

## Estudo comparativo dos efeitos das compensações série e paralelo na proteção de Linhas de Transmissão

Raphael F. Oliveira\*. Aurélio L. M. Coelho\*. Francisco R. A. C. Baracho\*\*. Ivan P. Faria\*. Elcio F. Arruda\*.

\**Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira Itabira, Brasil (e-mail: raphael.fcto@gmail.com, aurelio.coelho@unifei.edu.br, ivan.faria@unifei.edu.br, elcio.arruda@unifei.edu.br)*

\*\**Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto – Campus de João Monlevade João Monlevade, Brasil (e-mail: f\_baracho@ufop.edu.br)*

---

Abstract: The FACTS (Flexible AC Transmission Systems) devices have great use in the Electric Power System (EPS) for the dynamic control of the active and reactive powers of the system. This work deals with a comparative analysis between the effects caused in the distance protection of transmission lines (TLs) by two of these devices: the STATCOM (Static Synchronous Compensator) and the SSSC (Static Synchronous Series Compensator). The objective is to verify how the connections of these two converters, connected in series in the case of SSSC and in parallel for STATCOM, influence the characteristics of the distance protection in relation to the range of the distance relay. Computational simulations were made using the PSCAD/EMTDC software where both the electrical system under analysis and FACTS were modeled and the protection zones for one of these lines were defined. After the section was protected, the FACTS were inserted and short circuits between phases and between phase and ground were applied, both in the presence and in the absence of the FACTS for comparative analysis. Once the effects of FACTS devices on distance protection in a simulation environment were verified, laboratory tests were carried out to ensure compliance among the results.

Resumo: Os dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) possuem grande emprego no Sistema Elétrico de Potência (SEP), para controle dinâmico das potências ativa e reativa do sistema. Aborda-se, neste trabalho, uma análise comparativa entre os efeitos causados na proteção de distância de linhas de transmissão (LTs) por dois destes dispositivos: o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) e o SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*). O objetivo é verificar como as conexões destes dois conversores, ligados em série no caso do SSSC e em paralelo para o STATCOM, influenciam nas características da proteção de distância, em relação ao alcance dessa função de proteção. Foram realizadas simulações computacionais usando o *software* PSCAD/EMTDC, onde se modelaram tanto o sistema elétrico em análise quanto os FACTS e foram delimitadas as zonas de proteção para uma das linhas. Depois de realizada a proteção do trecho, foram inseridos os FACTS e aplicados curtos-circuitos entre fases e entre fase e a terra, tanto na presença quanto na ausência dos FACTS, para análises comparativas. Uma vez verificados os efeitos dos dispositivos FACTS na proteção de distância em ambiente de simulação, realizaram-se testes em laboratório para assegurar a concordância entre os resultados.

**Keywords:** FACTS; SEP; Series compensation; Parallel compensation; Protection.

**Palavras-chaves:** FACTS; SEP; Compensação série; Compensação paralela; Proteção.

---

### 1. INTRODUÇÃO

As LTs são as principais responsáveis pelo transporte da energia gerada até o consumidor. Toda energia é transmitida em alta e extra-alta tensão visando reduzir as perdas técnicas (ANEEL, 2020), inerentes aos materiais condutores. No entanto, verifica-se que mesmo com tensões mais altas, este sistema sofre outras perdas, associadas a fenômenos naturais, vandalismo e furtos. Essas são conhecidas como perdas não técnicas.

Para melhorar a transmissão de energia elétrica frente aos prejuízos citados, uma alternativa empregada é a utilização de dispositivos FACTS, que são associações

de indutores e capacitores chaveados por elementos semicondutores de potência. Esses permitem o controle da magnitude e ângulo de fase das tensões e correntes onde são aplicados, e alteram a reatância indutiva equivalente da LT, modificando a potência transmitida conforme descrito por Pupin, C. E. (2018). Quando se faz uso de FACTS, os investimentos em expansão da rede através da construção de novas LTs podem ser postergados, possibilitando uma melhor gestão dos ativos.

Como os FACTS modificam a amplitude e o ângulo de tensão e corrente do sistema e, conseqüentemente, a impedância medida, estes equipamentos afetam a

operação dos relés de proteção baseados na característica de impedância. Estes efeitos podem ser refletidos nos tempos de operação e nos alcances das zonas de proteção, como relatado em Liu et al. (2010), Elsamahy et al. (2013), Ghorbani et al. (2014), Yaghobi (2014), Samkari et al. (2015), Deshmukh et al. (2016) e Mati et al. (2017).

Em vista destes problemas, despertou-se o interesse em levantar os principais efeitos que os dispositivos FACTS série SSSC e paralelo STATCOM podem causar na proteção de distância de LTs. Em complemento à literatura, este trabalho apresenta, além de simulações computacionais, análises dos resultados obtidos a partir de experimentos laboratoriais para verificar a resposta de um relé comercial neste contexto. Para isso, os dispositivos FACTS são modelados no *software* PSCAD/EMTDC, bem como é feita a parametrização do relé de distância comercial para proteção de um trecho de um sistema de potência teste. Os FACTS em estudo são inseridos na LT estudada, e os principais efeitos desses na proteção de distância são avaliados.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Princípio da Compensação de Energia

Ao se considerar uma LT conectando uma estação geradora (G) a um centro de carga, conforme ilustrado na Fig. 1, assumindo que a LT não possui perdas, e ignorando o carregamento da linha, o fluxo de potência ativa  $P$  é dado pela equação (1), como evidenciado por Padiyar, K. R. (2007). Por outro lado, o fluxo de potência reativa  $Q$ , é dado por (2).

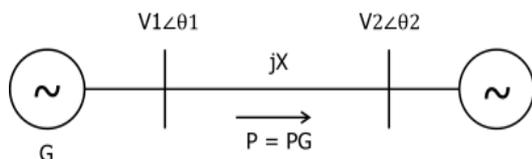


Fig 1 Linha de transmissão CA transmitindo potência de uma central geradora.

$$P = \frac{V1.V2}{X} \text{sen}(\theta1 - \theta2) \quad (1)$$

$$Q = \frac{V1.V2}{X} [1 - \text{cos}(\theta1 - \theta2)] \quad (2)$$

Em (1) e (2),  $X$  é a reatância da linha,  $V1$  e  $V2$  as tensões nos barramentos, e  $\theta1$  e  $\theta2$  os ângulos das tensões em cada barra. Supondo que  $V1$  e  $V2$  sejam mantidos constantes, a potência injetada pela geração  $G$  determina o fluxo de potência na linha.

Durante o transporte de energia, a potência transmitida depende de três parâmetros: tensões, reatância e diferença angular entre as tensões dos terminais. Os dispositivos FACTS atuam neste sentido, dependendo

da topologia e conexão adotada durante a inserção desses, modificando o fluxo de potência.

### 2.2 Dispositivos FACTS

Os FACTS surgiram com os avanços nos estudos da eletrônica de potência, onde se desenvolveram componentes elétricos à base de silício, capazes de chavear sinais elétricos de tensão e corrente nos níveis requeridos, recriando a forma de onda em magnitude, frequência e forma adequadas.

Estes equipamentos são classificados pelo tipo de conexão empregado e através da potência dos dispositivos eletrônicos utilizados no controle. São dois grupos principais: os conversores de impedância variável, e os VSCs (Conversores Fonte de Tensão, acrônimo do inglês *Voltage Source Converters*) evidenciados por Padiyar, K. R. (2007) e Oliveira, R. F. Oliveira et al (2021).

#### 2.2.1 STATCOM

Um STATCOM é um dispositivo FACTS formado por um VSC conectado em paralelo com os sistemas de transmissão CA, que permite o controle da absorção ou injeção de potência reativa através da posição relativa da tensão gerada pelo VSC em relação à tensão da rede.

Sua aplicação aumenta a capacidade das LTs existentes, regula a tensão das linhas, melhora a estabilidade transitória e o amortecimento da oscilação de potência, corrige o fator de potência e elimina harmônicos de corrente, como descrito por Albehadili, A., Abdul-Qader, I. (2015).

A Fig. 2 exemplifica a topologia de um STATCOM. A ação de chaveamento da tensão  $V_{dc}$  é feita através dos terminais de  $g1$  a  $g6$ , que são comandados via técnica PWM (Modulação por Largura de Pulso, acrônimo do inglês *Pulse Width Modulation*) para injeção de uma tensão que esteja em sincronia com a rede. Através do sistema de controle, o STATCOM pode injetar ou consumir potência da rede em regime permanente.

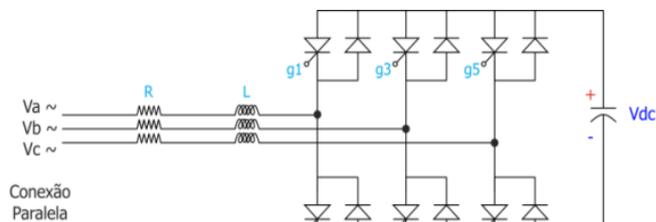


Fig. 2 Topologia de circuito de um STATCOM. Adaptado de Padiyar, K. R. (2007) e Oliveira, R. F. Oliveira et al (2021).

Os circuitos de conversores de potência como o STATCOM são acompanhados de indutores e resistores na saída, como indicado pelos componentes  $R$  e  $L$  na

Fig. 2, necessários para filtrar o conteúdo harmônico proveniente da ação de chaveamento.

### 2.2.2 SSSC

O SSSC é um conversor que opera em série com a LT, injetando tensão modulada em magnitude e fase, na frequência da rede, através de um transformador de acoplamento.

O SSSC pode ser aplicado à LT com o objetivo de controlar o fluxo de potência, reduzindo a reatância equivalente dessa e consequentemente aumentando a capacidade de transmissão.

A Fig. 3 exemplifica o circuito de um SSSC. Os tiristores são comandados pelas portas de  $g_1$  a  $g_6$  via PWM e o filtro indutivo capacitivo indutivo (LCL) de saída, indicado pelos componentes  $L_1$ ,  $C_1$  e  $L_2$ , é necessário para remoção do conteúdo harmônico proveniente da ação de chaveamento da tensão  $V_{dc}$ .

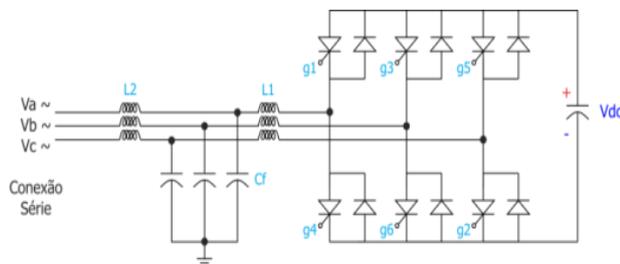


Fig. 3 Topologia de circuito de um SSSC. Adaptado de Padiyar, K. R. (2007) e Oliveira, R. F. Oliveira et al (2021).

### 2.3 Proteção de Distância de Linhas de Transmissão

A proteção das LTs é utilizada para atuar sempre que houver um defeito dentro de uma área protegida, de forma seletiva, isolando o trecho sujeito à falha. Os componentes utilizados na proteção são os relés, instalados nas extremidades da LT através de painéis de comando nas subestações (SEs) como mostrado por Araújo, C. A. et. al (2005).

Os relés possuem princípios de operação que podem ser principais ou secundários e instantâneos ou temporizados. Em cada extremidade da SE, os relés realizam as leituras da tensão e corrente da LT a partir do uso de transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs), que refletem em valores secundários as grandezas da LT. Assim, os dispositivos de proteção estimam os parâmetros necessários para atuar mediante a existência de um defeito, como evidenciado por Araújo, C. A. et. al (2005).

Os relés de distância, categorizados na tabela do *American National Standards Institute* (ANSI) como função 21, identificam a distância entre o ponto onde estão instalados e o ponto de falha por meio de medições

de impedância de sequência positiva associadas à falha, através dos TCs e TPs, como mostra De Araújo, M. R. (2015).

O modo de operação da proteção de distância é baseado na avaliação da impedância de curto-circuito, a qual é proporcional à distância até a falha, sendo necessário considerar na parametrização o tipo de falha envolvido para que os esquemas de proteção funcionem conforme o esperado, como mostrado por Oliveira, A. (2007).

Em comparação com outros tipos de proteção de LTs, a proteção de distância é mais rápida, seletiva e menos susceptível a mudanças. Para defeitos que ocorram em sua primeira zona de atuação – compreendida entre 80% a 90% do comprimento da linha - seu tempo de atuação é instantâneo. Na segunda zona, para defeitos nos últimos 10% a 20% do comprimento da linha de transmissão protegida, o tempo é de aproximadamente 400 a 500 ms, como descrito por Oliveira, A. (2007). Caso exista a parametrização de uma terceira zona, essa deve cobrir as zonas 1 e 2, com um tempo de atuação duas vezes maior que o tempo ajustado para a zona 2, ou seja, em torno de 1s. Essas regiões de proteção são comumente denominadas zonas mho, para faltas entre fases, e zonas quadrilaterais, para faltas envolvendo a terra, como ilustrado na Fig. 4 (a) e (b), respectivamente.

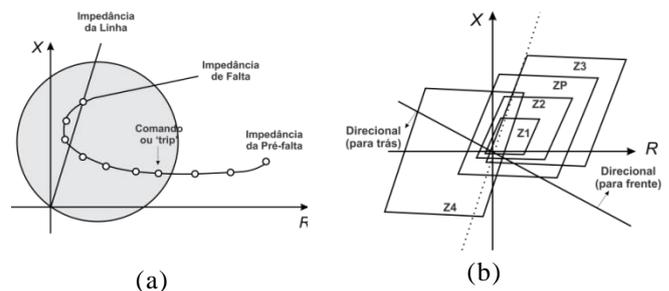


Fig. 4 Trajetória da impedância vista pelo relé para a característica: (a) mho; (b) quadrilateral, Silva, et. al (2009).

## 3. METODOLOGIA

Inicialmente, realizaram-se as modelagens computacionais do SEP estudado e dos conversores série e paralelo. Os diagramas foram obtidos por meio do PSCAD/EMTDC, um *software* que possui uma série de possibilidades de simulação envolvendo sistemas elétricos de potência, permitindo análise de curto-circuito, fluxo de potência, proteção dos sistemas elétricos, dentre outros. A Fig. 18, do apêndice A, ilustra o circuito do SEP IEEE 9 barras, utilizado neste estudo. O sistema teste é um SEP bastante empregado em estudos de fluxo de potência, curtos-circuitos, estabilidade e proteção, pois compõe um conjunto formado por três geradores, três transformadores elevadores, seis trechos de LT e três cargas fixas, cujos dados elétricos para modelagem neste estudo e posterior parametrização da proteção de distância foram obtidos do estudo de Opal-RT (2017).

De posse do sistema elétrico, foi feita a modelagem dos conversores, através de um VSC de 6 pulsos disponível na biblioteca do *software* adaptando-se o controle do conversor de acordo com as tensões empregadas no circuito analisado. A Fig. 5 ilustra o circuito do STATCOM utilizado e a Fig. 6 evidencia o SSSC modelado. Ambos os conversores foram anexados entre os barramentos 6 e 9, visto que durante o estudo de fluxo de potência, o barramento 6 foi o que apresentou menor nível de tensão em valores de tensão por unidade (p.u.).

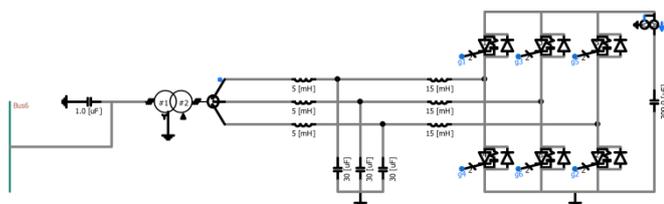


Fig. 5 STATCOM modelado no PSCAD/EMTDC.

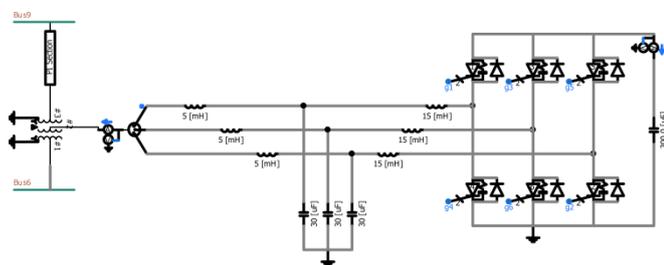


Fig. 6 SSSC modelado no PSCAD/EMTDC.

Com os conversores e o sistema elétrico em análise modelados no PSCAD/EMTDC, foram obtidos os sinais de tensão e corrente do barramento 6 para análise da proteção de distância. Foi gerado um banco de dados em formato COMTRADE a partir das simulações de faltas Fase-Fase e Fase-Terra, com e sem a presença dos FACTS estudados. Esses foram utilizados no módulo de testes Advanced Transplay da mala de testes secundários OMICRON CMC 356. Uma vez simulados os valores secundários de tensão e corrente da linha, foram aplicados os sinais analógicos em um relé numérico de proteção de LTs - modelo SEL-421 - para avaliar a função ANSI 21 (proteção de distância), como exemplificado na Fig. 4. A montagem para ensaio é mostrada na Fig. 7.

A medição da distância e da impedância de falta feita por uma proteção numérica de distância é efetuada através de algoritmos para análise dos sinais de corrente e tensão. O principal usa a análise de Fourier, onde se realiza o cálculo da resistência e reatância da LT utilizando equações diferenciais. As tensões e correntes amostradas são transformadas em fasores com as respectivas partes reais e imaginárias, por meio de filtros ortogonais e, somente a partir destes sinais, a impedância de curto-circuito é calculada, como descreve Oliveira, A. (2007).

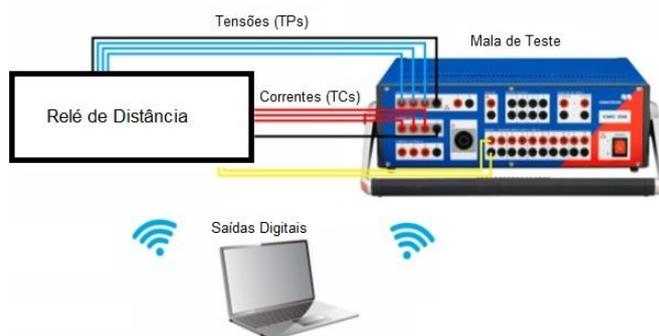


Fig. 7 Esquema de montagem para ensaios.

Neste trabalho, a amostragem dos sinais de tensão e corrente para estimativa da impedância da linha foi feita com o auxílio dos blocos de funções previamente definidos na biblioteca do *software* PSCAD/EMTDC.

### 3.1 Ajuste da Proteção de Distância

Inicialmente foi feita a parametrização para o trecho escolhido sem as compensações série e paralelo e, em seguida, inseriram-se os dispositivos FACTS, em simulações separadas para análise da trajetória da impedância. Considerou-se a extensão indicada na Fig. 8 (trecho 4-6-9).



Fig. 8 LT 4-6-9 protegida, alimentada por dois transformadores elevadores 1 e 3 (24/230kV e 15,5/230kV) ligados nas Barras 1 e 3, acoplados as centrais geradoras G1 e G3.

As LTs objetos de estudo são representadas por seu modelo  $\pi$  equivalente por meio do bloco Seção PI, da biblioteca do PSCAD/EMTDC. As barras 4, 6 e 9, em verde na Fig. 8, representam a configuração original do sistema. Na barra 6, foram inseridos os compensadores em paralelo, no caso do STATCOM e em série, no caso do SSSC.

Para o estudo de curto-circuito, em faltas aplicadas na zona 1 de proteção, foi necessário particionar a linha de 4-6 em 80% de seu comprimento, ou seja, em duas seções PI, com a primeira contendo 80% do trecho, e a segunda com os 20% restantes. O mesmo foi feito para faltas na zona 2, porém considerando 100% do trecho 4-6, somado a 50% do trecho 6-9. Para a zona 3, que compreende o final do trecho 6-9, foram aplicadas faltas no terminal 9, ou seja, no ponto que compreende 100% do trecho 4-6 acrescido de 100% do trecho 6-9. De posse dos parâmetros das LTs, que estão dispostos no estudo de Opal-RT (2017), foram definidas as zonas de proteção, conforme descrito na seção 2.3.

Os dados correspondentes à configuração da proteção no relé foram calculados por meio do manual de instruções do fabricante *Schweitzer Engineering Laboratories* (2011), onde as zonas de proteção do tipo mho foram empregadas em todos os tipos de faltas e as zonas quadrilaterais utilizadas para faltas envolvendo a terra.

Para as zonas mho, o ajuste da proteção do trecho 4-6-9 foi feito conforme descrito na seção 2.3. O ajuste das zonas quadrilaterais de proteção foi feito da mesma forma, considerando os mesmos alcances para as zonas 1, 2 e 3, bem como as mesmas temporizações. A diferença está no alcance resistivo que é maior do que o do tipo mho, conforme definido no manual *Schweitzer Engineering Laboratories*, (2011). A Fig. 9 mostra os diagramas obtidos durante a parametrização.

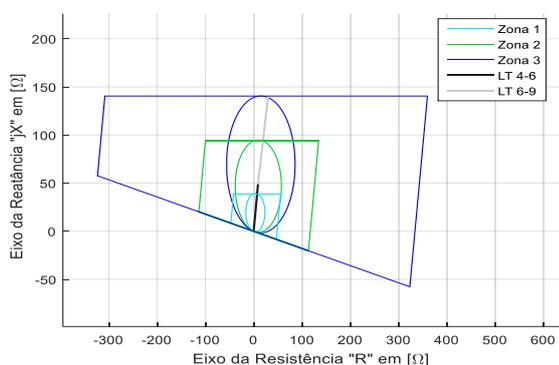


Fig. 9 Zonas de proteção do trecho 4-6-9.

De posse da proteção de distância do trecho estudado, foram simuladas faltas Fase-Fase e Fase-Terra nos limiares das zonas de proteção de modo a verificar, com e sem a presença de FACTS, a trajetória da impedância de falta para ambos os casos, obtendo parâmetros comparativos. Estes resultados são apresentados na seção 4.

#### 4. RESULTADOS

Durante as simulações e ensaios, verificou-se que sem a presença dos FACTS, o relé atuou conforme o esperado, para as faltas simuladas nas zonas de proteção 1, 2 e 3, pois as impedâncias de falta foram diretamente inseridas nessas. Isso pode também ser constatado através dos tempos, uma vez que o relé atuou instantaneamente para faltas em zona 1, com um atraso de 0,5 segundos para faltas em zona 2 e com 1 segundo para faltas em zona 3.

Devido à grande quantidade de informações a respeito dos ensaios de curtos-circuitos realizados com e sem a presença dos FACTS, não seria possível exibi-los completamente neste estudo. Assim, priorizou-se evidenciar apenas os casos de alterações significativas na proteção de distância, causadas pelo STATCOM e SSSC, estudados neste trabalho.

Dentre os efeitos que podem ser encontrados em estudos envolvendo a proteção de sistemas elétricos, é possível

destacar os sub e sobrealcanes. Um subalcanço ocorre quando a impedância aparente medida pelo relé é maior que a sua impedância de ajuste, ou seja, o relé protege um trecho menor de linha. Por outro lado, um sobrealcanço acontece quando a impedância aparente aferida pelo relé possui um valor menor que a sua impedância de ajuste e, com isso, o relé passa a proteger um trecho maior de linha.

#### 4.1 Ensaios de curto circuito com o STATCOM

Para os curtos-circuitos trifásicos aplicados nos limiares das zonas 1, 2 e 3, a inserção do STATCOM não influenciou no alcance das zonas de proteção, já que a impedância e os tempos de atuação foram os correspondentes a cada zona de proteção.

Para faltas bifásicas, embora o relé tenha atuado para os curtos-circuitos aplicados nos limiares das zonas 1 e 2, para a uma falta aplicada na zona 3, verificou-se um sobrealcanço da proteção. O relé que deveria atuar de acordo com a trajetória da impedância, se inserindo na zona 3 e com tempo de 1 segundo, atuou em zona 2 com tempo de 0,5 segundos. Neste caso, um trecho que deveria ser protegido apenas parcialmente, é protegido redundantemente, o que pode causar desligamentos desnecessários no SEP. A Fig. 10 mostra o diagrama de proteção com a trajetória da impedância para este tipo de falta simulada.

Uma possível causa para esse sobrealcanço pode residir na quantidade de conteúdo harmônico presente na saída do conversor. Este efeito é refletido no sinal de saída, podendo interferir na leitura das tensões e correntes pelo relé, como foi verificado a partir de medições dos valores RMS de tensão e corrente da LT considerada, utilizando o PSCAD/EMTDC.

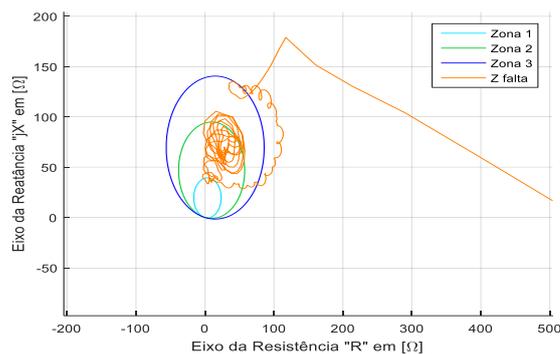


Fig. 10 Falta Fase-Fase no limiar da zona 3, atuação na zona 2.

Para as faltas do tipo Fase-Terra na zona 1 quadrilateral, o relé atuou na zona esperada. Porém, para faltas aplicadas nas zonas 2 e 3, o relé subalcança e não é verificado o sinal de comando de atuação, já que a trajetória da impedância não se insere nas zonas parametrizadas. Uma possível justificativa para deste efeito poderia ser o acréscimo de uma parcela resistiva associada à inserção do dispositivo STATCOM, de modo que a resistência total medida pelo relé durante a

estimativa da impedância é maior do que quando não se aplica este compensador. As Fig. 11 e 12 mostram, respectivamente, as trajetórias das impedâncias de falta para os curtos-circuitos aplicados em zonas 2 e 3, e os sublances verificados a partir da visualização da trajetória da impedância, que não se encontra inserida na área definida pelos diagramas mho.

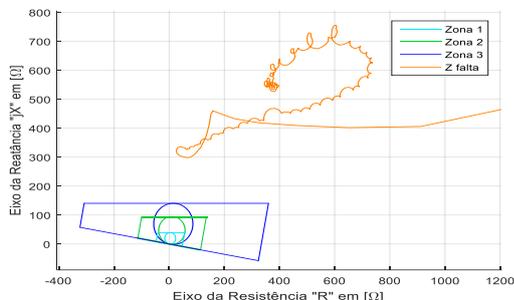


Fig. 11 Curto-circuito Fase-Terra aplicado na zona 2 com STATCOM. Não ocorre atuação.

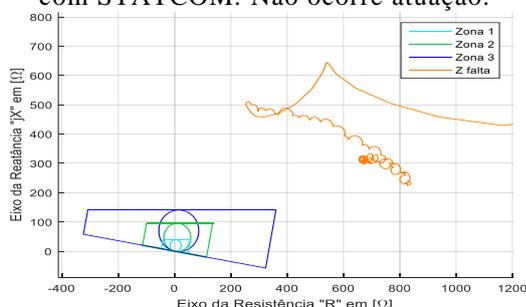


Fig. 12 Curto-circuito Fase-Terra aplicado na zona 3 com STATCOM. Não ocorre atuação.

#### 4.2 Ensaios de curto circuito com o SSSC

Para curtos-circuitos trifásicos, a inserção do SSSC, ao contrário do STATCOM, influencia no alcance das zonas de proteção. Embora a trajetória da impedância tenha seguido o que era esperado para faltas na zona 1, para faltas aplicadas nas zonas 2 e 3, houve um sublance tanto em termos de trajetória da impedância, quanto de temporização. Para a falta ocorrida em zona 2, o relé atuou após 2 segundos de aplicação da falta, e para a falta em zona 3, não se verificou o sinal de comando. Este comportamento foi observado também em faltas bifásicas. A Fig. 13 apresenta o ensaio realizado para falta trifásica na zona 2 e a Fig. 14 o ensaio de curto-circuito trifásico na zona 3.

Com isso foi levantado um problema de proteção, já que o trecho que antes era protegido na ausência do FACTS, agora apresenta uma incorreta operação na presença desse. A não atuação pode ocasionar danos no sistema, levando a necessidade de uma nova parametrização, considerando a influência dos FACTS, ou um estudo de coordenação da proteção, como será evidenciado na seção 4.3.

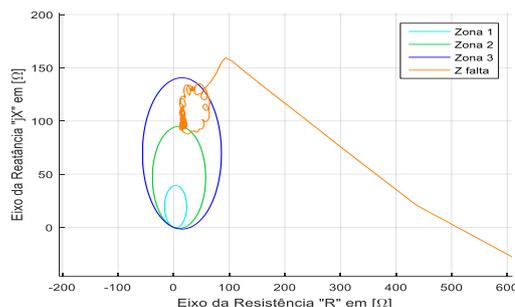


Fig. 13 Falta trifásica aplicada na zona 2 com o SSSC. Atuação na zona 3.

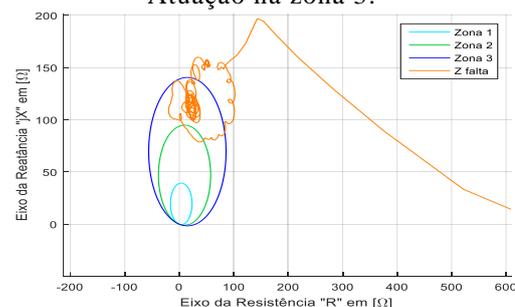


Fig. 14 Falta trifásica aplicada na zona 3 com o SSSC. Não ocorre atuação.

No que diz respeito às faltas do tipo Fase-Terra aplicadas na presença do SSSC, verificou-se que para as faltas aplicadas em zonas 2 e 3, há um sublance de operação do relé, que devido à existência da resistência de falta e da parcela resistiva associada ao compensador série, não consegue contornar essas e apresenta uma incorreta atuação.

As Fig. 15 e 16 ilustram as trajetórias das impedâncias de falta para os curtos-circuitos citados. A impedância está completamente fora das regiões de operação quadrilaterais, justificando o sublance e não operação do relé para estas faltas na presença do SSSC.

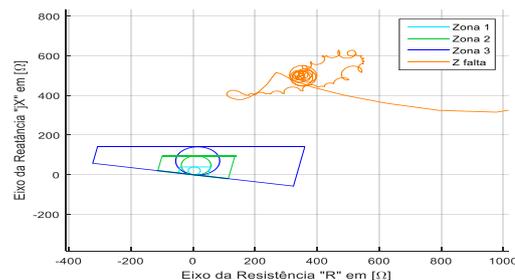


Fig. 15 Falta fase terra aplicada na zona 2 na presença do SSSC. Não ocorre atuação.

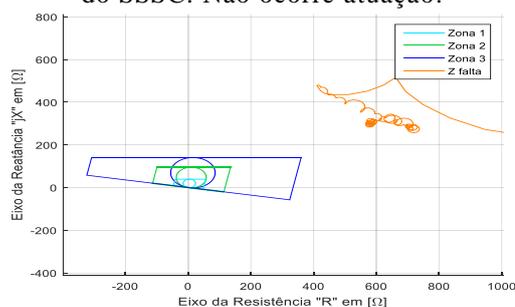


Fig. 16 Falta fase terra aplicada na zona 3 na presença do SSSC. Não ocorre atuação.

Para os sistemas de proteção para faltas fase-fase, baseados na característica mho, que tiveram subalcance de zonas de atuação na presença do dispositivo SSSC, verificou-se como seria a atuação para o ajuste da característica quadrilateral de fase do relé sob teste. Porém, como visto nas Fig. 15 e 16, mesmo com este tipo de característica, ainda foram confirmados os subalcances, tanto para as faltas Fase-Fase quanto Fase-Terra. A solução proposta neste trabalho para os subalcances das faltas Fase-Fase é um estudo de coordenação da proteção de distância, conforme é descrito na seção 4.3.

#### 4.3 Coordenação da proteção de distância do sistema estudado.

Para que o subalcance na presença do SSSC pudesse ser contornado, foi verificada a coordenação entre a proteção de distância dos trechos 4-6-9, já analisado, e do trecho 9-8-7 adjacente. Considerou-se o mesmo procedimento de parametrização adotado para o trecho 4-6-9 para as linhas que integram o trecho 9-8-7 do sistema IEEE 9 barras, porém, adotando-se uma proteção reversa. A zona 1 de proteção do relé adjacente é parametrizada de modo a sensibilizar o relé para faltas que ocorram em pontos localizados em áreas atrás de onde o relé adjacente é instalado.

Utilizando os dados referentes às LTs de 9 à 8 e de 8 à 7 do SEP mostrados por Opal-RT (2017), definiram-se as zonas de proteção, utilizando a metodologia descrita na seção 3. O diagrama da Fig. 17 mostra a parametrização mho para o sistema coordenado, sujeito a uma falta trifásica aplicada na zona 3, ou seja, na presença do SSSC. Conforme foi mostrado na seção 4.2, para este caso o relé apresenta um subalcance de operação para a zona 3 do trecho 4-6-9. Porém, agora na presença do relé adjacente inserido para proteção do trecho 9-8-7 e 4-6-9, seria possível assegurar que o relé do trecho 9-8-7 atuaria na zona 1, garantindo a segurança do sistema mesmo diante do subalcance do trecho anterior.

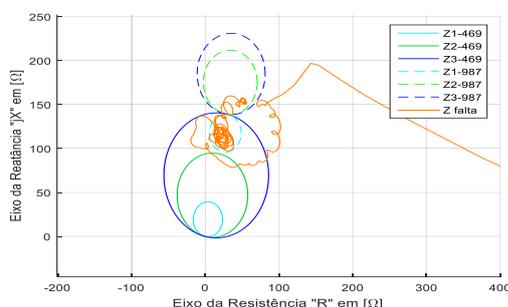


Fig. 17 Coordenação entre as proteções de distância dos trechos 4-6-9 e 9-8-7 para falta trifásica na zona 3.

Para os subalcances verificados nas faltas Fase-Terra na presença do SSSC e do STATCOM, uma possível opção seria considerar a resistência dos FACTS e a resistência do arco elétrico no valor de impedância vista pelo relé

durante os ajustes da proteção, uma vez que essa pode levar a impedância de falta para regiões fora do alcance das zonas de proteção. Esta formulação é mostrada na equação (3).

$$Z_{\text{Falta vista pelo relé}} = Z_{\text{Sequência Positiva}} + R_{\text{Arco Elétrico}} \quad (3)$$

Considerando a resistência do arco nos ajustes do relé, a parcela da impedância correspondente à resistência de falta poderia ser mais bem retratada, uma vez que a resistência do arco elétrico associado à falta é somada à impedância de sequência positiva durante a estimativa da impedância de sequência. Com isso espera-se que os problemas de subalcances verificados sejam contornados, já que agora a resistência de falta pode ser medida pelo relé, segundo os ajustes impostos na parametrização deste equipamento. Ressalta-se que este estudo não foi realizado neste trabalho, sendo apenas uma sugestão de melhoria para trabalhos futuros.

## 5. CONCLUSÃO

Diante do exposto foi possível, portanto, verificar os efeitos que as compensações realizadas em série e paralelo com as LTs CA possuem em termos de influência no sistema de proteção de distância aplicáveis a estes elementos do SEP.

Para compensação série com o SSSC, constatou-se que este afeta a trajetória da impedância de falta, causando um subalcance da proteção para as faltas aplicadas nos limiares das zonas 2 e 3 definidas o que, em termos de operação do sistema, pode levar a uma incorreta proteção do trecho considerado. Propõe-se que seja feita uma parametrização considerando a coordenação entre as proteções do trecho compensado e da linha adjacente, com uma proteção reversa que atua para faltas que ocorram antes do ponto onde o relé está instalado, de modo que mesmo com o subalcance da proteção principal, a proteção subsequente seja capaz de contornar à falta aplicada, protegendo a LT.

Para compensação paralela, verificou-se que o STATCOM causa um sobrealcance para faltas bifásicas aplicadas no limiar da zona 3. Uma das causas pode residir na tensão proveniente do conversor pode estar com grande quantidade de conteúdo harmônico, que é refletido no ponto de acoplamento do conversor. Isso pode causar erros na leitura das grandezas de tensão e corrente por parte do relé, interferindo diretamente na estimativa da impedância de falta. Como efeito, podem ocorrer desligamentos desnecessários no trecho considerado, gerando interrupções no fornecimento de energia, algo indesejado se tratando de continuidade do serviço.

Neste contexto, seria necessário assegurar que as oscilações na impedância de falta medida pelo relé fossem reduzidas de modo a evitar o sobrealcance. Uma possibilidade seria alterar o filtro LCL de saída do STATCOM, tornando o conteúdo harmônico menos

significativo no sinal de saída. Também seria possível considerar a redução das zonas ajustadas para que o relé não viesse a sofrer este sobrealcançe.

Sugere-se que, em trabalhos futuros, seja feita a parametrização considerando os efeitos das resistências de falta e dos dispositivos FACTS. Outra possibilidade seria realizar a coordenação de todo o sistema IEEE 9 barras, de modo a assegurar robustez em termos de proteção do conjunto estudado.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a UNIFEI e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelos recursos concedidos para elaboração desta pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- Albehadili, Ahmed; ABDUL-QADER, Ikhlas. Analysis of distance relay performance on shunt FACTS-compensated transmission lines. In: 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT). IEEE, 2015. p. 188-193.
- ANEEL. *Informações Técnicas: Perdas de Energia*. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset\\_publisher/CegkWaVJWF5E/content/perdas/654800?inheritRedirect=false](https://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/perdas/654800?inheritRedirect=false)>. Acesso em: 25/06/2020.
- Araújo, Carlos André S. Cândido, José Roberto R. Flávio Câmara de Souza e Dias, Marcos Pereira. *Proteção de Sistemas Elétricos*. Editora Interciência. 2005.
- De Araujo, Marcos Roberto. *Proteção de distância em linhas de transmissão longas e extra longas*. UFMG Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- Deshmukh, N., Bedi, A. S., & Patne, N. R. (2016). Analysis of distance protection performance for line employing UPFC. 2016 *IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*.
- Elsamahy, M.; Faried, S. O. and Sidhu, T. (2014). Impact of midpoint STATCOM on generator loss of excitation protection, *IEEE Transactions on power delivery* 29(2): 724-732.
- Ghorbani, Amir et al. Impact of STATCOM and SSSC on synchronous generator LOE protection. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, v. 24, n. 4, p. 2575-2588, 2016.
- Liu, Q., Wang, Z., & Zhang, Y. (2010). Study on a Novel Method of Distance Protection in Transmission Line with STATCOM. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 2010.
- Mati, A. and Bentarzi, H. Impact of STATCOM on Generator Positive-Offset mho element Loss of Excitation Protection. *The 5th International Conference on Electrical Engineering, ICEE-B*, 2017.
- Oliveira, Alp de. Avaliação do comportamento da proteção de distância em linhas de transmissão com compensação série fixa através da simulação digital em tempo real.

2007. *PhD Thesis. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá*, Itajubá, MG.
- Oliveira, R. F. Oliveira et al (2021). Comparative study of the effects of series and parallel compensations on distance protection of transmission lines. *2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*.
- Opal-RT. *IEEE 9 Bus System Example*. 2017. Disponível em: <[kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9modeldocumentation\\_R0.pdf](https://kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9modeldocumentation_R0.pdf)>. Acesso: 12 out.2020.
- Padiyar, K. R. FACTS controllers in power transmission and distribution. *New Age International*, 2007.
- Pupin, Carlos Eduardo. Estabilidade de sistemas de potência com dispositivos FACTS SSSC e STATCOM adaptados ao fluxo de potência, com controladores ESP e POD ajustados pela técnica Particle Swarm Optimization. *UNESP Universidade Estadual Paulista*, 2018.
- Samkari, H., Allehyani, M., & Johnson, B. K. (2015). Modeling and simulation the impacts of STATCOMs on distance protection. *2015 North American Power Symposium (NAPS)*. doi:10.1109/naps.2015.7335196.
- Schweitzer Engineering Laboratories. *Protection and Automation System*. SEL-421, Instruction Manual, 2011
- Silva, K. M. Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão. 203 f. Tese (Doutorado em 76 Engenharia Elétrica) – *Universidade de Campina Grande, Campina Grande*, Paraíba, Brasil, abr. 2009.
- Yaghoobi, H. Impact of static synchronous compensator on flux-based synchronous generator loss of excitation protection, *IET Generation, Transmission & Distribution* 9(9): 874-883, 2014.

#### APÊNDICE A

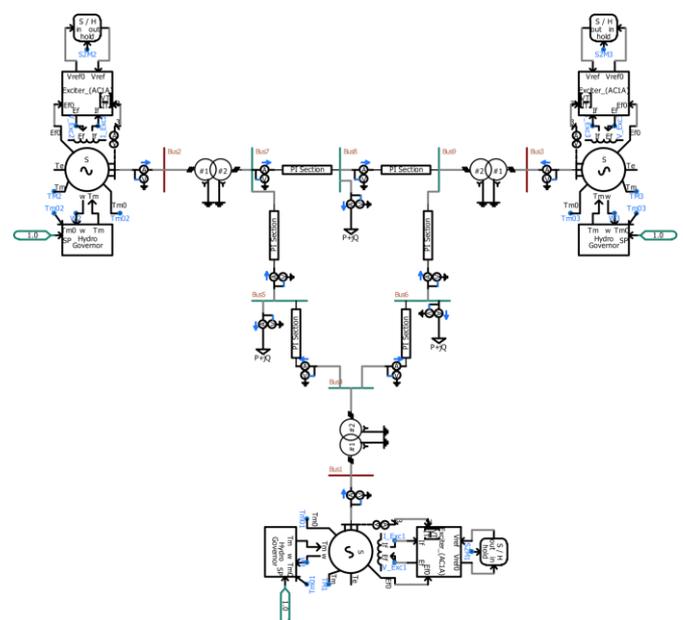


Fig. 18 Sistema IEEE 9 barras modelado no PSCAD/EMTDC.