

Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC

Mateus A. Ferreira¹, Eduardo G. Silveira² and Alex Sander A. Luiz³.

¹ Instituto Federal de Minas Gerais - Minas Gerais, Brasil. E-mail: mateus.ferreira@ifmg.edu.br

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - CEFET-MG – UFSJ, Minas Gerais, Brasil. E-mail: eduardo@cefetmg.br

³ Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - CEFET-MG – UFSJ, Minas Gerais, Brasil. E-mail: alex@cefetmg.br

Abstract: This paper presents the development of a low voltage electrical system composed of a three phase transmission line series-compensated by an open-loop controlled Thyristor controlled series capacitor (TCSC). An overview is given of the main problems caused by series compensation in distance relays. Next the procedures adopted for the construction of the experiment are discussed. Finally, the various scenarios used in simulations and practical measurements are described. The simulated and measured results are analyzed and compared with each other.

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema elétrico em tensão reduzida composto por uma linha de transmissão trifásica com compensação série promovida por Thyristor controlled series capacitor (TCSC) controlado em malha aberta. É dada uma visão geral dos principais problemas causados pela compensação série nos relés de distância. Em seguida são detalhados os procedimentos adotados para construção do experimento. Por fim, são abordados os diversos cenários utilizados nas simulações e medições práticas. Os resultados simulados e medidos são analisados e comparados entre si.

Keywords: Series compensation, Distance relay, TCSC.

Palavras-chaves: Compensação série, Relé de distância, TCSC.

1. INTRODUÇÃO

Em linhas de transmissão, o fluxo de potência é definido em função de alguns parâmetros, sendo um dos principais a reatância longitudinal da linha. Neste cenário, principalmente em linhas longas, a utilização da compensação série promove grandes benefícios, pois além de aumentar a capacidade de transferência de potência, substituindo ou adiando grandes investimentos na construção de novas linhas de transmissão, também aumenta a margem de estabilidade eletromecânica, melhora a regulação de tensão e reduz as perdas (Anderson, 1999).

Apesar das vantagens que apresenta, a compensação série também causa problemas, os quais se destacam a ressonância subsíncrona e a alteração no desempenho esperado dos sistemas de proteção (Anderson, 1999).

Das funções de proteção de linhas de transmissão, a de distância é a que apresenta maiores problemas relacionados à compensação série, principalmente no que diz respeito à determinação da direcionalidade e variação do alcance dos relés. Esses problemas se manifestam de diversas formas, dependendo de fatores como, a localização dos relés, a localização da falta, o grau de compensação, o tipo de polarização utilizada, a localização da compensação na linha em relação ao local da falta e a intensidade da corrente (Anderson, 1999).

A compensação série controlada por tiristores TCSC (*Thyristor-Controlled Series Capacitor*) oferece algumas

vantagens extras, como a possibilidade da mitigação do problema de ressonância subsíncrona por meio de estratégias de controle. No entanto, os problemas nos sistemas de proteção podem ser até mais pronunciados devido à variação dinâmica da reatância da linha (Weiguo, 1998).

Este trabalho tem o objetivo de investigar os efeitos do TCSC nos sistemas de proteção de distância por meio de uma montagem prática em escala reduzida de uma linha de transmissão compensada em série com TCSC.

Em seus trabalhos, Shouyuan et al. (1998), Patel (2017), Yedidi e Johnson, (2006) e Nyati et al. (1993), também apresentaram o desenvolvimento de sistemas de compensação série controlada (TCSC) em escala reduzida. No entanto, seus objetivos eram diferentes do presente trabalho, e em alguns casos, não foram apresentados resultados de testes práticos no sistema desenvolvido.

2. PRINCIPAIS IMPACTOS DO TCSC NO RELÉ DE PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

2.1. Influência na impedância efetiva

Em linhas de transmissão com compensação série os ajustes das zonas de proteção dos relés de distância são influenciados, já que esse tipo de proteção é baseado na reatância da linha, e esta é reduzida pela compensação. Desta forma, se durante uma falta não ocorre o *by-pass* dos bancos de capacitores ou este é feito de forma parcial, considerando a inexistência de resistência de falta, os relés sofrem sobre alcance e podem

enxergar faltas que estão além das suas zonas de proteção. Portanto, o tipo de *by-pass* utilizado como proteção de sobretensão do capacitor tem grande importância.

Das primeiras instalações de compensação série fixa até o fim da década de 1970, geralmente utilizavam-se centelhadores, que foram substituídos por varistores a óxido metálico (MOV) em instalações mais modernas (Alexander et al., 2002).

A influência do *by-pass* por centelhador na proteção de distância depende da estratégia de proteção escolhida. Por exemplo, ao se considerar a atuação do centelhador no ajuste das zonas de proteção, e a mesma não ocorrer na ocasião da falta, o sobrealcançe das zonas de atuação poderá ocorrer. Por outro lado, se essa atuação não for contemplada no ajuste e de fato ocorrer durante a falta, poderá ser observado o subalcançe dessas zonas (Novosel et al. 1997).

A partir da década de 1980 os sistemas de *by-pass* para os capacitores que compõe o TCSC passaram a ser feitos com varistores a óxido metálico (MOV). Neste arranjo, o varistor desvia apenas uma parte da corrente do capacitor em cada semiciclo, a partir do momento em que a tensão nos terminais do capacitor atinge o limite operacional determinado em projeto. Isto resulta em um grau de compensação reduzido na medida em que a sobrecorrente no capacitor aumenta, tornando-o menos efetivo (Marttila, 1992).

O *by-pass* da compensação série por MOV é ilustrado pela Fig. 1 e pela Fig. 2, a seguir, que foram geradas por meio da simulação de uma falta no sistema estudado por este trabalho, que será detalhado na seção 3. A Fig. 1 apresenta a tensão no capacitor em operação normal (a) e durante falta na qual o MOV promove seu *by-pass* (b), enquanto a Fig. 2 mostra as correntes no capacitor (a) e no MOV durante a mesma falta (b). Verifica-se que, durante um mesmo semiciclo há corrente no MOV e no capacitor, sendo assim, durante este intervalo a compensação não foi removida totalmente.

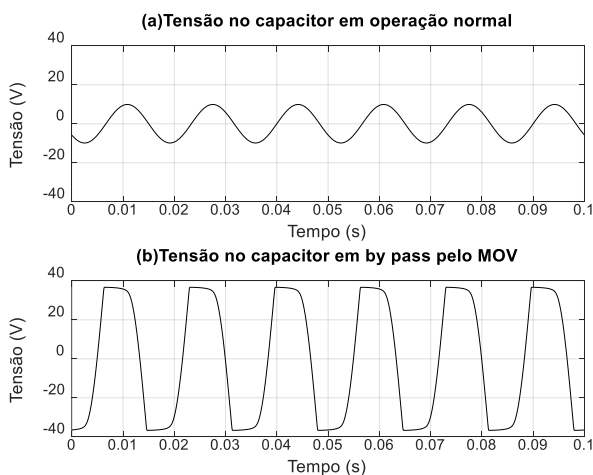


Fig. 1. Tensão nos terminais do capacitor, (a) em operação normal e (b) durante falta em que ocorre *by-pass* pelo MOV.

Em 1987 (Goldsworthy, 1987) propôs expressões analíticas que descrevem a impedância efetiva do conjunto composto por um capacitor e seu MOV de proteção. Nos gráficos da Fig. 3, observa-se que a resistência e a capacitância do modelo proposto são não lineares e são funções da corrente no

capacitor. Nesse gráfico, a corrente é expressa em múltiplos da menor corrente que causa condução do MOV, e tanto a reatância capacitiva quanto a resistência do conjunto são expressos em função da reatância do capacitor em regime permanente.

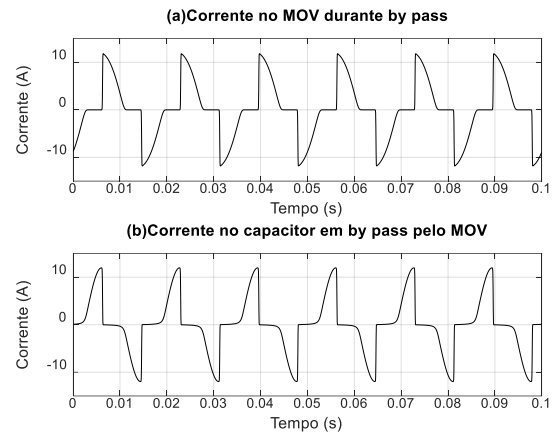


Fig. 2. Corrente em um capacitor (a) e em seu MOV de proteção (b) durante uma falta.

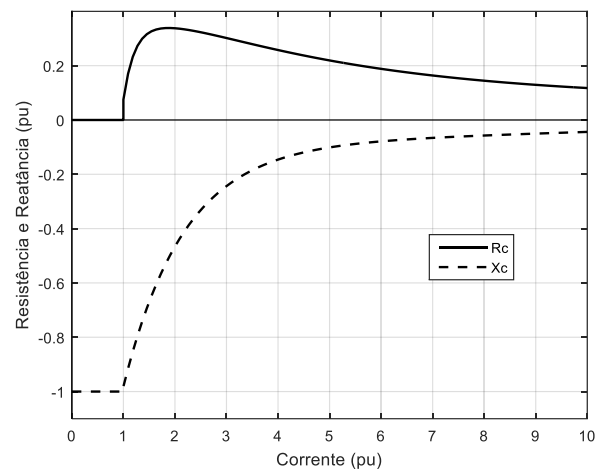


Fig. 3. Resistência e reatância efetivas de um banco de capacitores protegido por varistor em função da corrente.

No relé de distância, o sobrealcançe em caso de condução do MOV dependerá do nível de severidade da corrente de falta. No pior caso, para faltas de baixa corrente para as quais o varistor não conduz, a impedância equivalente do circuito composto pelo capacitor e pelo varistor equivale a reatância do capacitor. Como as linhas são tipicamente compensadas entre 20% e 70%, o sobrealcançe normalmente atinge esse mesmo percentual. Para faltas de correntes muito superiores ao valor que inicia a condução do MOV, embora a impedância vista pelo relé seja alterada pela resistência da falta, o risco de sobrealcançe é pequeno, já que a reatância capacitiva da compensação pode ser reduzida a quase zero pelo *by-pass*. Já durante faltas em que a corrente tem intensidade suficiente apenas para condução parcial do MOV, a impedância vista pelo relé conterá parte da compensação acrescida das resistências do MOV e da falta, se houver (Kasztenny, 2001).

2.2. Inversões de tensão e de corrente

Faltas próximas aos capacitores da compensação série podem causar inversões de tensão e de corrente, nas quais os ângulos de fase dessas grandezas são alterados em 180° (Weiguo et al. 1998) (Miller et al. 2014).

A inversão de tensão ocorre se a tensão entre o relé e o ponto da falta se torna capacitiva, isso acontece quando a reatância do capacitor é superior à do trecho da linha em falta.

A inversão de corrente ocorre quando a impedância em um lado da falta é indutiva e no outro é capacitiva (Weiguo et al. 1998) (Miller et al. 2014). Para que isso seja possível é necessário que no terminal em que ocorre a falta, a reatância capacitiva da compensação seja superior à reatância do sistema à montante somada a reatância do trecho da linha em falta. Desta forma, as correntes em cada terminal da linha estão defasadas de 180°, ou seja, a corrente na linha de transmissão terá o mesmo sentido em ambos os terminais da linha.

2.3. Impacto da dinâmica do TCSC

Os efeitos da compensação série por TCSC no desempenho do relé de distância podem ser diferentes dos observados na aplicação da compensação fixa. Isto ocorre principalmente devido à variação dinâmica da impedância e pela possibilidade de transição entre modos de operação em virtude da estratégia de controle empregada.

A transição entre os modos de operação pode ser realizada a qualquer momento. Por exemplo, o sistema de controle pode ser configurado para que, na ocorrência de uma falta, o modo de operação seja transferido de capacitivo para indutivo de forma imediata, reduzindo a corrente de falta (Tenório e Jenkins, 1997), ou após o nível máximo de dissipação de energia do MOV ser atingido (Weiguo et al. 1998). Com isso, a impedância vista pelo relé de distância seria modificada, podendo interferir nas tomadas de decisão do sistema de proteção da linha em falta e das adjacentes.

Além disso, quando ocorre uma falta surgem correntes e tensões não simétricas que causam mau funcionamento do sistema de disparo dos tiristores. Com isso, podem ocorrer erros nos sistemas de medição dos relés (Weiguo et al. 1998).

3. MODELAGEM DA MONTAGEM PRÁTICA

3.1. Modelo prático da linha de transmissão

O modelo desenvolvido, apresentado na Fig. 4, é radial e a fonte tem tensão de linha de 52 V. Cada fase da linha de transmissão é composta por dois indutores, L1 e L2, de núcleo ferromagnético cujas características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características médias de indutância e resistência dos indutores que compõe a linha de transmissão.

	Indutância	Reatância	Resistência
L1	50 mH	18,85 Ω	0,34 Ω
L2	25 mH	9,43 Ω	0,51 Ω
Total	75 mH	28,28 Ω	0,85 Ω

No terminal da linha está ligada uma resistência trifásica de 15 Ω representando uma carga.

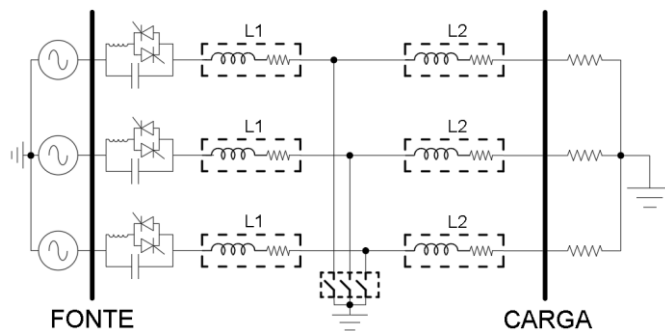


Fig. 4. Representação do modelo de sistema elétrico proposto.

3.2. Sistema de medição

Na barra da fonte são medidas as tensões de fase e as correntes da linha. Os sinais são amostrados a uma frequência de 4 kHz por meio de uma placa de aquisição de dados instalada em um computador. O modelo da placa é PCI-6221 da National Instruments.

A Fig. 5 apresenta, por meio de um diagrama, o processo de aquisição dos dados de corrente da linha. A amostragem dos sinais de tensão é semelhante ao de corrente, no entanto, como mostra a Fig. 6, cada sinal de tensão tem seu valor reduzido por um transformador, que também tem função de isolar o circuito de controle, antes de ser filtrado e amostrado.

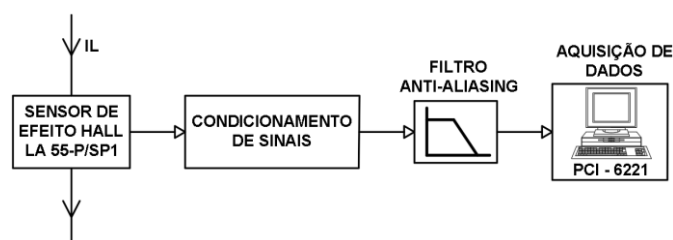


Fig. 5. Circuito de medição e amostragem dos sinais de corrente.

Os dados amostrados são processados posteriormente a aquisição em um programa desenvolvido no software MATLAB que tem o objetivo de reproduzir a função de distância de um relé de proteção.

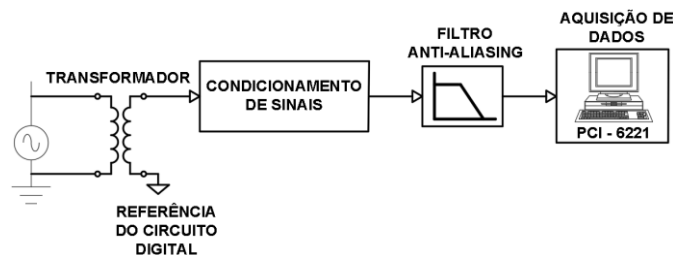


Fig. 6. Circuito de medição e amostragem dos sinais de tensão.

3.3. Relé de distância

A análise da condição de operação da linha é feita após a etapa de amostragem dos dados. Foi implementado no software MATLAB um programa que simula um relé de distância de característica MHO que tem função de detectar, identificar e fazer a localização de faltas ocorridas no sistema.

De forma a reproduzir o funcionamento de um relé numérico, os dados passam por etapas de pré-processamento antes da

execução da função de proteção. Estas etapas estão mostradas na Fig. 7.



Fig. 7. Etapas do processamento de dados do relé de distância implementado.

Na primeira etapa do pré-processamento dos dados de tensão e corrente amostrados da linha, é aplicado um filtro passa-baixas de topologia butterworth de segunda ordem. Em seguida, por meio de interpolação linear, a frequência de amostragem é reduzida de 4 kHz para 960 Hz, equivalente a utilizada por relés comerciais (Phadke e Thorp, 2009). Por fim, são feitas as estimativas de fasores de tensão e corrente pelo método de mínimos quadrados (Sachdev e Baribeau, 1979), antes da aplicação da função de proteção.

3.4. Parâmetros do TCSC projetado

As referências Hingorani e Gyugyi (2000), Mathur e Varma (2002), Padiyar (2007) e Yedidi e Johnson (2006) foram utilizadas para seleção dos parâmetros do TCSC. A seleção dos parâmetros está apresentada a seguir como um procedimento seguido por etapas. Primeiramente são feitas definições importantes relacionadas ao sistema.

O grau de compensação (%comp) é definido como a razão entre o capacitor fixo (X_C) e o total da reatância da linha (X_{Linha}), conforme equação (1).

$$\%comp = \frac{X_C}{X_{Linha}} \cdot 100\% \quad (1)$$

O fator de ressonância (λ) é definido como a razão entre a frequência de ressonância (ω_0), do circuito LC paralelo formado pelo TCSC, e a frequência fundamental do sistema (ω_N), conforme equação (2).

$$\lambda = \frac{\omega_0}{\omega_N} = \sqrt{\frac{1}{\omega_N \cdot L} \cdot \frac{1}{\omega_N \cdot C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2)$$

- *Seleção do capacitor*

A escolha do capacitor foi feita baseada no mínimo de compensação desejada, que ocorre quando os tiristores estão bloqueados e o TCSC opera como um sistema de compensação fixa. Baseado na equação (1) foi definido o valor de 420 μ F, sendo obtido a compensação mínima de aproximadamente 20%. O banco de capacitores utilizado é composto por 7 capacitores de 60 μ F 380 V ligados em paralelo.

- *Seleção do Indutor*

Normalmente o indutor é definido de forma que a frequência de ressonância do TCSC não coincida com nenhuma frequência presente no sistema. Com base nessa premissa, os indutores, de núcleo de ar, foram construídos com 2,15 mH, o que produz uma frequência de ressonância de aproximadamente 167,5 Hz e fator de ressonância λ igual a 2,8.

A Fig. 8 apresenta a curva de reatância do TCSC projetado em função do ângulo de disparo, onde todos os componentes são considerados ideais. É possível notar que há apenas uma zona de ressonância.

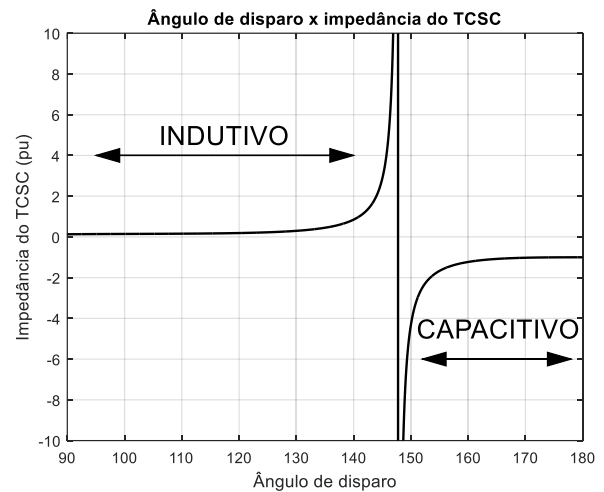


Fig. 8. Curva de reatância do TCSC projetado em função do ângulo de disparo considerando todos os elementos ideais.

Tipicamente os valores de λ são escolhidos entre 1 e 3 (Mathur e Varma, 2002) (Yedidi e Johnson, 2006). Valores de λ superiores a 3 conduzem para sistemas com múltiplas zonas de ressonância. Este tipo de situação torna a implementação do TCSC mais difícil, pois restringe a faixa de ângulos de disparo utilizáveis dificultando o controle.

- *Circuito de disparo*

O circuito de disparo projetado, mostrado na Fig. 9, toma como referência as tensões nos capacitores, portanto o disparo acontece na faixa entre 90° e 180°, quando a tensão e a corrente no capacitor têm polaridades opostas.

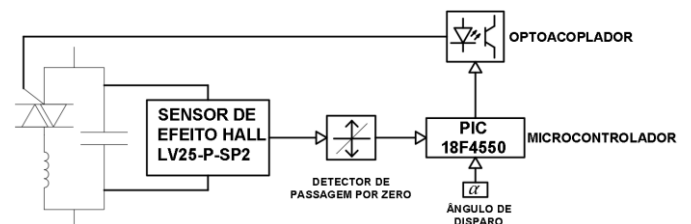


Fig. 9. Circuito de disparo do TCSC.

Para proteger o circuito de disparo as tensões de cada fase são reduzidas por meio de sensores de efeito hall LV25-P-SP2. Em seguida, passam por comparadores gerando três ondas quadradas, que são utilizadas para detecção das passagens por zero. Um microcontrolador PIC18F4550 recebe esses sinais de referência para gerar os pulsos de disparo de acordo com o ângulo determinado por meio de um teclado externo. Antes de promoverem o disparo os pulsos oriundos do microcontrolador ainda passam por um optoacoplador MOC 3020 com função de proteger o circuito de controle. Cada fase tem seu próprio controle de disparo individual. Em cada fase os pulsos dos semiciclos positivos são gerados com referência nas passagens por zero, enquanto os pulsos dos semiciclos negativos são gerados por simetria com 180° de atraso. Também foram

implementados os modos de operação com os tiristores bloqueados e em *by-pass*.

Como os valores de corrente são muito inferiores aos verificados em linhas de transmissão, por conveniência, os tiristores foram substituídos por TRIACS BTA08-600B.

- *Sistema de by-pass do capacitor*

No sistema proposto não há risco de danos ao capacitor seja por sobretensão ou por sobrecorrente, já que essas grandezas são rigorosamente controladas. No entanto, para representar de forma mais fiel os sistemas reais e diante da dificuldade de se encontrar varistores com valores comerciais de tensões de ruptura baixas, adequados para o sistema proposto, são utilizados diodos supressores de surto bidirecionais modelos 1.5KE15CA, 1.5KE24CA e 5KP33CA em paralelo aos capacitores. Estes diodos têm propósito semelhante ao dos varistores, que é de oferecer um caminho alternativo para a corrente quando a tensão em seus terminais atinge determinado valor, definido pela sua característica de condução. Há também um disjuntor que permite o *by-pass* total do TCSC.

A Fig. 10 apresenta uma foto real da montagem prática realizada com as identificações dos principais componentes.

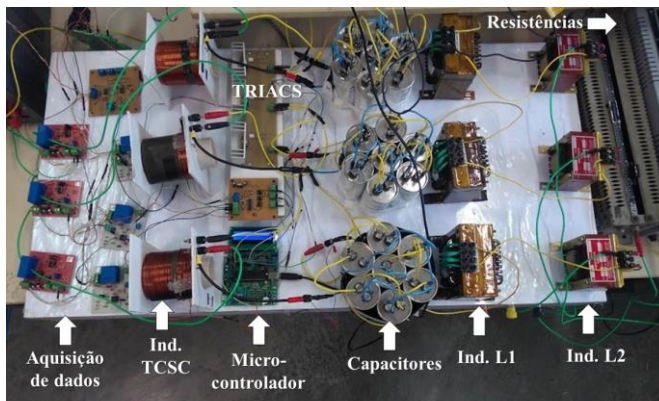


Fig. 10. Foto da montagem prática realizada.

4. SIMULAÇÃO

Para validar os resultados da montagem prática também foi desenvolvida uma simulação no *software* SIMULINK. O sistema simulado é praticamente igual a realizado na prática com pequenas variações no sistema de disparo devido à impossibilidade da representação de todos os elementos utilizados na prática, como por exemplo, o microcontrolador. A Fig. 11 apresenta um diagrama esquemático do sistema simulado, no qual a linha de transmissão é representada por um circuito RL série com parâmetros concentrados, assim como a carga resistiva, semelhantes ao modelo prático. O bloco com nome de TCSC contém, além da compensação, os sistemas de controle e proteção, que nesse caso foi feita com MOVs.

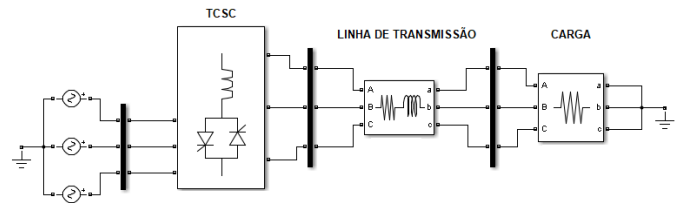


Fig. 11. Sistema simulado no SIMULINK.

5. RESULTADOS

Foram realizados ensaios em diversas situações de falta para verificar o alcance e a capacidade de identificação de faltas do relé de distância desenvolvido. Devido à impossibilidade de realizar faltas em muitos pontos da linha montada na abordagem prática, primeiramente essa análise foi feita por meio de simulações, em que são causadas faltas fase-terra em diversos cenários de compensação e em diferentes pontos da linha. Em seguida, são apresentados os resultados dos ensaios práticos, que contemplam maior diversidade de tipos de faltas.

Para fins de análise dos resultados, foi considerada a extensão da linha em termos percentuais, sendo 0% a barra em que se encontra o relé e 100% a barra remota. Para todos os resultados práticos apresentados, a compensação de 20% é realizada com o capacitor fixo, enquanto que a de 40% por TCSC. Considera-se ainda que não há resistência de falta e apenas 70% da linha é protegida em primeira zona, esse limite é indicado por um círculo pontilhado. Em todas as figuras apresentadas a seguir, a seta ZL indica a impedância nominal da linha.

5.1. Resultados de Simulações

A Fig. 12 apresenta a impedância vista pelo relé quando não há compensação série para situações de operação normal e para diversas faltas em ao longo da linha. O relé só atuaria até a falta em 60% da linha, pois as demais faltas estão fora zona

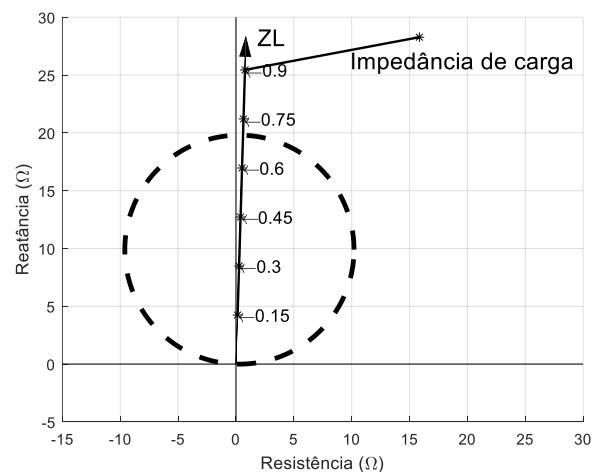


Fig. 12. Impedância vista pelo relé para faltas no sistema proposto sem compensação série. Dados de simulação.

No cenário seguinte, a linha é compensada em cerca de 40% por TCSC sem sistema de *by-pass* para os capacitores. Conforme mostra a Fig. 13, há sobrealcance do relé e ocorre inversão de corrente para a falta em 30% da linha. Seria esperado que também ocorresse inversão de corrente para a falta mais próxima à barra do capacitor, no entanto, conforme

apresentado anteriormente, a dinâmica do TCSC altera bastante a impedância vista pelo relé durante a falta, levando ao valor médio verificado no diagrama.

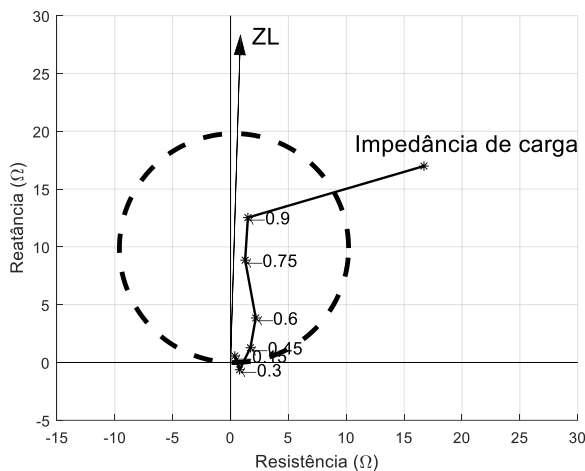


Fig. 13. Impedância vista pelo relé para diversas situações de falta no sistema proposto compensado em 40% por TCSC sem *by-pass* do capacitor. Dados de simulação.

Na última simulação realizada, são adicionados varistores para *by-pass* dos capacitores da linha compensada por TCSC. Nesse caso, mostrado na Fig. 14, o sobrealcançe do relé persiste, mas é reduzido, principalmente para faltas próximas ao relé. Verifica-se também que a condução do varistor acrescenta um valor considerável de resistência à impedância vista pelo relé, causando a não atuação para faltas próximas aos capacitores.

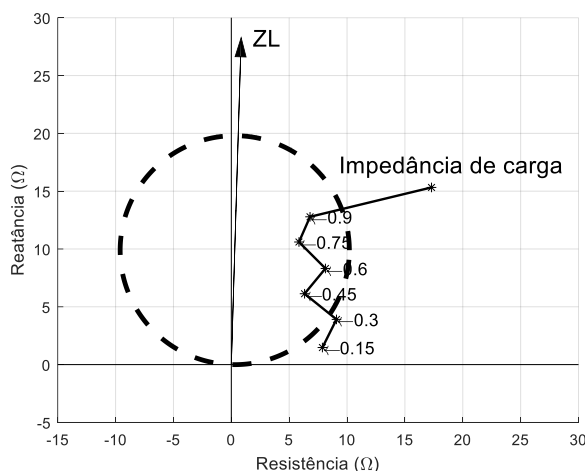


Fig. 14. Impedância vista pelo relé para diversas situações de falta no sistema proposto compensado em 40% por TCSC com *by-pass* do capacitor promovido por varistor. Dados de simulação.

5.2. Ensaios práticos

Foram realizadas simulações seguidas de ensaios na montagem prática nas mesmas condições para avaliar o desempenho do relé na estimação da distância da falta.

Os testes apresentam cenários com diferentes tipos de faltas e níveis de compensação. Todas as faltas ocorrem em 66,67% da linha, no ponto entre os indutores L1 e L2 apresentados na Tabela 1.

Nos resultados apresentados na Tabela 2, o sistema de *by-pass* dos capacitores não está presente, assim, como não há resistência de falta, o sobrealcançe teórico do relé pode ser previsto, já que são conhecidos os valores das reatâncias da linha e dos capacitores. Para a compensação fixa é esperado que o relé localize a falta em aproximadamente 45%, já para compensação por TCSC esse valor seria de 25%, considerando que o sistema de disparo mantenha seu funcionamento normal durante a falta.

Tabela 2 - Análises de tipos de falta e graus de compensação diversos. Sem *by-pass* dos capacitores.

%comp	Tipo de falta	Local Simulado (%)	Local Medido (%)
0%	AT	66,32	65,13
	AB	66,40	64,25
	ABCT	66,16	61,83
20%	AT	44,80	43,45
	AB	44,42	42,66
	ABCT	44,17	40,45
40%	AT	18,30	19,90
	AB	24,14	27,51
	ABCT	25,80	19,83

Os resultados obtidos se aproximaram dos valores teóricos. Algumas discrepâncias notadas nos dados medidos são justificáveis, já que os indutores utilizados na montagem têm núcleo ferromagnético, assim, o aumento da corrente causa aumento da dispersão do fluxo magnético e conseqüente leve redução da indutância. Além disso, nas situações em que o TCSC está ativo, há imprecisões no circuito de disparo durante o transitório da falta, o que pode levar a pequenas variações das grandezas vistas pelo relé.

Testes semelhantes foram realizados com o sistema de *by-pass* em funcionamento. As tensões de referência para proteção dos capacitores são específicas para cada grau de compensação utilizado. Para compensação fixa de 20%, o sistema de *by-pass* começa a condução em 3 pu. Já na compensação por TCSC o início da condução do sistema de *by-pass* acontece a partir de 2,5 pu. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 3. Nesse cenário não é apresentado o valor de referência esperado para localização da falta, pois conforme visto anteriormente, o sistema de *by-pass* não remove totalmente a compensação.

Tabela 3 - Análises de tipos de falta e graus de compensação diversos com sistema de *by-pass* dos capacitores.

%comp	Tipo de falta	Local Simulado (%)	Local Medido (%)
20%	AT	47,70	45,41
	AB	46,14	48,20
	ABCT	47,70	56,60
40%	AT	42,01	41,52
	AB	38,53	35,38
	ABCT	41,94	37,89

Devido a não linearidade das características de impedância e resistência do sistema de *by-pass*, é razoável esperar que quanto maior a corrente envolvida na falta, maior será o *by-pass*, e isso foi verificado. Na falta com maior nível de

compensação, que envolve valores mais altos de corrente, os valores de distância aferidos tiveram melhora em relação ao sistema sem *by-pass*.

Também foram realizados ensaios e simulações de faltas no final da linha, fora da zona protegida. Nesta condição são apresentados resultados apenas para faltas fase-terra, conforme Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 - Análise de faltas AT no final da linha sem sistema de bypass.

%comp	Tipo de falta	Local Simulado (%)	Local Medido (%)
0%	AT	100	98,54
20%	AT	77,88	85,9
40%	AT	40,87	62,32

Tabela 5 - Análise de faltas AT no final da linha com sistema de bypass.

%comp	Tipo de falta	Local Simulado (%)	Local Medido (%)
20%	AT	78,49	85,74
40%	AT	57,46	77,08

É possível observar que a condução do sistema de *by-pass* melhorou os resultados obtidos. Assim como citado anteriormente, os resultados se aproximariam mais do caso sem compensação se a intensidade da corrente de falta fosse suficiente para promover a condução total do sistema de *by-pass*.

Os resultados obtidos também estão apresentados na Fig. 15 e na Fig. 16, nas quais são mostradas a impedância vista pela unidade AT do relé distância em diferentes cenários de faltas AT.

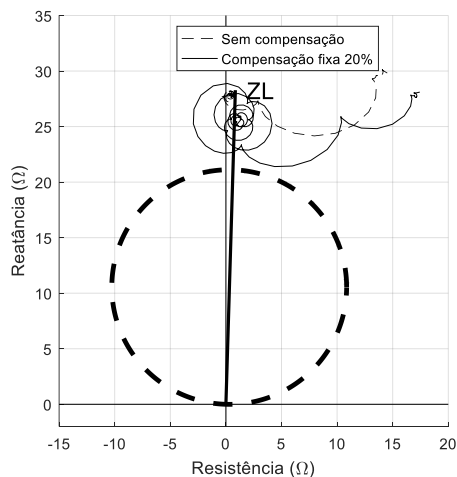


Fig. 15. Impedância vista pela unidade AT do relé de distância para uma falta sem compensação e com compensação fixa de 20%. Dados de medições.

No sistema sem *by-pass* verificou-se o sobrealcançe do relé, especialmente quando há compensação por TCSC, uma vez que a falta no fim da linha foi detectada dentro da zona protegida. Já nos resultados com sistema de *by-pass* foi possível verificar que houve melhora em relação ao anterior, no entanto, no sistema compensado por TCSC houve discrepância considerável entre os resultados de simulação e

medido, uma vez que a simulação indicou atuação do relé enquanto a medição indicou falta fora da zona protegida.

A Fig. 15 apresenta, a partir de dados medidos, a comparação entre a impedância vista pelo relé em uma falta AT no sistema sem compensação e com compensação fixa de 20%. Verifica-se a oscilação do valor de impedância decorrente da troca de energia entre a linha de transmissão e a compensação série, assim como o sobrealcançe do relé, tendo em vista que a impedância vista ao final do transitório é inferior àquela sem compensação.

Já a Fig. 16 mostra a comparação das impedâncias entre o sistema sem compensação e outro compensado em 40% por TCSC durante uma falta AT. Nesta situação ocorre o sobrealcançe do relé, uma vez que uma falta no final da linha não deveria ser vista como interna à zona protegida. Também se verifica que o TCSC acrescenta resistências ao sistema, contribuindo para redução da oscilação da impedância vista pelo relé durante a falta.

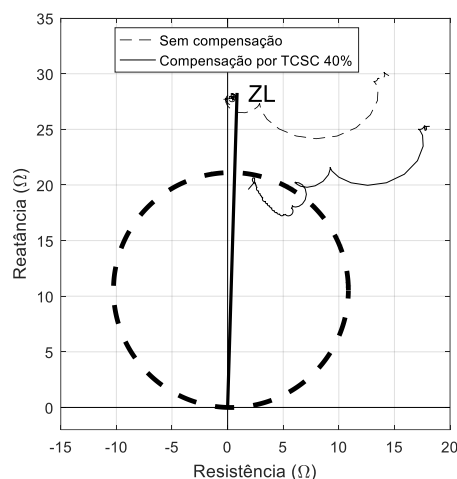


Fig. 16 Impedância vista pela unidade AT do relé de distância para uma falta sem compensação e com compensação por TCSC de 40%. Dados de medições.

6. CONCLUSÕES

A principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento da representação em escala de um sistema elétrico compensado por TCSC. Abordagens práticas não são usuais neste tipo de estudo, mas apresentam algumas vantagens interessantes em relação aos trabalhos que envolvem apenas simulações. Apesar de os fenômenos elétricos serem facilmente reproduzidos por ferramentas computacionais, a análise por meio da montagem prática em escala reduzida permite a medição e análise das grandezas elétricas em regime transitório e permanente, além de possibilitar a observação da influência da dinâmica de operação dos dispositivos semicondutores e sistemas microprocessados envolvidos nesse tipo de sistema e que são de reprodução computacional complexa.

Foram apresentados diversos resultados de ensaios práticos e simulações de faltas no sistema proposto envolvendo diferentes tipos de faltas e esquemas de compensação série. Os resultados verificaram os principais problemas investigados,

que são, o sobrealcançe do relé de distância, a inversão de corrente e a influência da dinâmica de operação do TCSC.

REFERÊNCIAS

- Alexander, G.E., Rowe, S.D., Andrichak, J.G. e Wilkinson, S.B. (2002). Series Compensated Line Protection: Evaluation & Solutions. *GE MULTILIN, GER-3736*.
- Anderson, P.M. (1999). *Power System Protection*, Wiley - IEEE, New York.
- Goldsworthy, D.L. (1987). A Linearized Model for MOV-Protected series capacitor. *IEEE Transactions on Power Systems*, volume (2).
- Hingorani, N.G. e Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS*. Wiley-IEEE, Nova York.
- Kasztenny, B. (2001). Distance Protection of Series Compensated Lines – Problems and Solutions. *28^o Annual Western Protective Relay Conference*.
- Marttila, R.J. (1992), Performance of Distance Relay Mho Elements on Mov-Protected Series-Compensated Transmission LINES. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume (7).
- Mathur, R.M. e Varma, R.K. (2002). *Thyristor-Based Facts Controllers for Electrical Transmission Systems*. Wiley, Kanpur.
- Novosel, D., Phadke, A., Saha, M.M. e Lindahl, S. (1997). Problems and Solutions for Microprocessor Protection of Series Compensated Lines. *Sixth International Conference on Developments in Power System Protection*.
- Nyati, S., Wegner, C., Delmerico, R., Piwko, R., Baker, D. e Edris, A. (1993). Effectiveness of Thyristor Controlled Series Capacitor in Enhancing Power System Dynamics an Analog Simulator Study. *IEEE Transmission and Distribution Committee*, volume (9).
- Padiyar, K.R. (2007). *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*. New Age International Ltd, New Delhi.
- Patel, N. (2017). Hardware Implementation and Simulation of Single Phase TCSC at Laboratory Scale Level. *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*.
- Phadke, A.G. e Thorp, J.S. (2009). Computer Relaying for Power Systems. Capítulo 5. Wiley, Chichester.
- Sachdev, M. e Baribeau, M. (1979). A New Algorithm for Digital Impedance Relays. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volume (1).
- Shouyuan, W., Xiaoxin, Z. e Yajian, L. (1998). Design and Simulation on TCSC Analog Model and Controller. *POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology*.
- Tenório, A.R.M. e Jenkins, N. (1997). Investigation of the TCSC as a Fault Current Limiter. *International Conference on Power Systems Transients*.
- Miller, J., Watson, M.B., Leighfield, J. e PSC North America (2014). Review of Series Compensation for Transmission Lines. *Southwest Power Pool*. JU4715.
- Weiguo, W., Xianggen, Y., Jiang, Y., Xianzhong, D. e Deshu, C. (1998). The Impact of TCSC on Distance Protection Relay. *POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology*.
- Yedidi, V.K. e Johnson, B.K. (2006). Design of TCSC for Classroom and Research. *Power Engineering Society General Meeting*.