

REDUÇÃO DO IMPACTO DA CONEXÃO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS DIRETAMENTE ACOPLADOS NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Abstract— This paper presents a method to place, size, coordinate and adequate protection systems in electric distribution networks with directly-coupled distributed generation (DG). It is noticeable the increase in DG penetration in distribution networks (DN), bringing several benefits to the operation of these grids. However, since the majority of DN are already built, consolidated and with protective devices placed and sized for certain current level and directionality, adding DG in these systems may cause serious problems. This paper introduces a method to determine the allocation of protective devices, as well as their coordination and sizing, depending on DG location. Firstly, recloser allocation problem is treated in a multiobjective approach, aiming to reduce reliability indices. To solve the optimization problem, particle swarm optimization is applied. Fuse cutouts allocation is determined by a set of rules, developed considering feeders particularities, such as loads importance, physical location, among others. After protective devices allocation, DG insertion is considered, and its effects on the protection coordination are evaluated. In order to adapt DN to receive DG, fault current limiters (FCL) are placed to avoid fuse cutouts miscoordination, as well as recloser - fuse miscoordination. Moreover, recloser operation is analyzed to determine the operational philosophy in order to avoid misoperation in the presence of DG. Graphical and numerical results are presented for the considered test systems to show the functionality and performance of the proposed method.

Keywords— Protection Systems; Distribution Systems; Fault current limiters; Distributed generation

Resumo— Este artigo apresenta um método para alocar, dimensionar, coordenar e adequar sistemas de proteção em redes de distribuição elétrica com geração distribuída diretamente acoplada (GD). É notável o aumento da penetração da DG em redes de distribuição (RD) de energia, trazendo vários benefícios para o funcionamento dessas redes. No entanto, uma vez que a maioria das RD já foi construída, consolidada e com dispositivos de proteção alocados e dimensionados para determinado nível de corrente e direcionalidade, adicionar GD nesses sistemas pode causar sérios problemas. Este artigo apresenta um método para determinar a alocação de dispositivos de proteção, bem como sua coordenação e dimensionamento, dependendo da localização da DG. Em primeiro lugar, o problema de alocação do religador é tratado em uma abordagem multiobjetiva, com o objetivo de reduzir os índices de confiabilidade. Para resolver o problema de otimização, a metaheurística enxame de partículas é aplicada. A alocação de elos fusíveis é determinada por um conjunto de regras, desenvolvidas considerando as particularidades dos alimentadores, tais como cargas de importância, localização física, entre outros. Após a alocação dos dispositivos de proteção, a inserção da DG é considerada e seus efeitos na coordenação da proteção são avaliados. Para adaptar a RD para receber a GD, os limitadores de corrente de falta (FCL) são considerados para evitar a descoordenação entre elos fusíveis, bem como entre elos fusíveis e religadores. Além disso, a operação do religador é analisada para determinar a filosofia operacional, a fim de evitar o mau funcionamento na presença da GD. Os resultados gráficos e numéricos são apresentados para o sistema teste considerado para mostrar a funcionalidade e o desempenho do método proposto.

Palavras-chave— Sistemas de proteção, Sistemas de distribuição, limitadores de corrente de falta, Geração distribuída.

1 Introdução (Estilo: <Secao>, 20pt antes)

A operação tradicional de sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) está mudando devido ao desenvolvimento de novas tecnologias que buscam aperfeiçoar o fornecimento de energia elétrica. Com as redes elétricas inteligentes em evidência, também cresce a utilização de geração distribuída (GD) nos SDEE. Estas fontes são capazes de reduzir perdas, melhorar a qualidade de energia e o perfil de tensão, entre outras vantagens (Ochoa et al, 2006). Entretanto, o aumento da penetração de GD causa problemas que devem ser considerados, como dificuldades no controle de tensão, problemas na gestão de energia reativa, etc. (Menditeze, 2016). Sistemas de distribuição apresentam seus dispositivos de proteção alocados antes da consideração de penetração da GD, tendo sua coordenação estabelecida. A contribuição da GD para uma falta altera a sensibilidade dos dispositivos de proteção, causando diversos problemas de descoordenação, demandando novos estudos de proteção (Kennedy et al, 2016). Buscando solucionar problemas de descoordenação, diversos autores desenvolveram métodos para reduzir a influência da GD na coordenação dos dispositivos de proteção. Em (Mahat et al, 2011) é apresentada uma

proteção de sobrecorrente adaptativa em SDEE com GD. O método considera a detecção de ilhamento, resincronização com a rede e características de relés à jusante como dados de entrada, medindo tensão, corrente e frequência. Entretanto, o método deve calcular o tempo de eliminação da falta para modificar os ajustes dos relés, então, permitirá ocorrer a falta. Além disso, elos fusíveis e religadores não são contemplados pelo método, o que faz que este não seja aplicável em SDEE reais. Os autores em (Kumar et al, 2016) afirmam ter desenvolvido um mecanismo adaptativos para relés para a proteção completa em SDEE com GD. Apesar de o algoritmo de Fourier para rastrear os sinais do sistema de potência se mostrou eficiente, o método não é aplicável na completa proteção dos SDEE, visto que os autores apenas consideram a proteção composta por relés de sobrecorrente, ignorando os demais dispositivos. Em (Hussain et al, 2013) os autores afirmam terem resolvido a descoordenação religador – elo fusível nos SDEE com GD. O método consiste em alocar limitadores de corrente de falta para reduzir a corrente de falta até a zona de coordenação determinada pelas curvas tempo x corrente de religadores e elos fusíveis. Porém, este método não leva em conta a possibilidade de a GD contribuir para a falta durante a operação rápida do religador, o que faz essa metodologia ser infatível.

Neste trabalho, primeiramente é apresentado um método inovador para a determinação da alocação e dimensionamento dos dispositivos de proteção em SDEE. Em um segundo momento, é solucionado o problema da descoordenação religador – elo fusível em SDEE com GD, através da alocação de limitadores de corrente de falta, em uma abordagem multiobjetivo. Além disso, é verificada a filosofia operacional dos religadores de acordo com a posição da GD, de modo a evitar que seja permitido a esta contribuir para a falta durante a atuação rápida do religador.

2 Definição do Problema

2.1 Influência da GD na proteção de sistemas de distribuição de energia elétrica

Um alimentador tradicional de distribuição consiste em uma seção principal e derivações que alimentam as cargas radialmente. O sistema de proteção é composto por um relé de sobrecorrente instalado na subestação, religadores e elos fusíveis protegendo as derivações que alimentam os transformadores de distribuição.

Com a inserção de GD (geradores síncronos diretamente acoplados), a corrente de falta será a soma da contribuição da subestação e da GD, como mostrado na Figura 1.

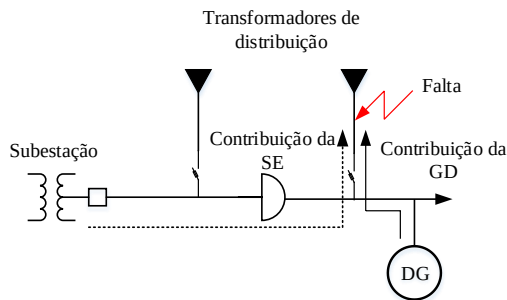


Figura 1. Contribuição da SE e da GD para a falta

Metodologias desenvolvidas recentemente afirmam que alocando um limitador de corrente de falta para limitar a contribuição da GD irá resolver o problema de descoordenação religador – elo fusível, o que não é verdade. Considerando um sistema de proteção coordenado, quando uma falta temporária ocorre, o religador irá operar na sua curva rápida. Entretanto, dependendo da localização da GD, ainda haverá contribuição da GD à jusante da falta, e isso poderá causar a atuação do elo fusível ou a operação do religador na sua curva rápida não irá eliminar a falta, visto que não haverá recuperação da característica dielétrica do ar, independente da natureza da falta (temporária ou permanente), como mostrado na Figura 2. Portanto, dependendo da potência de curto-circuito da GD, será impossível romper o arco elétri-

co durante a operação rápida do religador, o que invalida essas metodologias.

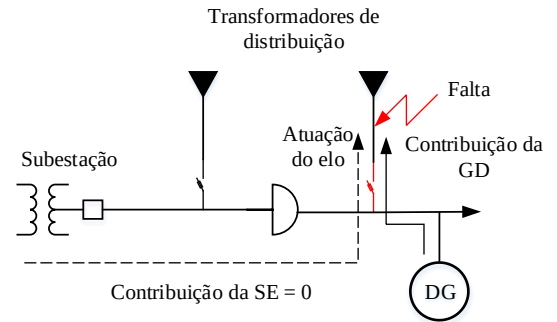


Figura 2. Atuação do elo fusível devido à contribuição da GD para a falta

Para evitar a operação rápida do religador e a atuação do elo fusível devido à contribuição da GD, é imperativo que a filosofia de operação do religador seja alterada de coordenada para seletiva. Também deve-se garantir que essa contribuição extra devido à GD não afete a seletividade entre elos fusíveis. Portanto, para resolução desse problema, este trabalho apresenta uma metodologia de alocação de limitadores de corrente de falta para reduzir a influência da GD na descoordenação religador – elo fusível, bem como para estabelecer a filosofia operacional do religador (coordenado ou seletivo) a fim de manter um nível aceitável de confiabilidade.

2.2 Funções Objetivo

Primeiramente, um estudo de curto-circuito é realizado em todos os nós do sistema. Esses cálculos primários são a referência a ser utilizada no processo de otimização. Então, a quantidade, alocação e especificação da GD pode ser considerado em qualquer nó do sistema, permitindo qualquer combinação. Considerando todas as GD conectadas, um novo estudo de curto-circuito é realizado e as novas correntes de falta são determinadas.

As funções objetivo modeladas para o problema de alocação de limitadores de corrente de falta buscam minimizar a diferença entre as correntes de faltas nos dispositivos antes e depois da conexão da GD. Também, a dimensão dos limitadores deve ser minimizada, restringindo o custo associado.

As funções objetivo são mostradas em (1) e (2).

$$f_1 = \sum_{n=1}^{n_{\text{elos_protegidos}}} |I_{\text{protegidos_GD_n}} - I_{\text{protegidos_semGD_n}}| + \sum_{p=1}^{n_{\text{elos_protegidos}}} |I_{\text{protegidos_GD_p}} - I_{\text{protegidos_semGD_p}}| \quad (1)$$

$$f_2 = \sum_{k=1}^{n_{LCF}} (R_k + X_k) \quad (2)$$

Em que:

$n_{elos_protetores}$: Número de elos fusíveis protetores;

$I_{protetores_GD_n}$: Corrente de falta no n-ésimo elo fusível protetor, considerando penetração de GD;

$I_{protetores_semGD_n}$: Corrente de falta no n-ésimo elo fusível protetor, sem a presença de GD;

$n_{elos_protegidos}$: Número de elos fusíveis protegidos;

$I_{protegidos_GD_p}$: Corrente de falta no p-ésimo elo fusível protetor, considerando penetração de GD;

$I_{protegidos_semGD_p}$: Corrente de falta no p-ésimo elo fusível protetor, sem a presença de GD;

n_{LCF} : Número de limitadores de corrente de falta;

R_k : Resistência do k-ésimo limitador de corrente de falta;

X_k : Indutância do k-ésimo limitador de corrente de falta.

Estas funções objetivo buscam determina a alocação dos limitadores de corrente de falta para reduzir a diferença de corrente que sensibiliza os elos fusíveis com e sem a presença de GD, mantendo assim a seletividade entre esses. Também, o dimensionamento do LCF deve ser minimizado, visto que o custo desses dispositivos é atrelado à sua impedância.

2.3 Restrições

As restrições devem refletir limites técnicos e econômicos, buscando adequar a solução à uma região factível do espaço de busca.

$$I_{i,GD} - I_{i,SemDG} < Tol \quad (3)$$

$$X_{min} \leq X_{LCF} \leq X_{max} \quad (4)$$

$$X_{min} \leq X_{LCF} \leq X_{max} \quad (5)$$

$$(I_{protetor_k}, I_{protegido_k}) \leq I_{seletividade_k} \quad (6)$$

Where:

$I_{i,GD}$: Corrente na i-ésima seção do alimentador, considerando GD;

$I_{i,SemGD}$: Corrente na i-ésima seção do alimentador, antes da conexão da GD;

Tol : Tolerância admitida para a diferença entre as correntes de falta antes e depois da conexão da GD;

X_{min} and X_{max} : Limites de reatância do LCF (X_{FCL});

R_{min} and R_{max} : Limites de resistência do LCF (R_{LCF});

$I_{protetor_k}$: Corrente de falta seletiva no elo fusível protetor k ;

$I_{protegido_k}$: Corrente de falta seletiva no elo fusível protegido k ;

$I_{seletividade_k}$: Limite de seletividade entre $I_{protetor_k}$ e $I_{protegido_k}$;

A restrição (3) fixa que a diferença entre as correntes de falta na seção i do alimentador com e sem contribuição da GD deve ser menor que uma tolerância pré-estabelecida. As restrições (4) e (5) limitam a dimensão do LCF entre valores mínimos e máximos de resistência e reatância. A restrição (6) é relativa aos limites de seletividade entre elos fusíveis, que deve ser respeitada.

2.4 Método de solução: Enxame de partículas multi-objetivo

Para resolver problemas multiobjetivo, as soluções de Pareto (não-dominadas) devem ser encontradas. No enxame de partículas multiobjetivo, é necessário decidir como selecionar as partículas para dar preferência àquelas não-dominadas e como manter a diversidade do enxame. A implementação do algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo é mostrada no fluxograma da Figura 4.

2.5 Filosofia operacional dos religadores

Para determinar se a curva rápida do religador deve ser habilitada (coordenado) ou não (seletivo), a posição da GD deve ser investigada. Anteriormente, pesquisas não consideram a posição da GD, o que é provado um erro, pois desconsidera a contribuição da GD para faltas temporárias quando o religador abre o circuito durante a operação rápida. Quando a GD é localizada à jusante do religador, e a falta ocorre entre estes, haverá a atuação do elo fusível devido à contribuição da GD, fazendo com que o esquema coordenado não seja adequado, pois não haverá tempo suficiente para eliminação do arco elétrico. Para resolver esse problema, a filosofia operacional do religador deve ser alterada de coordenado para seletivo, desabilitando a curva rápida do religador e permitindo a atuação do elo fusível, desconectando um número mínimo de consumidores. Quando a GD está localizada à montante do religador, irá aumentar significativamente a magnitude da corrente para faltas à jusante do religador, causando descoordenação religador – elo fusível, entretanto, não há necessidade de alteração da filosofia operacional do religador. Este trabalho resolveu essa situação através da alocação de LCF.

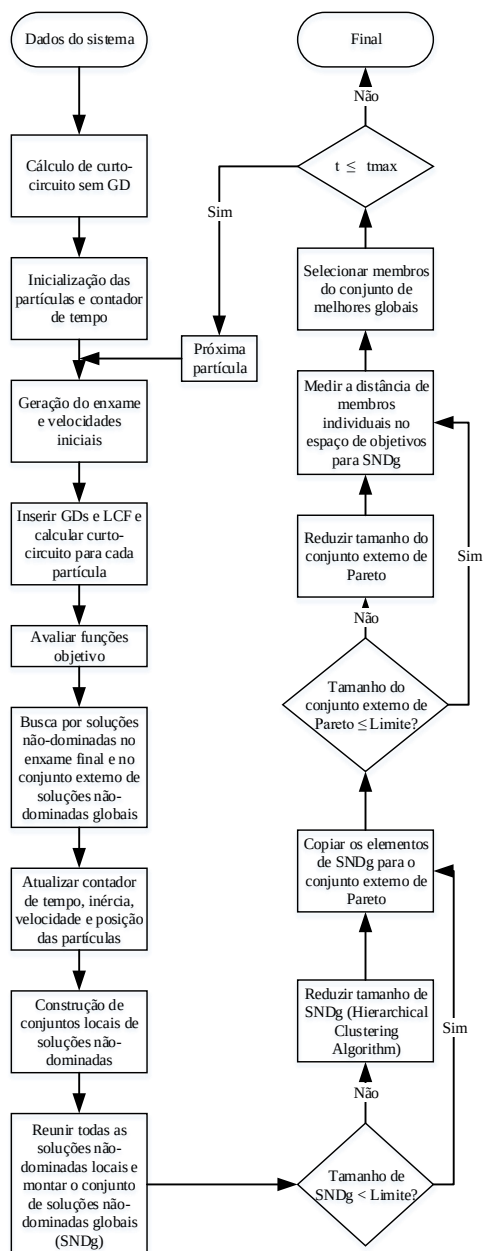


Figura 4. Algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo

3 Resultados

Para avaliar a eficiência do método, é considerado um sistema teste amplamente utilizado na literatura.

O sistema teste considerado é mostrado na Figura 5, e foi escolhido devido aos dados disponíveis (IEEE, 1991), sendo modelado em Matlab® para propósitos matemáticos e Digsilent® para avaliação de aspectos técnicos. A alocação dos dispositivos de proteção é mostrada na Tabela 1. Três GDs foram consideradas separadamente e combinadas, conectadas diretamente à rede através de um transformador e todas as combinações dessas foram abordadas. Os dados das GDs são encontrados na Tabela 2. Relatores e elos fusíveis foram previamente dimensiona-

dos e coordenados, usando métodos tradicionais (IEEE, 1991). A Tabela 3 mostra a alocação e dimensionamento dos LCF e a filosofia operacional adequada para os relatores para o sistema teste considerado.

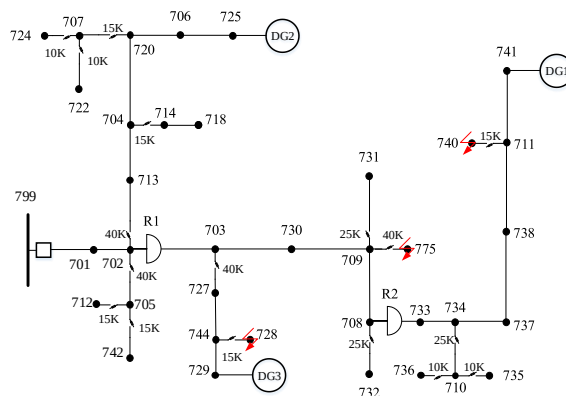


Figura 5. Sistema teste – IEEE 37 nós.

As faltas foram simuladas nos nós 728, 740 e 775, que representam três diferentes direções de falta em relação a posição dos relatores. Na Tabela 4, os resultados são apresentados para o pior cenário, dependendo de qual GD está conectada.

Na Tabela 4, a filosofia operacional dos relatores é mostrada para faltas em três pontos, onde S significa esquema de proteção seletivo e C, coordenado. É possível notar que, dependendo da falta, os relatores devem ter sua curva rápida desabilitada para evitar a contribuição da GD para a falta durante essa operação rápida.

Tabela 1. Alocação de dispositivos de proteção

Sistema	Relé	Relatores	Elos fusíveis
IEEE 37 Nós	799-701	702-703 (Pos. 1); 708-733 (Pos. 2)	702-705; 702-713; 704-720; 703-727; 709-731; 709-775; 708-732; 734-710; 711-740

Tabela 2. Dados das fontes de GD

Parâmetro	Dados
Potência	2 MVA
Reatância síncrona (Xs)	2.95%
Reatância transitória (X'd)	0.25%
Reatância subtransitória (X''d)	0.17%
Constante de tempo transitória de eixo direto (T'd)	0.47
Constante de tempo subtransitória de eixo direto (T''d)	0.054
Reatância da GD	9.67%
Transformador	5%, 12.47kV /480 V
Tensão base	12.47 kV
MVA Base	100 MVA

Tabela 3. Alocação e dimensionamento dos LCF

Combinação de GD	Local do LCF	Dimensão FCL
GD1	GD1; 730-709	j0.48; 0.48+j0.32
GD 2	GD2; 730-709	0.1+j0.28; 0.48+j0.32
GD 3	DG3; 730-709	0.3+j0.36; 0.48+j0.32
GD1 + GD2	GD1; GD2 730-709; 704-713	j0.48; 0.1+j0.28; 0.48+j0.32 0.15+j0.22
GD2 + GD3	GD2; GD3 730-709; 704-713; 727-744	0.1+j0.28; 0.3+j0.36; 0.48+j0.32; 0.15+j0.22
GD1 + GD3	GD1; GD3 727-744; 730-709;	j0.48; 0.3+j0.36; 0.48+j0.32; 0.15+j0.22
GD1 + GD2 + GD3	GD1; GD2; GD3 704-713; 730-709; 727-744	j0.48; 0.1+j0.28; 0.3+j0.36; 0.48+j0.32; 0.15+j0.22

Tabela 4. Filosofia operacional do religador para falta em diferentes nós

Caso	GD	(728)	(740)	(775)
1	GD1	R1: S	R1: C	R1: C
		R2: C	R2: S	R2: S
2	GD2	R1: C	R1: C	R1: C
		R2: C	R2: C	R2: C
3	GD3	R1: S	R1: S	R1: C
		R2: C	R2: C	R2: C
4	GD1 + GD2	R1: S	R1: C	R1: S
		R2: C	R2: S	R2: C
5	GD2 + GD3	R1: S	R1: C	R1: S
		R2: C	R2: C	R2: C
6	GD1 + GD3	R1: S	R1: C	R1: S
		R2: C	R2: S	R2: C
7	GD1 + GD2 + GD3	R1: S	R1: C	R1: S
		R2: S	R2: S	R2: S

É possível verificar que, no caso 1, haverá a operação rápida do religador para uma falta em 728. Entretanto, a GD irá continuar a contribuir para a falta, impedindo o religamento e causando a atuação do elo fusível. A filosofia operacional do religador

nesse caso deverá ser seletiva, desconectando todos os consumidores à jusante de 728.

No caso 2, a esquema de proteção coordenado pode ser aplicado devido à direção da corrente de falta que sensibiliza o religador. Esta será composta pela contribuição da subestação e da GD. Caso seja uma falta temporária, esta será removida pela operação rápida do religador.

Finalmente, esta metodologia inovadora não pode ser comparada com métodos desenvolvidos anteriormente pois estes não consideram aspectos de coordenação e seletividade e apresentam equívocos, sendo impossível sua implementação em sistemas de distribuição reais.

4 Conclusões e recomendações

A metodologia desenvolvida foi capaz de alocar eficientemente limitadores de corrente de falta em sistemas de distribuição de energia elétrica para reduzir violações de seletividade entre dispositivos de proteção. Ademais, ao contrário de diversas metodologias previamente desenvolvidas, esta técnica considera com sucesso e soluciona a descoordenação religador – elo fusível, levando em consideração a filosofia operacional mais adequada para cada caso. A alocação de limitadores de corrente de falta é responsável por limitar a contribuição da GD para a corrente de falta, buscando evitar violações de seletividade entre elos fusíveis e entre religadores e elos fusíveis, nas situações apropriadas. O método foi aplicado a um sistema teste amplamente utilizado para avaliação. Os resultados mostraram excelente performance, evitando com sucesso violações de seletividade entre elos fusíveis e religadores. Ademais, a filosofia operacional do religador foi alterada dependendo do local de instalação da GD, evitando a atuação desnecessária de elos fusíveis ou falhas nas tentativas de religamento enquanto a GD continua alimentando a falta temporária durante o intervalo de religamento, após operação rápida do religador.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer às Centrais Elétricas do Amapá (CEA) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo ao trabalho.

Referências Bibliográficas

- Ochoa, L. F., Feltrin, A. P., Harrison, G. P., “Evaluating distributed generation impact with a multiobjective index”, IEEE Trans. Power Delivery, v. 21, n. 3, pp. 1452 – 1458, 2006;
- Manditereza, P. T., Bansal, R., “Renewable distributed generation: The hidden challenges – A review from the protection perspective”,

- Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 58, pp. 1457 – 1465, 2016;
- Kennedy, J., Ciufo, P., Agalgaonkar, A., “A review of protection systems for distribution networks embedded with renewable generation”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 58, pp. 1308 – 1317, 2016;
- Mahat, P., Chen, Z., Bak-Jensen, B., Bak, C.L., “A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distribution generation”, IEEE Trans. Smart Grid, v.2, n.3, pp. 428 – 437, 2011;
- Kumar, D. S., Srinivasan, D., Reindl, T., “A fast and scalable protection scheme for distribution networks with distributed generation”, IEEE Trans. Smart Grids, v. 31, n. 1, pp. 67 – 75, 2016;
- Hussain, B., Sharkh, S. M., Hussain, S., Abusara, M. A., “An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distributed generation”, IEEE Trans. Power Delivery, v. 28, n. 2, pp. 669 – 677, 2013;
- Hussain, B., Sharkh, S.M., Hussain, S., Abusara, M. A., “An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distribution generation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, n. 2, April 2013;
- Shah, P. H., Bhalja, B. R., “New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser – fuse miscoordination during distributed generation interconnections”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 8, n. 4, pp. 682 – 688, 2014;
- Chaitusaney, S., Yokoyama, A., “Prevention of Reliability Degradation from Recloser – Fuse Mismatch Due To Distributed Generation”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, n. 4, pp. 2545 – 2554, 2008;
- Lim Sung-Hun, Kim Jae-Chul, “Analysis on protection coordination of protective devices with a SFCL due to the application location of a dispersed generation in a power distribution system”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, n. 3, 2011;
- IEEE Distribution Planning Working Group Report, “Radial distribution test feeders”, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 6, Number 3, pp 975-985, August 1991.