

Análise dos Efeitos da Alocação de Compensadores Estáticos na Resposta da Função de Proteção de Impedância de Linhas de Transmissão

Luiz Selefe Mendes da Silveira *
Aurélio Luiz Magalhães Coelho **
Élcio Franklin de Arruda ***
Ronaldo Eugênio de Souza Filho ****

* *Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, (e-mail: luizselefemendes@gmail.com).*

** *Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG (e-mail: aurelio.coelho@unifei.edu.br)*

*** *Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG (e-mail: elcio.arruda@unifei.edu.br)*

**** *Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG (e-mail: ronaldo.eugenio@unifei.edu.br)*

Abstract: The use of the Static Reactive Compensator (SVC) in the power system allows for greater flexibility in controlling system variables and, as a consequence, SEP expansion investments can be delayed. Inserting the SVC into the transmission line alters the power flow parameters and consequently the voltage and current modules and angles in the system to which they are connected. Therefore, this work analyzes the influence of the SVC on the alteration of the actuation times and the reach of the protection zones of the transmission lines that compose the SEP. PSCAD / EMTDC software is used to perform all modeling of an SEP. After SEP modeling, disturbances are caused in the system and the ANSI 21 protection function is evaluated against these abnormalities in the scenario with and without the presence of SVC. The results showed that there was an underreach of the ANSI 21 function in view of disturbances from the perspective of the presence of SVC.

Resumo: A utilização do Compensador Estático de Reativos (CER) no sistema elétrico de potência (SEP) permite uma maior flexibilidade no controle das variáveis do sistema e, como consequência, pode-se postergar os investimentos de expansão do SEP. A inserção do CER na linha de transmissão pode alterar os parâmetros do fluxo de potência e, conseqüentemente, os módulos e ângulos das tensões e correntes no sistema em que estão conectados. Portanto, neste trabalho analisa-se a influência do CER na alteração dos tempos de atuação e nos alcances das zonas de proteção das linhas de transmissão que compõem o SEP. O *software* PSCAD/EMTDC é utilizado para realizar toda a modelagem de um SEP. Após a modelagem do SEP, perturbações são causadas no sistema e avalia-se a função de proteção de impedância (ANSI 21) frente a essas anormalidades no cenário com e sem a presença do CER. Os resultados indicam que houve um subalcance da função ANSI 21 frente a distúrbios na perspectiva da presença do CER.

Keywords: Protection; Transmission Lines; Static Var Compensator; PSCAD/EMTDC; ANSI 21.

Palavras-chaves: Proteção; Linhas de Transmissão; Compensador Estático de Reativos; PSCAD/EMTDC; ANSI 21.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEP) têm a função de disponibilizar energia de modo contínuo e ininterrupto aos seus consumidores, sejam eles empresas de grande porte ou até mesmo uma pequena residência. O SEP tem a missão de gerar, transmitir e distribuir exatamente a quantidade de energia solicitada por seus usuários, além de suprir as perdas que ocorrem na produção e no transporte da energia.

Com relação ao SEP, tem-se que 68% das interrupções no fornecimento de energia ocorrem por falhas nas linhas de transmissão (LTs) (Filho and Mamede, 2000) e que, no caso de uma falha, 2,36% das interrupções estão associados a atuação dos relés de proteção, (Duro et al., 2013). Nesse contexto, deve ser dada a devida importância para a proteção da mesma.

Com os avanços tecnológicos na eletrônica de potência, criou-se o conceito de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) com o objetivo de flexibilizar e otimizar a capacidade operativa do sistema (Frontin et al., 2013; Hingorani et al., 2000). A introdução de equipamentos FACTS em LTs é uma realidade dentro do sistema elétrico. Dessa forma, os investimentos em expansão da rede podem ser postergados, o que possibilita uma melhor gestão dos ativos do sistema.

A inserção de dispositivos FACTS nas LTs traz benefícios ao sistema no qual está conectado de diversas formas: aumenta a capacidade de transmissão de potência nas linhas existentes; aprimora a estabilidade de regime permanente e dinâmica; contribui para o amortecimento de oscilações de potência; melhora a estabilidade de tensão e reduz o problema da ressonância subsíncrona (Sidhu et al., 2005).

Entretanto, a inserção dos dispositivos FACTS pode modificar os valores de amplitude e ângulo de tensão e corrente do sistema onde são inseridos e, conseqüentemente, da impedância medida, podendo afetar a operação dos relés de proteção baseados na característica de impedância, como aqueles aplicados em LTs (exemplo da função ANSI 21) e geradores (exemplo da função ANSI 40). Tais efeitos podem ser refletidos nos tempos de operação e nos alcances das zonas de proteção, afetando assim os estudos de estabilidade e coordenação do sistema de proteção.

Em vista dos problemas supracitados e observando uma tendência desta temática na literatura, como em (Bessa, 2015), (Paz and Cruz, 2015) e (Taquire et al., 2016), despertou-se o interesse em aprofundar os estudos nesta linha de pesquisa. Assim, neste trabalho é realizado um estudo para avaliar a função de proteção de impedância, conhecida como ANSI 21, ao se inserir FACTS nas LTs.

O foco deste trabalho será o estudo de um tipo especial de dispositivos FACTS, o Compensador Estático de Reativos (CER). Sabe-se que o CER é um dispositivo FACTS *shunt* e que possui um tempo de resposta rápido. Nessa perspectiva é muito importante considerar a sua influência em casos de falha na LT e os seus efeitos nas medições do relé de distância (Sidhu et al., 2005).

Para realização deste estudo, realizou-se a modelagem de todo um SEP teste, desde a representação de componentes

de potência (geradores, LTs e cargas) até os dispositivos de controle, regulação e proteção, fazendo uso do PS-CAD/EMTDC. Diversos eventos são simulados e armazenados em um banco de dados para teste *off-line* em malha fechada com um relé de proteção comercial. Tal dispositivo é testado para diferentes cenários com e sem a presença do CER, avaliando o tempo de resposta da função de proteção baseada na característica de impedância de LTs, a ANSI 21. As principais conclusões são reportadas com bases nas análises das simulações e dos testes.

O artigo é composto por uma breve fundamentação teórica na seção 2. E em seguida pela metodologia prática na seção 3. Posteriormente, na seção 4, faz-se uma análise dos resultados obtidos. Por fim, conclui-se sobre os mesmos confrontando com a literatura na seção 5.

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS SOBRE O CER E PROTEÇÃO ANSI 21 APLICADAS A LTS

2.1 Compensador Estático de Reativos - CER

O CER é uma solução híbrida para a regulação de tensão e é conectado em paralelo com a rede de transmissão. É a composição de Capacitores Chaveados por Tiristores (CCT) com Reatores Controlados por Tiristores (RCT). O termo “estático” indica que não há componentes que se movem ou que rotacionam (Kundur et al., 1994; Hingorani et al., 2000).

Para um melhor entendimento sobre como o CER altera os parâmetros da rede, é útil uma análise da equação da potência transmitida entre duas barras de um sistema a partir da Figura 1. Nas extremidades da LT, tem-se os equivalentes Thévenin da geração à esquerda (barra 1) e dos elementos restantes do SEP a direita (barra 2) da Figura 1.

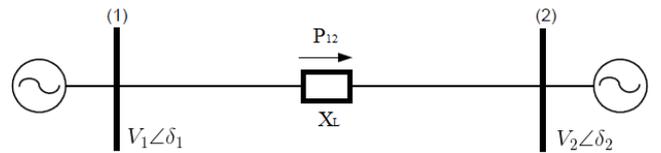


Figura 1. Sistema de Transmissão de Corrente Alternada.

A equação que estabelece o fluxo de potência entre as barras 1 e 2 do sistema é de acordo com (1) (Frontin et al., 2013).

$$P_{12} = \frac{V_1 \cdot V_2}{X_L} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (1)$$

onde P_{12} é a potência ativa que flui da barra 1 para a barra 2. V_1 , δ_1 e V_2 , δ_2 são, respectivamente, os módulos e ângulos das tensões nas barras 1 e 2. Por último, X_L é a impedância entre as barras 1 e 2.

O CER é conectado em *shunt* com a LT e ocorre uma alteração no numerador de (1), nas variáveis de módulo e ângulo da tensão na barra na qual ele está conectado e conseqüentemente altera-se o resultado do fluxo de potência do sistema. Em outras palavras, o CER possui a capacidade de trocar reativos com o sistema. Dessa

forma, a alocação do CER no sistema de transmissão permite otimizar e flexibilizar a operação do SEP. No entanto, como consequência têm-se alteração nas variáveis do sistema. Os ajustes das proteções dependem destas variáveis, fazendo-se necessária uma revisão da proteção nesse novo cenário.

2.2 Proteção de Impedância em LTs - ANSI 21

O relé de distância (ANSI 21) avalia a impedância elétrica entre o ponto de instalação dos transformadores de instrumento até o limiar de sua zona de alcance. A representação da impedância se dá no diagrama R-X e caso um defeito ocorra dentro da sua zona de proteção da LT a tensão tende a reduzir e a corrente tende a aumentar, fazendo com que a impedância medida se reduza e o seu trajeto se desloque para a origem do diagrama R-X.

O relé de distância se destaca na proteção de LTs por seus ajustes serem independentes das configurações do sistema, ou seja, a parametrização do relé depende apenas das características intrínsecas da LT, como a reatância, capacitância, resistência e o seu comprimento. As filosofias de proteção do relé 21 podem ser baseadas em características de impedância, admitância ou reatância. Neste trabalho é utilizada a característica de admitância, ou MHO, cujos detalhes são apresentados na seção 3.1.

A proteção de mínima impedância ou distância (ANSI 21) é normalmente aplicada na proteção de LTs como proteção principal (Filho and Mamede, 2000). Para isso, as correntes e tensões provenientes dos transformadores de corrente e tensão (TCs e TPs), respectivamente, são monitoradas para o cálculo das impedâncias vistas pelo relé localizado na barra de conexão da LT.

3. METODOLOGIA

No presente trabalho, foi realizada a modelagem de um SEP e os seus equipamentos de potência, controle e regulação em ambiente computacional. Para avaliar os impactos do CER na resposta da função de proteção ANSI 21 de uma LT, foram provocados vários tipos de curto-circuitos (monofásicos, bifásicos e trifásicos, sendo estes dois últimos envolvendo a terra ou não) em diversos pontos, de modo que o CER esteja fixo no meio da LT sob análise.

A modelagem implementada consiste no sistema IEEE 9 barras modificado por OPAL-RT (2017), composto por três geradores, três transformadores elevadores, seis trechos de LTs e três cargas para a representação do sistema elétrico. Essa modelagem é amplamente usada em estudos de estabilidade, fluxo de potência, curtos-circuitos e proteção, como ilustrado na Figura 2.

O CER utilizado nas avaliações das funções de proteção possui uma potência de 167 MVar em seus CCTs e 100 MVar em seus RCTs. Essa configuração foi retirada de um modelo exemplo da biblioteca do software PS-CAD/EMTDC, adequando apenas aos níveis de tensão do sistema em questão. As malhas de controle implementadas nesse equipamento, bem como os seus ganhos associados, são de acordo com valores padrões do software. A utilização desta configuração foi devida a simplicidade de alocação e da elaboração do circuito de controle.

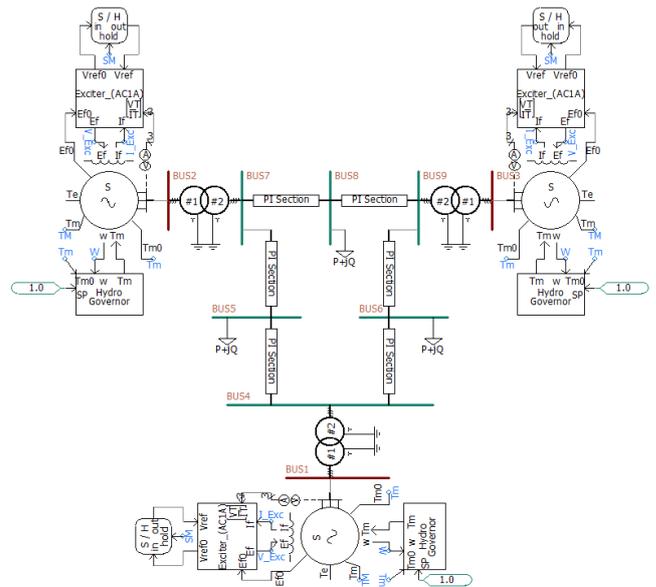


Figura 2. Sistema IEEE 9 barras.

A modelagem completa e a simulação do sistema é executada no software PSCAD/EMTDC. O objetivo das simulações é obter os sinais de tensões e correntes no barramento de início da LT para a análise da função ANSI 21. Desse modo, foram gerados um banco de dados com sinais de tensão e corrente no formato COMTRADE, oriundos dos cenários simulados com e sem a presença do CER. Esses sinais foram carregados em um módulo (*Advanced Transplay*) de uma mala de testes (modelo OMICRON CMC 356) e aplicados de forma analógica em um relé numérico de proteção de LTs SEL-421, para avaliar a função de proteção ANSI 21.

A parametrização do relé é feita através do seu software *AcSELerator Quickset*, e a comunicação com a mala de testes é feita através do software *Test Universe*. A montagem da implementação realizada para os testes no relé está de acordo com a Figura 3.

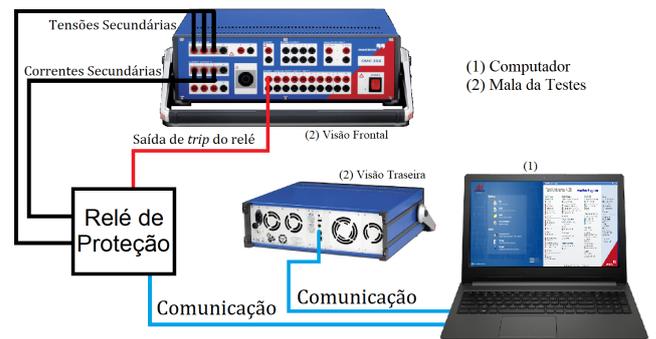


Figura 3. Montagem realizada para os testes.

A comunicação entre o computador e a mala de testes é por meio do cabo *ethernet*, assim como é feita a comunicação relé-computador. Os arquivos COMTRADE são carregados na mala de testes e aplicados de forma analógica no relé sob teste, o qual retornará à mala o sinal de *trip* (disparo) quando da atuação de uma das suas funções de proteção.

3.1 Ajuste da Função ANSI 21

O objeto de estudo para a análise da função ANSI 21 consiste na proteção do trecho de LT entre as barras 7 e 8 da Figura 2. Esse trecho é destacado e melhor representado de acordo com a Figura 4.

As LTs são representadas por seu modelo π equivalente por meio do bloco *Seção PI*, apresentado pela biblioteca do PSCAD/EMTDC. As barras verdes (7, 8 e 9) da Figura 4 correspondem a configuração original. A barra cinza corresponde a barra fictícia onde o CER foi instalado, localizado a 50% da LT 7-8. Essa localização é comumente usada, como em Sidhu et al. (2005). As barras vermelhas também são fictícias e tem por objetivo a aplicação do curto-circuito. Nota-se que, mesmo que a configuração da Figura 4 seja mantida, os valores das porcentagens do comprimento da LT, representados pelos modelos π equivalente, serão alterados. A única seção que tem valor fixo é a *Seção PI I*, que corresponde a 50% da LT 7-8. A título de exemplo, para aplicar um curto-circuito a 80% da LT 7-8, os blocos de *Seção PI II* e *Seção PI III* irão corresponder, respectivamente, a 30 e 20% do restante da LT 7-8.

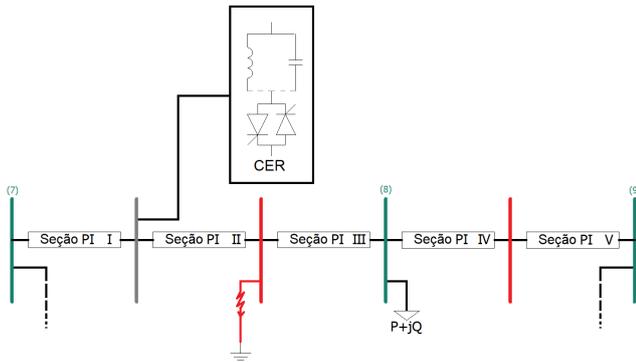


Figura 4. Trecho entre as barras 7 à 9 com a inserção do CER.

Os parâmetros das LTs analisadas estão dispostos na Tabela 1, os quais foram adaptados de (OPAL-RT, 2017), sendo que a LT 7-8 tem 76,176 km de extensão e a LT 8-9 possui 106,646 km.

Tabela 1. Parâmetros das linhas de transmissão. Adaptado de (OPAL-RT, 2017)

LT	R_0 (Ω)	X_{L0} (Ω)	X_{C0} (Ω)	R_1 (Ω)	X_{L1} (Ω)	X_{C1} (Ω)
7 \rightarrow 8	44,9	114,3	591,2	4,5	38,2	355,0
8 \rightarrow 9	62,9	160,0	421,6	6,3	53,5	253,0

A partir dos parâmetros retirados da Tabela 1, têm-se os dados necessários para realizar a parametrização da função 21 no relé sob teste.

Os parâmetros utilizados foram calculados por meio das instruções contidas no manual do fabricante (Schweitzer Engineering Laboratories, 2011), de modo que as zonas de proteção MHO são empregadas para todos os tipos de faltas e as zonas quadrilaterais são exclusivas para faltas envolvendo a terra.

A primeira zona MHO tem alcance de 80% do trecho correspondente entre as barras 7 e 8 (LT 7-8). A segunda zona protege totalmente a LT 7-8 mais 50% do trecho correspondente a LT 8-9, e a terceira zona protege totalmente as duas LTs.

A primeira zona quadrilateral possui alcance de 80% da LT 7-8. A segunda e a terceira zona protegem até 50% da LT 8-9, diferenciando-se apenas pelo alcance resistivo da zona e o seu tempo de atuação.

A temporização das zonas MHO e quadrilateral são compartilhadas, sendo que a zona 1 é instantânea, a zona 2 temporizada de 300 ms e a zona 3 de 600 ms.

As LTs juntamente com as zonas de proteção MHO e quadrilateral estão representados no diagrama R-X de acordo com a Figura 5.

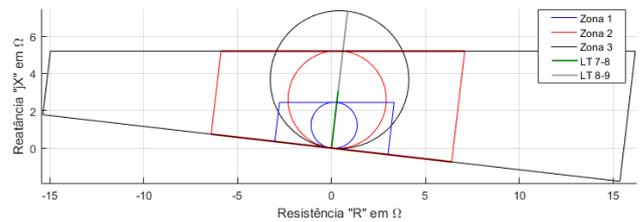


Figura 5. Ajustes das zonas de proteção MHO e Quadrilateral do relé sob teste.

Os pontos onde foram aplicados os curtos-circuitos são sempre 10%, a menos ou a mais, do alcance de cada zona de proteção e no limiar. Os tipos de curtos-circuitos aplicados englobam todos os tipos: monofásicos, bifásicos e trifásicos.

É importante destacar que, para cada tipo de curto-circuito, foram aplicadas todas as combinações de fases, envolvendo a terra ou não. Nessa perspectiva, há uma enorme quantidade de informações que não é possível inserir nesse estudo de forma individual. Assim, os resultados apresentados são dados por meio da média dos resultados dos curtos-circuitos de cada tipo, com e sem a presença do CER.

4. RESULTADOS

Em todas as análises, para cada falta, foram extraídos os dados de localização da falta vista pelo relé, tempo de atuação e a zona de atuação. Após a aquisição dos dados, calculou-se o erro absoluto, em km, que a inserção do CER na LT causou no sistema. Os erros absolutos calculados se referem ao erro das médias da localização da falta visto pelo relé, com e sem a presença do CER.

4.1 Curtos-circuitos próximos ao limiar da Zona 1

Para curtos-circuitos monofásicos, a alocação do CER influenciou em um subalcance na ordem de dezenas de quilômetros na atuação do relé. Ou seja, houve uma limitação no alcance da proteção da função ANSI 21, de modo que, um trecho que é totalmente protegido sem a presença do CER, ficará protegido parcialmente após a alocação do mesmo. Os resultados correspondentes aos erros associados a inserção do CER estão representados pela Figura 6.

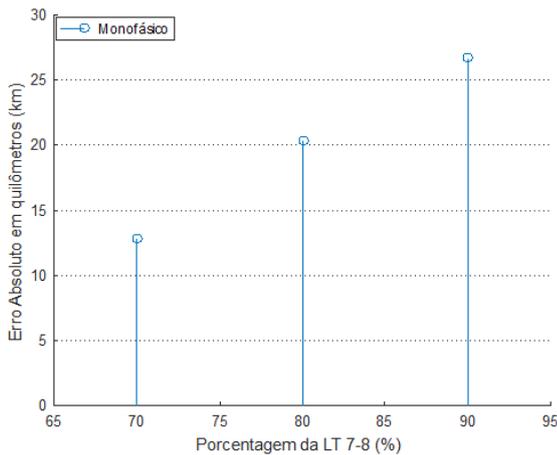


Figura 6. Erros absolutos - Curtos-circuitos monofásicos ao redor da zona 1.

Para o caso de um curto-circuito monofásico a 70% da LT 7-8 a influência do CER fez com que o relé enxergasse a falta, em média, 12,84 km à frente. Isso permitiu um atraso de 300 ms em sua atuação, já que o relé deixou de atuar na zona instantânea para atuar na zona 2, que é temporizada.

Para um curto-circuito monofásico no limiar da zona instantânea, ou seja, à 80% da LT 7-8, o relé localizou a falta à 20,38 km a frente da localização real. Essa diferença não causou variação na zona de atuação e, portanto, não houve diferença na temporização. O mesmo ocorreu para um curto-circuito monofásico a 90% da LT 7-8.

Para a análise de curtos-circuitos bifásicos e trifásicos, os resultados dos erros absolutos causado pela inserção do CER estão dispostos na Figura 7.

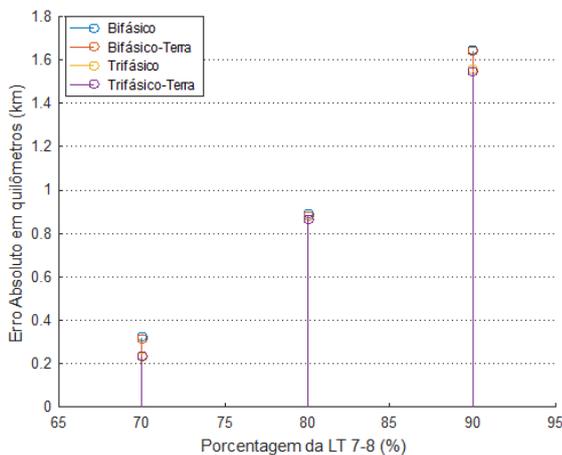


Figura 7. Erros absolutos - Curtos-circuitos bifásicos e trifásicos ao redor da zona 1.

Inicialmente para curtos-circuitos bifásicos e trifásicos a 70% da LT 7-8, não houve alterações significativas para o cenário do CER presente, limitando-se a um avanço de 323 m. Assim, independente da alocação do CER, bem como a presença ou ausência do elemento terra nas faltas, não causaram uma mudança na zona de atuação do relé.

Para curtos-circuitos no limiar da zona 1 os erros para as faltas bifásicos e trifásicos não superaram os 900 m de

distância. É importante destacar que, mesmo que o curto-circuito seja aplicado exatamente a 80% da LT 7-8 o relé enxergou as faltas sem a presença do CER em 80,15%, e atuou em zona 1. Essa variação percentual está dentro da classe de exatidão do relé e representa 114 m numa LT de 76,176 km. No entanto, em todos os casos com a presença do CER, o relé atuou em zona 2. Nesse sentido, a inserção do CER promoveu um atraso de 300 ms na atuação do relé.

Diferentemente do caso anterior, para curtos-circuitos a 90% da LT 7-8, o erro de distância promovido pelo CER foi de 1,64 km para faltas bifásicos, e de 1,55 km para faltas trifásicos. No entanto, como a localização da falta se encontra logo após ao alcance da zona instantânea, não houve alterações com relação ao tempo de atuação ou a zona de atuação do relé.

4.2 Curtos-circuitos próximos ao limiar da Zona 2

Para curtos-circuitos monofásicos a partir de 40% da LT 8-9 não é possível realizar gráficos como nos casos anteriores. Isso ocorre porque a zona quadrilateral ajustada no relé sob teste se limita a proteger até 50% da LT 8-9 e o erro associado a alocação do CER extrapola esses limites, ou seja, o relé não atua para faltas 1ϕ 's após 50% da LT 8-9.

Mais uma vez há uma variação entre a localização da falta aplicada na simulação e a localização vista pelo relé. Mesmo quando a falta foi inserida no trecho a 40% da LT 8-9, o relé enxergou a falta em 45,96%. Assim, para o caso de um curto-circuito monofásico, o relé atuou para a zona 2 em todos os casos.

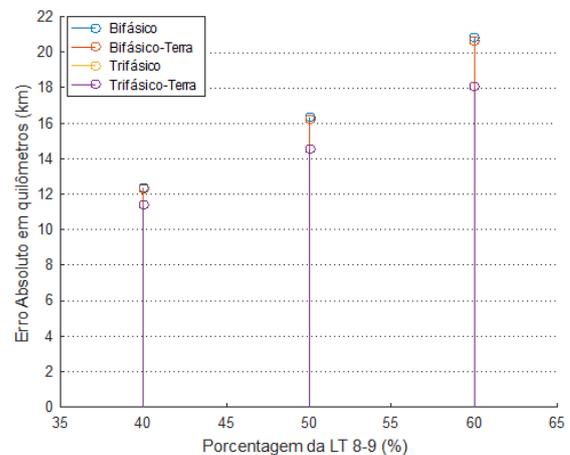


Figura 8. Erros absolutos - Curtos-circuitos bifásicos e trifásicos ao redor da zona 2.

Para os casos bifásicos e trifásicos (Figura 8) há um aumento considerável do erro de distância absoluto em relação a presença do CER. Ao analisar as faltas a 40% da LT 8-9, para curtos-circuitos bifásicos o relé enxergou a falta 12,34 km à frente do ponto de falta simulado. Já para faltas trifásicos foram 11,37 km à frente. Essa desigualdade provocou uma mudança na zona de atuação, na qual o relé atuou para zona 3 na presença do CER, admitindo que o sistema ficasse submetido a falta por mais 300 ms. Destacase também que o erro absoluto de faltas envolvendo a terra são muito semelhante aos de faltas não envolvendo a terra.

Deve-se atentar ao fato de que as zonas quadrilaterais se limitam a proteger 50% da LT 8-9, portanto, o relé não atua para faltas 1ϕ 's à 50% da LT 8-9, independentemente da alocação do CER. Isso é levado em consideração até o final das análises dessa função.

Entretanto, constata-se que para as análises seguintes de curtos-circuitos bifásicos e trifásicos, o relé sempre calculará o curto-circuito numa localização anterior em relação a simulação no cenário de ausência do CER. Isto é, para curtos-circuitos bifásicos a 50% da LT 8-9 o relé localizará a falta, em média a 49,32%. Já para curtos-circuitos trifásicos localizará à 48,66% da LT 8-9.

Para curtos-circuitos bifásicos e trifásicos à 50% da LT 8-9, o relé enxerga a falta, respectivamente, a 16,35 e 14,54 km à frente de sua localização. Para faltas bifásicas-terra o relé enxergou a falta 183 m a frente em relação a falta bifásica sem envolver a terra. Já para o caso trifásico-terra o valor foi idêntico. Os resultados para a análise de curtos-circuitos a 40% da LT 8-9 foram iguais para os curtos-circuitos a 50%, isso se deve ao fato mencionado no parágrafo anterior.

Para curtos-circuitos bifásicos e trifásicos a 60% da LT 8-9, o relé localizou a falta a 20,73 e 18,05 km, respectivamente, à frente de sua localização sem considerar a instalação do CER. No entanto estes erros não causaram um subalcançe da função 21.

4.3 Curtos-circuitos próximos ao limiar da Zona 3

Para os casos desta seção não há atuações do relé na presença do CER. As medições da localização das faltas foram lidas pelo relé fora do seu alcance de proteção. Para curtos-circuitos bifásicos e trifásicos à 90% da LT 8-9, o relé enxerga a falta à 88,77% e 88,97% da LT, respectivamente, e atua em zona 3 temporizada em 600 ms. Já para curtos-circuitos bifásicos e trifásicos à 100% da LT 8-9, o relé enxerga a falta, respectivamente, à 95,44% e 92,58% da LT e também atua em zona 3.

5. CONCLUSÃO

A proteção de impedância (ANSI 21) se mostrou sensível a presença do CER. Ao redor dos limites de uma zona, com o CER foi provocado um atraso ou uma não atuação devido ao acréscimo da localização do ponto de falta visto pelo relé. Esse erro associado a localização da falta na presença do CER, pode causar um atraso para que a equipe de manutenção encontre o defeito e, em casos extremos, os equipamentos podem estar sujeitos a condições severas por mais tempo do que a proteção foi ajustada para atuar, podendo afetar a estabilidade do sistema.

Além disso é evidente que à medida que a distância de aplicação do curto-circuito está aumentando, os erros associados a alocação do CER também aumentam. Constata-se também que o erro absoluto nos casos de faltas envolvendo a terra são muito semelhante aos de faltas não envolvendo a terra, e que, os maiores erros na localização da falta em virtude da alocação do CER estão associados a curtos-circuitos monofásicos, resultado coerente com o obtido em (Sidhu et al., 2005) numa análise semelhante.

Para futuros trabalhos pode-se realizar um estudo equivalente para outros tipos de dispositivos FACTS, por exemplo o STATCOM ou aqueles baseados em compensação série. Em seguida, pode-se analisar as alterações nos tempos de atuação e localização da falta em razão da inserção da compensação no sistema.

Portanto, na análise de proteção de LTs constatou-se que a presença do CER promove um subalcançe da função de proteção ANSI 21, fazendo com que a parametrização da proteção não seja a mais adequada, sendo necessário novos ajustes considerando a influência do CER.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos para elaboração desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Bessa, A.R. (2015). *Estudo de Aplicação de Compensador Estático do Tipo SVC na Linha de Transmissão Mesquita-Viana II em 500 kV*. Master's thesis, Universidade Federal do Espírito Santo.
- Duro, M.A.S. et al. (2013). Falhas em linhas de transmissão elétrica na região sudeste do Brasil e efeitos do ambiente geofísico. *Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação*.
- Filho, J.M. and Mamede, D.R. (2000). Proteção de sistemas elétricos de potência. *Grupo Gen-LTC*.
- Frontin, S.O. et al. (2013). Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. *Finatec 1ª Edição, Brasília*.
- Hingorani, N.G., Gyugyi, L., and El-Hawary, M. (2000). *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*, volume 1. IEEE press New York.
- Kundur, P., Balu, N.J., and Lauby, M.G. (1994). *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York.
- OPAL-RT (2017). IEEE 9 Bus System Example. Disponível em: kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9_model_documentation_R0.pdf. Acesso: 12 nov.2019.
- Paz, R. and Cruz, M. (2015). *Contribuição para proteção de distância em linhas compensadas com dispositivos UPFC*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schweitzer Engineering Laboratories (2011). *Protection and Automation System*. SEL-421, Instruction Manual.
- Sidhu, T.S., Varma, R.K., Gangadharan, P.K., Albasri, F.A., and Ortiz, G.R. (2005). Performance of distance relays on shunt-facts compensated transmission lines. *IEEE Transactions on Power delivery*, 20(3), 1837–1845.
- Taquire, N.G., Leite, J.B., and Mantovani, J.R. (2016). Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série. In *XXI Congresso Brasileiro de Automática, Vitória, Espírito Santo, Brasil*.