

UMA ABORDAGEM PARA O MONITORAMENTO OTIMIZADO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SÁVIO M. CARNEIRO*, ANTÔNIO J. DE O. ALVES*, RICARDO DE A. L. RABÊLO*, HERMES M. G. C. BRANCO†

* *Universidade Federal do Piauí
Teresina, Piauí, Brasil*

† *Universidade Estadual do Piauí
Teresina, Piauí, Brasil*

Emails: saviomotac@gmail.com, aj.alves@zerokol.com, ricardoalr@ufpi.edu.br, hermescb@uespi.br

Abstract— In this paper we present a multi-objective approach to solving the problem of allocation of quality monitors electrical energy distribution systems, considering topological aspects, voltage sags and the cost of monitoring. The Monte Carlo method was used in the modeling of occurrences of faults for the study of voltage sags and the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II - NSGA-II was used in solving the problem of optimal allocation of power quality monitors. The model adopted in the optimization problem formulation is intended to maximize coverage topological, minimizing the voltage dips unmonitored and minimize monitoring costs. The approach presented was submitted to the IEEE test systems, simulated in DigSILENT Power Factory 15.1 software. The results allow the user the choice of monitoring solution that best fits their technical and financial reality, thus demonstrating the good efficiency of the proposed methodology.

Keywords— Power Quality, Allocation Monitors, Monte Carlo Method, Multi-Objective Optimization and NSGA-II.

Resumo— Este trabalho apresenta uma abordagem multiobjetivo para resolução do problema de alocação de monitores de qualidade de energia elétrica em sistemas de distribuição, considerando os aspectos topológicos, os afundamentos de tensão e o custo de monitoramento. O Método de Monte Carlo foi utilizado na modelagem das ocorrências de faltas para o estudo dos afundamentos de tensão e o algoritmo *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II - NSGA-II* foi empregado na resolução do problema de alocação de monitores. A modelagem adotada na formulação do problema de otimização visa maximizar a cobertura topológica do sistema, minimizar a quantidade de afundamentos de tensão não monitorados e minimizar os custos do monitoramento. A abordagem apresentada foi submetida aos sistemas de testes do IEEE, simulado no software DigSILENT Power Factory 15.1. Os resultados obtidos permitem ao usuário a escolha da solução de monitoramento que mais se adequa a sua realidade técnica e financeira, demonstrando assim a boa eficiência da metodologia proposta.

Palavras-chave— Qualidade da Energia, Alocação de Monitores, Método de Monte Carlo, Otimização Multiobjetivo e NSGA-II.

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) estão sujeitos a uma grande quantidade de cargas não lineares e a uma variedade de distúrbios elétricos (Bollen and Gu, 2006). Dentre esses distúrbios, os afundamentos de tensão são considerados uns dos mais sérios problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) enfrentados tanto pelas concessionárias quanto pelos consumidores, sejam eles comerciais, residenciais e principalmente os industriais devido aos prejuízos financeiros ocasionados pelo mau funcionamento ou parada do processo de produção (Branco et al., 2015).

Desta forma, monitorar constantemente a QEE é essencial para identificar os distúrbios existentes e corrigir possíveis falhas no plano de controle desses eventos. Além disso, um monitoramento eficiente pode ser utilizado em diversas aplicações, tais como: diagnóstico das condições de operação, localização de eventos associados a falta de qualidade de QEE, compartilhamento de informações entre locais remotos, estudo da propa-

gação dos eventos relacionados a QEE, avaliação dos custos envolvidos na QEE, aperfeiçoamento dos programas de manutenção preventiva, entre outros (Eldery et al., 2006).

Monitorar a QEE de um SEP não é uma atividade trivial, pois os equipamentos de medição possuem um alto custo, o que torna impraticável o monitoramento completo (Ali et al., 2016). Alternativamente, o monitoramento pode ser realizado considerando apenas alguns pontos estratégicos do sistema, o que leva a um novo problema: a identificação dos melhores pontos de instalação dos monitores. Por questões técnicas e operacionais, no contexto da QEE, não há nenhum conhecimento prévio sobre os locais em que os monitores devem ser instalados de forma a proporcionar a melhor visão geral da situação enfrentada pelos SEPs. Além disso, a maioria dos distúrbios tem um caráter estocástico, o que também dificulta um plano de monitoramento contínuo (Espinosa-Juárez and Hernandez, 2007).

Diante deste contexto, várias metodologias de alocação otimizada de monitores de QEE em SEPs

estão presentes na literatura. Por exemplo, há estudos que visam reduzir a quantidade de monitores instalados por meio de técnicas de estimação de valores da tensão em pontos não monitorados (Almeida and Kagan, 2011). Outros buscam assegurar uma cobertura completa dos a undamentos de tensão (Espinosa-Juarez et al., 2009). Há também estudos que estão voltados para a garantia da cobertura redundante no monitoramento desses eventos (Salim and Nor, 2010). Existem trabalhos que buscam empregar a alocação otimizada de monitores para identificação da localização da ocorrência de faltas (Lotfifard et al., 2011; Majidi et al., 2015). Há ainda trabalhos relatando a otimização da alocação para monitoramento de distorções harm nicas (Muscas et al., 2007), bem como na localização da origem de flutuações de tensão que podem ser observadas por cintilação (Moaddabi et al., 2008).

Em todos os trabalhos analisados foi identificada a preocupação dos autores em fornecer soluções com o menor custo possível, desconsiderando a relação custo/benefício existente entre o investimento a ser realizado e a qualidade do monitoramento resultante desse investimento. Como consequência, soluções que demandam um investimento um pouco maior podem ser desprezadas, mesmo possuindo uma melhor relação custo/benefício em comparação com a solução de menor custo.

Este trabalho apresenta uma abordagem multiobjetivo para resolução do problema de alocação de monitores de QEE em Sistemas de Distribuição (SD), considerando os aspectos topológicos, os a undamentos de tensão e o custo de monitoramento. Dessa forma, objetiva-se fornecer soluções que maximizem a cobertura topológica do sistema, minimizem a quantidade de a undamentos de tensão não monitorados e minimizem os custos do monitoramento. A abordagem foi aplicada nos sistemas elétricos de teste do IEEE (Kersting, 1991) e, como resultado, a metodologia forneceu um conjunto de soluções otimizadas que permitiram uma análise mais criteriosa do custo/benefício de cada cenário proposto.

Esta nova abordagem traz como principais contribuições o estabelecimento de uma metodologia de alocação otimizada de monitores que facilita a tomada de decisão guiada pelo orçamento disponível para investimento da concessionária e a utilização do Método de Monte Carlo (MMC) (Newman et al., 1999) na modelagem do comportamento dos tipos de faltas em conjunto com o Método de Posi o de Faltas (Bollen, 2000) para a definição dos pontos de monitoramento.

O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 explica o funcionamento da abordagem desenvolvida. Na seq ncia, a Seção 3 descreve o sistema elétrico utilizado nos testes. Em seguida, os resultados obtidos são apresentados na Seção

4. Finalizando o artigo, a Seção 5 apresenta as conclusões.

2 ABORDAGEM PROPOSTA

Esta seção apresenta a modelagem multiobjetivo para o problema de alocação otimizada de monitores de QEE em sistemas de distribuição. Todas as etapas da abordagem são detalhadas, iniciando pela representação computacional adotada para os SDs na Subseção 2.1. Logo após, é definido o conceito do vetor de alocação na Subseção 2.2 e, por fim, as funções objetivo são formalizadas na Subseção 2.3.

2.1 Representação Computacional do Sistema de Distribuição

A resolução de um Problema de Otimização Multiobjetivo (POM) necessita, primeiramente, da definição de uma estrutura adequada para a representação computacional do problema. Nesta abordagem a estrutura de dados de árvore foi escolhida para a representação do SD. Essa escolha foi baseada na equivalência existente entre um SD e a estrutura de  rvore.

Para exemplificar, pode-se estabelecer as seguintes relações: as barras de um sistema podem ser comparadas aos nós de uma árvore, as ligações entre barras podem ser vistas como as arestas que conectam os nós e a presença de hierarquia entre os diversos níveis do sistema é a característica primordial de uma  rvore. A eficiência apresentada por essa estrutura na representação de um SD já foi explorada por outros autores em trabalhos existentes na literatura, como o visto em (Won and Moon, 2008).

2.2 Vetor de Alocação

A indicação se uma determinada barra b_i é monitorada ou não é realizada por meio do vetor de alocação (X), que possui um elemento para cada barra existente no SD. Os valores possíveis para o vetor de alocação foram definidos como sendo 0 (zero) ou 1 (um), no qual o primeiro representa a ausência de um monitor na barra correspondente e o segundo representa a situação contrária, conforme a Equação 1:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se existe monitor instalado na barra } b_i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

2.3 Definição das Funções Objetivo

A formulação das funções objetivo constituem uma importante etapa na resolução de um POM, pois são por meio delas que as soluções podem ser mensuradas. A seguir, as funções objetivo para o

problema de alocação otimizada de monitores de QEE em sistemas de distribuição são formalizadas.

2.3.1 Custo do Monitoramento

Considerando que o custo da instalação dos monitores em uma barra b_i é representado por p_i , o custo total do monitoramento do sistema é determinado pelo produto entre o vetor de alocação X e o vetor de custos P . Portanto, o primeiro objetivo é minimizar a Equação 2:

$$f_1(X) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot x_i \quad (2)$$

em que n representa o número de barras existentes no SD.

2.3.2 Cobertura Topológica

Ao analisar a cobertura topológica do sistema, algumas regras extraídas do trabalho de Won e Moon (2008) foram usadas para auxiliar a definição dos pontos de instalação dos monitores no sistema. A definição de cada regra é dada a seguir:

Regra 1: Se existem N linhas conectadas a uma barra, então existem N pontos possíveis de instalação para os monitores. Porém, somente   necessário conhecer as correntes de $(N-1)$ destas linhas, já que uma das linhas pode ser computada conhecendo-se todas as outras (Lei de Kirchhoff das Correntes). A situação em que não se consegue determinar todas as correntes nas linhas conectadas a um determinado não é tida como uma ambiguidade topológica (Won et al., 2006).

Regra 2: É preponderante instalar monitores nas derivações das cargas, uma vez que a maioria dos prejuízos causados pelos problemas de QEE aparecem nas cargas dos consumidores, tornando-os importantes pontos de monitoramento.

Regra 3: Os monitores devem ser instalados em ramais com muitos descendentes, o que possibilita monitorar uma área maior. Com base nesta regra, os monitores tendem a ser instalados em pontos próximos a fonte de energia.

O próximo passo foi o estabelecimento de uma forma de mensurar cada uma das regras apresentadas. Assim, para a *Regra 1* tem-se que uma barra b_i é dita ambígua se não for possível determinar as correntes de todas as linhas a ela conectadas, conforme a Equação 3:

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{se } b_i \text{ pode ter sua corrente determinada} \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

Desta forma, a ambiguidade total de um SD com n barras, dado um arranjo de monitores X , é expressa por:

$$A(X) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i \quad (4)$$

Para a *Regra 2* temos que se a quantidade de carga existente em uma barra b_i é dada por l_i , o total de cargas monitoradas em um SD, dado um arranjo de monitores X , é expresso por:

$$L(X) = \sum_{i=1}^n l_i \cdot x_i \quad (5)$$

Neste modelo, considerou-se o somatório das potências das cargas conectadas nas três fases como a carga total conectada à barra b_i . As cargas distribuídas nas linhas foram consideradas como pertencentes às barras de origem da linha.

Por fim, a *Regra 3*   mensurada pela extensão da área que pode ser monitorada a partir de uma barra b_i , ou seja, pela quantidade de descendentes de uma barra b_i somada à própria barra, aqui denotada por d_i . Desta forma, a área total monitorada de um SD, dado um arranjo de monitores X , é expressa por:

$$D(X) = \sum_{i=1}^n d_i \cdot x_i \quad (6)$$

A função objetivo que avalia a qualidade da cobertura topológica de um SD, dado um arranjo de monitores X , é composta pelas combinações das Equações 4, 5 e 6 e seu valor foi normalizado no intervalo de 0 a 1. Assim, o segundo objetivo é maximizar a Equação 7:

$$f_2(X) = \frac{L(X)}{L_{total}} * w_1 + \frac{D(X)}{D_{total}} * w_2 + \left(1 - \frac{A(X)}{n}\right) * w_3 \quad (7)$$

em que, L_{total} é o total de carga existente no SD, D_{total} é a área total do SD, n é o número de barras do SD e w_1 , w_2 e w_3 representam pesos, com $w_1 + w_2 + w_3 = 1$.

2.3.3 Cobertura de Afundamentos

Para a definição dos pontos de monitoramento, a abordagem proposta utiliza como base o Método de Posição de Faltas. Entretanto, a Matriz de Tensão Durante a Falta (MTDF) gerada por esta abordagem baseia-se na série histórica de faltas ocorridas em um SD, cujo comportamento foi modelado utilizando-se o Método de Monte Carlo. Durante o processo de construção da MTDF foram considerados curtos-circuitos francos. O pseudocódigo do método utilizado para a geração da MTDF é apresentado na Figura 1.

De posse da MTDF, um limiar e deve ser definido para a construção da Matriz de Cobertura (MC_e), que possui as mesmas dimensões da MTDF e   preenchida atribuído-se o valor 1 às posições da MC_e correspondentes a valores abaixo

```

1.  função gerarMTDF()
2.      para i = 1 até TOTAL_SERIE_TEMPORAL faça //Percorre toda a série temporal
3.          para b = 1 até TOTAL_BARRAS faça //Aplica a falta em cada barra do sistema
4.              tipoFalta = proximaFaltaPeloMMC() //Obt m o próximo tipo de falta a ser
5.                  aplicado usando o MMC
6.              executarCurtoCircuito(tipoFalta) //Aplica o tipo de falta obtido na barra atual
7.          para b = 1 até TOTAL_BARRAS faça //Percorre todas as barras do sistema
8.              guardarValoresTensao(b) //Guarda o valor da tensão remanescente na barra
9.
10.     mtdf = calcularMediaValores() //Calcula o valor médio da tensão
11.                                     remanescente de todas as barra
12.     retorne mtdf //Retorna a mtdf gerada
13. fim

```

Figura 1: Pseudocódigo da geração da MTDF.

do limiar e o valor 0 às posições com valores acima do limiar, conforme Equação 8:

$$MC_e = \begin{cases} 1, & \text{se } mtdf_i < e \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (8)$$

Sendo que $mtdf_i$ é o elemento i da MTDF gerada e e é o limiar para indicar abaixo de qual valor de tensão o monitor de qualidade de energia elétrica deve passar a registrar as ocorrências.

A Equação 9 representa o produto interno entre MC_e e o vetor de alocação (X) que resulta no vetor (V), no qual as posições com valores maiores que zero representam as barras em que os afundamentos de tensão podem ser monitorados pelos monitores alocados, considerando o limiar estabelecido.

$$V = MC_e \cdot X \quad (9)$$

Contudo, nem todas as posições deste vetor com valor igual a zero implicam, necessariamente, em afundamentos de tensão não monitorados. Uma posição do vetor V pode ser igual a zero porque todos os elementos de uma linha da matriz MC_e são iguais a zero, o que resulta de não haver afundamentos de tensão naquela linha de MC_e com valores abaixo do limiar estabelecido. Portanto, é fundamental garantir que esta situação não influencie na determinação da quantidade de afundamentos de tensão que não são percebidos por um arranjo de monitores. Esta garantia   obtida pela multiplicação da matriz MC_e por um vetor que possua todas as posições iguais a 1, como mostra a Equação 10. O resultado possibilita afirmar que se alguma posição do vetor resultante ($\bar{V}$) for igual a zero é devido ao fato desta linha da matriz MC_e ter todos os elementos iguais a zero.

$$\bar{V} = MC_e \cdot 1 \quad (10)$$

Dispondo dos vetores V e $\bar{V}$, o número de barras do SD nas quais os afundamentos de tensão podem ser monitorados é dado pela Equação 11:

$$u_i = \begin{cases} 1, & \text{se } v_i = 0 \text{ e } \bar{v}_i > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (11)$$

na qual as posições com valor igual a 1 no vetor U indicam as barras em que os afundamentos de tensão não são monitorados. Desta forma, o terceiro objetivo do problema de alocação é minimizar a Equação 12:

$$f_3(X) = \sum_{i=1}^n u_i \quad (12)$$

3 SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO

A abordagem proposta foi submetida ao sistema de teste de 13, 34 e 37 barras do IEEE (Kersting, 1991). No entanto, este trabalho analisa apenas os resultados obtidos com o sistema de 34 barras, e por esta razão os demais sistemas não são detalhados nesta seção.

O circuito IEEE de 34 barras é um alimentador real localizado no Arizona (EUA), no qual é possível evidenciar as seguintes características: opera com tensão nominal de 24,9 kV; é um sistema com linhas muito longas e é bastante carregado; apresenta um transformador abaixador para um pequeno trecho que opera com tensão nominal de 4,16 kV; apresenta poucas ramificações laterais; cargas modeladas como concentradas e como distribuídas; e cargas desequilibradas.

4 RESULTADOS

Para fins de validação, a abordagem proposta neste artigo foi testada no circuito alimentador apresentado na Seção 3. Por motivo de simplificação, em todos os testes foi considerado que o custo de instalação dos monitores em qualquer barra é igual e com valor unitário. Essa simplificação em nada prejudica a validação da abordagem e ainda facilita a identificação da quantidade de monitores necessários.

O comportamento de cada SD, em face as ocorrências de faltas, foi simulado no software DigSILENT Power Factory 15.1. O MMC foi aplicado na modelagem do comportamento das ocorrências de faltas no SD, sendo a frequência de ocorrência de faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas definidas em 80%, 15% e 5%, respectivamente. Foram

Tabela 1: Algumas soluções pertencentes à Fronteira de Pareto para o problema de alocação de monitores de QEE no SD IEEE de 34 barras para um limiar de tensão de 0,9 p.u..

Solução	$f_1(X)$	$f_2(X)$	$f_3(X)$	Barras monitoradas
1	1	0	0,0265	b_{33}
2	1	3	0,0765	b_2
3	1	13	0,1263	b_{18}
4	2	0	0,1528	b_{18}, b_{33}
5	2	3	0,2028	b_2, b_{18}
6	2	13	0,2314	b_{18}, b_{29}
7	4	0	0,3344	$b_2, b_{18}, b_{29}, b_{33}$
8	4	3	0,3806	b_2, b_5, b_{18}, b_{29}
9	8	0	0,6138	$b_2, b_9, b_{11}, b_{16}, b_{18}, b_{23}, b_{29}, b_{33}$
10	8	3	0,6427	$b_2, b_9, b_{11}, b_{15}, b_{16}, b_{18}, b_{23}, b_{29}$
11	18	0	0,9003	$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{15}, b_{16}, b_{18}, b_{23}, b_{29}, b_{30}, b_{33}$
12	27	0	0,9925	$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}, b_{17}, b_{18}, b_{19}, b_{20}, b_{22}, b_{23}, b_{29}, b_{30}, b_{31}, b_{32}, b_{33}$
13	30	0	0,9957	$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}, b_{17}, b_{18}, b_{19}, b_{20}, b_{22}, b_{23}, b_{26}, b_{27}, b_{28}, b_{29}, b_{30}, b_{31}, b_{32}, b_{33}$

utilizados valores iguais para os pesos w_1 , w_2 e w_3 da Equação 7, no valor de 0,33. A abordagem considerou um período de 1000 unidades de tempo nas simulações. O algoritmo de otimização utilizado foi o NSGA-II (Deb et al., 2002) e os seus parâmetros foram ajustados conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros utilizados no NSGA II.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	500
Quantidade de gerações	100
Método de seleção	Torneio de 16
Método de <i>crossover</i>	<i>Single Point</i>
Probabilidade de <i>crossover</i>	0,75
Método de mutação	<i>Bit Flip</i>
Probabilidade de mutação	0,01

Os experimentos realizados analisaram o comportamento da abordagem para o limiar de 0,9 p.u.. A Fronteira de Pareto (FP) retornada pelo algoritmo de otimização é apresentada na Figura 2 e algumas soluções pertencentes a ela são transcritas na Tabela 1.

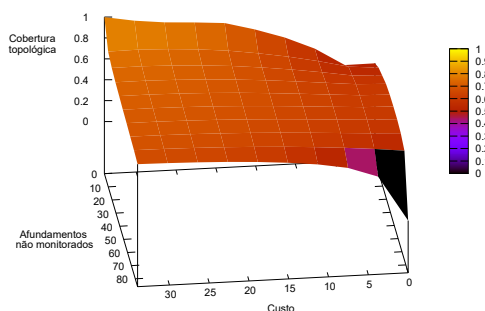


Figura 2: Fronteira de Pareto obtida para o limiar de 0,9 p.u. no circuito alimentador IEEE de 34 barras.

A construção de um plano de monitoramento é uma atividade complexa que, via de regra, é guiada pelo orçamento disponível e visando atingir um certo grau de eficiência para um determinado conjunto de critérios. Contudo, essa tarefa pode ser facilitada quando a FP é conhecida.

O responsável pela a elaboração de uma estratégia de monitoramento poderia definir como prioridade a cobertura total de afundamentos de tensão, ou seja, soluções cujo total de afundamentos não monitorados seja igual a zero. Partindo dessa premissa, uma análise de menor custo levaria a escolha da solução 1 (com apenas 1 monitor). No entanto, o ganho na Cobertura Topológica ($f_3(X)$) proporcionado pela Solução 4 (com 2 monitores) é quase seis vezes superior. A medida que o número de monitores aumenta, percebe-se que o ganho evidenciado na análise anterior vai reduzindo até chegar ao ponto em que o investimento necessário não justifica o benefício alcançado. Isso fica claro ao se analisar as soluções 12 e 13 (com 27 e 30 monitores, respectivamente), em que o aumento de custo de aproximadamente 11% implica em um ganho de apenas 0,0032 na Cobertura Topológica. Portanto, por meio da abordagem proposta é possível não só identificar um conjunto de soluções otimizadas para um monitoramento como também detectar a existência de zonas de saturação, facilitando a tomada de decisões e evitando o desperdício de recursos que não se traduzem em ganho real na qualidade do monitoramento.

Outro ponto interessante de ser observar ao analisar a Tabela 1 é que soluções com o mesmo custo podem levar a situações completamente diferentes, como pode ser visto nas soluções com custos iguais a 1, 2, 4 e 8, em que o número de afundamentos não monitorados varia de maneira substancial.

5 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma abordagem para alocação otimizada de monitores de qualidade de energia elétrica para sistemas de distribuição (SD) por meio da aplicação de técnicas de otimização multiobjetivo visando fornecer soluções que maximizem a cobertura topológica do sistema, minimize a quantidade de afundamentos de tensão não monitorados e minimize os custos do monito-

ramento.

Os resultados obtidos permitem o auxílio à tomada de decisões sobre as quantidades e localização dos monitores que devem ser instalados no sistema, possibilitando que a concessionária defina uma estratégia de monitoramento baseada nos recursos disponíveis e evitando gastos desnecessários que não se traduzem em melhoria do monitoramento.

Uma limitação da metodologia proposta está na necessidade de utilização de dados estatísticos fidedignos à realidade das ocorrências de faltas no SD, pois esses dados impactam diretamente na MTDF gerada e, por consequência, nos cálculos de afundamentos de tensão.

Agradecimentos

Este trabalho é resultado do Projeto de P&D: Metodologia para alocação otimizada de monitores de qualidade da energia elétrica em sistemas de distribuição pelo emprego de técnicas inteligentes - 0042/2014, financiado pela Eletrobrás Distribuição Piauí.

REFERÊNCIAS

- Ali, S., Wu, K., Weston, K. and Marinakis, D. (2016). A machine learning approach to meter placement for power quality estimation in smart grid, *IEEE Transactions on Smart Grid* **7**(3): 1552–1561.
- Almeida, C. F. M. and Kagan, N. (2011). Using genetic algorithms and fuzzy programming to monitor voltage sags and swells, *IEEE Intelligent Systems* (2): 46–53.
- Bollen, M. H. (2000). *Understanding power quality problems*, Vol. 3, IEEE press New York.
- Bollen, M. H. and Gu, I. (2006). *Signal processing of power quality disturbances*, Vol. 30, John Wiley & Sons.
- Branco, H. M., Oleskovicz, M., Delbem, A. C., Coury, D. V. and Silva, R. P. (2015). Optimized allocation of power quality monitors in transmission systems: A multiobjective approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **64**: 156–166.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* **6**(2): 182–197.
- Eldery, M., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. and Vannelli, A. (2006). A novel power quality monitoring allocation algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery* **21**(2): 768–777.
- Espinosa-Juárez, E. and Hernandez, A. (2007). A method for voltage sag state estimation in power systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **22**(4): 2517–2526.
- Espinosa-Juarez, E., Hernandez, A. and Olguin, G. (2009). An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sags monitors, *IEEE Transactions on Power Delivery* **24**(4): 2034–2042.
- Kersting, W. (1991). Radial distribution test feeders, *IEEE Transactions on Power Systems* **6**(3): 975–985.
- Lotfifard, S., Kezunovic, M. and Mousavi, M. J. (2011). Voltage sag data utilization for distribution fault location, *IEEE Transactions on Power Delivery* **26**(2): 1239–1246.
- Majidi, M., Arabali, A. and Etezadi-Amoli, M. (2015). Fault location in distribution networks by compressive sensing, *IEEE Transactions on Power Delivery* **30**(4): 1761–1769.
- Moaddabi, N., Sadeghi, S. and Abyaneh, H. A. (2008). Minimization of monitoring locations for detection of flicker sources by the direction of propagation method, *IEEE 2nd International Conference on Power and Energy (PECon)*, IEEE, pp. 307–312.
- Muscas, C., Pilo, F., Pisano, G. and Sulis, S. (2007). Optimal measurement devices allocation for harmonic state estimation considering parameters uncertainty in distribution networks, *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, IEEE, pp. 1–6.
- Newman, M. E., Barkema, G. T. and Newman, M. (1999). *Monte Carlo methods in statistical physics*, Vol. 13, Clarendon Press Oxford.
- Salim, F. and Nor, K. (2010). Voltage sags observation through optimal monitor locations, *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, IEEE, pp. 1–6.
- Won, D.-J., Chung, I.-Y., Kim, J.-M., Moon, S.-I., Seo, J.-C. and Choe, J.-W. (2006). A new algorithm to locate power-quality event source with improved realization of distributed monitoring scheme, *IEEE Transactions on Power Delivery* **21**(3): 1641–1647.
- Won, D.-J. and Moon, S.-I. (2008). Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology, *IEEE Transactions on Power Delivery* **23**(1): 288–295.