no mínimo, igual ao número de variáveis de estado do sistema, neste caso representadas pelas tensões trifásicas em cada barra. Com ressalva para o sistema de 13 barras em que as barras 671 e 692 são separadas apenas por uma chave, considerada como fechada nesta análise e, portanto, as duas

barras apresentam os mesmos valores de tensões trifásicas.

Assim, a partir desta informação referente ao número de medições necessárias e verificando que para todos os sistemas analisados e nos dois cenários considerados, o número de medidores trifásicos de corrente possíveis é sempre maior do que o número de medidores trifásicos de corrente necessário, surge a necessidade de um método de alocação estes medidores da maneira mais adequada possível para que a observabilidade completa dos sistemas seja alcançada, principalmente em casos de sistemas maiores em que a análise por força bruta como feito neste trabalho torna-se impraticável.

4 Conclusão

Este artigo realizou uma análise sobre a formulação dos métodos de estimação de estado harmônico voltado para sistemas de distribuição no intuito de verificar a necessidade real de se utilizar vários (ou todos) os canais de medição sugeridos com objetivo único de garantia da observabilidade do sistema.

Por meio da análise realizada fica evidente que os métodos que utilizam os valores das correntes de linha são mais eficientes no intuito de reduzir o número de medições realizadas garantindo mesmo desempenho do estimador, ou seja, quando variáveis de entrada do algoritmo não são as injeções de correntes nas barras.

Além disso, mesmo que haja a possibilidade de realizar a medição em mais de um canal de corrente por medidor instalado é necessário realizar esta análise, pois como visto no cenário 1 para todos os sistemas, mesmo sem esta limitação, a medição de todos os canais de corrente conectados a barra não se faz necessária.

Como pode ser notado para os três sistemas, a análise foi realizada na força bruta, ou seja, uma combinação de possíveis configuração de medidores de cada vez. No entanto, em sistemas maiores, o número de combinações pode ser muito grande. Portanto, torna-se necessário um método para alocação de medidores no intuito de reduzir o número de medidores utilizados a partir de um adequado posicionamento e que garanta sistemas elétricos completamente observáveis. Além disso, torna-se necessária também uma análise dos canais monofásicos de medição de corrente, já que como o trabalho se refere a sistemas de distribuição, por várias vezes é possível que haja barras que não possuem nenhum elemento conectado, o que pode gerar também a economia na instalação dos equipamentos.

Referências Bibliográficas

- Almeida, C. F. M. & Kagan, N., 2011. Harmonic State Estimation through Optimal Power Quality Monitoring. 21 International Conference on Electricity Distribution, 6-9 June, pp. 1-4.
- Almeida, C. F. M. & Kagan, N., 2011. Using Genetic Algorithms and Fuzzy Programming to Monitor Voltage Sags and Swells. IEEE Intelligent Systems, March-April, Vol. 26, No. 2, pp. 46-53.
- Arrilaga, J., Watson, N. R. & Chen, S., 2000. Power System Quality Assessment. UK: Wiley.
- Bahabadi, H., Mirzaei, A. & Moallem, M., 2011. Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Harmonic State Estimation in Unbalanced Distribution System Using Genetic Algorithms. 21st International Conference on Systems Engineering (ICSEng), pp. 100-105.
- Bhujel, D., Watson, N. R. & Jalal, T. S., 2017. Application of harmonic state estimation to a distribution system. 2017 IEEE Manchester PowerTech, Manchester, pp. 1-6.
- Breda, J. F. D., Vieira, J. C. M. & Oleskovicz, M., 2016. Three-phase harmonic state estimation for distribution systems by using the SVD technique. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5.
- DIgSILENT, 2010. Power System Analysis Software. DIgSILENT PowerFactory Version.
- Du, Z. -P., Arrillaga, J. & Watson, N., 1996. Continuous harmonic state estimation of power system. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, July, pp. vol. 143, no. 4, pp. 329-336.
- Du, Z. -P., Arrillaga, J., Watson, N. R. & Chen, S., 1999. Identification of harmonic sources of power systems using state estimation. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, January, pp. vol. 146, no. 1, pp. 7-12.
- Eldery, M. A., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. A. & Vannelli, A., 2006. A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm. IEEE Transactions on Power Delivery, April, Vol. 21, No. 2, pp. 768-777.
- Hou, S. et al., 2006. Research into Harmonic State Estimation in Power System Based on PMU and SVD. 2006 International Conference on Power System Technology, pp. 1-6.
- Kersting, W., 2001. Radial distribution test feeders. Power Engineering Society Winter Meeting, 2(IEEE), pp. 908-912.
- Ketabi, A., Nosratabadi, S. M. & Sheibani, M. R., 2012. Optimal PMU Placement with Uncertainly Using Pareto Method. Mathematical Problems in Engineering, April, pp. 1-12.
- Larson, R. E., Tinney, W. F. & Peschon, J., Mar. 1970. State Estimation in Power Systems Part I-II. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-89(3), pp. 345-363.
- Liao, H., 2006. Power system harmonic state estimation and observability analysis via sparsity maximization. IEEE Transaction on Power Delivery, pp. vol. 22, no. 1, pp. 15-23.
- Lin, Y., Wu, D. Y. & Han, F., 2014. Harmonic state estimation in power distribution network using improved complex independent component analysis. 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), Shenzhen, pp. 80-84.
- Madtharad, C., Premrudeepreechacharn, S. & Watson, N. R., 2003. Power system state estimation using singular value decomposition. Electric Power Systems Research 67, pp. 99-107.
- Madtharad, C., Premrudeepreechacharn, S., Watson, N. & Saeng-Udom, R., 2005. An optimal measurement placement method for power system harmonic state estimation. IEEE Transactions on Power Delivery, April, Volume 20, no.2, pp. 1514-1521.
- Marín, F. J., García-Lagos, F., Joya, G. & Sandoval, F., 2003. Genetic Algorithms for Optimal Placement of Phasor Measurement Units in Electrical Networks. Electronics Letters, 18 September, Vol. 39 No. 19.
- Melo, I. D., Pereira, J. L. R., Variz, A. M. & Oliveira, B. C., 2016. A PMU-based distribution system harmonic state estimation using parallel processing. 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, pp. 496-501.
- Molina-Moreno, I., Medina, A. & Cisneros-Magaña, R., 2014. Experimental time domain harmonic state estimation using partial measurements. North American Power Symposium (NAPS), Pullman, WA, pp. 1-6.

- Nguyen, H. T., Yang, J. & Choi, S., 2010. On harmonic state estimation and the evaluation of harmonic power contributions from sources. IEEE PES General Meeting, July, pp. 1-6.
- Pires, I. A., 2006 (in Portuguese). Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica. Brazil: Master Thesis, Federal University of Minas Gerais.
- Rakpenthai, C., Uatrongjit, S., Watson, N. & Premrudeepreechacharn, S., 2013. On Harmonic State Estimation of Power System With Uncertain Network Parameters. IEEE Transactions on Power Systems, Nov., Volume 28, no.4, pp. 4829-4838.
- Reis, D. C. S., Villela, P. R. C., Duque, C. A. & Ribeiro, P. F., 2008. Transmission Systems Power Quality Monitors Allocation. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-7.
- Schweppe, F. C., Wildes, J. & Rom, D. B., 1970. Power System Static-State Estimation Part I-III. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-89(1), pp. 120-135.
- Watson, N. R., Arrillaga, J. & Du, Z. P., Mar 2000. Modified symbolic observability for harmonic state estimation. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Mar, 147(2), pp. 105-111.
- Yu, K. K. C. & Watson, N. R., 2004. Three-Phase Harmonic State Estimation using SVD for Partially Observable Systems. 2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon, Volume 1, pp. 29-34.
- Yu, K. K. C., Watson, N. R. & Arrillaga, J., 2005. Error analysis in static harmonic state estimation: a statistical approach. IEEE Transaction on Power Delivery, April, pp. vol. 20, no. 2, pp. 1045-1050.