



**XXII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/29
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES NO RTDS™ PARA SIMULAÇÃO DE FALTAS ENTRE ESPIRAS E À TERRA

FABIANO MAGRIN

GERALDO ROCHA(*)
Schweitzer Engineering Laboratories

RICARDO ABOUD

RESUMO

O artigo descreve um elemento diferencial de sequência-negativa que melhora a sensibilidade para faltas internas entre espiras sob condições de carga pesada com supervisão na detecção de faltas externas, adicionando segurança a este elemento durante faltas externas com saturação do TC. O artigo também descreve um elemento direcional para a detecção de faltas restritas a terra, próximas ao neutro. Ao final, faltas são aplicadas ao modelo criado no RTDS™ para a verificação da sensibilidade e confiabilidade do diferencial de sequência-negativa e do elemento direcional de faltas restritas a terra ao transformador.

PALAVRAS-CHAVE

Relés de proteção, transformadores, simulação RTDS™, diferencial, REF

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma preocupação na aplicação de relés para proteção de transformadores consiste na sensibilidade do relé para detecção de faltas entre espiras que envolvam somente algumas espiras durante condições de operação do transformador com carga pesada.

O elemento diferencial de fase tradicional detecta rapidamente a maioria das faltas internas nos transformadores, exceto as faltas entre espiras e as faltas fase-terra próximas ao neutro do transformador.

Para uma falta fase-terra próxima ao neutro do transformador, pode ser usado um elemento de proteção direcional contra falta à terra restrita ("Restricted Earth Fault" – REF). Elementos direcionais de REF utilizam a corrente de terra no neutro do transformador como referência, comparando-a com a corrente de sequência-zero dos terminais do enrolamento em estrela do transformador para determinar se a falta é interna ao transformador.

A falta entre espiras consiste num desafio interessante para o elemento diferencial de fase tradicional, uma vez que a corrente de carga do transformador pode mascarar a corrente de falta.

O elemento diferencial de sequência-negativa descrito neste artigo possui alta sensibilidade para faltas desequilibradas. Conforme poderá ser visto, este elemento diferencial detecta faltas que envolvem somente 2% do enrolamento de um transformador usado no laboratório.

Para a comprovação da sensibilidade e adequacidade dos ajustes de proteção para essas funções, modelou-se um transformador utilizando o Simulador Digital de Tempo Real (RTDS™) no laboratório da Schweitzer Engineering Laboratories, em Campinas/SP.

(*) Rod. Campinas Mogi-Mirim (SP 340), km 118,5 – Prédio 11 – CEP 13.086-902 Campinas, SP, – Brasil
Tel: (+55 19) 3515-2000 – Fax: (+55 19) 3515-2011 – Email: marketing_br@selinc.com

2.0 - ELEMENTO DIFERENCIAL DE SEQUENCIA-NEGATIVA

Um dos maiores desafios da engenharia de proteção, quando voltada para a proteção de transformadores, é a detecção de faltas entre espiras e espira a terra. O elemento diferencial de fase tradicional não possui sensibilidade adequada, uma vez que a corrente de carga do transformador pode mascarar a corrente de falta. Se o transformador estiver com carga leve, as sensibilidades do elemento diferencial de fase e dos elementos diferenciais de sequência-negativa são praticamente as mesmas. Contudo, a sensibilidade do elemento diferencial de fase diminui significativamente à medida que a carga do transformador aumenta, enquanto a sensibilidade do elemento diferencial de sequência-negativa permanece inalterada. A seguir são apresentados os conceitos básicos para o entendimento deste artigo. Para maiores detalhes, podem ser consultadas as referências bibliográficas (1) e (2).

2.1 Princípio de Operação do Elemento Diferencial Tradicional

A Figura 1 mostra uma conexão típica do elemento diferencial de um transformador de dois enrolamentos. Os elementos diferenciais percentuais comparam uma corrente de operação com uma corrente de restrição escalonada ou compensada.

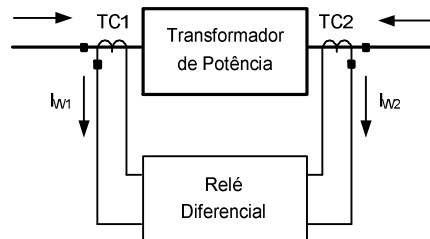


Figura 1 – Diagrama de Conexão do Elemento Diferencial Típico

A Figura 2 mostra a característica de operação com inclinações (“Slope”) simples e dupla, as quais usam a corrente de operação I_{OP} e a corrente de restrição I_{RT} . Esta característica tem a aparência de uma linha reta com inclinação SLP, com uma linha reta horizontal definindo a corrente mínima de pickup do elemento, I_{PU} . A região de operação está acima da característica e a região de restrição está abaixo da característica.

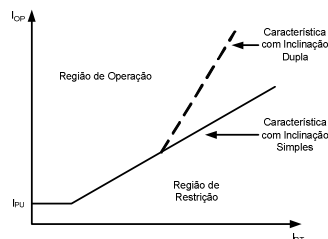


Figura 2 – Característica de Operação do Elemento Diferencial Percentual com Inclinação Simples e Dupla

2.2 Elemento Diferencial de Corrente de Sequência-Negativa

A Figura 3 mostra a característica de operação do elemento diferencial de corrente de sequência-negativa. Este método cria uma corrente de restrição, I_{RTQ} , e uma corrente de operação, I_{OPQ} , usando as correntes de sequência-negativa provenientes de todas as entradas dos terminais na zona do diferencial. O princípio de operação é idêntico àquele do elemento diferencial de corrente de fase tradicional, ou seja, se a corrente de operação de sequência-negativa for maior do que a corrente de restrição de sequência-negativa multiplicada pela inclinação ($I_{OPQ} > I_{RTQ} \cdot \text{SLP}$) e se a corrente de operação for maior do que o valor limite mínimo $O87PQ$, a falta é declarada como sendo dentro da zona de proteção do transformador.

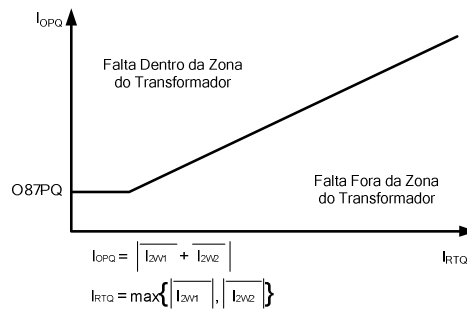


Figura 3 - Característica de operação do elemento diferencial de corrente de sequência-negativa

Para permitir uma maior segurança deste algoritmo, este deve ser dessensibilizado ou bloqueado durante a energização do transformador e durante faltas externas em que exista a possibilidade de ocorrer saturação do TC. Uma alternativa que atende aos requisitos de segurança e confiabilidade é a utilização de uma segunda inclinação para estes casos.

2.3 Princípio de Operação do Elemento Diferencial de Sequência-Negativa

O elemento diferencial de corrente de sequência-negativa opera conforme mostrado na Figura 4. Se ocorrer uma falta desequilibrada no transformador, seja uma falta entre espiras ou uma falta entre os enrolamentos, haverá circulação de corrente de sequência-negativa saindo do ponto da falta.

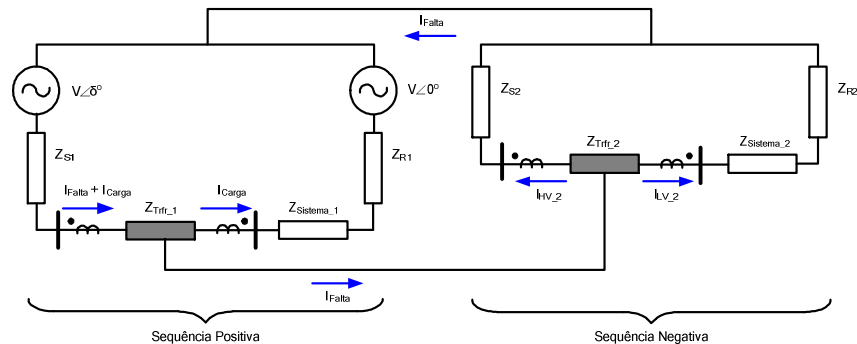


Figura 4 - Diagramas de impedância de sequência-positiva e negativa para uma falta interna desequilibrada no transformador, sem envolvimento de terra

3.0 - MODELAGEM DE TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA NO RTDS™

Vários modelos de transformador de potência estão disponíveis no RTDS™ como, por exemplo, modelo de transformadores de dois enrolamentos delta-estrela ou estrela-delta, modelo de transformadores com três enrolamentos ou modelo para autotransformadores. Para cada um destes casos, é possível ajustar se o transformador deve ser ideal, linear ou com saturação. A utilização de cada modelo depende do que se deseja estudar. Outros parâmetros necessários para o modelamento são reatância de dispersão de sequência-positiva para cada grupo de enrolamentos, perdas sem carga, tensões nominais dos enrolamentos e corrente de magnetização. A Figura 10 mostra uma das telas de configuração com alguns destes parâmetros.

Name	Description	Value	Unit	Min	Max
AutoT	Transformer Name	TR1			
type	Transformer Model Type	Saturation		0	2
Trmva	3 Phase Transformer MVA	330	MVA	1E-6	
f	Base operation frequency	60.0	Hz	1E-4	
YD2	Tertiary Winding (#2) Type			0	1
Lead	Delta lags or leads Y	Lags			
X012	Pos. seq. leakage reactance (#1-#2)	0.349	p.u.	0	1.0
X013	Pos. seq. leakage reactance (#1-#3)	0.077	p.u.	0	1.0
X023	Pos. seq. leakage reactance (#2-#3)	0.246	p.u.	0	1.0
NLL	No load losses	0.00033	p.u.	0.0	1.0
NLLtp	No load loss branch type	Winding			
ETAP	Enable Online Tap Changer	Disable		0	1
srtp	Solve Model on card type	GPC		0	2

Buttons: Update, Cancel, Cancel All

Figura 10 – Tela de Modelagem do Transformador de Potência

Infelizmente, para casos em que se deseja aplicar faltas internas ao transformador, este tipo de modelamento não é aplicável, pois não é disponibilizado acesso aos enrolamentos do trafo. Para estes casos, o RTDS™ fornece modelos monofásicos que permitem acesso a um ou dois pontos internos no enrolamento. A Figura 11 mostra o componente utilizado com acesso a estes terminais, denominados VF1 e VF2.

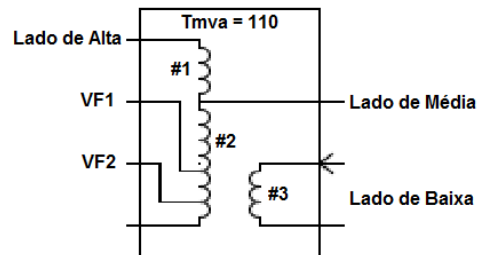


Figura 11 – Transformador Monofásico com Um e Dois Acessos ao Enrolamento

Os parâmetros a serem ajustados são basicamente os mesmos. O que este modelo vem a acrescentar é a possibilidade de acesso aos enrolamentos o que permite a aplicação de faltas desde 0.1% até 99.9% do enrolamento. A Figura 12 mostra os taps de acesso ao enrolamento através dos parâmetros VF1 e VF2.

rtids_sharcu_TRF1P3WAtt					
INTERNAL PLOT SELECTIONS			INTERNAL PLOT SIGNAL NAMES		
CONFIGURATION			WINDING VOLTAGES, ETC		
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
VW1	Rated Voltage of Winding #1	345	kV(RMS)		
VW2	Rated Voltage of Winding #2	161	kV(RMS)		
VW3	Rated Voltage of Winding #3	13.8	kV(RMS)		
VF1	Fault winding #1 voltage (% of VW2)	40	%	0.1	99.9
VF2	Fault winding #2 voltage (% of VW2)	3	%	0.1	99.9
Im1	Magnetizing Current of Winding #1	0.132	%	0.0001	90.
Im2	Magnetizing Current of Winding #2	0.132	%	0.0001	90.
Im3	Magnetizing Current of Winding #3	0.132	%	0.0001	90.
Im4	Magnetizing Current of Winding #4	0.132	%	0.0001	90.
Im5	Magnetizing Current of Winding #5	0.132	%	0.0001	90.

Figura 12 – Ajuste Porcentual para Faltas Internas ao Trafo

Outro fator importante no modelamento é a conexão dos transformadores e das faltas. Como os componentes são todos monofásicos, tudo deve ser feito de forma manual. Por exemplo, a modificação das conexões do transformador para uma ligação em delta deve ser realizada pelo engenheiro durante a modelagem. O mesmo vale para as posições das faltas e para suas ligações, ou seja, para obter uma falta entre espiras, é necessário construir toda a interligação de forma manual.

No caso apresentado neste artigo, foi estudado um autotransformador com terciário ligado em delta defasado de 30°. O trafo possui potência de 330 MVA e tensões de 345/161/13.8 kV. A Figura 13 mostra as ligações que foram necessárias para o modelamento. Foram aplicadas faltas externas e internas à seção diferencial, faltas entre espiras e faltas espira a terra.

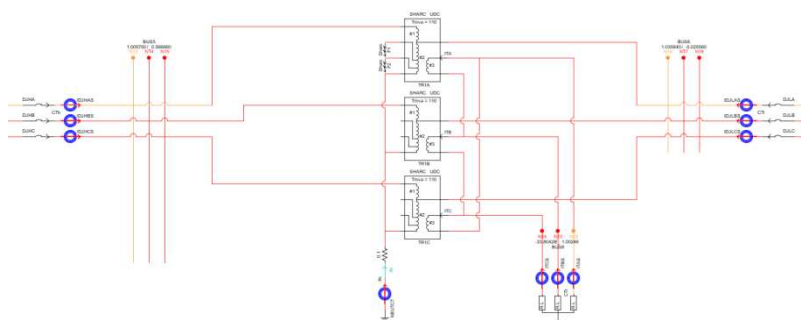


Figura 13 – Ligações do Autotrafo

O sistema estudado está representado por seu unifilar na Figura 14 e contém 4 linhas de transmissão - L1, L2, L3 e L4 -, fontes equivalentes - EQ1, EQ2 e EQ3 - e cargas equivalentes. O transformador em estudo está representado como T1. Na barra B3 também foi implementada uma carga controlável, de forma a permitir variar o carregamento do transformador. Já para o terciário foi modelada apenas carga, sem fonte.

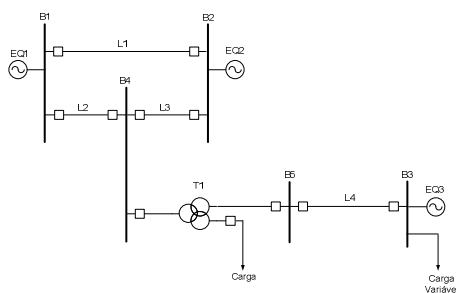


Figura 14 – Sistema Modelado

4.0 - TESTES REALIZADOS

Primeiramente, foram aplicadas as faltas externas ao transformador. A Figura 15 apresenta a localização das faltas. As faltas foram divididas em externa e interna à seção diferencial, lembrando que a seção diferencial é delimitada pela posição dos TCs. A Tabela 1 apresenta a descrição da simbologia apresentada.

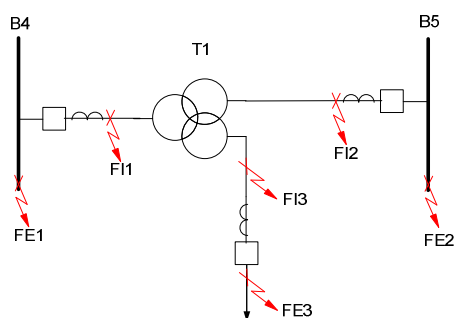


Figura 15 – Localização das Faltas Externas ao Enrolamento do Transformador

Tabela 1 – Localização das faltas Externas ao Enrolamento do Transformador

Localização	Descrição
FE1	Falta externa 1
FE2	Falta externa 2
FE3	Falta externa 3
FI1	Falta interna 1
FI2	Falta interna 2
FI3	Falta interna 3

O principal objetivo deste teste é determinar se os algoritmos de proteção diferencial de fase e de sequência-negativa e REF possuem segurança e confiabilidade para todos os tipos de falta, mesmo em caso de saturação de TCs para faltas nos pontos FE1, FE2 e FE3.

Posteriormente, foram realizados ensaios com faltas internas ao transformador. A Tabela 2 descreve a localização e tipo de falta.

Tabela 2 – Localização das Faltas Internas ao Transformador

Localização	Tipo de Falta
F1	Entre Espiras
F2	Espira-Terra

O principal objetivo deste teste é determinar a sensibilidade de cada elemento de proteção, avaliando os elementos diferenciais de fase, de sequência-negativa e o elemento de falta restrita a terra.

5.0 - RESULTADOS

A Tabela 3 descreve as variáveis digitais monitoradas durante todos os testes. A Tabela 4 descreve as variáveis analógicas monitoradas.

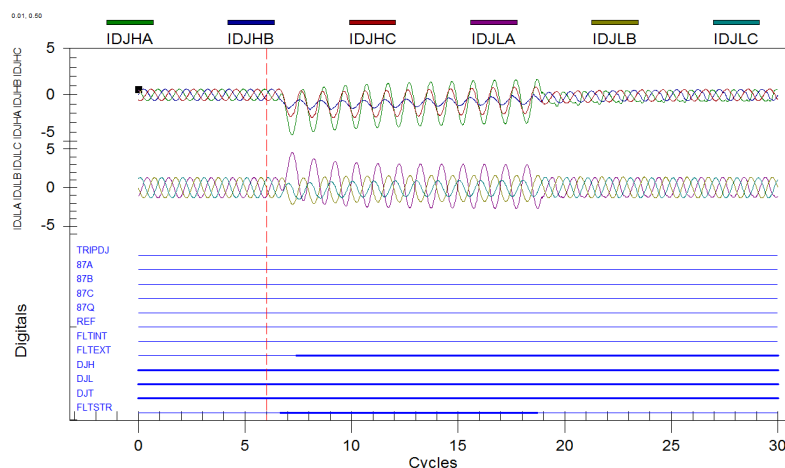
Tabela 3 – Descrição das Variáveis Digitais Monitoradas pelo RTDS™

Variável Digital	Descrição
TRIP DJ	Trip
87A	Diferencial fase A
87B	Diferencial fase B
87C	Diferencial fase C
87Q	Diferencial de Seq-negativa
REF	Falta restrita a terra
FLTINT	Falta interna
FLTEXT	Falta externa
DJH	Estado do disjuntor do primário
DJL	Estado do disjuntor do secundário
DJT	Estado do disjuntor do terceário
FLTSTR	Início da falta

Tabela 4 – Descrição das Variáveis Analógicas Monitoradas pelo RTDSTTM

Variável Analógica	Descrição
IDJHA	Corrente alta tensão fase A
IDJHB	Corrente alta tensão fase B
IDJHC	Corrente alta tensão fase C
IDJLA	Corrente média tensão fase A
IDJLB	Corrente média tensão fase B
IDJLC	Corrente média tensão fase C
IN	Corrente de neutro
IDJLAS	Corrente secundária do TC fase A – média tensão
IDJLBS	Corrente secundária do TC fase B – média tensão
IDJLCS	Corrente secundária do TC fase C – média tensão

A Figura 16 apresenta o COMTRADE para uma falta monofásica Fase A-terra na posição FE1. A falta foi aplicada no cruzamento por zero da tensão da fase A do lado de alta do transformador. Através de uma análise simples dos elementos digitais, vê-se que a variável FLTEXT muda para o estado lógico 1, determinando que a falta é externa à seção do diferencial e, dessa forma, dessensibilizando e/ou bloqueando a atuação dos elementos de proteção.

Figura 16 – COMTRADE Gerado pelo RTDSTTM

Já a Figura 17 mostra um caso de falta Fase C-terra dentro da seção diferencial, localização FI1. A falta foi aplicada no cruzamento por zero da tensão da fase A e com resistência de falta de 100 ohms. Nota-se que, neste caso, é detectada a falta como interna, FLTINT, em aproximadamente 0,6 ciclo, e o disparo do sinal de abertura dos disjuntores é emitido em 26 ms. Nestes tempos estão inclusos os tempos de processamento do relé e também dos contatos de saída.

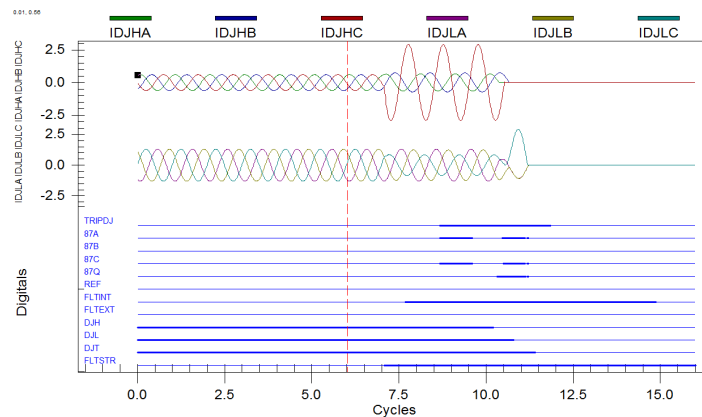


Figura 17 – Falta dentro da Seção do Diferencial com $R_f = 100 \Omega$ e Localização F1

A Figura 18 mostra um caso de falta entre espiras, F1, no transformador, de 40% para 42% do enrolamento. Observa-se que a falta não é determinada nem como interna e nem como externa. Dessa forma, o elemento de proteção diferencial de sequência-negativa está liberado e promove o disparo da proteção em 3 ciclos. Pode também ser observado que quase não há variação significativa nas correntes de fase no primário e secundário do transformador, ou seja, o elemento diferencial de fase não consegue ter sensibilidade suficiente para atuar. Para este tipo de falta somente o algoritmo de detecção de falta interna e externa em conjunto com o elemento diferencial de sequência-negativa enxerga a falta e a elimina.

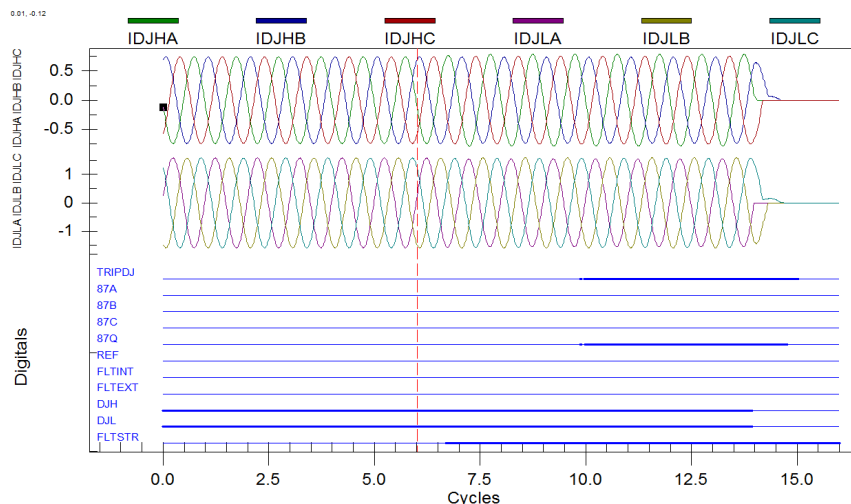


Figura 18 – Falta Entre Espiras

O próximo caso a ser analisado é um caso de falta entre espira a terra localizada em F2 a 1% do enrolamento do transformador. A Figura 19 mostra novamente que quase não há variação visual nas correntes de fase do primário e secundário, mas há o aparecimento de correntes de sequência-zero, como pode ser visto no neutro do transformador. Observa-se que o único elemento com capacidade de detectar faltas neste nível é o elemento de falta restrita a terra, REF, o qual promoveu o disparo em 2,3 ciclos.

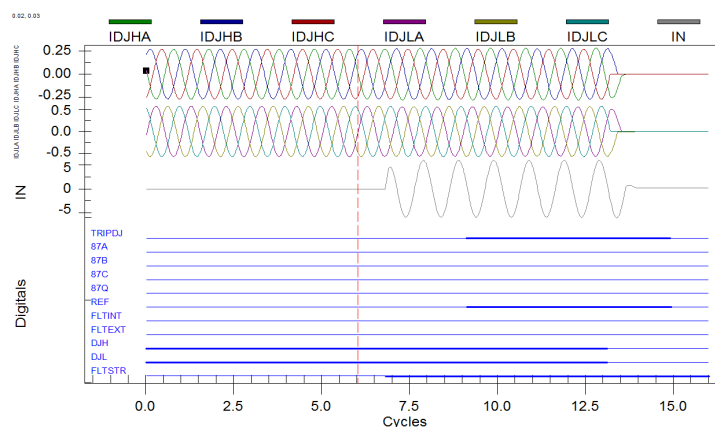


Figura 19 – Falta Espira a Terra

A Tabela 5 mostra o resultado geral do teste relacionando tipo, resistência de falta, Rf, e elementos de proteção hábeis a serem sensibilizados e eliminarem a falta.

Tabela 5 – Resultado dos Testes

Tipo de Falta	Rf	Dif. de Fase	Dif. de Seq-neg	REF
ØT	não	X	X	X
ØØ	não	X	X	
ØØT	não	X	X	X
3Ø	não	X		
ØT	sim		X	X
ØØ	sim		X	
ØØT	sim		X	X
3Ø	sim	X		
Entre espiras	não		X	
Espira-Terra	não		X	X

6.0 - CONCLUSÃO

Pelos resultados apresentados acima, percebe-se que o desempenho dos elementos de proteção foi mais do que satisfatório. O relé bloqueou os algoritmos diferenciais e REF para todos os casos de falta externa, mesmo em situações de alta saturação dos transformadores de corrente. Este desempenho se deve a novos algoritmos de proteção, os quais podem, atualmente, ser implementados em plataformas digitais de alto desempenho e tecnologia.

Para todas as faltas externas e internas, o elemento diferencial de sequência-negativa trabalhou de forma segura e confiável, apresentando, além disso, alta sensibilidade para faltas entre espiras. A sensibilidade deste elemento é 30% maior do que a dos tradicionais elementos diferenciais de fase, o que possibilita a detecção de faltas para casos de curto-circuito de 2% entre espiras.

Para o elemento REF, o desempenho para faltas externas e internas foi também além do esperado, pois este elemento conseguiu detectar faltas até 1% entre espira-terra ao transformador. Um benefício ainda maior deste elemento é o fato de ser desnecessária a coordenação com outros elementos de proteção. Este benefício, somado a algoritmos também de alto desempenho para detecção de faltas internas e externas, possibilita alto nível de sensibilidade.

Ferramentas de tempo real como o RTDS™ proporcionam versatilidade e variedade de testes que podem ser aplicados não só a sistemas de potência e proteção, mas também a sistemas de controle e automação. Com o uso desta ferramenta, é possível prever possíveis faltas e ações a serem tomadas antes mesmo que elas ocorram, evitando, assim, interrupções de energia. Em casos de faltas em que a interrupção de energia é inevitável, ela contribui para a análise de métodos de eliminação mais rápida da falta e, consequentemente, para a diminuição dos danos aos equipamentos envolvidos e também às pessoas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Improvements in Transformer Protection and Control – Janeiro de 2009 de Armando Guzman, Norman Fischer e Casper Labuschagne
- (2) Manual do relé SEL-487E da Schweitzer Engineering Laboratories
- (3) AEP Experience with protection of three Delta/Hex phase angle regulating transformers – apresentado no 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA em Outubro de 2006 de M. J. Thompson, H. Miller e J. Burger
- (4) Symmetrical Components – New York and London: McGraw-Hill, 1933 de C. F. Wagner e R. D. Evans