



RESUMO DAS PRINCIPAIS ETAPAS EXECUTADAS PELO ALUNO NO PERÍODO

A primeira etapa do projeto consistiu na leitura da pesquisa de CHAVES, J. S., TAVARES, M. C., MESTAS, P., “Rural electrification based on capacitive coupling using a collector line” [1], buscando entender o sistema elétrico que será utilizado no estudo de proteção. A pesquisa em questão descreve uma forma de produção de energia elétrica através do acoplamento capacitivo entre uma linha de transmissão de extra alta tensão e uma linha coletora localizada em seu arredor. Tal sistema pode atender pequenas comunidades remotas sem acesso à energia elétrica e também pode operar como uma fonte secundária de energia elétrica para sistemas de distribuição rural com baixo índice de desempenho.

O projeto de iniciação científica em questão é baseado na pesquisa referenciada em [1], e o objetivo principal é o estudo da proteção da linha de transmissão principal pelo uso dos relés programados com funções de proteção de sobrecorrente e proteção direcional ao incorporar a linha coletora com acoplamento capacitivo em sua faixa de servidão. A hipótese inicial questiona se há alguma mudança nos tempos de ativação de disparo dos relés instalados para a proteção da linha de transmissão principal após ser introduzida a linha coletora em vazio em sua faixa de servidão, ou seja, se a geração não convencional de energia elétrica estudada em [1] pode alterar o funcionamento da proteção da linha de transmissão principal assegurada pela configuração prévia dos relés.

Foram desenvolvidas simulações de fenômeno de indução de tensão em linha coletora usando o software ATP, com foco em circuitos RLC com capacitância e resistência variáveis e indutância fixa, entendendo o princípio da extração de energia elétrica do campo elétrico existente na região em torno da linha de transmissão com o auxílio de uma linha coletora [1]. Como o circuito extrator de energia tem resposta capacitiva foi modelada uma força eletromotriz atrás de uma capacitância. Para regular a tensão na carga é provocada a condição de ressonância série através da instalação de um indutor, e quanto mais longe da situação de ressonância do circuito, pior seria a relação entre tensão de saída e tensão de entrada, e, conseqüentemente, pior a geração de energia elétrica, visto que não é extraída a máxima potência do sistema.

Função de proteção 50 e 51

A próxima etapa consistiu da simulação de diversas situações de falta elétrica no circuito mostrado na figura 1, montado no software PSCAD. O objetivo foi testar as funções 50 (relé de sobrecorrente instantâneo) e a função 51 (relé de sobrecorrente temporizado), em condições típicas de defeito. O circuito da figura 1 é composto por uma fonte de tensão de 230 kV, três linhas de transmissão e três cargas conectadas no final de cada linha de transmissão de valores 10,05 MVA, 25,02 MVA e 20,1 MVA, respectivamente.

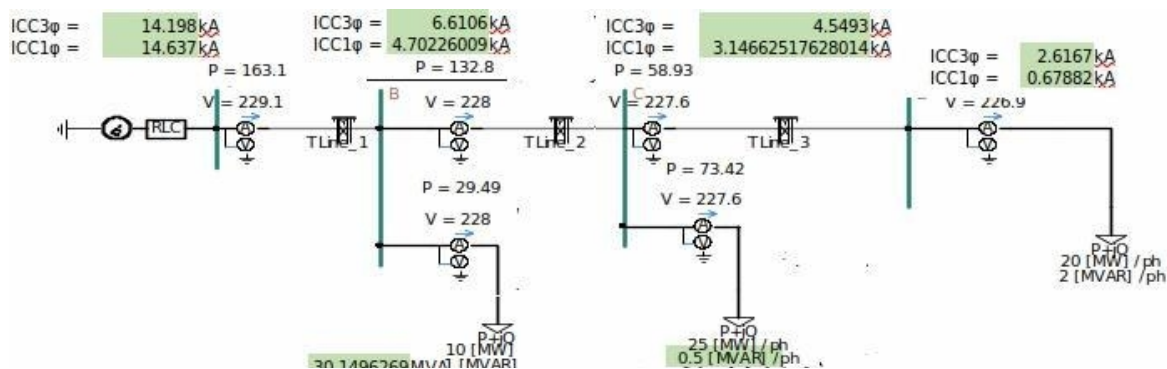


Figura 1 - Circuito fictício analisado

O sistema analisado possui três relés de sobrecorrente localizados nas barras, todos com as funções 50 e 51 configuradas ao mesmo tempo para as correntes de fase e de neutro. Os três relés deveriam atuar de forma coordenada, ou seja, o relé mais próximo da falta deveria atuar primeiro, o segundo mais próximo em seguida, e, por fim, o último, em um caso extremo de nenhum relé anterior ter sido ativado. Alguns parâmetros de configuração dessas funções do relé foram escolhidos, como a corrente de ativação mínima (*pick-up current*) e os parâmetros da equação de tempo de disparo do relé para a função 51, e a corrente máxima suportada (*over current limit*) antes do disparo para a função 50.

A primeira configuração a ser escolhida é a relação de transformação do transformador de corrente (RTC) do relé, a qual é baseada na corrente nominal que passa por ele, e deve ser maior do que pelo menos um vigésimo da corrente máxima de curto-circuito. É padronizado na indústria que a relação de transformação é sempre proporcional a cinco, e, sendo assim, foram escolhidas relações de transformação de corrente de 500, 300 e 200, respectivamente, para os relés 1, 2 e 3, sendo o relé 1 aquele que está mais próximo da fonte, e o relé 3 o que está mais distante.

Para a função 50, a corrente mínima de atuação escolhida deve ser maior ou igual que 85% da corrente de curto-circuito trifásico do secundário do TC do relé, ou seja, a corrente de atuação mínima deve ser $1/RTC$ de 85% da corrente máxima de falta trifásica. Para a proteção de fase, foram escolhidas correntes mínimas de atuação de 16 A, 17 A e 15 A, respectivamente, enquanto para a proteção de neutro, foram escolhidas correntes de atuação de 13 A, 12 A e 6 A.

A função 51 exige que a corrente mínima para atuação seja maior que um valor um pouco maior que o valor de corrente no secundário do transformador de corrente do relé para corrente nominal no primário. O fator escolhido foi de 30%, o que implica que a corrente mínima de atuação seja maior que 30% da corrente de secundário. Os valores escolhidos

para a proteção de fase foram de 2 A, 2 A e 1 A, respectivamente, enquanto para a proteção de neutro foram de 0,1 A, 0,2 A e 0,1 A. A equação de tempo de disparo utilizada é normalizada pelo sistema de curvas dos EUA, ANSI, denominada U2 (curva inversa), dada por $T_p = T_D \cdot \left(0.18 + \frac{5.95}{M^2 - 1} \right)$.

Essa equação gera uma curva para cada um dos três relés utilizados e mostra a coordenação da proteção. O parâmetro M é dado pela razão entre uma corrente variável, interpolada no eixo das abscissas, e a corrente mínima de atuação da função 51. Esse gráfico pode, portanto, ser feito tanto para a proteção de fase quanto para a de neutro, mudando, assim, se a corrente utilizada para compor o parâmetro M provém da função de sobrecorrente temporizada de fase ou de neutro. O parâmetro T_D para o último relé assumiu o valor de 0,5 e foi escolhido a partir do menor valor prático possível, verificado no software AcSELeRator. Para definir o valor do parâmetro T_D para os dois primeiros relés foram substituídos os valores já conhecidos na equação mostrada, isolando a variável desconhecida. Sendo assim, os valores de TD são respectivamente 0,8, 0,7 e 0,5. É possível verificar que para um mesmo valor de corrente, por exemplo, 2500 A, os relés são ativados ordenadamente, um após o outro.

O circuito foi, então, simulado no PSCAD, com objetivo de extrair o tempo de ativação de cada relé, assim como o tipo de função ativada para diferentes tipos de curto-circuito. Baseado na figura 1, foram escolhidos cinco locais diferentes para ocorrer curto-circuito. Os pontos de falta estão localizados da seguinte forma: o primeiro ponto de falta está localizado entre a fonte e a primeira linha de transmissão; o segundo na carga da barra B; o terceiro localiza-se na segunda linha de transmissão, entre as barras B e C; o quarto na carga da barra C e o quinto na carga da barra D.

As faltas tiveram o tipo de falta e a resistência de falta variados. Cada falta aplicada poderia ser monofásica entre uma só fase e a terra (AG), bifásica entre duas fases e a terra (BCG) e trifásica entre as três faltas e a terra (ABCG), e pode ter resistências de falta de 1 Ω , 5 Ω , 10 Ω e 100 Ω , mudando a intensidade da corrente de curto-circuito.

A figura 2 mostra os tempos teóricos de disparo dos relés 1, 2 e 3 simulados no PSCAD para o primeiro ponto de falta, com tipo de falta AG e para quatro resistências de falta distintas.

		PONTO DE FALTA 1 - PSCAD											
Rf[Ω]		1			5			10			100		
t-RELÉ [s]		t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]	t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]	t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]	t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]
AG	51P	0,387			0,412			0,449				*	*
	50P	0,216			0,216								
	TPP	0,216			0,216			0,449					
	Trip	0,211	0,531	0,378	0,216	0,719	0,454	0,216	1,083	0,588	0,359		
	51N	0,347	0,531	0,378	0,347	0,719	0,454	0,347	1,083	0,588			
	50N	0,211			0,216			0,216			0,359		
	TPN	0,211	0,531	0,378	0,216	0,719	0,454	0,216	1,083	0,588	0,359		

Figura 2 - Tempos de acionamento dos relés no PSCAD

É importante citar que o tempo de simulação salvo pelo PSCAD é de dois segundos, ou seja, é possível que os relés que não dispararam durante o teste fossem ativar o *trip* em algum momento posterior. Essa etapa também foi simulada na prática utilizando o relé 351A-SEL, o qual é programado no software AcSELeRator QuickSet da empresa SEL, sendo colocados, portanto, todos os parâmetros calculados em teoria e usados no PSCAD.

Os dados de tensão e corrente de falta coletados do PSCAD foram enviados para a caixa de testes Doble F6150, para validação prática dos casos simulados no software. Essa caixa de testes reproduz as formas de onda e injeta nas entradas dos relés, sendo preciso apenas coletar os tempos de acionamento práticos de cada relé em cada caso estudado, para então comparar com os tempos teóricos simulados no software PSCAD, mostrados na figura 3.

		PONTO DE FALTA 1 - CAIXA											
Rf[Ω]		1			5			10			100		
t-RELÉ [s]		t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]	t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]	t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]	t-R1 [s]	t-R2 [s]	t-R3 [s]
AG	LN1 51P	0,3825	-	-	0,402	-	-	0,4454	-	-	-	-	-
	LN2 50P	0,219	-	-	0,226	-	-	-	-	-	-	-	-
	LN3 TPP	0,219	-	-	0,226	-	-	0,4438	-	-	-	-	-
	LN4 Trip	0,219	0,5278	0,3805	0,222	0,7193	0,4499	0,2271	1,0911	0,5799	0,3502	-	-
	LN5 51N	0,3357	0,5278	0,3805	0,338	0,7193	0,4499	-	1,0911	0,5799	-	-	-
	LN6 50N	0,219	-	-	0,222	-	-	0,2271	-	-	0,3502	-	-
	LN7 TPN	0,219	0,5278	0,3805	0,222	0,7193	0,4499	0,2271	1,0911	0,5799	0,3502	-	-

Figura 3 - Tempos de acionamento dos relés na caixa de testes

É possível verificar que a diferença entre os tempos de atuação prático e simulado é pequena, de no máximo 0,0113 segundo. As demais simulações, com falta do tipo bifásico e terra, e trifásico e terra, e em outros pontos de falta diferentes geraram resultados similares e não necessitam ser expostos.

Para que esse circuito pudesse ser utilizado na pesquisa [1], base do projeto de iniciação científica, era necessária incorporação da linha coletora (LC) na faixa de servidão de uma linha de transmissão. Isso foi feito com a inclusão de um componente de linha de transmissão desenvolvida pelos programadores do software PSCAD para linhas de transmissão com geometrias não convencionais [1]. Esse componente de LT permite a incorporação de uma fase na faixa de servidão da linha de transmissão, com capacidade de variação de diversos parâmetros, como a distância entre os condutores, o tamanho deles, a espessura, a disposição espacial etc.

Esse arquivo possibilitou a criação do circuito representado na figura 4, uma modificação do circuito fictício mostrado na figura 1 com as linhas de transmissão de acordo com o demandado na pesquisa [1]. Esse circuito de 230 kV não possui linha coletora e serve como base dos testes de tempo de ativação dos relés.

As linhas de transmissão possuem os seguintes tamanhos: linha AB = 30 km; linha BC = 20 km e linha CD = 45 km. Foi necessário refazer todos os cálculos de parâmetros de configuração dos relés já feitos anteriormente, visto que mudaram alguns parâmetros na linha de transmissão. Para a proteção de fase da função 50, foram escolhidas correntes mínimas de atuação de 19 A, 24,5 A e 25,5 A, respectivamente, enquanto para a proteção de neutro, foram escolhidas correntes de atuação de 15 A, 17,5 A e 17 A. Os valores escolhidos para a proteção de fase da função 51 foram de 1,2 A, 1,5 A e 1 A, respectivamente, enquanto para a proteção de neutro foram de 0,1 A, 0,12 A e 0,1 A. Foi utilizada a mesma equação de tempo de disparo do relé anterior e os valores de T_D foram os mesmos.

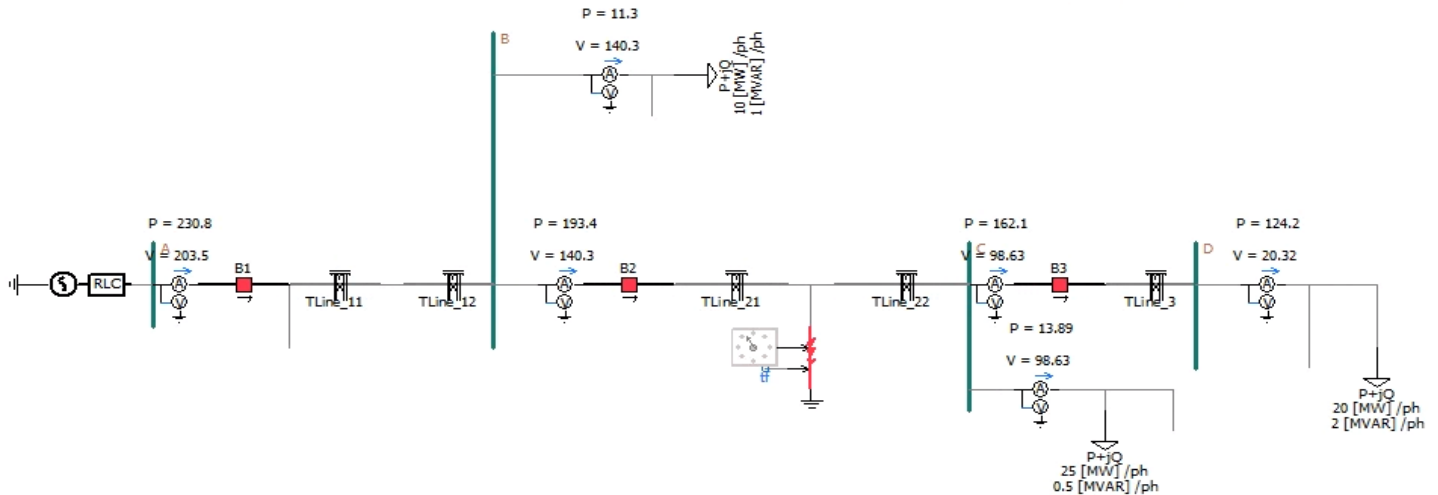


Figura 4 – Circuito equipado com relé de proteção de sobrecorrente instantâneo e temporizado sem linha coletora

Com o relé parametrizado, o circuito foi submetido à mesma série de testes no PSCAD feita anteriormente, e foi montado o circuito representado na figura 5, o qual é equivalente ao circuito da figura 4, mas com uma linha coletora incorporada na faixa de servidão da linha de transmissão TLine_21 de tamanho 10 km. Foram realizados exatamente todos os testes anteriores feitos para o circuito da figura 4, sendo possível recolher os tempos de ativação dos relés para as funções 50 e 51, e posteriormente comparar com os valores obtidos ao realizar os mesmos testes no circuito da figura 5.

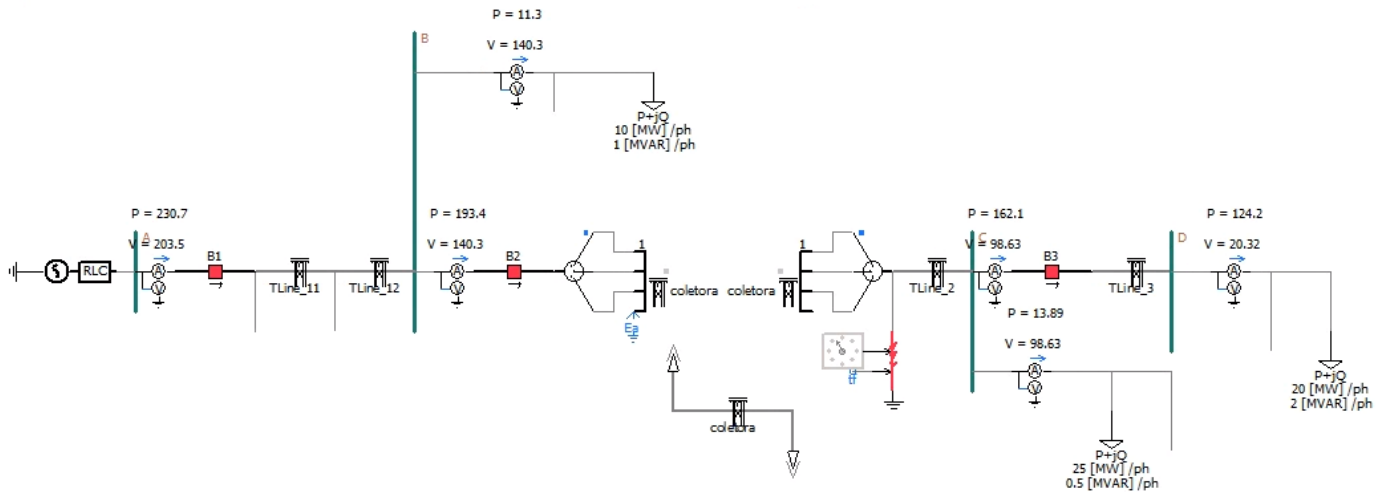


Figura 5 – Circuito equipado com relé de proteção de sobrecorrente instantâneo e temporizado com linha coletora

Sendo T_0 o tempo de ativação de um relé do circuito da figura 4 e T_1 o tempo de ativação de um relé do circuito da figura 5, cada elemento da tabela foi calculado de acordo com a seguinte equação: $\% = \left(\frac{T_1}{T_0} \cdot 100 \right) - 100$.

Função de proteção 32

A próxima função estudada foi a do relé de proteção direcional de potência. Essa etapa do projeto se baseou fortemente na leitura da tese de mestrado de BERROCAL, J. D. V., “Estudo do elemento direcional de proteção em uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda” [7], que fez testes similares aos que foram reproduzidos aqui, mas com diferentes propósitos.

O dispositivo direcional além de ativar o *trip*, também mostra a direção que se encontra a falta em relação à localização do relé, e para isso utiliza a interação entre a polarização e a operação. Com os parâmetros configurados, o relé delimita sua zona de operação a partir de um eixo de máximo torque, e se o fasor da corrente estiver na zona de operação, a falta se encontra a frente do relé (*forward*), caso contrário, encontra-se atrás (*reverse*), de acordo com [7], sendo assim, o dispositivo do PSCAD se baseia na ideia que, para uma falta localizada à frente do relé, a impedância de sequência negativa assume valor positivo, e, para uma falta localizada atrás do relé, valor negativo.

O circuito escolhido para a aplicação do relé de proteção direcional está exposto na figura 6, e existe um único relé localizado após a barra C, antes da linha de transmissão TLine_41. O sistema de 230 kV e suas linhas de transmissão

possuem os seguintes tamanhos: linha AB = 60 km; linha BC = 40 km; linha AC = 80 km; linha CD = 70 km e linha DE = 100 km. O relé com a função de proteção 3ZQ do software PSCAD possui como parâmetros de entrada a magnitude e a fase da corrente de sequência negativa, a magnitude e a fase da tensão de sequência negativa, e a magnitude da corrente de sequência positiva. Todos esses parâmetros foram gerados a partir da corrente que passa entre as barras C e D (I_{CD}) no dispositivo de FFT (transformada rápida de Fourier), o qual gera diversas componentes harmônicas da onda para as seqüências positiva, negativa e zero do fasor. Foi utilizada apenas a primeira harmônica.

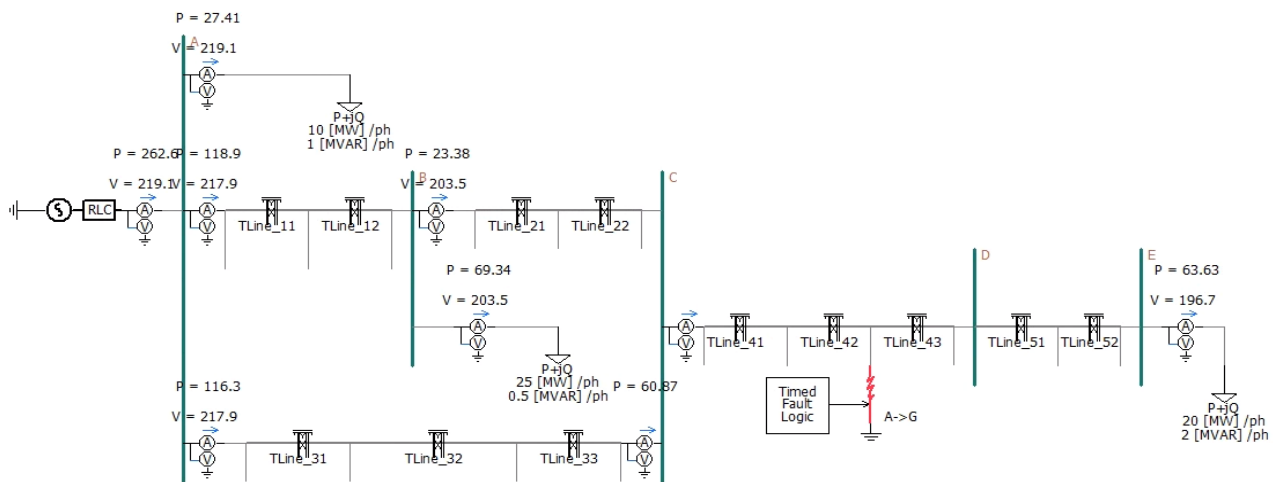


Figura 6 – Circuito equipado com relé de proteção direcional de potência sem linha coletora

Alguns parâmetros de parametrização do relé devem ser escolhidos dependendo das dimensões do circuito:

- *Forward OC setting*: deve ser menor do que $3I_2$ (corrente de seqüência negativa) para falta à frente;
- *Reverse OC setting*: deve ser menor do que $3I_2$ (corrente de seqüência negativa) para falta atrás;
- Z_2 *forward threshold*: deve ser maior que a impedância de seqüência negativa para falta à frente;
- Z_2 *reverse threshold*: deve ser maior que a impedância de seqüência negativa para falta atrás;
- I_1 *restraint fator*: deve ser menor que a razão entre corrente de seqüência negativa e de seqüência positiva.
- *Line angle*: ângulo de fase da impedância da linha.

Foram feitos então testes de falta com resistência mínima da fonte de tensão até o final do circuito de 10 em 10 km, percorrendo o circuito em anel tanto pelo caminho dos barramentos ABC quanto pelo caminho dos barramentos AC, sendo recolhidos os valores de $3I_2$ (triplo da magnitude da corrente de seqüência negativa), os valores de impedância de seqüência negativa e a corrente de seqüência positiva para o tipo de falta AG, todos em função da distância do ponto de falta até a barra C. Sendo assim, os valores escolhidos para os parâmetros foram: *forward OC setting* = 1; *reverse OC setting* = 0,05; Z_2 *forward threshold* = 15,1; Z_2 *reverse threshold* = 15; I_1 *restraint fator* = 0,2; *line angle* = 85.

Visto que o relé foi parametrizado no circuito sem linha coletora, foi possível aplicar diversos testes semelhantes ao que foi feito no relé com proteções de sobrecorrente temporizado e instantâneo. As faltas foram feitas com a corrente de curto-circuito máxima, ou seja, resistência de falta mínima de 0,01Ω. Não é possível fazer um tipo de falta trifásico no circuito (do tipo ABCG), pois a proteção do relé se baseia inteiramente em cálculos com corrente de seqüência negativa, corrente de seqüência positiva e impedância de seqüência negativa, parâmetros provindos de uma falta desbalanceada.

Foi montado o circuito representado na figura 7, equivalente ao circuito da figura 6, mas com uma linha coletora na faixa de servidão da linha de transmissão Tline_42.

Foram feitos exatamente todos os testes anteriores realizados para o circuito da figura 6, sendo possível recolher os tempos de ativação dos relés para a função 3Z para posterior comparação com os valores obtidos ao realizar os mesmos testes, visto que a única característica alterada foi a incorporação da linha coletora. Os tempos de ativação do relé podem ser vistos na figura 8.

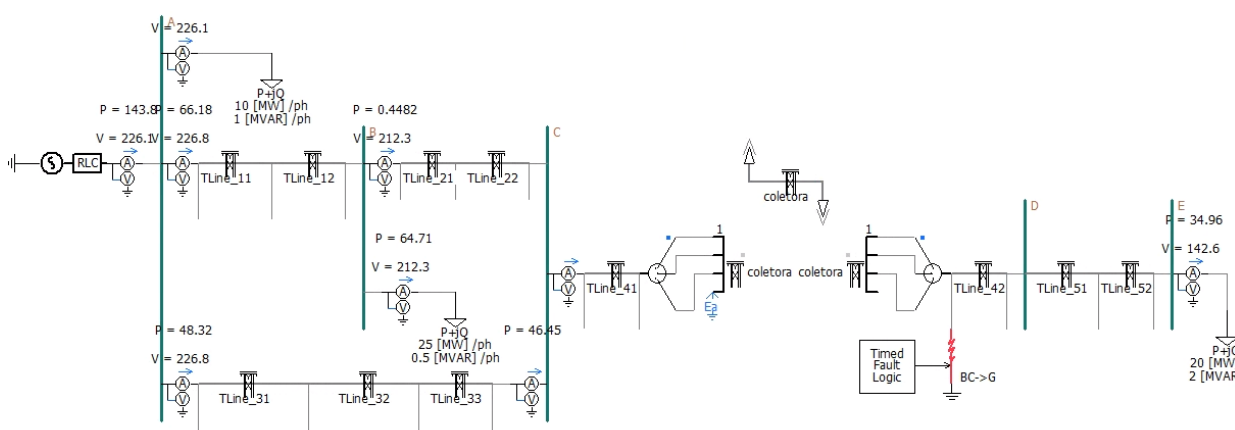


Figura 7 – Circuito equipado com relé de proteção direcional de potência com linha coletora

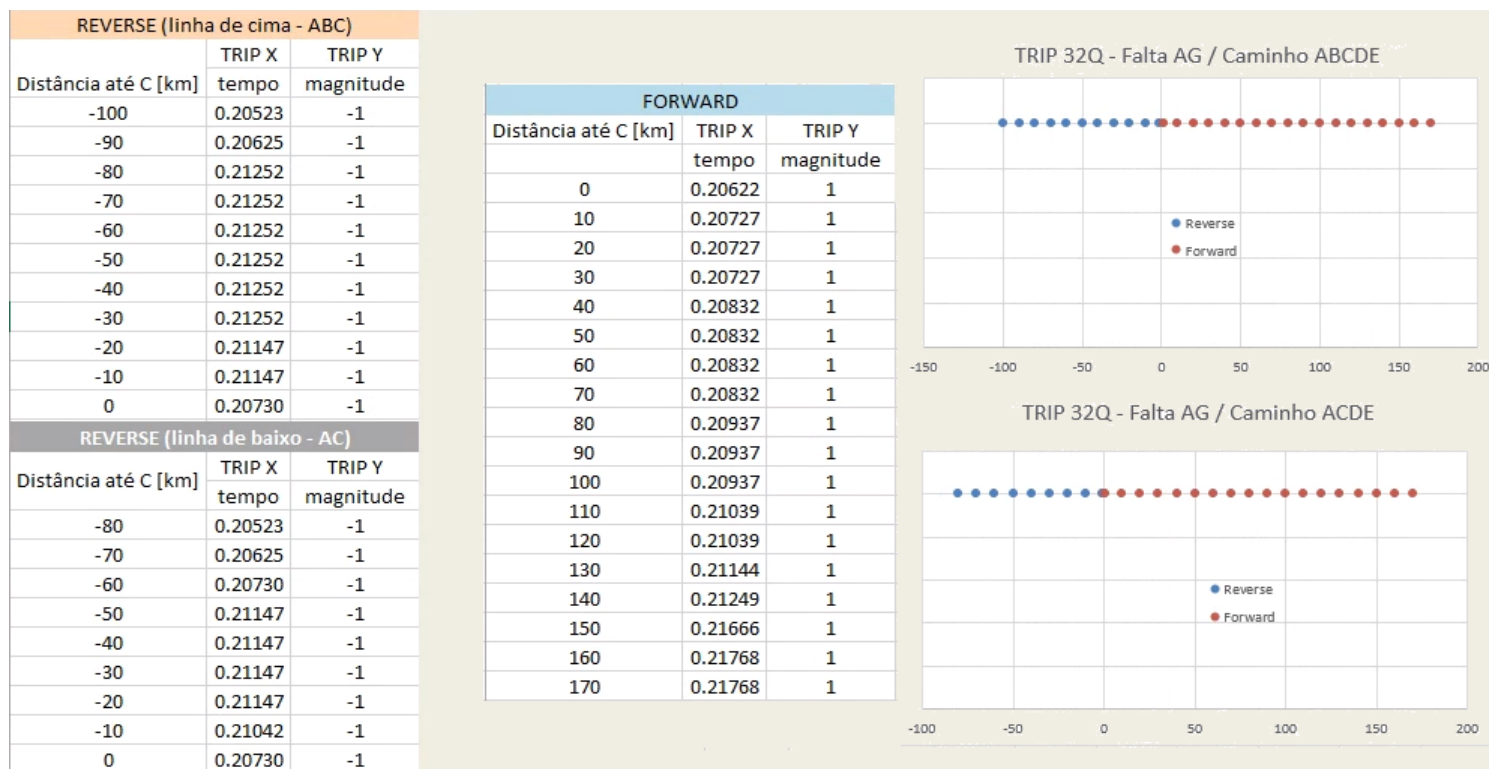


Figura 8 – Tempos de acionamento do relé para o circuito da figura 8 e tipo de falta AG

Existem quatro casos distintos existentes: quando a falta elétrica é feita no sentido das linhas de transmissão do caminho ABCDE com tipos de falta AG e BCG, e quando a falta elétrica é feita no sentido das linhas de transmissão pelo caminho ACDE, também com tipos de falta AG e BCG.

É interessante citar que o ponto localizado a -100 km da barra C no caminho ABCDE é o mesmo ponto localizado a -80 km da barra C no caminho ACDE. Os tempos de ativação são diferentes, mas os dois caminhos correspondem ao mesmo gráfico.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A diferença percentual é nula ou quase nula entre os tempos de disparo dos relés equipados com as funções 50 e 51 dos circuitos mostrados nas figuras 4 e 5, com diferença máxima de -0,08%, ou seja, ela demonstra que a incorporação da Linha Coletora em vazio no entorno de uma linha de transmissão em operação não altera a proteção da linha de transmissão principal, considerando as proteções de sobrecorrente temporizada e instantânea. Além disso, a diferença percentual é nula ou quase sempre nula (sendo de -0,49% em apenas um caso e 0,01% em seis casos) entre os tempos de disparo dos relés equipados com a função de proteção 32 dos circuitos com e sem a inserção da linha coletora, ou seja, ela prova que a inclusão de uma linha coletora sem carga na faixa de servidão de uma linha de transmissão funcional não altera a proteção da linha de transmissão principal quando se trata da proteção direcional de potência.

Os dados com diferença percentual não nula, ou seja, os tempos de ativação dos relés com diferenças muito pequenas entre as medições feitas no circuito sem a linha coletora e com a inserção da linha coletora provém do método de integração utilizado e pode ser desconsiderado. Foi tomado cuidado extremo na coleta dos valores de tempo de ativação do relé, pois essa tarefa foi realizada manualmente, e, portanto, uma maneira de otimizar esse processo e reduzir erros é a automatização da coleta dos valores de tempo de disparo.

BIBLIOGRAFIA

- 1 CHAVES, J. S., TAVARES, M. C., MESTAS, P., **Rural electrification based on capacitive coupling using a collector line**. 2019. IAPE, Oxford, Inglaterra.
- 2 EMANUELLI, Luis Cesar. Playlist **Proteção de Sistemas Elétricos Radiais Função 50 e 51**. 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/channel/UCVDt7DzFvmAU6Cd3oejraXg/> featured>.
- 3 KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência, Volume 1**. 2ª edição. Florianópolis, Santa Catarina, 2005.
- 4 Schweitzer Engineering Laboratories, INC., SEL-351A, **Protection System - Instruction Manual**.
- 5 DOBLE, **F6150e Power System Simulator**. Disponível em: <<https://www.doble.com/product/f6150e/>>.
- 6 MARDEGAN, Claudio. **Dispositivos de Proteção – Parte I**. O Setor Elétrico, 2010. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wpcontent/uploads/2010/05/Ed50_marco_protecao_seletividade_capIII.pdf>.
- 7 BERROCAL, J. D. V., **Estudo do elemento direcional de proteção em uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda**. 2017. Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas.