

Projeto de ilhamento controlado em redes de energia elétrica utilizando um método grafo-algébrico.

RESUMO

Rafael Bratífich

bratifich@alunos.utfpr.edu.br

Discente, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPr, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Edson Aparecido Rozas

Theodoro

edsontheodoro@utfpr.edu.br

Docente, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPr, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

OBJETIVO: O problema de ilhamento controlado em redes de energia elétrica pode ser modelado como um problema de otimização (busca/pesquisa) para determinar o melhor conjunto de corte no grafo associado ao sistema elétrico de potência para satisfazer algum critério específico. **MÉTODOS:** Neste trabalho um novo método grafo-algébrico baseado no processo de fatoração triangular inferior superposto seletivo da matriz nó-ramo do grafo associado à rede elétrica é proposto, visando a realização do projeto de ilhamentos controlados (intencionais). Esta nova proposta é aplicada em redes de energia elétrica de pequeno porte. **RESULTADOS:** A metodologia permitiu encontrar um conjunto único de corte sem a necessidade de enumerar todas as possíveis soluções do problema. **CONCLUSÕES:** A nova metodologia possibilita encontrar a solução ótima para o problema sem enumerar todas as possíveis soluções utilizando um processo de busca não enumerativa mas guiada através do estabelecimento de uma função domínio, ao invés de uma função custo usual. O emprego da função domínio permitiu maior velocidade de processamento e simplificou a implementação do problema.

PALAVRAS-CHAVE: Teoria de grafos, Ilhamento controlado, Redes de energia elétrica.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de energia elétrica está impulsionando os sistemas elétricos de potências (SEPs) a operarem mais próximos dos seus limites de estabilidade angular e aumentando o número de contingências críticas que podem gerar o colapso do sistema (perda de sincronismo entre os geradores).

Quando ocorre a perda do sincronismo a última medida corretiva é a separação física da rede elétrica permitindo aos subsistemas autonomia de operação (os geradores coerentes são agrupados permanecendo em sincronismo) e assim possibilitando a continuidade do fornecimento de energia (VITTAL; HEYDT, 2009).

Deste modo, o desenvolvimento do projeto de ilhamento controlado (intencional) apresenta um elevado grau de dificuldade devido ao seu estudo propor uma separação física intencional da rede de transmissão de energia conservando o equilíbrio dos subsistemas e evitando o colapso do SEP após a ocorrência de um distúrbio crítico irresolúvel para a operação da rede elétrica de forma totalmente interconectada (SOUZA, 2014).

Assim, o projeto de ilhamento controlado é, geralmente, dividido em duas etapas: a primeira estuda a dinâmica do SEP em situação de contingência para a determinação dos grupos de geradores coerentes (YOU et al., 2004) e a segunda analisa o conjunto de corte (equipamentos a serem desligados) a ser adotado. A pesquisa do conjunto de corte equivale a um problema de otimização no qual deve-se proporcionar o melhor atendimento aos objetivos descritos na função custo (otimização) do problema, tais como: o menor corte de carga (promovendo o melhor balanceamento de carga-geração nas ilhas isoladas), o menor número de equipamentos de transmissão desligados, a menor interrupção de contratos de compra e venda de energia elétrica, entre outros (WANG; VITTAL, 2004). Neste contexto, a utilização da teoria grafo-algébrica apresenta grande vantagem de possibilitar a representação topológica do SEP na forma de matrizes incidência nas quais o emprego de métodos de seleção e pesquisa tornam-se mais eficientes devido as características estruturais intrínsecas dessas matrizes para a realização de cálculos e extração de informações (SAVULESCO, 1980).

Diante da importância dos estudos envolvendo projetos de ilhamento controlado (intencional) e a eficiência dos métodos grafo-algébricos, existem inúmeras pesquisas direcionada para a seleção do melhor conjunto de corte utilizando tais métodos de busca: o método para interrupção mínima de fluxo de potência proposto por Wang e Vittal (2004), o método para estabelecimento de ilhas dinamicamente estáveis a fim de evitar blecautes parciais no sistema proposto por Sun et al. (2006) e o método para minimizar a interrupção do fornecimento de energia para as cargas (evitar o corte de carga) proposto por Ding et al. (2015).

Neste artigo é apresentada uma nova proposta, para o projeto de ilhamento controlado, baseada no método proposto nos trabalhos de Theodoro et al. (2014) e Souza (2014). A nova proposta permite a obtenção do conjunto de corte ótimo sem a geração de diversos candidatos utilizando o conceito de domínio de nós do grafo (associado ao SEP). A utilização do domínio permite a realização de uma busca em largura (*Breadth-First Search - BFS*) inteligente no grafo aumento a eficiência computacional e facilitando a implementação da metodologia.

2 METODOLOGIA

Considere um grafo G associado à rede de energia elétrica nos quais os nós representam os barramentos do sistema e as arestas (ramos) os equipamentos de interconexão. A matriz incidência nó-ramo associada ao SEP é dada por:

$$H_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se o ramo } j \text{ não está conectado} \\ & \text{à barra } i \\ + |P_{ij}|, & \text{se o fluxo de potência no ramo} \\ & j \text{ entra na barra } i \\ - |P_{ij}|, & \text{se o fluxo de potência no ramo} \\ & j \text{ sai da barra } i \end{cases} \quad (1)$$

O grafo associado à rede elétrica é direcionado (dígrafo) conforme o fluxo de potência ativa na rede. Assim, a potência total (líquida) na barra i é definida por:

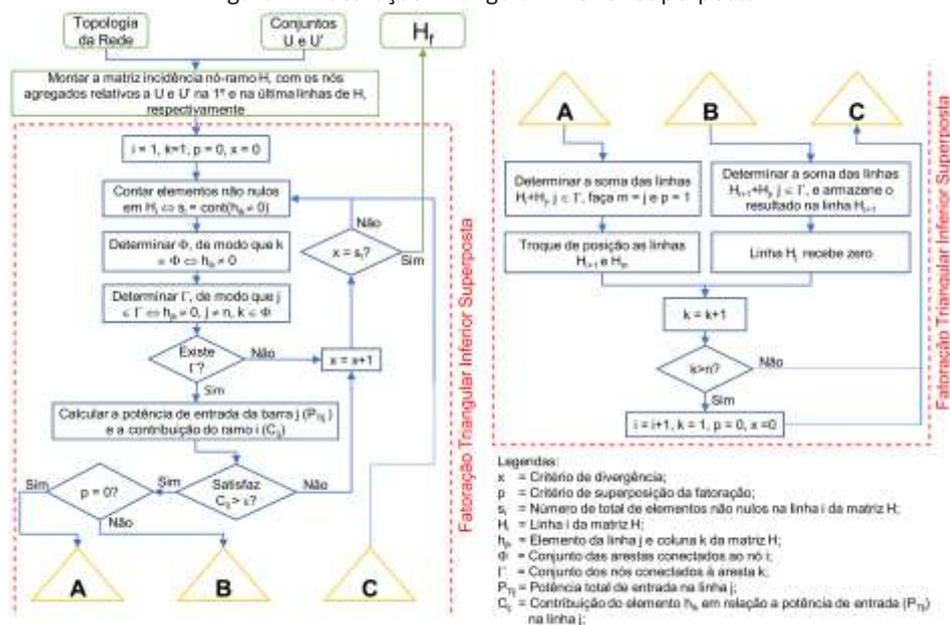
$$P_{Ti} = \sum_{h_{ij}>0} h_{ij} + \sum_{h_{ij}<0} h_{ij} = P_{TI_i} + P_{TO_i} \quad (2)$$

com P_{TI_i} sendo referente a injeções positivas de potência na barra e P_{TO_i} referente a injeções negativas de potência. Estabelece-se, também, o conceito de contribuição do ramo j para com o nó (barra) i que expressa a relação entre o fluxo de potência enviado através do ramo j e a potência total injetada na barra i por:

$$C_{ij} = \frac{|h_{ij}|}{P_{TI_i}} \quad (3)$$

A função contribuição (C_{ij}) estabelece um domínio englobando um conjunto de nós (ilha) que satisfaça uma condição limite (ε) que determina se o nó analisado pertence ou não ao domínio em questão ($C_{ij} \geq \varepsilon$). O fluxograma apresentado na Figura 1 apresenta as etapas para a aplicação do método proposto neste trabalho.

Figura 1 - Fatoração Triangular Inferior Superposta



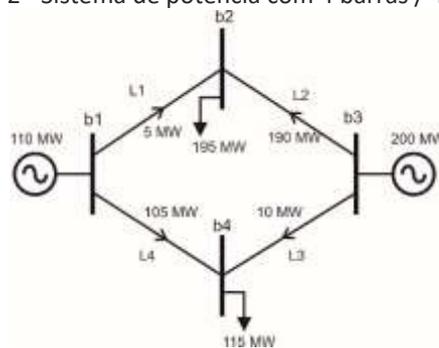
Fonte: Elaborada pelos autores.

Todos os nós adjacentes ao nó de origem são avaliados durante a fatoração através da função contribuição (C_{ij}). Os nós agregados possibilitam investigar todos os caminhos do domínio que promoverão um conjunto de corte mínimo e, portanto, a menor interrupção do fluxo entre as fronteiras das ilhas (conjuntos U e U'). O valor limite (ε) é determinado considerando-se as capacidades dos geradores conectados ao SEP de modo a representar um compromisso entre o número de equipamentos desligados e o desbalanço de potência entre as ilhas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seja o SEP composto por 2 geradores, 4 barras e 4 linhas de transmissão mostrado na Fig. 2.

Figura 2 - Sistema de potência com 4 barras / 4 linhas.



Fonte: Adaptada de SOUZA (2014, p. 60).

A matriz incidência nó-ramo (H) do grafo associado a este SEP é dada por:

$$H = \begin{bmatrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b1 & -5 & 0 & 0 & -105 \\ b2 & 5 & 190 & 0 & 0 \\ b4 & 0 & 0 & 10 & 105 \\ b3 & 0 & -190 & -10 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Propõe-se um ilhamento intencional para separar os geradores conectados às barras 1 e 3 no sistema. A função de contribuição (C_{ij}) para o domínio foi ajustada para $\varepsilon = 0,75$. Após o processo de fatoração obtém-se a matriz:

$$H_f = \begin{bmatrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b1 & -5 & 0 & 0 & -105 \\ b1 + b4 & -5 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

A linha final da matriz H_f representa o conjunto de corte das linhas a serem desligadas $C = \{L1 \text{ e } L3\}$. O conjunto de corte encontrado promoverá a interrupção do menor fluxo de potência ativa promovendo balanceamento de potência dentro de cada ilha do sistema. O método, também, permite a seleção arbitrária do barramento inicial na busca pela solução ótima. Assim, independente da seleção do barramento inicial dos geradores encontra-se o mesmo conjunto de corte para o ilhamento, como pode ser demonstrado no exemplo abaixo com a construção da matriz incidência nó-ramo (H) anterior iniciando a fatoração a partir do barramento 3 ($b3$).

$$H = \begin{bmatrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b3 & 0 & -190 & -10 & 0 \\ b2 & 5 & 190 & 0 & 0 \\ b4 & 0 & 0 & 10 & 105 \\ b1 & -5 & 0 & 0 & -105 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Propõe-se um ilhamento intencional para separar os geradores conectados às barras 1 e 3 no sistema. A função de contribuição (C_{ij}) para o domínio foi ajustada para $\varepsilon = 0,75$. Após o processo de fatoração obtém-se a matriz:

$$H_f = \begin{bmatrix} & L1 & L2 & L3 & L4 \\ b3 & 0 & -190 & -10 & 0 \\ b3 + b2 & 5 & 0 & -10 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

O mínimo global obtido no processo é $C = \{L1 \text{ e } L3\}$, verificando-se que independente do barramento inicial selecionado obtêm-se o mesmo conjunto.

4 CONCLUSÃO

O método proposto apresenta diversas vantagens como: (i) implementação simples, (ii) eficiência computacional e (iii) facilidade para o reconhecimento das fronteiras dos domínios. Todos os limites do domínio podem ser encontrados através da busca em amplitude (*BFS*) inteligente de modo otimizado sem a verificação (fatoração) de todos os elementos da matriz reduzindo o tempo computacional. Os conjuntos de corte selecionado através do ajuste do limite (ϵ) promovem a separação dos nós (barras do SEP) em domínios comp (ilhas) compatíveis reduzindo o impacto no SEP. As redes elétricas de pequeno porte investigadas corroboram a eficiência da metodologia e sua simplicidade de implementação demonstrando sua eficácia para o desenvolvimento de projeto de ilhamento controlado. Entretanto, faz-se necessário desenvolver mais estudos para otimizar a escolha do valor limite (ϵ) da função domínio dos nós e determinar seu impacto em sistemas de energia de grande porte. Esta metodologia para o projeto de ilhamento intencional também será apresentada no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017).

Project for controlled islanding in electric networks using an algebraic-graph method

ABSTRACT

OBJECTIVE: The problem of controlled islanding in electric power networks can be modeled as an optimization problem (search / research) to determine the best cutting set in the graph associated with electric power system to satisfy some specific criteria. **METHODS:** In this work a new algebraic-graph method based on selective superposed lower triangular factorization of node-branch incidence matrix of the graph associated with the power network is proposed, aiming for the project of controlled islanding (intentional). This new proposal is applied in small-sized electric power networks. **RESULTS:** The methodology is able to find a single cut-set without the need to enumerate all the possible solutions of the problem. **CONCLUSIONS:** The new methodology is able to find the optimal solution to the problem without enumerating all the possible solutions using a non-enumerative but guided search process through the establishment of a domain function, instead of a usual cost function. The use of the domain function allowed a higher processing speed and simplified the implementation of the problem solution.

KEYWORDS: Graph theory, Controlled islanding, Electric networks.

5 REFERÊNCIAS

DING, T.; SUN, H.; SUN, K.; LI, F.; ZHANG, X. Graph theory based splitting strategies for power system islanding operation. **IEEE Power & Energy Society General Meeting**, v. 1, p. 1-5, 2015.

SAVULESCO, S. C. **Grafos, Dígrafos e Redes Elétricas: aplicações na pesquisa operacional**. Instituto Brasileiro de Edições Científicas, São Paulo – SP, 1980.

SOUZA, P. V. L. **Um Método Grafo-Algébrico para Projeto de Ilhamento Controlado em Sistemas Elétricos de Potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SUN, K.; ZHENG, D. Z.; LU, Q. Searching for Feasible Splitting Strategies of Controlled System Islanding. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 153, n. 1, p. 89-98, 2006.

THEODORO, E. A. R.; MANSOUR, M. R.; SOUZA, P. V. L.; ALBERTO, L. F. C. A Comprehensive Algebraic-Graph Approach for Intentional Islanding in Power System Grids: Solutions and Regularization. **XX Congresso Brasileiro de Automática**, v. 1, p. 1380-1387, 2014.

VITTAL, V.; HEYDT, G. The Problem of Initiating Controlled Islanding of a Large Interconnected Power System Solved as a Pareto Optimization. **IEEE PES Power System Conference and Exposition**, v. 1, p. 1-7, 2009.

WANG, X.; VITTAL, V. System Islanding using Minimal Cutsets with Minimum Net Flow. **IEEE PES Power System Conference and Exposition**, v. 1, p. 379-384, 2004.

YOU, H.; VITTAL, V.; WANG, X. Slow Coherency-based Islanding. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 1, p. 483-491,

Recebido: 31 ago. 2017.

Aprovado: 02 out. 2017.

Como citar:

BRATIFICH, R. et al. Projeto de ilhamento controlado em redes de energia elétrica utilizando um método grafo-algébrico. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Rafael Bratifich

Avenida Alberto Carazzai, 1640, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

Direito autoral:

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

