

Modelagem de um Relé de Proteção Direcional de Linha de Transmissão no ATP

Jacqueline Panez, Maria C. Tavares

Resumo--Neste artigo descreve-se a modelagem e simulação da proteção direcional de linha de transmissão que foi implementada no programa de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP. Os relés direcionais implementados utilizam três métodos de polarização, sendo estes o método de polarização por tensão, o método de polarização por corrente e o método de impedâncias. O estudo foi realizado num sistema com uma linha longa de 600 km e compensação em série. Foram feitas análises de sensibilidade para identificar condições de operação indevida da proteção.

Index Terms: ATP, MODELS, Linha de transmissão, Proteção direcional, Compensação em Série.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão de hoje em dia são cada vez mais complexos em função do tamanho da malha e pela inserção cada vez maior da geração distribuída. Por este motivo, os elementos direcionais são cada vez mais utilizados para supervisionar os elementos de sobrecorrente para que eles operem somente para faltas numa direção, ou para frente ou para trás, a fim de auxiliar a coordenação da proteção.

Os relés direcionais podem analisar sinais de sequência negativa ou zero. A sequência negativa sempre está presente em faltas desequilibradas (faltas monofásica, bifásica e bifásica-terra) e a sequência zero só está presente em faltas que envolvem a terra (falta monofásica e bifásica-terra).

Alguns relés operam analisando as medidas de tensão e corrente, enquanto outros trabalham as medidas de impedância. A proteção direcional pode atuar erroneamente devido a muitos fatores, como é o caso de linhas de transmissão com compensação em série. Nestes casos podem ocorrer inversões dos sinais de corrente e tensão medidos [1].

No presente trabalho o relé direcional foi representado no programa de transitórios ATP num sistema com linha longa com capacitor série. O relé foi implementado na linguagem MODELS, tendo sido representado o tratamento do sinal [2] e a função da proteção em si.

Foram modelados relés que operam por corrente e tensão e outro que monitora a impedância de sequência. Para todos os casos foi feita uma análise de sensibilidade de modo a que o transformador de corrente (TC) operasse na região saturada. Adicionalmente foi variada a impedância burden do TC para

avaliar a influência destes parâmetros no desempenho do relé direcional.

Como contribuição da pesquisa foram identificadas condições para a operação indevida da proteção para o sistema com compensação em série.

II. PROTEÇÃO DIRECIONAL DE LINHA DE TRANSMISSÃO

A proteção direcional precisa de duas grandezas para atuar, sendo estas a polarização e a operação, ambas utilizando a tensão ou a corrente. A grandeza de polarização tem uma referência fixa, ou fonte de polarização, para alguma quantidade "operar" (por exemplo, a corrente de sequência zero) esta deve ser comparada com a referência fixa. A fonte de polarização não deve mudar de direção, independentemente da localização da falta, como se mostra na figura 1.



Fig. 1. Operação da proteção direcional.

Para a modelagem do relé direcional com os métodos de polarização por tensão e polarização por corrente se baseou no modo de operação dos relés 7SJ82/7SA87 da marca SIEMENS [3]-[4]. Para o modelagem do relé direcional com o método de impedâncias foi modelado o relé SEL421 da marca SCHWEITZER INC. [5]-[6].

III. MÉTODOS DE POLARIZAÇÃO POR TENSÃO E CORRENTE DA PROTEÇÃO DIRECIONAL

A. Polarização por Tensão de Sequência Zero e Sequência Negativa

Para o método de polarização por tensão de sequência zero o elemento de polarização é a tensão residual (3V0) e o elemento de operação é a corrente residual (3I0). A tensão residual (3V0) é medida através dos três transformadores de tensão com o secundário ligado em delta aberto, como se mostra na figura 2. A corrente residual (3I0) é medida através dos três transformadores de corrente com o secundário ligado em estrela aterrado, como se mostra na figura 3.

Para o método de polarização por tensão de sequência negativa o elemento de polarização é a tensão de sequência negativa, e o elemento de operação é a corrente de sequência negativa. O modo de operação é igual ao do caso de polarização por tensão de sequência zero, só que a tensão e corrente de sequência negativa são calculadas pelo relé direcional com as equações 1 e 2, respectivamente.

A conexão do transformador de tensão é apresentada na

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da CAPES, CNPq e FAPESP (proc. 2015/05626-0).

Jacqueline Panez é aluna de mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Campinas.

Maria C. Tavares é professora Livre Docente da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas.

figura 4 e a conexão do transformador de corrente é apresentada na figura 3.

$$\bar{V}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\bar{V}_A + a^2 \cdot \bar{V}_B + a \cdot \bar{V}_C) \quad (1)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + a^2 \cdot \bar{I}_B + a \cdot \bar{I}_C) \quad (2)$$

Onde a e a^2 são operadores que podem ser representados como números complexos, na forma retangular ou exponencial, como se mostra nas equações 3 e 4.

$$a = \frac{-1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j2\pi/3} \quad (3)$$

$$a^2 = \frac{-1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j4\pi/3} \quad (4)$$

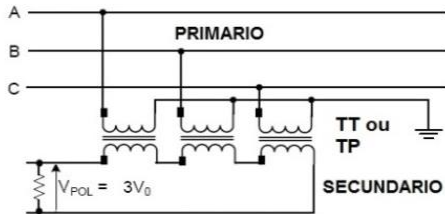


Fig. 2. Conexão dos transformadores de tensão para a medição da tensão de sequência zero.

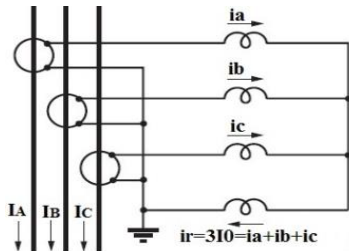


Fig. 3. Conexão dos transformadores de corrente para a medição da corrente de fase e corrente de sequência zero.

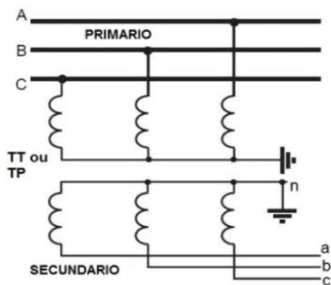


Fig. 4. Conexão dos transformadores de tensão para a medição das tensões de fase.

Os diagramas fasoriais indicados nas figuras 5 e 6 representam as tensões e correntes de fase durante um curto-circuito monofásico na fase A. A soma vetorial das tensões de fase resulta na tensão residual ($3V_0$), que em operação normal do sistema é zero. A soma vetorial das correntes de fase resulta na corrente residual ($3I_0$), como se mostra na figura 5. A tensão e corrente de sequência negativa ($3V_2$ e $3I_2$) são obtidas da soma em componentes simétricas e são calculadas pelas equações 1 e 2, como se mostra na figura 6.

Do diagrama fasorial da figura 5 pode-se verificar que a tensão residual ($3V_0$) é o elemento de polarização (V_{ref}) e mediante um ajuste de ângulo de torque (ϕ_{rot}) se rotaciona a tensão de referência (V_{ref}). A nova tensão de referência é $V_{ref,rot}$, e a partir desta nova tensão o relé direcional define as zonas de operação. A zona “a frente” é o plano perpendicular à tensão de referência ($V_{ref,rot}$) e para frente. A zona

“reversa” é a zona oposta à zona de frente, como se mostra na figura 5. Para que o relé possa operar é necessário obter a corrente residual ($3I_0$). O relé inverte o sentido da corrente residual ($-3I_0$) e se a corrente cair na zona “a frente” o relé declara a falta para frente, e se cair na zona “reversa” o relé declara a falta reversa.

Para o método de polarização por tensão de sequência negativa as regiões de operação são iguais ao caso de polarização por tensão de sequência zero, como se mostra na figura 6.

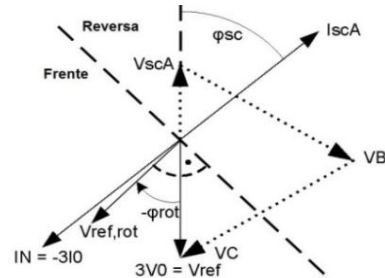


Fig. 5. Diagrama fasorial de operação do relé direcional com método de polarização por tensão de sequência zero.

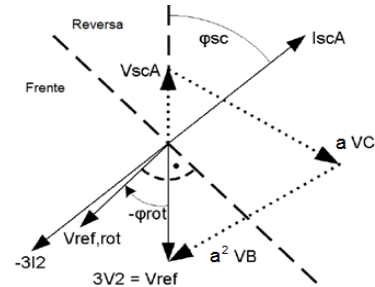


Fig. 6. Diagrama fasorial de operação do relé direcional com método de polarização por tensão de sequência negativa.

B. Polarização por Corrente de Sequência Zero e Sequência Negativa

Para o método de polarização por corrente de sequência zero o elemento de polarização é a corrente de sequência zero que sempre se encontra no eixo real positivo do plano vetorial, como se mostra na figura 7. O elemento de operação é a tensão de sequência zero. As regiões “a frente” e “reversa” são definidas através dos ângulos α e β , como se mostra na figura 7. A referência para os dois ângulos é definida como o eixo real positivo. Para que o relé possa operar se monitora a tensão de sequência zero. Se a tensão cair na zona “a frente” o relé declara a falta para frente, e se cair na zona “reversa” o relé declara a falta reversa.

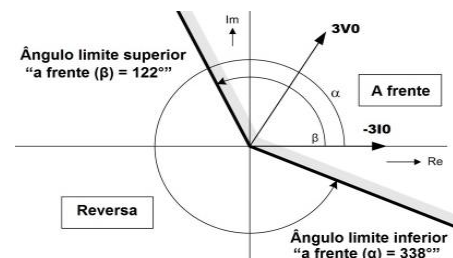


Fig. 7. Diagrama fasorial de operação do relé direcional com método de polarização por corrente de sequência zero.

Para o método de polarização por corrente de sequência negativa o elemento de polarização é a corrente de sequência negativa que sempre se encontra no eixo real positivo do plano

vetorial, como se mostra na figura 8. O modo de operação é igual ao caso de polarização por corrente de sequência zero, como se mostra na figura 8.

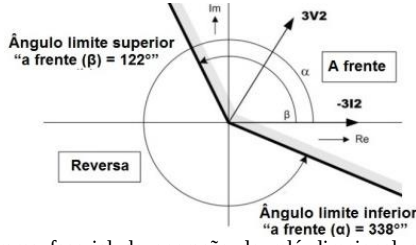


Fig. 8. Diagrama fasorial de operação do relé direcional com método de polarização por corrente de sequência negativa.

IV. MÉTODOS DE IMPEDÂNCIA DA PROTEÇÃO DIRECIONAL

Os elementos descritos na seção anterior requerem que os usuários selecionem as quantidades de polarização e operação para cada aplicação da rede. Uma modificação na configuração da rede pode causar a operação indevida dos elementos descritos na seção anterior. Essas limitações dos elementos direcionais tradicionais são eliminadas pelos elementos direcionais que respondem às impedâncias de sequência negativa e sequência zero, as quais resolvem o problema de sensibilidade de tensão dos elementos tradicionais polarizados por tensão para falta a terra remota ou de alta impedância.

A. Polarização por Tensão de Sequência Negativa (32Q)

O elemento 32Q serve como elemento direcional de terra. Os relés numéricos fazem o cálculo de seus componentes simétricos. A sequência negativa é usada pelo elemento 32Q que calcula a impedância de sequência negativa (Z2) para determinar a direção de curto-circuito monofásico, através da equação 5.

$$|\overline{Z2}| = \frac{Re[\overline{V}_2 \cdot (1 \angle \theta_2 \cdot \overline{I}_2)^*]}{|\overline{I}_2|^2} \quad (5)$$

Onde:

$\overline{V}_2$: Tensão de sequência negativa

$\overline{I}_2$: Corrente de sequência negativa

θ_2 : Ângulo da impedância de sequência negativa da LT

O elemento 32Q compara Z2 com dois limites de ajustes do relé direcional. Se Z2 está abaixo do limite Z2F, o elemento 32Q declara uma falta na direção “a frente”. Se Z2 está acima do limite Z2R, o elemento 32Q declara uma falta na direção “reversa”, como é mostrado na figura 9.

B. Polarização por Tensão de Sequência Zero (32V)

O elemento 32V opera na mesma forma que o elemento 32Q, sendo que calcula a impedância de sequência zero, pela equação 6.

$$|\overline{Z0}| = \frac{Re[\overline{V}_0 \cdot (1 \angle \theta_0 \cdot 3\overline{I}_0)^*]}{|3\overline{I}_0|^2} \quad (6)$$

Onde:

$\overline{V}_0$: Tensão de sequência zero

$\overline{I}_0$: Corrente de sequência zero

θ_0 : Ângulo da impedância de sequência zero da LT

O elemento 32V compara Z0 com dois limites de ajustes do relé direcional. Se Z0 está abaixo do limite Z0F, o elemento 32V declara uma falta na direção “a frente”. Se Z0 está acima

do limite Z0R o elemento 32V declara uma falta na direção “reversa”, como é mostrado na figura 10.

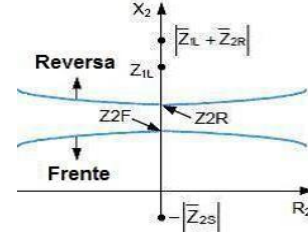


Fig. 9. Característica de operação do elemento 32Q.

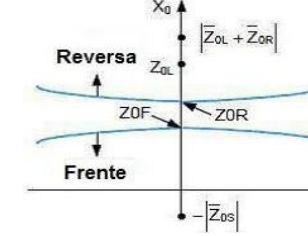


Fig. 10. Característica de operação do elemento 32V.

C. Operação dos Elementos 32Q e 32V

A figura 11 mostra a rede de sequência negativa para uma falta a terra no extremo remoto da linha protegida, num sistema com duas fontes, nas quais Z_{S2} e Z_{R2} são as impedâncias de sequência negativa das fontes local e remota, Z_{L2} é a impedância de sequência negativa da linha protegida.

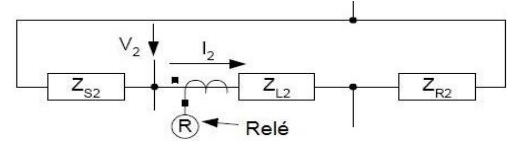


Fig. 11. Rede de sequência negativa para uma falta a terra no extremo da linha protegida num sistema com duas fontes.

O elemento 32Q mede a tensão de sequência negativa $\overline{V}_2$ e a corrente de sequência negativa $\overline{I}_2$. Para esta falta na direção “a frente”, a tensão $\overline{V}_2$ é:

$$\overline{V}_2 = -\overline{I}_2 \cdot \overline{Z}_{S2} \quad (7)$$

Então a impedância que o relé mede é:

$$\overline{Z2} = \frac{\overline{V}_2}{\overline{I}_2} = -\overline{Z}_{S2} \quad (8)$$

Para qualquer localização de falta na direção “a frente” o elemento 32Q mede a impedância de sequência negativa do sistema equivalente atrás do relé e de sinal negativo.

Uma análise similar mostra que para toda falta a terra na direção “reversa” o relé mede a impedância de sequência negativa equivalente a frente dele e de sinal positivo.

$$\overline{Z2} = \frac{-\overline{V}_2}{-\overline{I}_{R2}} = \overline{Z}_{L2} + \overline{Z}_{R2} \quad (9)$$

V. MODELAGEM DO RELÉ DIRECIONAL

Os softwares comerciais que são normalmente utilizados para a análise de sistemas de proteção possuem limitações em seus modelos, por serem estes dedicados à análise do sistema na sua frequência fundamental. Nesse sentido, o uso de softwares do tipo EMT (Eletromagnetic Transient Program - Programas de Transitórios Eletromagnéticos) vem se mostrando cada vez mais frequente para a modelagem e simulação de relés de proteção. Estes programas utilizam modelos mais elaborados para a representação dos

componentes do sistema elétrico, além de permitirem a implementação de modelos dos relés numéricos microprocessados. A MODELS é uma linguagem de programação estruturada interna ao ATP e com ela é possível criar modelos no sistema elétrico, como é o caso dos relés digitais de proteção. Sua estrutura de programação é apresentada na figura 12.

```

MODEL DEFAULT
  DATA d1, d2 -- Parâmetros de entrada
  INPUT i1, i2 -- Variáveis de entrada
  OUTPUT o1, o2 -- Variáveis de saída
  VAR o1, o2 -- Declaração de variáveis
  INIT -- Inicialização de variáveis
    o1:=0
    o2:=0
  ENDINIT
  EXEC -- Realização das operações do programa
    o1:=(i1-i2)*t
    o2:=sin(o1)
  ENDEXEC
ENDMODEL

```

Fig. 12. Estrutura básica da Linguagem MODELS.

A. Modelagem do transformador de corrente (TC)

Para a operação dos relés de proteção se faz necessário utilizar um TC, já que a corrente da rede elétrica é muito elevada (kA) para ser inserida diretamente aos relés. A função dos TCs é reduzir a corrente a valores da ordem de Amperes, mas a corrente a ser utilizada deve ter a mesma forma de onda da corrente primária medida. Quando os TCs operam saturados ocorre uma distorção da corrente reduzida, fazendo com que a proteção veja uma corrente diferente da corrente primária, podendo provocar uma operação indevida da proteção. Para o modelagem matemática do TC se emprega a norma IEEE no. C37.110 [7], que apresenta as equações matemáticas do TC. O modelo foi implementado na MODELS. O circuito equivalente do TC implementado no ATP é apresentado na figura 13.

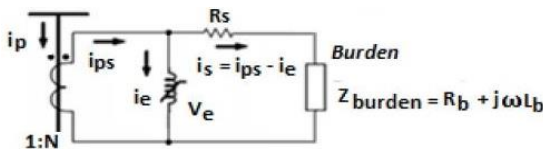


Fig. 13. O circuito equivalente do TC.

Onde:

ip: Corrente primária instantânea

ips: Corrente secundária ideal instantânea

is: Corrente secundária real instantânea

ie: Corrente de excitação instantânea

Ve: Tensão de excitação instantânea

N: Número de espiras do TC

Rs: Resistência do enrolamento secundário

Zb: Impedância do burden

Na figura 14 são apresentadas as correntes secundárias do TC para uma falta a terra. A falta começa em 0,045 s. Antes da falta se pode verificar que as correntes secundária ideal (ips) e secundária real (is) são iguais. Na falta essas correntes já não são iguais e devido à componente CC do transitório ocorre a saturação do TC e a corrente secundária real (is) se distorce, assim também haverá uma corrente de excitação (ie) fluindo pelo núcleo magnético do TC. Quando o TC não está saturado, como antes da falta, esta corrente de saturação é muito baixa.

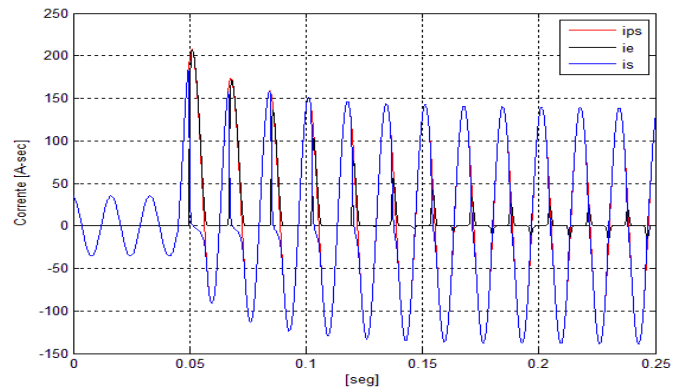


Fig. 14. Correntes secundárias do TC, para o caso de falta a terra com saturação do TC.

B. Modelagem do Relé direcional

Os relés numéricos fazem processamento dos sinais de corrente e tensão como é mostrado na figura 15.

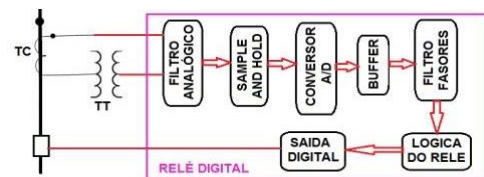


Fig. 15. Descrição simplificada de um relé.

O filtro analógico tem a função de suprimir frequências altas antes do processo de amostragem. No trabalho foi implementado o filtro do tipo Butterworth passa-baixa de 3ª ordem com frequência de corte de 188 Hz. A função de transferência do filtro utilizado é mostrada na equação 8.

$$H(s) = \frac{1,6452 \cdot 10^9}{s^3 + 2,3611 \cdot 10^3 \cdot s^2 + 2,7873 \cdot 10^6 \cdot s + 1,6452 \cdot 10^9} \quad (8)$$

A função Sample/Holder deve capturar e manter constante um sinal durante um intervalo de tempo. De acordo com o critério de Nyquist para a amostragem do sinal deve-se escolher uma frequência de amostragem de mínimo duas vezes a frequência fundamental do sistema. Neste trabalho foi utilizado por 960 Hz, valor também utilizado pelos relés comerciais e que corresponde a uma taxa de 16 amostras/ciclo.

O conversor A/D realiza a transformação do sinal analógico em uma palavra digital de vários bits.

O buffer é responsável por armazenar as amostras das correntes e tensões que serão utilizadas no algoritmo de estimação dos fasores. Em função do algoritmo de estimação de fasores escolhido são utilizadas 17 amostras, o que corresponde a um ciclo mais uma amostra.

O filtro fasor tem a função de eliminar a componente CC e os harmônicos que estão presentes durante a falta. O filtro fasor implementado foi do tipo cosseno.

Todo o tratamento de sinal e a lógica do relé foram implementados na rotina MODELS, como apresentado na figura 16.

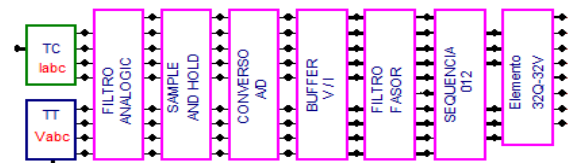


Fig. 16. Estrutura do relé implementado na MODELS.

VI. SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Para avaliar o desempenho da proteção direcional com os modelos desenvolvidos foi utilizado o sistema elétrico da figura 17 baseado num sistema elétrico real. O sistema elétrico apresenta uma linha de 500 kV que tem 600 km de comprimento e conta com compensação capacitiva em série. A compensação capacitiva em série de cada extremo da linha é de 25% da reatância longitudinal de sequência positiva total da linha ($X_c=39,979 \Omega$). Os reatores em derivação são de 325,063 MVar com fator de qualidade de 400 e reator de neutro de 2461,045 Ω com fator de qualidade de 50.

Os relés direcionais analisados são R1 e R2, o relé R1 se encontra antes do capacitor (lado barramento) e o relé R2 se encontra depois do capacitor (lado linha), como se mostra na figura 17.

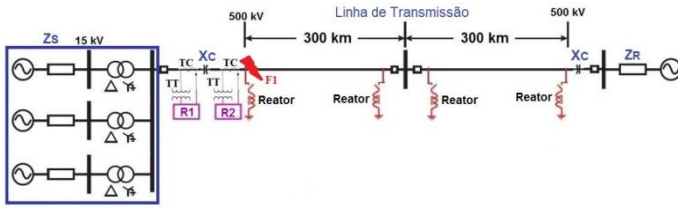


Fig. 17. Sistema elétrico em análise (linha de transmissão de 600 km com compensação em série).

Na tabela I são apresentados os parâmetros elétricos da linha, calculados para a frequência de 60 Hz. A resistividade do solo assumida foi de 4000 $\Omega \cdot m$.

TABELA I
Parâmetros Elétricos da Linha de 500 kV a 60 Hz.

Homopolar	R0 (Ω/km)	0,47806
	X0 (Ω/km)	1,5569
	Y0 ($\mu S/km$)	2,6007
Não Homopolar	R1 (Ω/km)	0,016036
	X1 (Ω/km)	0,26653
	Y1 ($\mu S/km$)	6,1158

Para faltas em qualquer ponto da linha os relés direcionais 32Q e 32V sempre calculam as impedâncias equivalentes das redes atrás deles. Na tabela II se apresenta a impedância da rede equivalente (Z_s) utilizada e calculada pelos relés R1 e R2.

TABELA II
Impedâncias teóricas e calculados pelos relés R1 e R2 em valor primário (Ω -prim) e valor secundário (Ω -sec).

	Relé R1			Relé R2		
	Teórico (Z_s)	Calculado pelo relé (Z_s)	Erro [%]	Teórico ($Z_s - X_c$)	Calculado pelo relé ($Z_s - X_c$)	Erro [%]
Z0 [Ω -prim]	-21,205	-20,375	3,91	18,7743	17,011	9,39
Z0 [Ω -sec]	-0,5598	-0,5379	3,91	0,4956	0,4491	9,39
Z2 [Ω -prim]	-66,245	-59,351	10,74	--	--	--
Z2 [Ω -sec]	-1,7489	-1,567	10,74	--	--	--

Os dados dos transformadores de corrente e tensão são os apresentados na tabela III. O relé direcional 32Q e 32V calculam as impedâncias em valores secundários e mediante a transformação da impedância primária para o secundário que é a divisão da relação de transformação do transformador de tensão e a relação de transformação do transformador de corrente, como se mostra na tabela III.

TABELA III

Dados dos transformadores de corrente e de tensão.

Transformador de corrente [A]	600/5
Transformador de tensão [kV]	500/0,11
Transformação da impedância primária para a secundária	37,879

VII. ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES

A. Análise das simulações da linha com compensação em série

Na figura 18 são apresentadas as impedâncias de sequência zero (Z_0) calculadas pelos relés R1 e R2 no domínio do tempo para uma falta monofásica (F1) como se mostra na figura 17. A falta começa em 0,05 s e depois de um ciclo essas impedâncias convergem (0,0667 s).

Os relés R1 e R2 operam corretamente indicando que a falta ocorre na direção “a frente” e abaixo do seu ajuste de zona a frente (Z_{0F}). A impedância (Z_0) calculada pelo relé R1 é a impedância de sequência zero da rede equivalente (Z_{s0}) atrás dele e de sinal negativo, como se mostra na figura 17. A impedância (Z_0) calculada pelo relé R2 é a impedância de sequência zero da rede equivalente (Z_{s0}) atrás dele mais a impedância do capacitor ($-X_c$). Essa soma de impedâncias ($Z_{s0} - X_c$) tem sinal positivo porque a impedância do capacitor é maior do que a impedância da rede equivalente ($Z_{s0} = 18,275\Omega < X = 39,979 \Omega$). Os ajustes das zonas a frente e reversa vão depender das localizações do capacitor e do transformador de tensão. Os ajustes para diferentes localizações são analisado em [1].

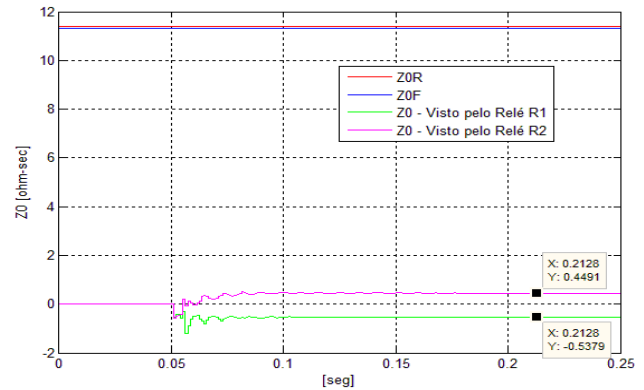


Fig. 18. Impedâncias de sequência zero vistas pelos relés R1 e R2.

Os relés direcionais com métodos de polarização por tensão e polarização por corrente são influenciados pelas inversões da corrente e da tensão provocada pelos capacitores série. As inversões da tensão e da corrente acontecem para as seguintes condições:

Inversão da tensão para o relé R1: $X_c > Z_{s0} + mZ_{0L}$

Inversão da tensão para o relé R2: $X_c > Z_{s0}$ e $X_c < Z_{s0} + mZ_{0L}$

Inversão da corrente para os relés R1 e R2: $X_c > Z_{s0} + mZ_{0L}$

Para o caso analisado ($X_c=39,979 \Omega$; $Z_{s0}=21,205 \Omega$ e $mZ_{0L}=0\Omega$), para o relé R1 ocorreria a inversões da tensão e da corrente, para o relé R2 só ocorreria a inversão da corrente. Então só o relé R2 operaria incorretamente e para evitar essa operação indesejada o relé R2 calcula a tensão no capacitor ($V_c = -jX_c \cdot I$), e acrescenta este valor ao valor de tensão medido. Esta correção é chamada de compensação do capacitor em série.

Na figura 19 se mostram a tensão e a corrente de sequência zero vistas pelos relés R1 e R2, para a mesma falta monofásica (F1) e com o método de polarização por corrente. Pode-se observar que o relé R1 opera corretamente indicando que a falta ocorre na direção a frente. O relé R2 com o ajuste da compensação do capacitor em série opera corretamente indicando que a falta ocorre na direção frente e sem o ajuste da compensação do capacitor em série opera incorretamente indicando que a falta ocorre na direção reversa.

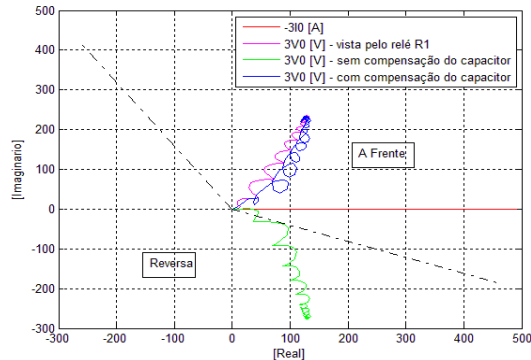


Fig. 19. Polarização por corrente de sequência zero vista pelos relés R1 e R2.

B. Análise das simulações da Saturação do TC

Para o caso de falta simulado anteriormente o TC não se satura porque a tensão de saturação do TC foi considerada igual a 1000 V. Para analisar o efeito da saturação do TC se reduziu a tensão de saturação para 300 V e 100 V, e para analisar o efeito da carga burden (Rb) do TC se consideraram dois valores de resistências: 2 Ω e 10 Ω .

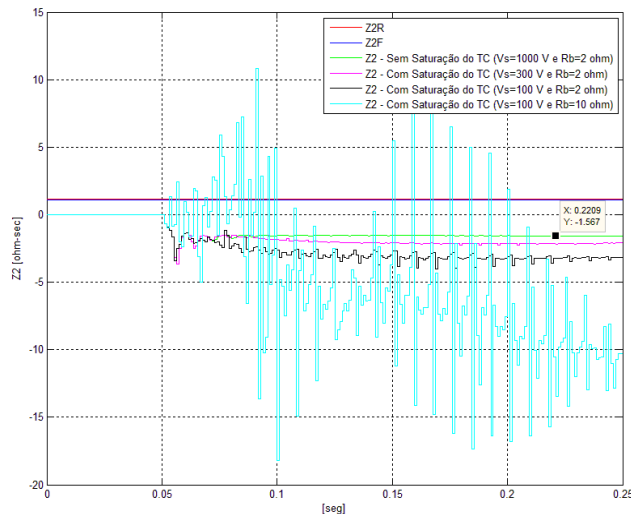


Fig. 20. Impedância de sequência negativa vista pelo relé.

Na figura 20 se apresentam as impedâncias de sequência negativa (Z2) calculadas pelo relé R1 com e sem saturação do TC. Pode-se observar que abaixando a tensão de saturação (Vs) do TC o módulo da impedância ($|Z2|$) aumenta. A redução da tensão de saturação do TC provoca a diminuição da sua corrente. Com o aumento da carga burden (Rb) se observará uma maior distorção da corrente do TC, assim como da impedância Z2, o que acaba resultando na operação incorreta do relé direcional 32Q.

Na figura 21 se apresenta o modo de operação da proteção direcional com polarização por tensão de sequência negativa para o relé R1 com e sem saturação do TC. Pode-se observar

que abaixando a tensão de saturação (Vs) do TC a corrente de sequência negativa (-3I2) diminui e gira no sentido anti-horário. Quanto maior a carga burden (Rb) maior será a distorção da corrente (-3I2), podendo entrar na operação da zona reversa. Desta forma o relé R1 operaria incorretamente, como se mostra na figura 21.

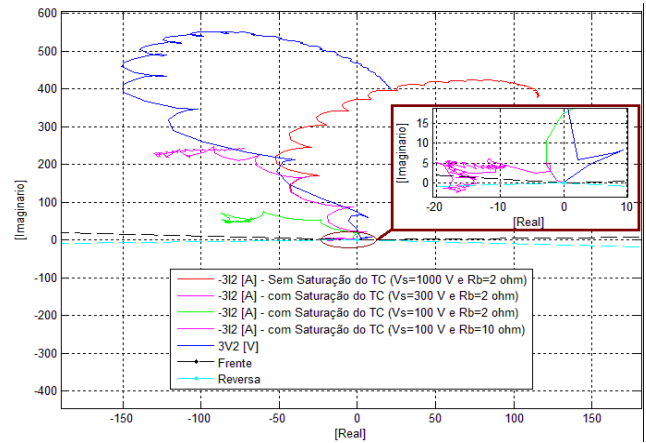


Fig. 21. Polarização por tensão de sequência negativa vista pelo relé R1.

VIII. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma revisão dos métodos de polarização que existem em dois relés direcionais comerciais, onde um opera com sinais de corrente e tensão e o outro com medidas de impedância. O sistema estudado consistiu numa linha de transmissão de 600 km com compensação série. Pelos estudos pode-se concluir que:

- Para o relé direcional R2 e com o método de polarização por corrente é necessário implementar o ajuste da compensação do capacitor em série de modo a evitar uma operação indevida.
- Os relés direcionais podem operar incorretamente se a carga burden do TC for elevada e se o joelho da curva de saturação for baixo. A saturação do TC prejudica a operação de ambos os relés, seja o que opera por tensão/corrente ou o que opera por impedância.

A modelagem dos relés implementados reproduziu corretamente o comportamento dos relés.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] Héctor J. Altuve, Joseph B. Mooney, and George E. Alexander "Advances in Series-Compensated Line Protection," Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., pp. 13, 2008.
- [2] D. Vinicius, M. Oleskovicz, R Giovanini. "Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: Dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados inteligentes," Universidade de São Paulo – USP, 2007, pp. 1-18.
- [3] SIEMENS. Manual SIPROTEC 5 – Overcurrent Protection 7SJ82/7SJ85. V6.00. 1374p.
- [4] SIEMENS. Manual SIPROTEC 5 – Distance Protection, Line Differential Protection, and Breaker Management for 1-Pole and 3-Pole Tripping 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK87. V6.00. 1580p.
- [5] SEL-421-4, -5 Relay Protection and Automation System – Instruction Manual – Applications Handbook. 422p.
- [6] Altuve, H. J. and Schweitzer E. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. 2014. 397p livro.
- [7] Glenn Swift, "Theory for CT SAT Calculator (PSRC)," IEEE PSRC, C37.110 IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes, pp. 9, June. 2001.
- [8] N. Oliveira, B. de Souza, Análise da Suscetibilidade dos Algoritmos de Estimação Fasorial aos Efeitos da Componente DC de Decaimento Exponencial. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012.