

Teste Monofásico do Elemento Diferencial do SEL-487E Sem Simulação de Estado

David Costello e Jason Young

INTRODUÇÃO

Ao testar um elemento diferencial, recomenda-se usar apenas a corrente de uma única fase. Embora este teste não simule as condições reais de um sistema, ele fornece uma prova adequada de que o relé foi ajustado conforme o desejado. Além disso, o teste monofásico simplifica o ensaio, tornando-o adequado para todos os equipamentos de teste, uma vez que nem todos possuem seis canais de corrente para executar um teste trifásico.

A simulação de estado, ou um teste automatizado no qual um estado de falta é aplicado após um estado de pré-falta ter sido inicialmente aplicado, simula com precisão as condições reais do sistema de potência. Todavia, o teste para condições de regime é frequentemente preferido porque pode ser feito manualmente e é mais simples. Este guia de aplicação mostra o teste monofásico, em regime, do elemento diferencial do Relé de Proteção de Transformadores SEL-487E, o qual não requer a simulação de estado. Para uma referência completa sobre o teste deste relé, consulte o Guia de Aplicação SEL AG2010-07 [1] - Testes dos Elementos Diferenciais do

Relé SEL-487E.

O Relé SEL-487E possui um elemento diferencial de fase cuja operação varia em relação ao elemento existente em outros relés de proteção de transformadores da SEL. A tradicional característica diferencial com restrição porcentual é mostrada na Figura 1.

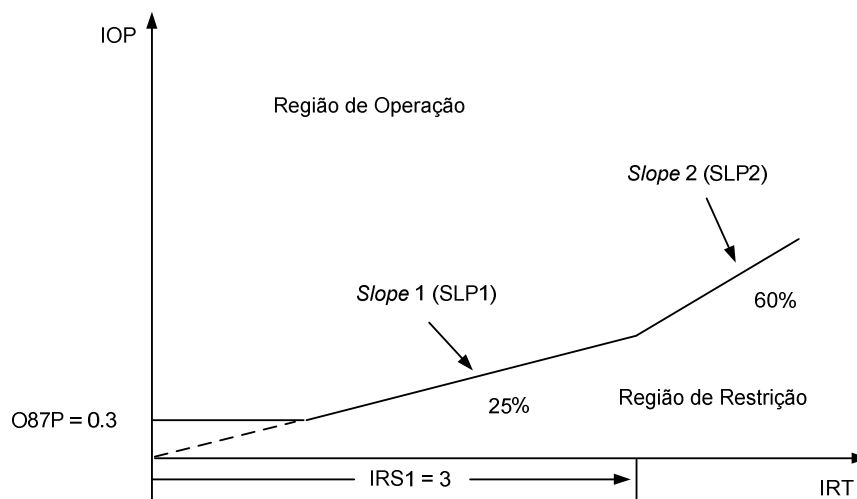


Figura 1 Característica Diferencial com Restrição Porcentual Tradicional

O relé tem quatro ajustes principais que definem diretamente o formato da característica, como mostra a Figura 1, mas durante a operação, a característica é fixa. Isto torna o teste monofásico deste elemento relativamente simples e direto.

Por outro lado, o SEL-487E tem uma característica diferencial que varia dinamicamente durante a operação. O relé opera na Inclinação 1 (“Slope 1”) durante a operação normal, mas comuta para o modo de alta segurança (“Inclinação 2” – “Slope 2”) quando for detectada uma falta externa. A característica é mostrada na Figura 2.

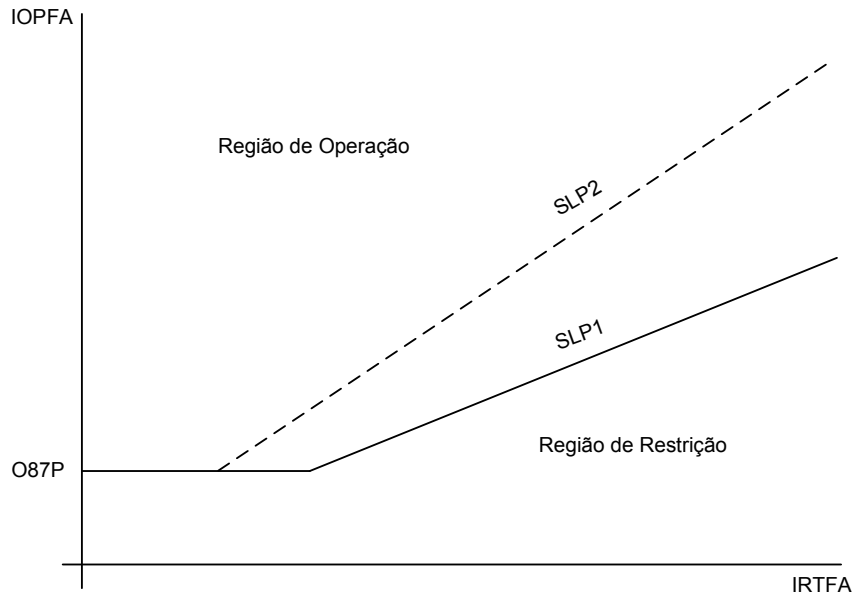


Figura 2 Característica Diferencial Filtrada do SEL-487E

O teste do ajuste da Inclinação 1 (SLP1) é similar ao método usado para testar as inclinações da característica tradicional. No entanto, para testar a Inclinação 2 (SLP2), é necessário simular uma falta externa para colocar o relé no modo de alta segurança. Obviamente, esta exigência complica o procedimento de teste, mas este guia de aplicação discute um método simples para testar o elemento. No total, são executados cinco testes: U87P, O87P, SLP1, e dois testes de SLP2.

SISTEMA USADO COMO EXEMPLO NO TESTE

Para explicar os testes necessários, usamos um transformador como exemplo para calcular os pontos de teste. O diagrama trifilar do sistema está representado na Figura 3, e os ajustes correspondentes estão listados na Tabela 1.

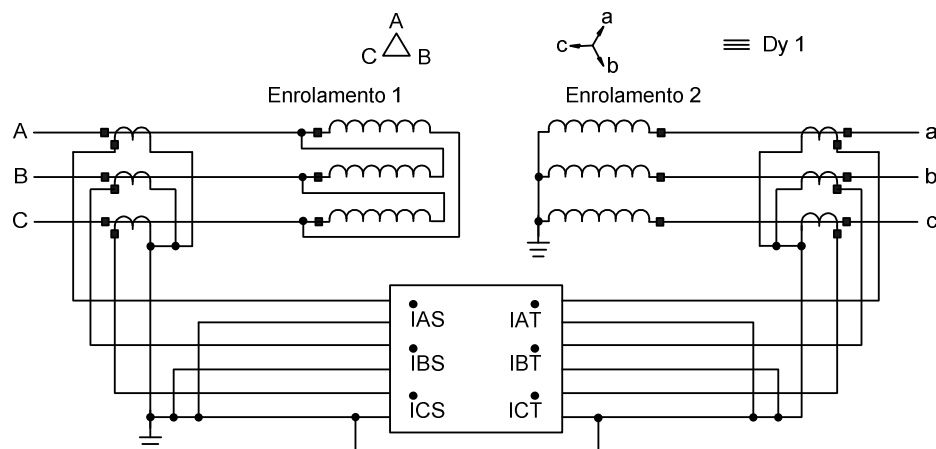


Figura 3 Diagrama Trifilar do Sistema de Teste

Tabela 1 Ajustes do Sistema de Teste

Ajuste	Descrição	Unidades	Faixa	Valor Atribuído
ECTTERM	Habilita os seguintes terminais de corrente	NA	S, T, U, W, X	S, T
E87	Inclui os seguintes terminais no elemento diferencial	NA	S, T, U, W, X	S, T
CTRS	Relação do Transformador de Corrente (TC) para o Terminal S	NA	1 a 50000	60
CTCONS	Conexão do TC para o Terminal S	NA	Y, D	Y
CTRT	Relação do TC para o Terminal T	NA	1 a 50000	500
CTCONT	Conexão do TC para o Terminal T	NA	Y, D	Y
E87TS	Inclui o Terminal S no elemento diferencial para as seguintes condições	Equações de controle SELOGIC®	NA	1
E87TT	Inclui o Terminal T no elemento diferencial para as seguintes condições	Equações de controle SELOGIC®	NA	1
ICOM	Matriz de conexão interna do TC / compensação habilitada	NA	Y, N	Y
TSCTC	Compensação da conexão do TC (Terminal S)	NA	0 a 12	12
TTCTC	Compensação da conexão do TC (Terminal T)	NA	0 a 12	1
MVA	MVA nominal máximo do transformador	MVA	1 a 5000, OFF	50
VTERMS	Tensão fase-fase nominal do Terminal S	kV	1.00 a 1000.00	138
VTERMT	Tensão fase-fase nominal do Terminal T	kV	1.00 a 1000.00	12.47
TAPS	Tap de corrente do Terminal S	A	0.50 a 175.00	3.48
TAPT	Tap de corrente do Terminal T	A	0.50 a 175.00	4.63
U87P	Corrente de partida do elemento sem restrição	Múltiplos do tap	1.00 a 20.00	8
O87P	Corrente de partida de operação do elemento diferencial	Múltiplos do tap	0.10 a 4.00	0.5
SLP1	Ajuste da Inclinação 1 ("Slope 1")	Porcento	5.00 a 100.00	35
SLP2	Ajuste da Inclinação 2 ("Slope 2")	Porcento	5.00 a 100.00	75
DIOPR	Corrente de partida de operação incremental	Múltiplos do tap	0.10 a 10.00	1.2
DIRTR	Corrente de partida de restrição incremental	Múltiplos do tap	0.10 a 10.00	1.2

PROCEDIMENTO DE TESTE

U87P

O elemento diferencial sem restrição opera com a corrente de operação fundamental calculada pelo relé. Conforme o nome indica, ele não é afetado pelos elementos de restrição ou bloqueio por harmônicos habilitados no relé. A corrente de operação é comparada com o ajuste de U87P, e a saída (87Un, onde $n = A, B$ ou C) é ativada para valores maiores do que o ponto de ajuste.

Este elemento pode ser testado através da aplicação de uma corrente monofásica a um enrolamento com valor superior ao ajuste de U87P e monitorando o “Relay Word bit” 87Un. Todavia, observe que o ajuste de U87P está em por unidade (pu) do ajuste do tap correspondente e, conseqüentemente, tem que ser convertido em amperes (A).

A Figura 4 mostra um diagrama de blocos do elemento diferencial do relé. Além de multiplicar pelo tap, as correntes também precisam ser multiplicadas (“scaled”) pela constante de compensação encontrada na Tabela 2, uma vez que está sendo executado um teste monofásico ao invés de um teste trifásico.

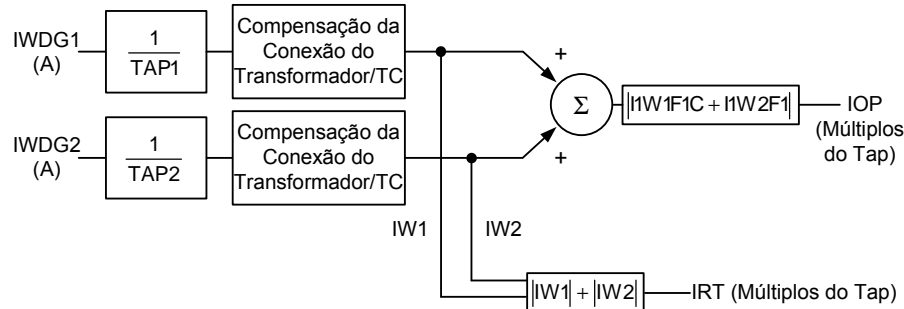


Figura 4 Diagrama de Blocos do Elemento Diferencial

Tabela 2 Constantes de Compensação para o Teste Monofásico

Ajuste $TnCTC$	A (Enrolamento 1)	B (Enrolamento 2)
0	1	1
Ímpar: 1, 3, 5, 7, 9, 11	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$
Par: 2, 4, 6, 8, 10, 12	1.5	1.5

Usando os ajustes do sistema de teste, o ponto de teste calculado para a Fase A no Terminal S é:

$$IAS = U87P \cdot TAPS \cdot A = 8 \cdot 3.48 \cdot 1.5 = 41.76 \text{ A} \quad (1)$$

Observe que este valor está bem acima da capacidade nominal contínua (15A) dos canais de entrada de corrente do relé. Contudo, as entradas do relé são especificadas para 500 A por 1 segundo. Isto é equivalente a 250000 A secundários (I^2t). Portanto, podemos encontrar o tempo máximo que a corrente de teste pode ser aplicada sem danificar a entrada, que é igual a:

$$\frac{250000}{I_{\text{test}}^2} = \frac{250000}{41.76^2} = 143 \text{ s} \quad (2)$$

Portanto, aplique 35 A ao terminal IAS do relé, e aumente a corrente monitorando o “Relay Word bit” 87UA usando o comando **TAR 87UA 10000** na janela do terminal. O 87UA deve ser ativado com $41.76 \text{ A} \pm 5\%$.

O87P

O ajuste de O87P define a corrente mínima de operação necessária para permitir a operação do elemento diferencial. Ele é testado usando o mesmo método de teste do U87P descrito na seção anterior.

O ponto de teste para o sistema usado como exemplo é:

$$IAS = O87P \cdot TAPS \cdot A = 0.5 \cdot 3.48 \cdot 1.5 = 2.61 \text{ A} \quad (3)$$

Portanto, aplique 2 A ao terminal IAS do relé, e aumente a corrente monitorando o “Relay Word bit” 87RA usando o comando **TAR 87RA 10000** na janela do terminal. O 87RA deve ser ativado com $2.61 \text{ A} \pm 5 \%$.

SLP1

O primeiro passo no teste de SLP1 consiste em determinar um valor de restrição aceitável. Isto é feito através da determinação do ponto onde SLP1 cruza com a mínima restrição de operação, O87P. Abaixo deste valor de restrição, o relé não opera baseado em SLP1. Portanto, um ponto de teste válido tem que estar além deste ponto. O menor valor de restrição que pode ser selecionado está mostrado em (4), juntamente com o valor correspondente para o sistema de teste.

$$IRT = O87P \cdot \frac{100}{SLP1} = 0.5 \cdot \frac{100}{35} = 1.43 \text{ pu} \quad (4)$$

Portanto, para simplificar, selecionaremos $IRT = 2.0 \text{ pu}$ como nosso ponto de teste. A corrente de operação correspondente para o ponto na linha SLP1 é então:

$$IOP = IRT \cdot \frac{SLP1}{100} = 2.0 \cdot \frac{35}{100} = 0.70 \text{ pu} \quad (5)$$

De forma similar aos dois primeiros testes, este ponto em pu deve ser convertido para corrente de entrada. Ao contrário dos dois primeiros testes, o teste SLP1 requer o uso de duas correntes, IAS e IAT. Consultando a Figura 4, as correntes compensadas, IW1 e IW2, podem ser obtidas

começando com $\frac{IRT}{2}$ para cada uma, com IW1 a 0 grau e IW2 a 180 graus. Isto fornece o valor

correto da corrente de restrição, mas não da corrente de operação. Adicionando metade da corrente de operação desejada à IW1 e subtraindo metade da corrente de operação desejada de IW2, obtêm-se os valores corretos de operação e de restrição. As equações são as seguintes:

$$IW1 = \frac{(IRT + IOP)}{2} = \frac{(2.0 + 0.7)}{2} = 1.35 \text{ pu} \quad (6)$$

$$IW2 = \frac{(IRT - IOP)}{2} = \frac{(2.0 - 0.7)}{2} = 0.65 \text{ pu} \quad (7)$$

IW1 e IW2 podem agora ser convertidas em IAS e IAT, respectivamente, multiplicando-se pela constante de compensação e tap correspondente.

$$IAS = IW1 \cdot TAPS \cdot A = 1.35 \cdot 3.48 \cdot 1.5 = 7.05 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (8)$$

$$IAT = IW2 \cdot TAPT \cdot T = 0.65 \cdot 4.63 \cdot 1.73 = 5.21 \angle 180^\circ \text{ A} \quad (9)$$

Este teste é executado aplicando-se o valor calculado ao terminal IAS e uma corrente maior do que o valor calculado ($6.0 \angle 180^\circ \text{ A}$) ao terminal IAT. Isso resulta num valor de operação menor, e o relé estará na região de restrição abaixo da linha SLP1. Diminua **lentamente** a corrente aplicada

ao terminal IAT enquanto monitora o “Relay Word bit” 87RA. O elemento deverá ser ativado quando $IAT = 5.21 \text{ A} \pm 5\%$.

A sequência deste teste está mostrada na Figura 5, onde o ponto [2.1, 0.6] corresponde à corrente inicial de $IAS = 7.05 \angle 0^\circ \text{ A}$ e de $IAT = 6.0 \angle 180^\circ \text{ A}$.

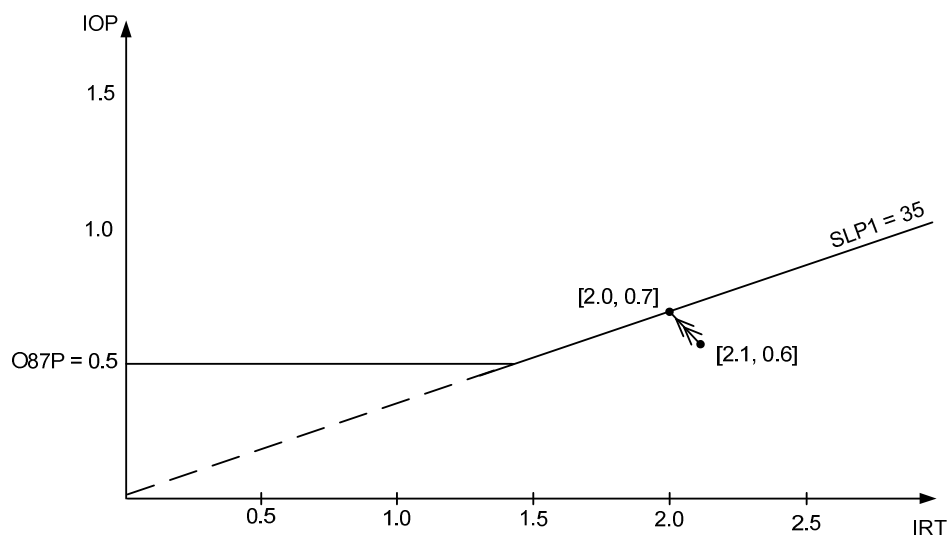


Figura 5 Teste de SLP1

SLP2

Conforme discutido anteriormente, o método de teste não será adequado para o teste de SLP2 porque esta inclinação somente estará ativa enquanto o relé estiver no modo de alta segurança. Isto é controlado pelo “Relay Word bit” $CONn$ que deve ser ativado por um período mínimo de 3 ciclos e um máximo de 60 ciclos, ou 1 segundo. A lógica de detecção de faltas está representada na Figura 6.

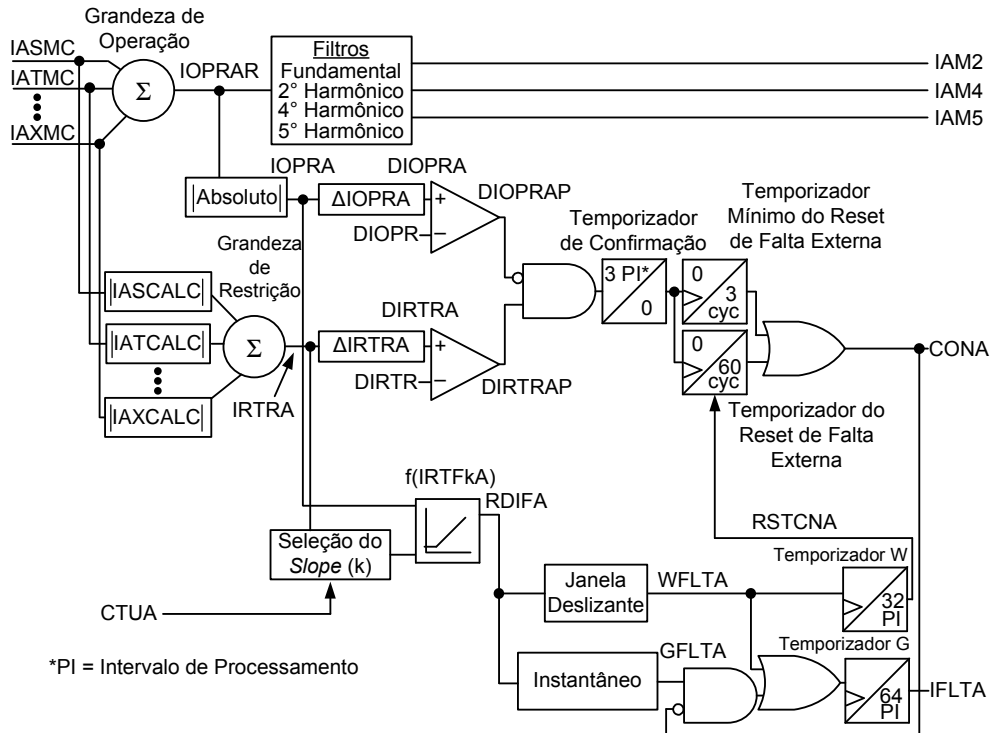


Figura 6 Diagrama da Lógica de Detecção de Falhas

Em primeiro lugar, observe que a lógica de detecção de falhas opera com grandezas diferenciais não filtradas ao invés dos valores filtrados usados para determinar a operação do relé (87Un e 87Rn). Portanto, como essas grandezas são valores instantâneos não filtrados, o componente de 60 Hz é $\sqrt{2}$ maior do que os valores filtrados. Este fato é muito importante para o cálculo correto dos pontos de teste para os ensaios de SLP2.

Uma falta externa é detectada quando ocorre uma alteração na corrente de restrição maior do que DIRTR (ajuste do relé) sem a correspondente alteração na corrente de operação maior do que DIOPR (ajuste do relé).

Quando isto ocorre durante $\frac{3}{32}$ ciclo, o relé ativa o “Relay Word bit” CON da fase

correspondente, levando ambos os elementos diferenciais filtrado e não filtrado para o modo de alta segurança por até 1 segundo. (Observe que DIRTR e DIOPR **não** devem ter seus valores default de 1.2 alterados sem simulação e teste suficientes.)

Como isto não propicia tempo suficiente para aumentar as correntes, dois testes separados têm que ser efetuados para verificar o ajuste de SLP2. Os pontos para o sistema de teste estão mostrados na Figura 7 e discutidos nas seções seguintes.

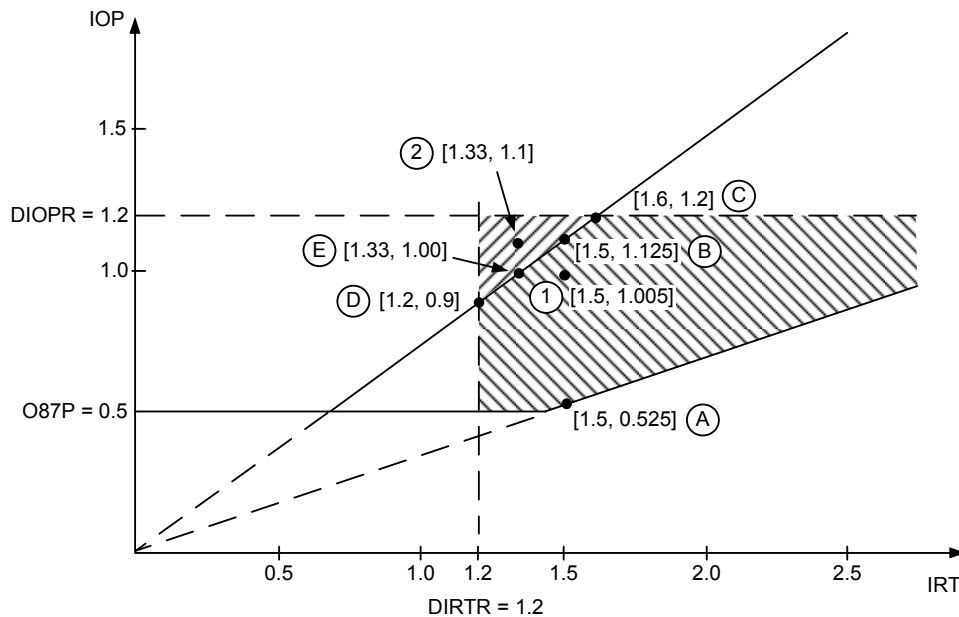


Figura 7 Pontos de Teste Não Filtrados de SLP2

A planilha Microsoft® Excel® “SEL-487E Slope Characteristic”, disponível para download junto com este guia de aplicação em: [//www.selinc.com](http://www.selinc.com), é fornecida para auxiliar os usuários no cálculo dos pontos de teste e visualização desses testes.

Teste 1

O objetivo do Teste 1 consiste em forçar o relé a entrar no modo de alta segurança e verificar que o relé está seguro por 1 segundo (tempo máximo de selo de CON_n) para um ponto de teste maior do que SLP1 e ligeiramente abaixo de SLP2.

O primeiro passo consiste em selecionar um valor de restrição maior do que 1.2. Porém, observe que o valor de operação correspondente tem que ser menor do que 1.2. Isso faz o relé detectar uma falta externa e chavear para o modo de alta segurança, habilitando SLP2. Para o sistema de teste, selecionamos um valor de restrição de 1.5.

O valor de operação correspondente pode ser selecionado em qualquer ponto entre SLP1 e SLP2, mas é recomendado usar um ponto mais próximo de SLP2 para comprovar com mais precisão o ajuste de SLP2. No sistema de teste, calculamos os valores de operação nos Pontos A e B, que correspondem a SLP1 e SLP2, respectivamente.

$$A_{OP} = 1.5 \cdot \frac{SLP1}{100} = 1.5 \cdot \frac{35}{100} = 0.525 \text{ pu} \quad (10)$$

$$B_{OP} = 1.5 \cdot \frac{SLP2}{100} = 1.5 \cdot \frac{75}{100} = 1.125 \text{ pu} \quad (11)$$

O ponto de teste selecionado está a 80% da distância de SLP1 até SLP2.

$$I_{OP} = A_{OP} + 0.8 (B_{OP} - A_{OP}) = 0.525 + 0.8(1.125 - 0.525) = 1.005 \text{ pu} \quad (12)$$

Agora que o Ponto de Teste 1 foi selecionado [1.5, 1.005], o ponto tem que ser convertido em amperes, de forma similar ao teste do O87P. Um fator extra precisa ser adicionado neste teste: as grandezas compensadas têm que ser divididas por $\sqrt{2}$ para converter os valores instantâneos não

filtrados em grandezas de teste em regime. Os cálculos para o sistema de teste estão mostrados abaixo.

$$IW1 = \frac{(IRT + IOP)}{2} = \frac{(1.5 + 1.005)}{2} = 1.25 \text{ pu} \quad (13)$$

$$IW2 = \frac{(IRT - IOP)}{2} = \frac{(1.5 - 1.005)}{2} = 0.25 \text{ pu} \quad (14)$$

Convertendo para amperes usando o tap, a constante de compensação e $\sqrt{2}$, obtemos:

$$IAS = IW1 \cdot TAPS \cdot \frac{A}{\sqrt{2}} = 1.25 \cdot 3.48 \cdot \frac{1.5}{\sqrt{2}} = 4.61 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (15)$$

$$IAT = IW2 \cdot TAPT \cdot \frac{B}{\sqrt{2}} = 0.25 \cdot 4.63 \cdot \frac{1.73}{\sqrt{2}} = 1.42 \angle 180^\circ \text{ A} \quad (16)$$

Antes de aplicar o teste, é importante adicionar tanto o 87RA como o CONA ao Registrador Sequencial de Eventos (“Sequential Events Recorder” – SER) usando o comando **SET R** na janela do terminal ou os ajustes do relatório do Editor de Ajustes do Software ACSELERATOR QuickSet® SEL-5030.

O teste deve ser aplicado por pouco mais de 1 segundo. Como resultado, CONA deve ser ativado por exatamente 1 segundo. Uma vez que tenha sido desativado, o relé retorna para SLP1, e 87RA dá trip. Esta sequência está mostrada abaixo.

#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
40	09/29/2009	12:24:12.9454	CONA	Asserted
39	09/29/2009	12:24:13.9455	CONA	Deasserted
38	09/29/2009	12:24:13.9605	87RA	Asserted

Teste 2

O segundo teste é executado para verificar que se o relé estiver no modo de alta segurança, ele vai operar para um ponto acima de SLP2. Portanto, o ponto de teste tem que ser selecionado no triângulo superior da Figura 7, onde a corrente de operação é menor do que 1.2, a corrente de restrição é maior do que 1.2, e a corrente de operação sobre a corrente de restrição é maior do que $\frac{SLP2}{100}$. Para encontrar o melhor ponto de teste, ache o valor de restrição para o Ponto C e

selecione um valor de restrição que seja $\frac{1}{3}$ da distância do Ponto D até o Ponto C.

Os cálculos para o sistema de teste são:

$$C_{RT} = DIOPR \cdot \frac{100}{SLP2} = 1.2 \cdot \frac{100}{75} = 1.60 \text{ pu} \quad (17)$$

$$2_{RT} = 1.2 + \frac{(1.6 - 1.2)}{3} = 1.33 \text{ pu} \quad (18)$$

Agora que temos uma grandeza de restrição selecionada, a corrente de operação correspondente deve ser escolhida no meio do caminho entre SLP2 e DIOPR. Novamente, os cálculos do sistema usado como exemplo no teste estão mostrados abaixo.

$$E_{OP} = 2_{RT} \cdot \frac{SLP2}{100} = 1.33 \cdot \frac{75}{100} = 1.00 \text{ pu} \quad (19)$$

$$2_{OP} = E_{OP} + \frac{(DIOPR - E_{OP})}{2} = 1.10 \text{ pu} \quad (20)$$

De forma similar ao Teste 1, o Ponto de Teste 2, [1.33, 1.10], precisa ser convertido para amperes. Os cálculos do sistema de teste são os seguintes:

$$IW1 = \frac{(IRT + IOP)}{2} = \frac{(1.33 + 1.10)}{2} = 1.215 \text{ pu} \quad (21)$$

$$IW2 = \frac{(IRT - IOP)}{2} = \frac{(1.33 - 1.10)}{2} = 0.115 \text{ pu} \quad (22)$$

Convertendo para amperes usando o tap, a constante de compensação e $\sqrt{2}$, obtemos:

$$IAS = IW1 \cdot TAPS \cdot \frac{A}{\sqrt{2}} = 1.215 \cdot 3.48 \cdot \frac{1.5}{\sqrt{2}} = 4.48 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (23)$$

$$IAT = IW2 \cdot TAPT \cdot \frac{B}{\sqrt{2}} = 0.115 \cdot 4.63 \cdot \frac{1.73}{\sqrt{2}} = 0.65 \angle 180^\circ \text{ A} \quad (24)$$

O teste deve ser aplicado por menos de 1 segundo. Como resultado, CONA deve ser ativado em primeiro lugar, seguido por 87RA alguns ciclos depois. A ativação de 87RA reseta o bit CONA que é desativado 3 ciclos (50 milissegundos) depois. Esta sequência está mostrada abaixo.

#	DATE	TIME	ELEMENT	STATE
34	09/29/2009	12:29:07.1996	CONA	Asserted
33	09/29/2009	12:29:07.2286	87RA	Asserted
32	09/29/2009	12:29:07.2326	87RA	Deasserted
31	09/29/2009	12:29:07.2496	CONA	Deasserted

Este procedimento de teste para o Teste 2 de SLP2 funciona para $SLP2 \leq 85$. Para $SLP2 > 85$, a simulação de estado é necessária. Use o Ponto de Teste 1 de SLP2 por 30 ciclos, e então remova IAT, fazendo $IOP = IRT$. Isto força o relé para o modo de alta segurança por 30 ciclos antes da simulação de uma falta interna; neste instante, 87RA será ativado.

CONCLUSÃO

Este guia de aplicação demonstra um método simples para testar ambos os elementos diferenciais com restrição e sem restrição do SEL-487E usando injeção de corrente monofásica em regime. Cinco testes são necessários para comprovar os ajustes de partida (“pickup”) e inclinação (“slope”) armazenados no relé. Além disso, o método fornecido neste guia de aplicação para testar o ajuste da Inclinação 2 (“Slope 2”) é simples e não requer simulação de estado. Um exemplo detalhado, com as explicações e cálculos dos pontos de teste necessários, foi incluído para facilitar o entendimento.

REFERÊNCIA

- [1] G. Alexander, D. Costello, B. Heilman e J. Young, “Testing the SEL-487E Relay Differential Elements”, Guia de Aplicação SEL (AG2010-07), 2010.
Disponível em: <http://www.selinc.com>.

Também disponível em português em <http://www.selinc.com.br/guiasdeaplicacao.aspx>

ASSISTÊNCIA DA FÁBRICA

Apreciamos o seu interesse nos produtos e serviços da SEL. Se houver qualquer dúvida ou comentário, por favor, entre em contato com:

SEL - Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial Ltda
Rodovia SP 340 - Campinas / Mogi Mirim, Km 118,5 - Prédio 11
Campinas / SP – CEP: 13.086-902
Tel: (19) 3515.2000 Fax: (19) 3515.2011
www.selinc.com.br suporte@selinc.com

SUPORTE TÉCNICO SEL HOT LINE
Tel: (19) 3515.2010
E-mail: suporte@selinc.com

© 2010 por Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
Todos os direitos reservados.

Todos os nomes das marcas ou produtos que aparecem neste documento são marcas comerciais ou marcas comerciais registradas de seus respectivos proprietários. Nenhuma marca comercial da SEL pode ser usada sem permissão por escrito.

Os produtos SEL que aparecem neste documento podem estar protegidos por patentes dos EUA e de outros países.

SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC.
2350 NE Hopkins Court • Pullman, WA 99163-5603 USA
Tel: +1.509.332.1890 • Fax: +1.509.332.7990
www.selinc.com • info@selinc.com

AG2010-09