A importância da proteção adaptativa em sistemas elétricos de distribuição com Active Network Management (ANM)

F.C.Souza Júnior * H.S.Sanca **

 * Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, campus Caicó, Caicó, RN, (e-mail: francisco.souza@ifrn.edu.br).
 ** Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (e-mail: huilman.sanca@ufrb.edu.br)

Abstract: In this paper an adaptive protection system applied to distribution power electic systems that include distributed generation and active network management (ANM) is proposed. Modern techniques of control and operation in power electric systems (PES) were powerfully the development of solutions to old PES problems, like: loss of coordination and selectivity in protection systems after topological or operational modifications. Methodologies able to keep all protection devices coordinated after network modifications, provoked by ANM system, are actual and relevant. The benefits of the coupled actuation of these techniques made more evident when small generators have been connected to the power grid, a fact that improves a high level difficult to determination power protection parameters based on overcurrent relays.

Resumo: Esse trabalho irá aplicar técnicas de um sistema de proteção adaptativa em um sistema elétrico de distribuição de energia no qual há a presença de fontes de geração distribuída (GD) e do sistema de monitoramento ativo de redes elétricas (*active network manegment (ANM)*, do inglês). Técnicas modernas de operação e controle de sistemas elétricos de potência (SEP) serão utilizadas com o intuito de minimizar problemas corriqueiros do sistema de proteção desse tipo de sistemas elétrico, como perda da coordenação e seletividade após modificações operacionais ou topológicas no mesmo. Metodologias capazes de manter a coordenação entre todos os dispositivos de proteção frente essas modificações veem sendo propostas por diversos pesquisadores, sendo tais benefícios ainda mais evidentes em redes com a presença do ANM.

Keywords: Smart grid, power protection, Active Network Menagement, adaptive protection, island operation.

Palavras-chaves: Smart grid, Proteção de Sistemas elétricos, Active Network Menagemt, Proteção adaptativa, operação em ilhamento.

1. INTRODUÇÃO

A presença de fontes de geração de energia elétrica próximas aos centros de consumo, conhecido como geração distribuída (GD), conectados à rede elétrica, seja ela de distribuição ou de sub-transmissão, vem tornando-se cada vez mais comum. A conexão dessas fontes de energia à rede proporciona consideráveis contribuições no sentido de melhoria nos níveis de tensão e índices de segurança do sistema. Por outro lado, a incorporação de fontes de GD ocasionam mudanças nos níveis das correntes de curtocircuito, exigindo uma completa revisão do estudo de coordenação da proteção da rede.

Com a inclusão de técnicas modernas de operação de sistemas elétricos, como o Gerenciamento Ativo de Redes Elétricas, do inglês *Active Network Management (ANM)*, condições de contingência podem ser facilmente solucionadas, entretanto essa técnica também provoca modificações no desempenho do sistema de proteção (Coffele et al., 2015). Uma nova filosofia dos sistemas de proteção chamada proteção adaptativa pode ser utilizada em conjunto com as técnicas da ANM, proporcionando ao sistema elétrico possibilidades de sanar problemas oriundos de situações de contingência e manter o desempenho do sistema de proteção sempre atualizado em relação à condição atual da rede.

A implementação da proteção adaptativa em sistemas reais vem ganhando destaque na literatura especializada ao longo dos últimos anos. Diferentes configurações de arquitetura são propostas para obtenção de um sistema capaz de monitorar e realizar o procedimento de determinação dos novos ajustes para os dispositivos de proteção (Li et al., 2006; Chavez et al., 2008; Souza and Souza, 2013). Com relação à determinação dos ajustes dos dispositivos de proteção, é possível, através de análises offline das topologias predominantes de operação, criar grupos de ajustes que são modificados de acordo com as condições presentes da rede (Souza and Souza, 2013). Trabalhos mais recentes não dependem de análises offline uma vez que determinam os ajustes dos dispositivos de proteção por meio de relações matemáticas que mensuram as correntes de curto-circuito, parâmetro mais importante na proteção de sistemas de distribuição (Ojaghi et al., 2013; Sanca et al., 2016). Em Coffele et al. (2015) um sistema de proteção adaptativa foi desenvolvido usando a metodologia *hardware-in-the-loop* para atuação em um sistema de sub-transmissão com presença de GD. O protocolo de comunicação IEC 61850 foi utilizado na interligação entre os dispositivos que compõem o sistema de proteção.

Além de modificar os níveis das correntes de curto-circuito, a inclusão da GD pode provocar o surgimento do problema do ilhamento, isto é, a possibilidade da desconexão da fonte principal de suprimento elétrico, ou de sua subestação, ficando os geradores que compõem a GD conectados da rede. Em geral, a GD tem potência muito menor que a potência da fonte principal do sistema, com isso diversos pesquisadores vem desenvolvendo algoritmos anti-ilhamento, geralmente baseados em variações na frequência da rede (Sanca et al., 2016).

Nesse contexto, pesquisas recentes apontam para a possibilidade de manutenção do abastecimento elétrico de uma pequena parte do sistema, conhecido como *microgrid*, por meio de fontes de GD em situações de contingência provocadas pela perda da geração principal (Gururani et al., 2016). A atuação desse sistema exige que o algoritmo antiilhamento atue em conjunto com um algoritmo de gerenciamento de demanda de modo que seja possível estabelecer a possibilidade de continuidade de abastecimento de uma porção da rede.

Sistemas que podem operar nessas três situações: sem ilhamento, com ilhamento e em *microgrid* apresentam grandes dificuldades para determinação dos ajustes do sistema de proteção, uma vez que severas mudanças podem ser observadas tanto nos níveis de curto-circuito quanto no sentido das correntes (Coffele et al., 2015).

Neste trabalho é proposta uma metodologia para determinação dos ajustes dos relés de sobrecorrente que garantam a coordenação e a seletividade de um sistema de sub-transmissão com penetração marcante da GD, considerando as situações de operação sem ilhamento, além de situações de modificação na topologia, fruto da ação da metodologia ANM. Na avaliação da metodologia proposta foram utilizados os programas MODELS/ATP e MATLAB[®] para geração das simulações em massa.

2. IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO E SOLUÇÕES MODERNAS

A conexão de fontes de GD à rede elétrica é realizada, na maioria das vezes, através do sistema de distribuição, trazendo para este novas características que precisam ser incorporadas à filosofia do sistema de proteção, inclusive uma série de problemas podem destacar-se quando a GD é conectada. A base de todos os problemas ocasionados pela GD para o sistema de proteção das redes de distribuição, cujo sistema é baseado no uso da função de sobrecorrente, é a quebra do paradigma da unidirecionalidade da corrente, seja a de carga ou de curto-circuito. De modo geral, segundo Enkins et al. (2010) as principais modificações relacionadas à conexão da GD em um sistema de distribuição são:

- Variações no perfil de tensão;
- Elevação nos níveis curtos-circuitos;
- Influência na qualidade de energia elétrica;
- Influência na proteção de sistema.

A inclusão de fontes de geração de energia elétrica baseado em sistemas solares fotovoltaicos não acarreta grandes modificações nos níveis de curto-circuito, uma vez que a corrente de curto-circuito máximo desse tipo de sistema é de cerca de 10-20% maior do que o valor máximo da corrente fornecida.

Por outro lado, a GD baseada em máquinas síncronas ou de indução, acarreta grandes modificações na corrente de curto-circuito do sistema, uma vez que esse tipo de máquina apresenta impedâncias série muito baixas.

A partir da implementação do ANM reconfigurações de redes elétricas frente a situações de contingenciamento, operações em ilhamento, gerenciamento da produção de energia por meio de fontes renováveis distribuídas ao longo da rede, bem como da demanda podem ser realizadas de maneira automática, ou com o mínimo de interferência humana na tomada das decisões.

A rigor, a operação do gerenciamento ativo de redes pode provocar danos à operação do sistema de proteção tradicional. Para sistemas de sub-transmissão é possível utilizar os grupos de ajustes disponíveis nos dispositivos de proteção modernos, para realizar a atualização dos parâmetros do sistema de proteção.

3. SISTEMA DE PROTEÇÃO ADAPTATIVA PROPOSTO

A proteção adaptativa é um conjunto de operações lógicomatemáticas que permitem a manutenção da coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção frente às modificações topológicas e/ou operacionais da rede (Horowitz et al., 1988).

Na Figura 1 apresenta-se um fluxograma simplificado dos processos necessários para implementação do sistema de proteção adaptativa proposto. Em termos gerais três partes podem ser identificadas no sistema utilizado: (i) monitoramento da rede elétrica a fim de verificar a ocorrência de modificações, (ii) determinação dos novos ajustes de proteção e (iii) a atualização dos ajustes pelos dispositivos de proteção.

Nos sistemas de proteção adaptativa as tensões e correntes do sistema elétrico de potência são obtidos por meio dos transdutores presentes no mesmo, além de dados sobre *status* dos dispositivos seccionadores provenientes de um sistema SCADA conectado previamente à rede. Na primeira etapa do sistema de proteção adaptativa, chamada Centro de Controle da Subestação no fluxograma da Figura 1, a detecção de modificações na rede elétrica é realizada através da análise das condições dos dispositivos seccionadores. Esse bloco pode receber informações sobre modificações da rede também por meio do sistema ANM. A segunda etapa do sistema de proteção adaptativa, representando na Figura 1 pelo Centro de Controle da Operação, responsável pela determinação *online* dos ajustes dos dispositivos de proteção, pode ser realizada de diversas maneiras. Como nos sistemas de distribuição/sub-transmissão a principal função de proteção é a função de sobrecorrente, relações que tenham por base a corrente de curto-circuito no ponto de instalação dos relés é a base para a maioria das técnicas descritas na literatura. O alcance da unidade instantânea de sobrecorrente realizou-se neste trabalho de acordo com a metodologia apresentada na seção 4.

Para implementação do dispositivo de proteção, representado pelo bloco IED na Figura 1, utilizou-se o modelo de relé de sobrecorrente instantânea proposto em Souza and Souza (2016). Por meio do modelo proposto, é necessário que os novos ajustes sejam enviados ao relé por meio de uma rede de comunicação utilizando um protocolo de comunicação, como o IEC 61850, por exemplo. Ainda há a possibilidade de utilizar uma saída digital do dispositivo para indicar a ocorrência de faltas no sistema. Utilizase essa funcionalidade para que o sistema de proteção adaptativa não confunda uma situação de falta com uma mudança topológica ou operacional na rede.



Figura 1. Fluxograma do sistema de proteção adaptativa proposto.

4. CÁLCULO DOS AJUSTES DAS UNIDADES DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEAS

Para determinar os ajustes das unidades de sobrecorrente instantâneas, é necessário utilizar relações entre a corrente de curto-circuito e um determinado patamar de atuação dos dispositivos, conhecidos como correntes de *pick-up*. Em alguns casos, os níveis de corrente de *pick-up* para um relé de sobrecorrente instantânea é definido em função de um alcance percentual da linha protegida, assim como acontece geralmente com a proteção de distância.

Redes com linhas muito curtas apresentam uma dificuldade inerente ao processo de coordenação das unidades de sobrecorrente instantânea. Segundo Anderson (1999), quando a relação entre as correntes de curto-circuito no início da linha protegida, faltas *close-in*, e no final do trecho protegido, faltas *far-end*, for menor que 30%, a coordenação dos dispositivos de proteção será de difícil obtenção. A determinação do alcance da unidade de sobrecorrente instantânea é realizada neste trabalho através de técnicas completamente automatizadas. Esse procedimento, baseado na topologia do sistema de proteção adaptativa apresentado na Figura 1, é descrito em detalhes nos tópicos seguintes.

4.1 Cálculo dos equivalentes de rede

Uma das principais dificuldades da realização dos ajustes online das unidades de sobrecorrente, seja temporizada ou instantânea, diz respeito à determinação dos circuitos equivalentes no ponto de instalação dos dispositivos de proteção.

Em Bahadornejad and Ledwich (2003) é apresentado uma metodologia baseada no uso de relações estatísticas para a determinação dos equivalentes de rede. Sendo uma rede elétrica com GD, conforme a mostrada na Figura 2, através da análise das malhas de \hat{E}_1 e \hat{E}_2 , chega-se as equações descritas a seguir:



Figura 2. Sistema elétrico de potência fictício.

$$\hat{E}_1 - Z_1 \times (\hat{I}_2 + \hat{I}_L) = \hat{V}.$$
 (1)

$$\hat{V} = Z_2 \hat{I}_2 + \hat{E}_2. \tag{2}$$

Resolvendo (2) em (1) para \hat{E}_1 em função de \hat{I}_L , tem-se:

$$\hat{E}_1 = Z_1 \hat{I}_L + \hat{V} \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \right) - \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \hat{E}_2.$$
 (3)

Considerando uma variação incremental nas fontes \hat{E}_1 e \hat{E}_2 de (3) e multiplicando essas variações pela variação da impedância Z_L , tem-se:

$$\Delta Z_L \times \Delta \hat{E}_1 = Z_1 \Delta Z_L \Delta \hat{I}_L + \Delta Z_L \times \hat{V} \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} \right) - \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \Delta \hat{E}_2 \times \Delta Z_L.$$
⁽⁴⁾

Observa-se em (4) que há alguns termos em que as variações de um não tem relação com a de outro, ou seja, são variáveis independentes. É o caso das fontes $\hat{E}_1 \in \hat{E}_2$ com a impedância da carga Z_L . Assim, aplicando o princípio da covariância à (4) os termos onde há a multiplicação entre variáveis independentes, a covariância (COV) será nula. Logo, pode-se reescrever (4) da seguinte forma:

$$0 = Z_1 \times COV(\Delta Z_L, \Delta \hat{I}_L) + \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}\right) \times COV(\Delta Z_L, \Delta \hat{V}).$$
(5)

Através de breves manipulações matemáticas, é possível chegar as equações de Z_1 e Z_2 , em função das variações incrementais mostradas em (5), de acordo com:

$$Z_1 = -\frac{COV(\Delta \hat{V}, \Delta Z_L)}{COV(\Delta \hat{I}_L, \Delta Z_L) + COV(\Delta \hat{I}_2, \Delta Z_L)} \quad (6)$$

$$Z_2 = \frac{COV(\Delta \hat{V}, \Delta Z_L)}{COV(\Delta \hat{I}_2, \Delta Z_L)} \tag{7}$$

Os valores das fontes de tensão \hat{E}_1 e \hat{E}_2 são obtidos substituindo-se (6) e (7) em (1) e (2).

4.2 Determinação do alcance da unidade instantânea de sobrecorrente

Considerando o sistema equivalente no ponto de instalação do dispositivo de proteção, cujos parâmetros de tensão e impedância equivalentes e impedância da linha de transmissão são dadas por \hat{E}_2 , $Z_S \in Z_L$, é possível determinar que faltas *close-in* (\hat{I}_{CI}) e *far-end* (\hat{I}_{FE}) podem ser determinadas por meio das equações a seguir:

$$\hat{I}_{CI} = \frac{\hat{E}_S}{Z_S} \tag{8}$$

$$\hat{I}_{FE} = \frac{\hat{E}_S}{Z_S + Z_L} \tag{9}$$

Para uma falta ocorrida a uma distância h da linha, esta pode ser determinada mediante:

$$\hat{I}_{ER} = \frac{\hat{E}_S}{Z_S + h \times Z_L} \tag{10}$$

Realizando manipulações matemáticas com (8), $(9) \in (10)$, é possível chegar a equação a seguir, em que K_1 representa uma constante cujo valor varia entre 1, 1 e 1, 4 Anderson (1999).

$$h = \frac{K_{SR}(1 - K_1) + 1}{K_1},\tag{11}$$

sendo K_{SR} a relação entre as impedâncias do equivalente no ponto de instalação do relé e a da linha protegida.

4.3 Atualização dos ajustes dos dispositivos de proteção

O sistema de proteção adaptativa proposto encarrega-se de enviar os novos ajustes para os dispositivos de proteção cada vez que uma nova topologia for identificada.

A arquitetura proposta para o centro de controle da operação (CCO) é semelhante à de um relé digital, entretanto as etapas de estimação de fasores, determinação dos equivalentes de rede e o cálculo dos novos ajustes só serão realizadas após a identificação de modificações na rede. Com essa estratégia, é obtida uma considerável redução no esforço computacional necessário, o que faz esse sistema susceptível de implementação por dispositivos processadores de sinais com poder de processamento não necessariamente altos.

5. SISTEMA-TESTE UTILIZADO

Para avaliação da técnica proposta, utilizou-se o sistema mostrado na Figura 3, baseado no sistema do IEEE/PSRC (Committee, 2004). O equivalente do sistema é representado pelo gerador MS1, que interliga-se ao sistema por meio de um transformador com enrolamento primário conectado em delta e o secundário em Y aterrado. São conectados à rede ainda os geradores que representam a geração distribuída GD1 e GD2. Para simulação, considerou-se que em cada uma das linhas há uma carga distribuída. Estão definidos também, na Figura 3, os locais onde serão realizadas às simulações de faltas no sistema. Foram incluídos no sistema nove dispositivos seccionadores (seccionadores S1 até S9 da Figura 3)) através dos quais o ANM irá atuar para modificar a topologia da rede.

Com relação a simulação de faltas no sistema foram aplicadas faltas monofásicas variando a resistência de falta entre $1\Omega e 10\Omega$, em intervalos de 1Ω . As faltas monofásicos foram escolhidas para simulação por serem as mais comuns em sistemas de distribuição e de sub-transmissão. Os sinistros foram simulados nos pontos assinalados com uma cruz na Figura 3, totalizando 12 locais de falta ao longo do sistema.

Para os cenários de simulação foram consideradas as atuações do ANM do sistema de acordo com os dados da Tabela 1. No total, 16 cenários diferentes foram analisados, totalizando 5.760 casos simulados. As simulações desse sistema foram realizadas utilizando-se o MATLAB[®] para simulação do sistema de proteção adaptativa e o ATP para simulações no sistema elétrico de potência. Logo, o sistema de proteção atua com base em arquivos de registros dos dados simulados para cada cenário de observação do sistema da Figura 3.

Tabela 1. Cenários analisados.

N^o	Chaves Abertas	GD conectada
1	S9, S5	GD1, GD2
2	S9, S4	GD1, GD2
3	S1, S7	GD1, GD2
4	S6, S4	GD1, GD2
5	S9, S5	GD2
6	S9, S4	GD2
7	S1, S7	GD2
8	S6, S4	GD2
9	S9, S5	GD1
10	S9, S4	GD1
11	S1, S7	GD1
12	S6, S4	GD1
13	S9, S5	_
14	S9, S4	—
15	S1, S7	_
16	S6, S4	_



Figura 3. Sistema-teste utilizado.

6. RESULTADOS

A partir do sistema-teste utilizado foram aplicadas faltas nos doze locais mostrado na Figura 3 considerando cada um dos cenários descritos na Tabela 1 como sendo provenientes de atuações do ANM. Para avaliar o sistema de proteção adaptativa proposto, em todos os pontos de instalação dos relés foram conectados dois dispositivos de proteção, um operando de acordo com as técnicas tradicionais e outro conforme as técnicas de proteção adaptativa.

Utilizando técnicas tradicionais de estudo de coordenação e seletividade, as unidades instantâneas dos dispositivos de proteção do sistema representado na Figura 3, considerando todas as chaves fechadas e a conexão dos dois geradores distribuídos. Essa situação foi considerada a topologia de utilização dominante, do inglês *dominant utilization topology*, (DUT). Os resultados para esta condição estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Ajustes dos dispositivos de proteção condição DUT - técnica tradicional.

$I_{PU}^{inst}\left(A\right)$	RA1	RA2	RB1	RB2
	700	450	810	200
$I_{PU}^{inst}\left(A ight)$	RC1 420	RC2 950	RD1 150	RD2 150

Utilizando-se os ajustes da Tabela 2, o sistema de proteção tradicional obteve o desempenho apresentado na Tabela 3 quando consideradas as modificações impostas pelo ANM. Conforme observa-se, tendo por base o número de 1920 simulações realizadas de acordo com o descrito na secção 5, o sistema de proteção tradicional falhou em cerca de 10% quando ocorre a desconexão de uma das fontes distribuídas de GD. A atuação indevida desse sistema perante a perda de um gerador já era esperada uma vez que os geradores simulados foram representados como máquinas síncronas, que contribuem consideravelmente para os níveis de curtocircuito da rede. Não foram analisadas as diferenças obtidas entre fontes de geração diferentes como as baseadas em sistemas fotovoltaicos, usinas à base de combustíveis fósseis, entre outras.

Quando analisado o caso em que há a desconexão dos dois geradores distribuídos ao mesmo tempo, ficando a rede alimenta apenas pelo gerador principal do sistema,

um elevado número de atuações indevidas foi verificado, resultando em um percentual de aproximadamente 45% de falhas no sistema de proteção tradicional.

Tabela 3. Desempenho do sistema de proteção tradicional frente aos cenários analisados.

GD conectada	Atuações indevidas			
GD1, GD2	0 - 0%			
GD2	221 - 11,51%			
GD1	209 - 10,89%			
_	$854 - 44,\!48\%$			

Considerando a atuação do sistema de proteção adaptativa, foram obtidos os ajustes apresentados na Tabela 4 para as unidades de proteção instantânea de sobrecorrente. Conforme pode-se verificar, importantes modificações ocorreram nos ajustes dos dispositivos de proteção de modo a proporcionar uma correta atuação em relação ao problema descrito anteriormente com relação ao sistema de proteção tradicional.

A desconexão dos geradores responsáveis pela GD acarretam as principais modificações nos ajustes. Esse fato explica-se pela influência dos mesmos nos níveis de curtocircuito do sistema. Observa-se, ainda, que as atuações do ANM provocaram, em sua maioria, alterações consideráveis nos ajustes das unidades de sobrecorrente instantânea. Esse fato verificou-se, sobretudo, quando na abertura das chaves S1 e S7. Conforme verifica-se na Figura 3, a chave S1 é uma das vias de interligação de GD1 à rede, e S7 conecta tanto GD2, quando parte do circuito duplo de LT1 e LT2 ao sistema. A abertura do sistema nesses locais representou significativas modificações nos equivalentes de rede nos pontos de instalação dos dispositivos de proteção.

Uma vez operando com os ajustes descritos da Tabela 4, o sistema de proteção adaptativa atuou corretamente para todas as situações de falta analisadas, adequandose às condições da rede tanto referentes à desconexão de geradores do sistema, quanto à modificações na topologia provocadas pela atuação do ANM.

7. CONCLUSÕES

Nesse artigo apresentou-se um sistema de proteção adaptativa de sobrecorrente instantânea para redes de distribuição com geração distribuída adaptado à manter a

Cenário	RA1	RA2	RB1	RB2	RC1	RC2	RD1	RD2
1	700 A	450 A	810 A	200 A	420 A	950 A	150 A	150 A
2	700 A	$480~\mathrm{A}$	650 A	600 A	$550~\mathrm{A}$	1000 A	140 A	160 A
3	$45 \mathrm{A}$	20 A	340 A	$340~\mathrm{A}$	650 A	1100 A	1110 A	2200 A
4	750 A	500 A	750 A	400 A	$260~\mathrm{A}$	$1155~\mathrm{A}$	1000 A	2100 A
5	700 A	$550~\mathrm{A}$	810 A	160 A	552 A	980 A	150 A	2000 A
6	700 A	$580~{\rm A}$	850 A	$175~\mathrm{A}$	$650~\mathrm{A}$	965 A	150 A	2200 A
7	45 A	22 A	885 A	105 A	$650~\mathrm{A}$	950 A	1100 A	2200 A
8	750 A	$450~\mathrm{A}$	200 A	$850~\mathrm{A}$	600 A	900 A	1000 A	2000 A
9	700 A	$550~\mathrm{A}$	810 A	160 A	552 A	980 A	150 A	2000 A
10	700 A	$580~{\rm A}$	$850~\mathrm{A}$	$175~\mathrm{A}$	$650~\mathrm{A}$	965 A	150 A	2200 A
11	$45 \mathrm{A}$	22 A	885 A	105 A	$650~\mathrm{A}$	950 A	1100 A	2200 A
12	750 A	$450~\mathrm{A}$	200 A	850 A	600 A	900 A	1000 A	2000 A
13	$210~{\rm A}$	700 A	850 A	25 A	$650~\mathrm{A}$	1100 A	$250~\mathrm{A}$	350 A
14	$225~\mathrm{A}$	650 A	600 A	100 A	850 A	885 A	260 A	355 A
15	$4{,}25~\mathrm{A}$	4 A	$4,\!35~{\rm A}$	100 A	850 A	1210 A	400 A	$450~\mathrm{A}$
16	$205~\mathrm{A}$	$650~\mathrm{A}$	500 A	$145~\mathrm{A}$	500 A	1115 A	$450~\mathrm{A}$	500 A

Tabela 4. Correntes de pick-up obtidas por meio da técnica adaptativa.

coordenação da proteção frente modificações causadas pela atuação do sistema ANM. Por meio dos resultados obtidos, verifica-se que os sistemas de proteção adaptativa são alternativas interessantes para solucionar problemas causados pela inserção de técnicas modernas de automação de redes elétricas como o gerenciamento ativo de redes elétricas.

Mudanças nos níveis de curto-circuito do sistema provocados pela inserção ou remoção de geradores do sistema também foram analisadas, permitindo ao sistema de proteção um desempenho adequado, sem atuações indevidas, quando comparado com o sistema que opera de acordo com as técnicas tradicionais de coordenação da proteção.

Como neste artigo considerou-se um sistema de proteção adaptativa composto apenas por redes de sobrecorrente em suas unidades instantâneas, não foi possível a análise do desempenho do sistema de proteção com relação ao tempo de atuação do mesmo. Entretanto, acredita-se que a análise baseada no número de atuações indevidas e nas modificações dos ajustes dos dispositivos de proteção proporcionam um bom parâmetro para avaliação do sistema proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao IFRN e a UFRB pela disponibilização de seus laboratórios.

REFERÊNCIAS

- Anderson, P.M. (1999). Power System Protection. IEEE. Bahadornejad, M. and Ledwich, G. (2003). System thevenin impedance estimation using signal processing on load bus data. In 2003 Sixth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management ASDCOM 2003 (Conf. Publ. No. 497), volume 1, 274–279.
- Chavez, A.A., l. Guardado, J., Sebastian, D., and Melgoza, E. (2008). Distance protection coordination using search

methods. *IEEE Latin America Transactions*, 6(1), 51–58.

- Coffele, F., Booth, C., and Dyśko, A. (2015). An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), 561–568.
- Committee, I.P.S.R. (2004). EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing.
- Enkins, N., Ekanayake, J.B., and Strbac, G. (2010). *Distributed Generation*. IET.
- Gururani, A., Mohanty, S.R., and Mohanta, J.C. (2016). Microgrid protection using hilbert #8211;huang transform based-differential scheme. *IET Generation, Transmission Distribution*, 10(15), 3707–3716. doi:10.1049/ iet-gtd.2015.1563.
- Horowitz, S.H., Phadke, A.G., and Thorpe, J.S. (1988). Adaptive transmission system relaying. *IEEE Transac*tions on Power Delivery, 3(4), 1436–1445.
- Li, Z., Tong, W., Li, F., and Feng, S. (2006). Study on adaptive protection system of power supply and distribution line. In 2006 International Conference on Power System Technology, 1–6.
- Ojaghi, M., Sudi, Z., and Faiz, J. (2013). Implementation of full adaptive technique to optimal coordination of overcurrent relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1), 235–244.
- Sanca, H.S., Souza, F.C., Souza, B.A., and Costa, F.B. (2016). Comparison frequency estimation methods on adaptive protection architecture applied on systems with distributed generation. In 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP), 1–6.
- Souza, F.C. and Souza, B.A. (2013). Adaptive overcurrent adjustment settings: A case study using rtds. In 2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), 1–5.
- Souza, F.C. and Souza, B.A. (2016). An overcurrent relay model to adaptive protection applications. *Przeglad Elektrotechniczny*, 92(4), 171–175.