

# Análise e Aplicação de Transformadores de Corrente

de

Stanley E. Zocholl

**Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.**

Copyright © 2004 Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the author and/or publisher. For information, contact Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2350 NE Hopkins Court, Pullman, WA 99163.

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

Zocholl, Stanley E.

Analyzing and Applying Current Transformers / Stanley E. Zocholl

p. cm.

Includes bibliographical references (p. 95)

1. Electric transformers.

2. Electric transformers--Protection. I. Title.

TK2551 .Z63 2004

First Edition: August 2004

SEL is a registered trademark of Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

## Índice

<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>Circuito Equivalente do Transformador de Corrente</b> .....	<b>3</b>
<b>Área Sob a Curva de Tensão e Formas de Onda Saturadas</b> .....	<b>5</b>
<b>A Curva de Excitação</b> .....	<b>9</b>
<b>Simulação por Computador</b> .....	<b>13</b>
<b>Limite da Densidade do Fluxo da</b> <b>Área sob a Curva de Tensão</b> .....	<b>19</b>
<b>Critério para Evitar a Saturação</b> .....	<b>22</b>
Características Nominais dos Transformadores de Corrente para Proteção de Linhas .....	23
Procedimento para Seleção de Transformadores de Corrente .....	25
Cálculo do <i>Burden</i> do Transformador de Corrente .....	26
Limites do Critério .....	27
Estatística da Assimetria .....	28
<b>História de Caso</b> .....	<b>29</b>
Falta de 33 kA com Transformadores de Corrente Ideais .....	29
O Efeito da Saturação .....	33
Falta de 33 kA com Assimetria Máxima na Fase A .....	36
Falta de 33 kA com <i>Offset</i> na Fase B e Fase C .....	38
<b>Regras para Aplicação de TCs</b> .....	<b>40</b>
<b>Aplicações do Relé Diferencial de Transformadores</b> .....	<b>42</b>
<b>Aplicação do Relé Diferencial de Geradores</b> .....	<b>47</b>
<b>Aplicações do Relé Diferencial de Barras</b> .....	<b>51</b>
<b>Características da Inclinação Porcentual</b> .....	<b>52</b>
<b>Característica Diferencial no Plano Alfa</b> .....	<b>56</b>

<b>Calculando a Inclinação para um Determinado</b>	
<b>Nível de Saturação</b> .....	<b>59</b>
Tensão de Saturação .....	65
<b>Aplicações do Diferencial de Barras e Máquinas</b> .....	<b>66</b>
<b>O Efeito do Fluxo Remanescente no Ajuste da Inclinação</b> .....	<b>69</b>
<b>O Efeito da Elevada Corrente de Falta na</b>	
<b>Proteção de Sobrecorrente</b> .....	<b>72</b>
<b>Limitações de um Ajuste do Instantâneo de 80 A</b> .....	<b>74</b>
<b>Definindo um Critério para</b>	
<b>Seleção de TCs</b> .....	<b>77</b>
Máxima Corrente de Falta Com um Ajuste do	
Instantâneo de 80 A .....	81
Valores Nominiais Mínimos do TC com um Ajuste do	
Instantâneo de 80 A .....	82
<b>Implementando os Elementos de</b>	
<b>Sobrecorrente Instantâneos</b> .....	<b>83</b>
Implementação Digital dos Relés de	
Sobrecorrente Instantâneos .....	83
Performance do Filtro Digital Com Saturação do TC .....	84
<b>Filtro Adaptativo Coseno-Pico</b> .....	<b>86</b>
Índice de Distorção Simples .....	87
<b>Anexo A: Simulação por Computador da Área</b>	
<b>sob a Curva de Tensão</b> .....	<b>93</b>
<b>Referências</b> .....	<b>95</b>

## Figuras

Figura 1	Transformador de Corrente Toroidal . . . . .	1
Figura 2	Circuito Equivalente do Transformador de Corrente . . . . .	4
Figura 3	Formas de Onda da Corrente Secundária para Vários Níveis de Excitação (Carga Resistiva) . . . . .	7
Figura 4	Fluxo no Núcleo e Corrente Secundária de um TC com Valor Nominal de 20 pu Simétrica, Conduzindo uma Corrente de 10 pu, com <i>Offset</i> Devido à Constante de Tempo Primária de 0,010 segundo (Ângulo de Impedância 75°) . . . . .	8
Figura 5	Curva de Excitação do Transformador de Corrente de 2.000:5, C400 Mostrando o Tap 300:5 com as Linhas Perpendicular e Tangente do “Ponto do Joelho” (“ <i>Knee-Point</i> ”) . . . . .	10
Figura 6	Impedância de Magnetização . . . . .	12
Figura 7	Circuito Equivalente de um Transformador de Corrente . . . . .	13
Figura 8	Circuito Equivalente da Conexão dos Transformadores de Corrente/Relé Diferencial . . . . .	14
Figura 9	<i>Loop</i> B-H e Inclinação da Curva Média . . . . .	16
Figura 10	Simulação no Computador de um Transformador de Corrente de 2.000:5, C 400 . . . . .	18
Figura 11	Transformador de Corrente de 2.000:5, C 400, com Corrente Assimétrica de 40 kA . . . . .	18
Figura 12	Tensão na Carga para uma Corrente de Falta Assimétrica . . . . .	20

Figura 13	Evento 1- Falta ABC de 33 kA, Localizada a 1,55 Milha, em uma Linha de Transmissão de 230 kV (Teórico-Sem Saturação do TC) . . . . .	31
Figura 14	Corrente Secundária em um TC de 3.000:5, C800, para uma Falta Trifásica de 33 kA, com <i>Offset</i> , Localizada a 1,55 Milha, com uma Constante de Tempo Primária de 0,066 . . . . .	32
Figura 15	Magnitude e Diferença de Fases da Corrente Secundária Amostrada . . . . .	34
Figura 16	Evento 2- Falta ABC de 33 kA, Localizada a 1,55 Milha, em uma Linha de Transmissão de 230 kV (Saturação do TC Causada pelo <i>Offset</i> Máximo na Fase A) . . . . .	37
Figura 17	Evento 3-Falta ABC de 33 kA, Localizada a 1,55 Milha, em uma Linha de Transmissão de 230 kV (Saturação do TC Causada pelo <i>Offset</i> nas Fases B e C) . . . . .	39
Figura 18	Serviço Auxiliar da Usina . . . . .	44
Figura 19	Correntes de Restrição do Relé Diferencial I1 e I2. Id é a Corrente Diferencial. . . . .	45
Figura 20	Conteúdo de Harmônicos da Corrente Diferencial da Figura 19, Plotados em PU da Frequência Fundamental . . . . .	46
Figura 21	Correntes Secundárias I1 e I2 Devidas à Corrente de Falta Passante de 58.800 A, com <i>Offset</i> . A Corrente Diferencial Id está Também Representada. TCs de 6.000:5 Têm o “Ponto do Joelho” em Volts de 700 e 500. X/R = 52. . . . .	49
Figura 22	Correntes Secundárias I1 e I2 Devidas à Falta Passante Assimétrica de 58.800 A. O Acréscimo da Resistência de Carga Diminui a Corrente Diferencial Id. TCs de 6.000:5. Tensões do “Ponto do Joelho” de 700 e 500. X/R = 52. . . . .	50
Figura 23	Proteção Diferencial . . . . .	52

Figura 24	Característica Porcentual	52
Figura 25	Saturação Devida ao <i>Offset DC</i> . TC de 2.000:5, C200, Carga de 2,0 $\Omega$ . Corrente de Falta de 10.667 A. $X/R = 14$	54
Figura 26	Formas de Onda da Fundamental Extraídas pelo Filtro Digital	55
Figura 27	Característica do Círculo	57
Figura 28	Característica Semelhante a uma Cardióide	58
Figura 29	Interface Gráfica do Programa MATLAB	59
Figura 30	VS = 20, Corrente de Falta de 10.667 A	62
Figura 31	VS = 40, Corrente de Falta de 10.667 A	62
Figura 32	VS = 80, Corrente de Falta de 10.667 A	63
Figura 33	VS = 160, Corrente de Falta de 10.667 A	63
Figura 34	VS = 80, Corrente de Falta de 10.667 A, com Característica tipo Cardióide	64
Figura 35	VS = 160, Corrente de Falta de 10.667 A, com Característica tipo Cardióide	64
Figura 36	Inclinação k Versus Tensão de Saturação do TC	65
Figura 37	Diferencial de Barras com Multirrestrição	67
Figura 38	Vs = 40, k = 30	68
Figura 39	Sinal de Operação Versus Restrição	68
Figura 40	VS = 67, k = 44, com Remanescente de 40%	71
Figura 41	Sinal de Operação Versus Restrição com Remanescente de 40%	71
Figura 42	Barra Auxiliar do Gerador com Corrente de Falta Elevada	75
Figura 43	Esquemático do Relé Mostrando os Sinais Medidos	76
Figura 44	Sinal Extraído Com a Corrente Primária do TC de 200 A	76

Figura 45	Sinais do TC e do Relé para uma Falta de 40 kA Usando TCs de 100:5, C50 .....	78
Figura 46	Resposta a uma Falta de 40 kA Usando TCs de 200:5, C200 .....	79
Figura 47	Resposta a uma Falta de 40 kA Usando TCs de 400:5, C400 .....	79
Figura 48	Diagrama do Detector de Pico Bipolar .....	84
Figura 49	Sobrealcance Transitório do Detector de Pico Bipolar .....	84
Figura 50	Sobrealcance Transitório do Filtro RMS Comparado ao do Detector de Pico Bipolar .....	85
Figura 51	Resposta do Filtro, Falta de 40 kA, X/R = 20, TC de 200:5, C100, Carga de 0,5 W .....	85
Figura 52	Elemento Instantâneo Usando o Filtro Adaptativo Coseno-Pico .....	86
Figura 53	Filtro Coseno Gerando Trip para uma Forma de Onda com Baixa Saturação, para uma Falta de 4.500 A, TC de 200:5, C400 com X/R = 11,31 .....	89
Figura 54	Filtro de Pico Bipolar Gerando Trip para uma Forma de Onda com Elevada Saturação, para uma Falta de 20 kA, TC de 200:5, C50 com X/R = 11,31 .....	90
Figura 55	Filtro Coseno Gerando Trip para uma Forma de Onda sem Saturação, para uma Corrente de Falta Simétrica de 4 kA, TC de 200:5, C100 .....	91
Figura 56	Gráfico Mathcad de Corrente e Fluxo .....	93