

■ 国外电力名著译丛

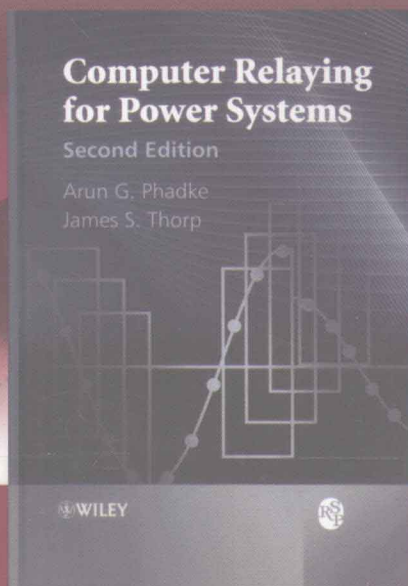
Computer Relaying
for Power Systems
Second Edition

电力系统微机保护

(第二版)

[美] Arun G. Phadke [美] James S. Thorp 著

高翔 译



本书如未贴有WILEY标签, 属于未授权并且非法。



WILEY



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

■ 国外电力名著译丛

**Computer Relaying
for Power Systems**
Second Edition

电力系统微机保护

(第二版)

[美] Arun G. Phadke [美] James S. Thorp 著
高翔 译

 **WILEY**



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是微机保护技术主要奠基人,同为 IEEE Fellow、美国工程院院士的 Arun G. Phadke 和 James S. Thorp 两位教授的经典著作。全面论述了微机保护的原理、构成特点和关键技术。

全书共分十章,主要包括微机保护概述,继电保护实践,微机保护算法的数学基础,数字滤波,输电线路保护,变压器、发电机、母线保护,集成系统的硬件组成、系统保护和控制,行波保护应用,广域测量应用。

本书可供继电保护专业人员,微机保护研究、设计、开发、制造人员和电力专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统微机保护:第2版/(美)斐克(Phadke, A.G.), (美)索普(Thorp, J.S.) 著;高翔译. —北京:中国电力出版社, 2011.9

ISBN 978-7-5123-2142-7

I. ①电… II. ①斐… ②索… ③高… III. ①计算机应用—电力系统—继电保护装置 IV. ①TM774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 198271 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2011-5102 号

Computer Relaying for Power Systems, 2nd Edition

ISBN 978-0-470-05713-1

Copyright © 2009

Research Studies Press Limited, 16 Coach House Cloisters, 10 Hitchin Street, Baldock, Hertfordshire, SG7 6AE

Published by

John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England

This Work is a co-publication between Research Studies Press Limited and John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English Language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Electric Power Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

版权所有。John Wiley & Sons Limited 所出版英文版的授权翻译。翻译的准确性完全取决于中国电力出版社, John Wiley & Sons Limited 不予负责。未经原版权持有人 John Wiley & Sons Limited 的书面许可,不得以任何形式复制本书内容。

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp sgcc com cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 10 月第一版 2011 年 10 月北京第一次印刷

700 毫米×1000 毫米 16 开本 15.625 印张 309 千字

印数 0001—3000 册 定价 58.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

作者介绍

Arun G. Phadke 博士 1982 年加入弗吉尼亚理工大学前在电力行业工作了 13 年。1985 年他成为美国电气工程的电力教授，一直保持教授称号直到 2000 年成为大学杰出教授。2003 年他成为大学杰出荣誉教授，并继续作为弗吉尼亚理工大学电气与计算机工程系的研究院成员。Phadke 博士 1980 年当选为 IEEE Fellow，于 1993 年当选为美国工程院院士。他是 IEEE Transactions on Power Delivery 的主编。1999~2000 年为 IEEE 电力系统继电保护委员会主席。2000 年 Phadke 博士获得了 IEEE Herman Halperin 奖。Phadke 博士在 CIGRE 也一直非常活跃。他是美国 CIGRE 全国委员会执行委员会委员，并且是技术委员会主席。曾任 USNC-CIGRE 副总裁并担任秘书长/司库。2002 年他被 CIGRE 理事会选为 CIGRE 杰出会员。Phadke 博士在 CIGRE SC34 活跃多年，同时担任一些工作组的主席。1999 年 Phadke 博士参与创建 CRIS (Critical Infrastructures) 的国际研究所。他是 1999~2002 年 CRIS 的第一任总裁，目前担任理事会成员。Phadke 博士 2006 年获得格勒诺布尔国立综合理工学院 (INPG) 荣誉博士。2008 年 Phadke 博士获得 HKN 协会的 Karapetoff 奖和电气工程本杰明·富兰克林奖。

James S. Thorp 博士是弗吉尼亚理工大学的电气与计算机工程系 Hugh P 和 Ethel C. Kelley 教授，电气与计算机工程系 Bradley 部门主任。1994~2004 年任康奈尔大学 Charles N. Mellowes 教授。他 1959 年从康奈尔大学获得电气工程学士学位，1962 年获得博士学位，1994~2001 年是康奈尔大学电气和计算机工程系主任。1976~1977 年在美国电力服务公司任实习教师，1988 年任英国剑桥大学丘吉尔学院海外院士。他曾为梅塔 (Mehta) 科技公司、巴斯勒 (Basler) 电气、RFL Dowty 工业、美国电力服务公司和通用电气做过咨询。他是 Alfred P. Sloan 基金会的国家学者，1989 年当选为 IEEE Fellow，1996 年被选为美国工程院院士。2001 年获得电力工程学会社会职业服务奖，2006 年获得 IEEE 电力工程杰出教育家奖，并于 2008 年与 Arun G. Phadke 共享本杰明·富兰克林奖。

译者序

微机保护自 20 世纪 80 年代面世以来，随着微电子、计算机、通信技术的成熟与发展，继电保护的可靠性得到了极大的提高，使得电力系统微机保护在电力系统及其相关领域获得迅速发展和广泛应用，成为现代变电站自动化系统的关键支撑，微机保护的相关实现技术构成了智能电网技术发展的重要支柱之一。

尽管微机保护自 20 世纪 90 年代以来已经成为一种主流应用技术，但是，系统阐述微机保护原理、构成特点、关键技术之书实在是乏善可陈，与微机保护应用的广度和深度，解决问题的有效性，形成了极大的反差。确实就计算机技术的发展速度而言，对于微机保护软、硬件技术的寿命周期和技术的可延续性构成了很大的挑战，微机保护特征和效用与保护所采用的实现技术之间具有很大的相关性，这也许正是微机保护技术方面的书不是很容易写的原因之一。但是，就针对电力系统问题的继电保护数字信号处理技术，保护应用基本原则和特征，本质上应遵循一定规律或原则要求。

在结合自己长期电力系统运行经验及相关项目实施体会，编写现代电网应用技术丛书过程中，感觉缺乏对于微机保护技术方面的系统性阐述。当看到本书原著“*Computer Relaying for Power System (2nd Edition)*”，有一种眼前一亮的感觉，深感这本书对于专业人员系统性了解微机保护的构架，实现原理及应用非常有价值。书稿翻译过程，恰逢本人在弗吉尼亚理工做访问学者，因此得以就书稿的一些技术细节问题当面请教 James S. Thorp 和 Arun G. Phadke 两位院士，使得译稿能尽量准确地表达作者的原意。

原著涉及的专业知识领域相当宽泛，从中可以充分领略 Arun G. Phadke 和 James S. Thorp 两位院士的基础理论功底和对于微机保护技术在电力领域应用的贡献。期待并相信本书能为从事微机保护或相关专业领域的学生，工程技术人员，研究人员带来有益的启示。特别感谢矫坚先生对于译稿全文的仔细阅读，并提出有价值的修改意见，有助于读者更好地理解原著的思想。本书翻译过程中本着尽量忠实于原著的精神，图形符号和文字符号也按原书采用 IEC 标准的习惯。

鉴于译者专业及英语水平的差距，难免译稿会存在不能恰如其分地反映原作者意图之处，敬请谅解，若能不吝赐教，将深感荣幸。

高 翔

2011 年 6 月

于弗吉尼亚黑堡

第一版序

数字式计算机用于继电保护的概念起源于 25 年前。自那时以来该领域迅速发展。计算机已经发生了很大变化,变得更强大、更便宜、更坚固。出于经济和技术的原因,今天的微机保护是首选方案。计算机硬件的这些进展同时伴随着微机保护领域的分析研究。通过大学和工业界组织研究人员的参与,电力系统保护的理论已被置于数学基础之上。值得注意的是,在大多数情况下,数学研究已确认这样的事实:传统的继电器设计已经优化或事实接近最优解继电保护问题。毋庸置疑:理论和继电保护的实践已同时得到确认。

关于这些研究的报告散落在各种会议记录、工程社团学报、设备制造商技术出版物等技术文献中。我们试图通过本书提出微机保护领域连贯的叙述,因为我们在这方面一直在做积极的研究,并且自 20 世纪 70 年代中期开始密切协作。尽管看起来我们似乎是对自己所做出贡献的部分给予了更多关注,但我们的确是试图就整个微机保护领域的发展提出一个不偏不倚的观点。如果确实令读者形成了这样的看法,我们寻求大家的谅解。

本书读者对象为电力工程系研究生、该领域的研究人员,以及所有潜在用户或者微机保护制造商等希望了解这一新发展的人。本书作为教学课程,我们建议书中材料按以下顺序阅读。如果有传统保护的课程作为预备课程,第 2 章可以省略。继电器的数学基础在第 3 章,目的是专门针对那些目前不处于学术环境的人。这个材料对于读者理解保护算法的原因以及算法的工作过程(即程序结构)非常必要,而且可以不需要完整的数学知识就能理解。读者也可以跳过这些数学背景,直接进入最感兴趣的部分。

我们与美国电力服务公司(AEP)的长期合作,成为我们保持对于微机保护研究兴趣的一个重要因素。AEP 公司 Tony Gabrielle 领导的前计算机应用部门的环境特别适合创新工程。他负责在这个主题方面推动我们,并给实际结果似乎是遥远的未来的急需支持。AEP 公司同样还拥有 Stan Horowitz,我们的同事和老师,没有他的帮助,我们可能会失去对保护作为一项实践工程的感性认识。Stan Horowitz, Eric

Udren 和 Peter McLaren 通读了书稿，并提出许多建设性的意见。我们对他们的帮助表示感谢。该书任何遗留的错误，当然由我们自己负责。

我们继续从这个领域的工作中获得巨大乐趣，并且希望通过这本书与读者分享这一乐趣。

Arun G. Phadke

于黑堡

James S. Thorp

于伊萨卡

1988 年

第二版序

这本书的第一版出版于 1988 年,其间二十年世界范围内的电力系统都已广泛接受了微机保护。事实上,在许多国家微机保护已经是继电保护装置的选择,人们很难再找到具有与微机保护可比能力的机电型或静态继电器。显然,保护制造的经济意义在使其成为可能方面发挥了重要作用,性能提高、自我检查功能以及可以通过通信线路进行保护整定已成为这一技术的主要特点,并使其在广泛的范围内被接受。

和大多数继电器设计师一样,我们也认为:保护原理基本上仍然是建立在 20 世纪获得的经验基础上。微机保护主要是以更有效的方式提供传统继电器同样的能力。说到这里,还应该认识到仅因为计算机能力和可获得的通信设施保护原理发生了变化。因此,没有这种新技术自适应继电保护无法实现。自适应保护以及广域测量的新领域(起源于微机保护领域)形成了目前这个版本的重要组成部分。

已发表的关于保护研究论文将显示,研究人员继续研究保护领域新分析技术的应用。在这个版本中我们已经包括了几个这样技术的内容,但是必须指出,这些技术大部分都没有看到在实际继电器设计中的应用。也许这证实了作者的信念,保护原理基本上取决于电力系统的现象,长期建立的保护系统设计技术非常健全并已接近优化。那些正在研究的新分析技术充其量只能提供很有限的改善,至于我们将在何时或哪些应用中看到这些新的分析技术能够带来明显益处,仍有疑问。

我们的书仍然是研究文本和参考工作。因此,每一章结尾的问题集往往是研究思路的陈述。一些问题是相当复杂的,每个问题都留出了个人解释和研究的余地。因此,我们并没有提供这些问题的解,而是留给个别有主动性的读者分析。我们当然有兴趣接收所有读者精心给出的评论。

我们很高兴参加了“111”^①项目,该项目始于 2008 年,是华北电力大学重点研究项目,由杨奇逊教授指导。该项目促进了我们继续参与微机保护许多方面的研究工作,且通过本项目支持下提供的设施,使得我们如期完成这

^① 由中国教育部主导的高等学校学科创新引智计划,简称“111”计划。——译者

本书的第二版。

我们继续从这个领域的工作中获得巨大乐趣，并且希望通过本书第二版继续与读者分享这个乐趣。

Arun G. Phadke

于黑堡

James S. Thorp

于黑堡

2009 年

缩 写 词 汇 表

- A/D, Analog to Digital, 模拟量到数字量
- ADC, Analog to Digital Converter, 模数转换器
- ANN, Artificial Neural Network, 人工神经网络
- ANSI, American National Standards Institute, 美国国家标准所
- CIGRE, International Council on Large Electric Systems, 国际大电网委员会
- CT, Current Transformer, 电流互感器
- CVT, Capacitive Voltage Transformer, 电容式电压互感器
- DFT, Discrete Fourier Transform, 离散傅立叶变换
- EHV, Extra High Voltage, 超高压
- EMI, Electromagnetic Interference, 电磁干扰
- EMTP, Electromagnetic Transients Program, 电磁暂态程序
- EPRI, Electric Power Research Institute, 美国电力科学研究院
- EPROM, Erasable Programmable Read Only Memory, 可擦写只读存储器
- FFT, Fast Fourier Transform, 快速傅立叶变换
- GPS, Global Positioning System, 全球定位系统
- I/O, Input Output, 输入、输出
- IEC, International Electrotechnical Commission, 国际电工委员会
- IEEE, Institute of Electronic and Electrical Engineers, 国际电子和电气工程学会
- MOV, Metal Oxide Varistors, 金属氧化压敏电阻
- MUX, Multiplexer, 多路转换器
- NAVSTAR, 并非缩写, 代表上述 GPS
- PDC, Phasor Data Concentrator, 相量数据集中器
- PMU, Phasor Measurement Unit, 相量测量装置
- PROM, Programmable Read Only Memory, 可编程只读存储器
- PT, Potential Transformer, 电压互感器
- RAM, Random Access Memory, 随机存储器
- RAS, Remedial Action Scheme, 补偿方案
- ROM, Read Only Memory, 只读存储器
- S/H, Sample and Hold, 采样和保持

SCDFT, Symmetrical Component Discrete Fourier Transform, 对称分量离散傅立叶变换

SIPS, System Integrity Protection Scheme, 系统集中保护方案

SWC, Surge Withstand Capability, 浪涌承受能力

WAMS, Wide Area Measurement System, 广域测量系统

WAMPACS, Wide Area Measurement, Protection and Control System, 广域测量、保护和控制系统

WLS, Weighted Least Squares, 最小二乘法

目 录

作者介绍	
译者序	
第一版序	
第二版序	
缩写词汇表	

第 1 章 微机保护概述	1
1.1 微机保护发展	1
1.2 历史背景	1
1.3 微机保护的预期效益	2
1.3.1 成本	3
1.3.2 自检和可靠性	3
1.3.3 系统集成和数字化环境	3
1.3.4 功能灵活性和自适应继电器	3
1.4 微机保护架构	4
1.5 模数转换	9
1.5.1 逐次逼近的 A/D 转换器	10
1.5.2 Delta-Sigma A/D 转换器	11
1.6 抗混叠滤波	12
1.7 变电站架构	14
1.8 小结	15
参考文献	16
第 2 章 继电保护实践	18
2.1 继电保护概述	18
2.2 继电保护系统功能	19

2.3	输电线路继电保护	22
2.3.1	过流继电器	22
2.3.2	方向继电器	23
2.3.3	距离继电器	25
2.3.4	矢量图和 $R-X$ 图	26
2.3.5	纵联保护	27
2.4	变压器、电抗器、发电机保护	28
2.4.1	变压器保护	28
2.4.2	电抗器保护	30
2.4.3	发电机保护	30
2.5	母线保护	30
2.6	电流、电压互感器性能	31
2.6.1	电流互感器	31
2.6.2	电压互感器	32
2.6.3	电子式电流、电压互感器	33
2.7	小结	35
	参考文献	36

第3章 微机保护算法的数学基础

38

3.1	引言	38
3.2	傅立叶级数	38
3.2.1	指数傅立叶级数	40
3.2.2	正弦、余弦傅立叶级数	41
3.2.3	相量	42
3.3	其他正交展开式	43
3.3.1	Walsh 函数	43
3.4	傅立叶变换	44
3.4.1	傅立叶变换特性	48
3.5	傅立叶变换的应用	55
3.5.1	采样	56
3.6	离散傅立叶变换	57
3.7	概率和随机过程简介	59
3.7.1	随机变量和概率分布	59
3.7.2	概率分布状况和密度	60
3.7.3	期望值	61
3.7.4	联合分布随机变量	62

3.7.5 自变量	63
3.7.6 线性估算	63
3.7.7 加权最小二乘法	64
3.8 随机过程	65
3.8.1 随机过程滤波	66
3.9 卡尔曼滤波	67
3.10 小结	71
参考文献	75

第4章 数字滤波 76

4.1 引言	76
4.2 离散时间系统	76
4.2.1 离散时间序列运算	77
4.2.2 卷积	77
4.3 离散时间系统	78
4.4 Z变换	79
4.4.1 幂级数	79
4.4.2 Z变换	80
4.4.3 逆Z变换	80
4.4.4 Z变换性能	81
4.4.5 离散系统傅立叶变换	82
4.5 数字滤波	83
4.6 数据窗	84
4.7 线性相量	86
4.8 逼近法—滤波器综合	87
4.9 小波	88
4.10 人工智能基础	91
4.10.1 人工神经网络	91
4.10.2 决策树	92
4.10.3 智能体	93
4.11 小结	93
参考文献	95

第5章 输电线路保护 97

5.1 引言	97
5.2 误差源	100

5.3	参数估值继电器	103
5.3.1	波形拟合算法	104
5.3.2	傅立叶算法	105
5.3.3	短数据窗的傅立叶算法	106
5.3.4	递归方程	107
5.3.5	Walsh 函数算法	108
5.3.6	差分方程算法	109
5.3.7	卡尔曼滤波算法	114
5.3.8	直流偏移的消除	115
5.4	非参数估值	117
5.4.1	基于故障分类的继电器程序	117
5.5	对称分量距离继电器	119
5.5.1	SCDFT	121
5.5.2	暂态监视器	121
5.5.3	速度范围考虑	123
5.5.4	继电器程序	125
5.6	更新的分析技术	127
5.6.1	小波应用	127
5.6.2	智能体应用	127
5.7	串联补偿线路保护	128
5.8	小结	129
	参考文献	130

第 6 章 变压器、发电机、母线保护

133

6.1	引言	133
6.2	电力变压器算法	133
6.2.1	电流制动	134
6.2.2	电压制动	136
6.2.3	磁通制动	137
6.2.4	基于励磁涌流间隙的制动功能	140
6.3	发电机保护	141
6.3.1	定子绕组差动保护	141
6.3.2	其他发电机保护	142
6.3.3	采样率跟踪系统频率	143
6.4	电动机保护	143
6.5	微机母差保护	144

6.6 小结	146
参考文献	148

第7章 集成系统的硬件组成 151

7.1 硬件问题的本质	151
7.2 用于保护的微机	151
7.3 变电站运行环境	153
7.4 工业环境标准	154
7.5 EMI 对策	156
7.6 辅助部件	157
7.6.1 电源	157
7.6.2 辅助继电器	157
7.6.3 试验部件	157
7.6.4 接口柜	158
7.7 冗余性和后备	158
7.8 服务、培训和维护	159
7.9 小结	160
参考文献	160

第8章 系统保护和控制在 162

8.1 引言	162
8.2 频率和相量测量	162
8.2.1 f 和 df/dt 最小二乘估计	164
8.3 时钟同步采样	165
8.4 相量测量在状态估计中的应用	166
8.4.1 涵盖相角测量的加权最小二乘法状态估计	168
8.4.2 线性状态估计	169
8.4.3 分区状态估计	171
8.4.4 PMU 布点	172
8.5 动态状态估计的相量	173
8.5.1 状态方程	174
8.6 在线监测	175
8.6.1 事件顺序分析	175
8.6.2 初始故障检测	176
8.6.3 断路器健康状态监测	176
8.7 控制应用	176