



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

电力系统的扰动分析

Disturbance Analysis for Power Systems

[美] 穆罕默德 A. 易卜拉欣 (Mohamed A. Ibrahim) 著

连晓峰 郭柯 等译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电力系统的扰动分析

[美]穆罕默德 A. 易卜拉欣 (Mohamed A. Ibrahim) 著

连晓峰 郭 柯 等译



机械工业出版社

Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled < Disturbance Analysis for Power Systems >, ISBN: 978-0-470-91681-0, by Mohamed A. Ibrahim, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2011-7729 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统的扰动分析/(美)易卜拉欣 (Ibrahim, M. A.) 著;
连晓峰等译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 3

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Disturbance analysis for power systems

ISBN 978-7-111-49531-4

I. ①电… II. ①易…②连… III. ①电力系统—扰动—研究
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 044936 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 肖 琳 封面设计: 马精明

责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 38.75 印张 · 753 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-49531-4

定价: 160.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

电力系统扰动分析是监测电力保护系统性能的一项重要功能。它不仅能够提供丰富的电力系统正常运行特性相关的宝贵信息，还能够简化管理电力系统现象，以及增强安全运行限值和常规继电保护。本书给出了作者在电力系统扰动分析领域 40 多年的工作经验。首先简要介绍了继电保护应用的理论和基本原理。然后详细介绍了电力系统扰动相关的大量实际案例。通过对实际的数字故障记录仪录波、示波图和数字继电器故障录波进行分析来阐述如何推断故障事件的发生顺序。本书中涵盖了扰动分析所需信息、故障角 (fault incident angle) 以及电力系统现象及其对继电保护系统性能影响等主题，同时还描述了系统扰动分析所得出的电力系统现象。另外，还包括了涉及发电机、变压器、架空输电线、馈线电缆和断路器失灵的保护系统的实际系统扰动的案例分析。书中的几个章节专门介绍了将系统扰动分析作为继电保护方案性能优化的一种工具。除此之外，本书还可作为验证电力系统模型，并提供电力系统特性丰富技术信息的一种工具。

本书可作为从事电力保护和控制、电力系统运行和电力系统设备等领域的工程技术人员的参考书，也可作为高等院校相关专业本科生、研究生以及教师的参考用书。

译者序

本书给出了作者在电力系统扰动分析领域 40 多年的工作经验。首先简要介绍了继电保护应用的理论和基本原理,然后详细介绍了电力系统扰动相关的大量实际案例。这些案例都来自于作者多年来在电力系统保护中亲身经历的故障。

书中详细介绍了如何将电力系统扰动分析作为判断电力保护系统性能的一种重要手段。通过对实际的数字故障记录仪录波、示波图和数值继电器故障录波进行分析来阐述如何推断故障事件的发生顺序。本书中涵盖了扰动分析所需信息、故障角以及电力系统现象及其对继电保护系统性能影响等主题,同时还描述了系统扰动分析所得出的电力系统现象。另外,还包括了涉及发电机、变压器、架空输电线、馈线电缆和断路器失灵的保护系统性能的实际系统扰动的案例分析。书中的几个章节专门介绍了将系统扰动分析作为继电保护方案性能优化的一种工具。除此之外,本书还可作为验证电力系统模型,并提供电力系统特性丰富技术信息的一种工具。

作者 Mohamed A. Ibrahim 是一名纽约州注册的专业工程师和 IEEE 资深会员。曾在赫勒万大学、曼苏拉大学和纽约大学理工学院任职,并在奥本大学和华盛顿州立大学授课。2004 年从纽约电力管理局保护和控制主任的职位上退休,发表了有关计算机继电保护与保护领域的多篇学术论文。

本书第 1~3 章由郭柯翻译,第 4、5 章由连晓峰和王佩荣翻译,第 6、7 章由李东红和金成学翻译,第 8 章由贾琦翻译,第 9 章由王宇龙和王伟翻译。全书由连晓峰审校整理,并对原书中的错误进行了注释。全书又经中国电力科学研究院秦晓辉博士审校、修改。另外,张晓伟、肖锦龙、母冬、张云、靳添絮、闫峰、姚瑶、马新宇、潘媛、黄庆彩、王雪、杨培文、臧竞之、侯宝奇、于嘉骥、张丹瑶、侯秀林、蔡有林、李世明、张鹏、窦超、刘天意、周浪涛、李林、王伟楠、刘禄、李艳慧、彭森、郭卫平、李红岩、崔建中、韩杰也参与了本书部分内容的翻译。

本书可作为从事电力保护和控制、电力系统运行和电力系统设备等领域的工程技术人员的参考书,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生以及教师的参考用书。

限于译者的经验和水平,书中难免存在缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

译者

原 书 前 言

电力监控系统中所采用的故障记录设备，从在特殊的感光纸或示波图胶片上记录的湿迹和光束发展到现在的基于微机处理的数字技术。由于湿迹和感光纸的重复显示问题，某些过去的故障记录需要耗时几天才能完成。因此，导致一些关键的记录丢失，从而难以进行电力系统的扰动分析。另外，故障记录设备的启动比较繁琐，容易导致示波器运行的不可靠。数字故障记录仪（DFR）是一种智能电子设备，在发生扰动后可立即通过通信链路自动将故障记录发送到远程运行中心和工程部门，这样就能够进行快速分析以尽快恢复系统。通过精确的有效值测量以及执行一系列软件包可进行系统模型的验证，并分析扰动对电力系统设备的影响。

电力系统扰动分析是监测电力保护系统性能的一项重要功能。这不仅能够提供丰富的电力系统正常运行特性相关的宝贵信息，还能够简化管理电力系统现象，以及增强安全运行限值和常规继电保护。经常检查系统运行时数字故障记录仪的录波和数字继电器的故障录波有助于发现早期问题，以使得在问题严重之前就能进行及时修正。了解电力系统振荡并增强电力系统摆动状态下的系统继电保护响应可避免电力系统断电。另外，通过分析 DFR 的录波还能加强电力系统工程概念以及在分析电力系统故障时采用对称分量元件。

大容量电力系统通常由两个冗余继电保护系统进行保护。这些系统的性能可通过系统扰动分析进行监测。电力系统的恢复需要先正确分析导致断电的扰动，在确认安全后才能再进行系统上电。正确分析系统扰动有助于在发生故障的电力设备上电的情况下安全恢复供电。另外，通过正确的系统扰动分析，还能获取关于继电保护应用的哲学思想的信心。

为方便用户检查，在 DFR 的录波中通过与录波对应的标识同时显示了表示监测电压和电流的唯一功能系统图。书中有一节专门记录了在实际的案例分析中出现的电力系统现象，这将为经验有限的工程师进行系统分析时提供问题的背景知识。

本书作为一个平台，记录和展示了作者在电力系统扰动分析领域 40 多年的工作经验。美国电力服务公司、纽约电力管理局和一些应用客户的许多同事都直接或间接地为本书作出了贡献，在此，对他们的付出表示衷心感谢。本书的主旨是简化问题，并对继电保护工程师提供故障清除的指导原则以及基础知识。根据这种组织架构，首先简要介绍了继电保护应用的理论和基本原理。然后通过涉及系统扰动的实际案例来强化这些基础知识。这些案例都是作者根据多年来在公共电力系统保护中实际发生的故障收集整理而成的。案例中公共发电厂、变电站和输电线的实际名称都用通用名称代替。

在早期垂直整合的环境下，对于大多数公共事业，培训和教育是必不可少的。在竞争激烈的新环境下，由于是通过对于年轻工程师传授宝贵经验，而导致经验和技术的交流受到限制。正是由于该原因，在继电保护的历史上，已经流传了一代又一代的基本知识正面临丢失的危险。由于目前对于从事电力系统扰动分析中保护和控制领域的工程师培训极少，这促使作者以这种有益于工程师的方式来记录本人的工作经验。

本书中，详细介绍了如何将电力系统扰动分析作为判断电力保护系统性能的一种重要手段。通过对实际的数字故障记录仪录波、示波图和数字继电器故障录波进行分析来阐述如何推断故障事件的发生顺序。本书中涵盖了扰动分析所需信息、故障角（fault incident angle）以及电力系统现象及其对继电保护系统性能影响等主题。同时还描述了系统扰动分析所得出的电力系统现象。另外，还包括了涉及发电机、变压器、架空输电线、馈线电缆和断路器失灵的电力系统性能的实际系统扰动的案例分析。书中的几个章节专门介绍了将系统扰动分析作为继电保护方案性能优化的一种工具。除此之外，本书还可作为验证电力系统模型，并提供电力系统特性丰富技术信息的一种工具。

本书主要是针对从事电力保护和控制、电力系统运行和电力系统设备等领域工作的工程师和技术人员。同时，也适用于电能控制中心的操作人员和技术支持人员，以增强发生电力扰动后安全恢复电力系统的技术背景知识。本书将为工程师提供大多数电力系统现象及其对保护系统特性影响的基础知识。同时，本书也可作为想要提高电力相关知识的本科生和研究生的教材。书中专门设置了问题一章，以增强对电力系统扰动分析作用的理解。因此，本书还能对本科生或研究生相关课程提供关于电力系统扰动分析主题的讨论。

Mohamed A. Ibrahim

目 录

译者序	
原书前言	

第 1 章 电力系统扰动分析功能	1
1.1 电力系统扰动分析的作用	1
1.2 数字故障记录仪 (DFR) 扰动分析的目的	3
1.3 通过电力系统扰动分析来测定电力系统设备状况	3
1.4 DFR 设备描述	4
1.5 电力系统扰动分析所需信息	5
1.6 故障记录仪监测信号	6
1.6.1 模拟信号	6
1.6.2 事件 (数字或二进制) 输入和输出	7
1.7 DFR 监测电压和电流的触发设置	7
1.8 DFR 和数字继电器的采样率与频率响应	8
1.9 通过数字继电器产生的故障录波	9
1.10 智能电子装置采集的数据集成与整合	9
1.11 DFR 的软件分析包	10
1.11.1 相量分析	10
1.11.2 有效值 (RMS) 计算	12
1.11.3 有功功率和无功功率的计算	14
1.11.4 数据显示操作	14
1.11.5 故障定位	15
1.11.6 电力系统谐波分析	16
1.11.7 对称分量分析	16
1.12 变电站接地电流监测中 DFR 的精度校验	17
1.13 利用 DFR 来验证电力系统短路模型	20
1.14 瞬态数据交换通用格式标准	25
参考文献	26
第 2 章 电力系统故障现象与电力系统的故障清除过程	28
2.1 电力系统中的分流故障类型	28

2.2 分流故障分类	29
2.2.1 三相故障	29
2.2.2 相—相故障	30
2.2.3 相—地故障	30
2.2.4 双相—地故障	31
2.3 电力系统中的串联不平衡类型	33
2.4 电力系统中的扰动成因	33
2.5 故障点	34
2.6 对称和非对称故障电流	34
2.7 电压峰值处的电弧放电或飞弧闪络	37
2.8 故障演变	41
2.9 并发故障	44
2.10 金属性 ($R_F = 0$) 或带地线合闸的线—地短路故障	45
2.11 线路两侧顺序故障清除导致表现为金属性 ($R_F = 0$) 远端线—地短路故障	46
2.12 线路两侧顺序故障清除导致表现为电阻性远端线—地短路故障	47
2.13 树木引起的高阻线接地故障	48
2.14 高阻线—地故障验证了仅从一端馈入故障电流时测量阻抗的自然阻性	50
2.15 一个非接地电力系统中的相—地故障	51
2.16 线—地故障时非故障相中的电流	52
2.17 三角形/星形变压器星形接地侧的线—地故障	55
2.18 三角形/星形变压器星形接地侧的线—线故障	56
2.19 三角形/星形变压器 (三角形绕组不与电源相连) 三角形侧的线—线故障	57
2.20 超高压双相—地故障时周波继电器的运行时间	59
2.21 油断路器箱中相 C—地故障的自动清除	60
2.22 输电线绝缘子飞弧闪络引起的相 B—地故障的自清除	61
2.23 通信信号延迟造成的辅助系统的延迟清除	62
2.24 线—地故障的顺序故障清除	63
2.25 线—地故障的步距故障清除	65
2.26 一端为瞬时接地器件且另一端为时限过电流接地器件的接地故障清除步骤	67
2.27 一次侧和本地备用 (断路器失灵) 保护系统故障后远端备用的接地故障清除	68
2.28 线—地故障中断路器失灵的故障清除	70

2.29 利用一种对比方法的故障点确定和故障分类	71
参考文献	73
第3章 电力系统现象及其对继电保护系统性能的影响	74
3.1 电力系统振荡导致输电线两端同时跳闸和仅在相邻输电线一端跳闸	74
3.1.1 发电机振荡现象	75
3.1.2 失步振荡事故描述	75
3.1.3 输电线 L1 上 Z1 的跳闸分析	75
3.1.4 对继电保护系统的影响	79
3.2 由线一地故障、发电损耗和三相 138kV 输电线意外跳闸共同造成的 发电机振荡	80
3.2.1 事故描述	80
3.2.2 发电机组 GB 跳闸分析的理论和结论	80
3.3 200MW 机组同步产生的电力系统平稳振荡	82
3.4 导致同一变电站的不同输电线产生不同振荡的电力系统主要扰动	83
3.5 高压侧相一地故障期间发电机转子处 120Hz 电流的表征	86
3.6 不平衡故障期间发电机负序电流的流动	88
3.7 170MW 水力发电机组的意外（偶然）励磁	89
3.8 发电机中性点处三次谐波电压的表征	90
3.9 电力系统故障时发电机中性点三次谐波电压幅值的变化	92
3.10 GSU 高压侧线一地故障时发电机输出的有功功率和无功功率	93
3.11 200MW 机组的励磁损耗	94
3.12 发电机的剩余（衰减）能量	96
3.13 发生故障和误同步时的电流非过零点	97
3.14 高压侧接地故障时通过升压变压器绕组间电容产生的发电机中性点 零序电压耦合	98
3.15 高压侧差动保护区域内存在故障时的变压器励磁	100
3.15.1 故障电流中的谐波分量分析	101
3.16 变压器的涌流	102
3.16.1 变压器涌流现象的定义	102
3.16.2 对变压器保护的影响	103
3.16.3 二次谐波检测逻辑方法	104
3.17 YG/三角形变压器星形接地侧励磁时的涌流	104
3.18 变压器三角形侧励磁时的涌流	105
3.18.1 三角形/YG 变压器三角形侧的励磁	105
3.18.2 三角形/三角形变压器三角形侧的励磁	106

3.19	线一地故障和断相同时发生时具有三角形三次绕组的自耦变压器的 两相励磁	107
3.20	整个三角形/星形变压器组的 30° 相移	110
3.21	远端双绕组三角形/YG 变压器产生的零序电流	111
3.22	作为零序源的传统电力调节变压器的铁心类型	112
3.23	断路器的重燃	113
3.24	合闸操作过程中断路器三相不一致	114
3.25	断路器的分闸电阻	115
3.26	反馈到断路器失灵故障检测器的二次电流	116
3.27	磁通量消除	118
3.28	电流互感器 (CT) 饱和	120
3.29	发电机断路器误同步引发的系统失步状态下的 CT 饱和	122
3.30	电容式电压互感器 (CVT) 的暂态	124
3.31	一个超高压 (EHV) 输电线断电时套管电位器的暂态	126
3.32	电容额定电流中断后电容器组断路器重燃	127
3.33	电容器组的合闸暂态	128
3.34	并联电容器组近距系统故障	129
3.34.1	涌流现象的定义	129
3.34.2	电容器涌出电流的仿真研究	131
3.35	数据采集与监控系统 (SCADA) 并入一个三相故障	133
3.36	自动重合闸到一个永久性线一地故障	134
3.37	线一地故障后快速重合闸	135
3.38	零序互耦感应电压	136
3.39	输电线相一地故障时造成高阻抗母线差动保护误跳闸的互耦合 现象	138
3.40	三相故障清除时非正弦中性点电流的表征	141
3.41	发生故障时平行输电线上电流反向	142
3.42	Ferranti (费兰梯) 电压上升	144
3.43	两端具有并联电抗器的 EHV 线上的电压振荡	146
3.43.1	EHV 线上相 A—C—地故障时的电压振荡	147
3.43.2	EHV 线上相 A—地故障时的电压振荡	148
3.43.3	EHV 线开关操作时的电压振荡	148
3.44	被监测输电线上雷击造成的相 C—地故障之后相邻输电线上的 雷击	150
3.45	用于保护电缆接头的 345kV 避雷器击穿之前的电流泄放	150
3.46	校准设置误差造成的模拟-数字 (A-D) 转换器的量程饱和	151

3.47	故障中断瞬间电流下降的表征	153
3.48	定子绕组中性点不正确连接的中压电动机的激励	154
3.49	从负载状态到故障状态时的相角变化	156
	参考文献	157

第4章 发电机系统扰动相关的案例分析 159

4.1	发电机保护的基础知识	160
	案例分析	161
案例分析 4.1	115kV 相一地故障期间由定子负序电流产生的水轮发电机 转子双频电流（120Hz）的表征	161
案例分析 4.2	170MW 水力发电机组的意外（偶然）激励	166
案例分析 4.3	人为操作失误造成的 200MW 发电机组失磁	176
案例分析 4.4	1100MW 发电机组的失磁跳闸	182
案例分析 4.5	联合循环发电厂中 50MW 蒸汽机组的误同步	183
案例分析 4.6	一个 200MW 水力发电机组的误同步	190
案例分析 4.7	水力发电机组手动同步过程中数字差动继电器的意外跳闸	198
案例分析 4.8	高压侧 138kV 相一地故障引发的 500MW 联合循环发电厂跳闸	202
案例分析 4.9	功率摇摆期间联合循环发电厂中 110MW 燃气轮机组的跳闸	209
案例分析 4.10	345kV 相一地故障正常清除时 800MW 发电厂的 DFR 录波分析	212
案例分析 4.11	发电机端浪涌电容器导线故障造成的 150MW 联合循环发电厂跳闸 ..	214
案例分析 4.12	800MW 火力发电机组的发电机定子接地故障	222
案例分析 4.13	800MW 发电机组端子处的三相故障	226
案例分析 4.14	电缆连接故障造成的 50MW 发电机组端子处三相故障	231
案例分析 4.15	发电机转子风扇上的叶片故障造成的定子相—相—地故障	236
案例分析 4.16	345kV 输电线近距相—地故障时抽水蓄能发电站的意外跳闸	244
案例分析 4.17	345kV 母线故障时 800MW 发电厂以及所连接 EHV 线的跳闸	250
案例分析 4.18	外部 138kV 三相故障时 150MW 联合循环发电厂的跳闸	254
案例分析 4.19	138kV 输电系统扰动时 150MW 联合循环发电厂的跳闸	259
案例分析 4.20	138kV 双相—地故障成功清除后 150MW 联合循环发电厂意外跳闸 ..	263
案例分析 4.21	电容器组位于保护区内的差动继电器导致感应发电机意外跳闸	265
案例分析 4.22	联合循环发电厂试运行阶段蒸汽发电（STG）机组与系统首次 同步时的意外跳闸	268
案例分析 4.23	500MW 联合循环发电厂中 STG 机组的顺序停机	271
案例分析 4.24	新机组试运行阶段由于接线错误导致发电机数字差动继电器 的意外运行	273
案例分析 4.25	在试运行之前逐步将一个新发电机并入电力系统	276

4.1.1 继电器设置计算相关案例分析	278
案例分析 4.26 100% 定子接地故障保护中三次谐波欠电压装置的设置过程	278
案例分析 4.27 提供电力系统后备保护的发电机继电装置设置基础	280
参考文献	284
第 5 章 变压器系统扰动相关的案例分析	285
5.1 变压器基础知识	285
5.1.1 广泛应用的变压器连接类型	285
5.1.2 自耦变压器	286
5.1.3 自耦变压器故障电流分析	286
5.1.4 三绕组变压器或自耦变压器的三角形电流监测	287
5.1.5 确定故障期间自耦变压器三角形绕组零序电流方向	287
5.1.6 三角形三次零序电流的标幺值	288
5.1.7 自耦变压器中性点电流的幅值和方向	288
5.1.8 确定电力系统模型	289
5.1.9 接地星形侧电压相位超前三角形侧 30° 的三角形/星形接地变压器 (Yd1 型变压器连接形式)	290
5.1.10 三角形侧电压相位超前接地星形侧 30° 的三角形/星形接地变压器 (Yd11 型变压器连接形式)	291
5.2 变压器差动保护基础知识	292
5.2.1 硬连接差动保护	292
5.2.2 多功能数字差动继电器	292
5.2.3 变压器差动保护的应用	293
5.2.4 两绕组三角形/星形接地变压器差动保护基础知识	294
5.3 案例分析	294
案例分析 5.1 具有位于变压器差动保护区的 13.8kV 相—相母线故障的 5MVA 13.8kV/4.16kV 厂用变压器激励	294
案例分析 5.2 发电机升压变压器缺乏冗余保护而导致 230kV 区域电力供应中断	300
案例分析 5.3 由于绕组配置中继电器设置错误导致的变压器数字差动继电器 意外运行	304
案例分析 5.4 利用变压器数字差动继电器故障录波来定位 13.8kV 开关设备的 相—相故障	309
案例分析 5.5 13.8kV 三角形绕组断相的发电机组升压变压器运行	314
案例分析 5.6 利用变压器相量图、DFR 录波和继电器目标来确定发电机组辅助 变压器的故障相	319
案例分析 5.7 450MVA 345kV/138kV/13.2kV 自耦变压器故障	323

案例分析 5.8 由于铁磁谐振状态导致的 750kVA 13.8kV/0.480kV 厂用变压器故障 329

案例分析 5.9 外部线一地故障时变压器数字差动继电器的意外跳闸 335

案例分析 5.9A 发电机处于工作状态时外部相 B—地故障导致的发电厂意外跳闸 ... 337

案例分析 5.9B 发电机处于停机状态时外部相 C—地故障导致的发电厂意外跳闸..... 340

案例分析 5.10 两台 75MVA 138kV/13.8kV GSU 变压器激励时变压器数字差动继电器的意外运行 346

案例分析 5.11 5MVA 13.8kV/4.16kV 厂用变压器激励时变压器数字差动继电器的意外运行 350

案例分析 5.12 5MVA 13.8kV/4.16kV 厂用变压器高压侧相—相故障演变为三相故障 352

案例分析 5.13 连接 2MVA 13.8kV/0.480kV 厂用变压器外壳的 13.8kV 母线处相—相故障演变为三相故障 357

案例分析 5.14 暴雨导致的 13.8kV 开关设备相—相故障演变为三相故障 362

案例分析 5.15 由于缺少作为继电器接线输入的燃气轮机电缆连接导致变压器数字差动继电器意外运行 365

案例分析 5.16 由鸟粪引发 115kV 变压器绝缘套管飞弧闪络而导致的相—地故障 ... 369

案例分析 5.17 利用变压器数字继电器示波图分析 4.16kV 低阻接地电源的相—地故障 373

案例分析 5.18 13.8kV 母线上由松鼠引起的相—相故障演变为三相故障 381

案例分析 5.19 由于动物接触引发的 13.8kV 变压器相—相故障演变为 115kV 变压器套管故障..... 384

案例分析 5.20 通过数字输入连接到气体继电器的跳闸输出来确定变压器多功能数字继电器的意外跳闸 388

参考文献..... 391

第 6 章 架空输电线系统扰动相关的案例分析..... 392

6.1 输电线保护基础知识 393

6.1.1 电力系统装置保护和控制的 对偶原理 394

6.1.2 输电线继电技术的历史沿革..... 394

6.1.3 大容量电力系统的保护准则..... 395

6.1.4 纵联继电系统在输电线保护中的应用 395

6.2 案例分析 396

案例分析 6.1 仅利用一端 DFR 录波来确定本地和远端线一地故障的清除时间 396

案例分析 6.2 仅利用一端示波图分析 345kV 输电线两端相—地故障的清除时间 398

案例分析 6.3 雷击造成的三相故障分析..... 400

案例分析 6.4 雷击造成的 765kV 双相—地故障分析 401

案例分析 6.5	通过分析雷击造成的三相接地故障来评估电力塔塔基电阻·····	404
案例分析 6.6	首先从一个直接接地电力系统中清除 115kV 相一地故障, 然后与一个非接地电力系统连接并从中清除故障·····	405
案例分析 6.7	人为破坏造成的 345kV 相一地 (相 C—地) 故障 ·····	411
案例分析 6.8	公路电力线事故造成的 345kV 相一地 (相 A—地) 故障 ·····	415
案例分析 6.9	外部相一地故障时 138kV 电流差动继电器系统的误跳闸 ·····	420
案例分析 6.10	由于附加 CT 电路接地造成的三相故障时 13.8kV 馈线接地继电器的意外运行 ·····	425
案例分析 6.11	通过分析 115kV 断路器开关关联的支柱绝缘子故障来修正系统模型误差 ·····	434
案例分析 6.12	利用 DFR 录波来定位机电式距离继电器保护的 345kV 输电线故障 ···	440
案例分析 6.13	利用远端变电站的 DFR 录波来定位热电联供装置的室外 13.8kV 开关设备故障·····	444
案例分析 6.14	由于负重输电线与树接触造成的高阻故障时 345kV 分裂导线束破损 (损坏) ·····	448
案例分析 6.15	输电线开关失灵造成的 115kV 相—相故障 ·····	454
案例分析 6.16	由于数字输电线保护继电器中时限过电流器件的设置错误造成的 115kV 馈线的意外跳闸 ·····	457
案例分析 6.17	缓解高压和超高压输电线的接地距离继电器范围的互耦效应 ·····	461
案例分析 6.17A	两条平行输电线保护推荐过程的应用 ·····	470
案例分析 6.17B	多条输电线串联且与一条较长输电线互耦的 345kV 电力系统的保护 ·····	474
参考文献	·····	481
第 7 章 输电缆馈线系统扰动相关的案例分析	·····	482
案例分析	·····	482
案例分析 7.1	可快速确定 345kV 海底电缆故障位置的继电保护区优化设计·····	482
案例分析 7.2	500MW 发电厂试运行阶段 138kV 电缆馈线差动继电器的意外运行·····	488
案例分析 7.3	发电机和开关站之间 345kV 电缆连接故障以及一个电缆端套相机械故障造成的相一地故障 ·····	495
案例分析 7.4	仅利用继电目标来排除 345kV 相一地故障 ·····	501
案例分析 7.5	300MW 发电机和 345kV 开关站之间 345kV 连接电缆故障造成的相一地故障 ·····	507
案例分析 7.6	利用数字电流差动继电器示波图和事故记录来分析 138kV 电缆端套故障 ·····	510
参考文献	·····	516

第 8 章 断路器失灵保护系统扰动相关的案例分析 517

8.1 断路器失灵保护的基础知识 517

8.1.1 断路器失灵的应用 519

8.1.2 传统断路器失灵时序图 520

8.1.3 传统断路器失灵的直流原理图 520

8.1.4 断路器失灵保护清除主保护系统的盲区 520

8.1.5 作为变电站配置功能的断路器失灵对电力系统的影响 522

8.1.6 断路器失灵保护的设置原则 524

案例分析 526

案例分析 8.1 固态断路器失灵继电系统意外运行造成的 150MW 联合循环
发电厂的跳闸 526

案例分析 8.2 115kV 双断路器失灵造成的 1000MW 发电厂以及附属变电站的损失 ... 532

案例分析 8.3 近距相一地故障清除时由于断路器问题造成的 230kV 变电站停机 538

案例分析 8.4 230kV 断路器失灵造成的 1000MW 发电厂以及附属变电站的隔离 543

案例分析 8.5 断路器自动同步时发电机断路器故障 550

案例分析 8.6 230kV 双回路电力塔相一地故障同时清除时断路器重燃 555

案例分析 8.7 故障清除期间 345kV 电容器组断路器故障并同时发生 345kV 双 SF₆
压力断路器故障 559

案例分析 8.8 230kV 避雷器故障清除后的油断路器失灵故障 565

案例分析 8.9 通过分析监测输电线电流和电压的本地示波图来检测远端
断路器问题 569

案例分析 8.10 一次侧继电系统故障以及二次侧继电系统缺失直流控制电力导致的
138kV 负荷区域停电 570

案例分析 8.11 断路器失灵期间在环形变电站配置中串联安装两个 345kV 断路器以
减少关键输电线的损耗 574

案例分析 8.12 两个 138kV 断路器串联设计以满足断路器失灵保护的需要 574

参考文献 576

第 9 章 问题 577

第 1 章 电力系统扰动分析功能

电力系统扰动分析可提供有关电力系统现象和电力保护系统特性的大量有价值的信息。通过扰动分析功能能够积累经验并获取知识。本书的组织结构为，首先介绍扰动分析功能以及如何实现扰动分析，接下来在后续章节中，阐述了系统故障相关的现象以及清除故障的过程，指出由系统扰动分析所得出的电力系统现象。另外，还提供了关于发电机、变压器、架空输电线、电缆馈线和断路器失灵等保护系统性能的实际系统扰动案例分析。其中，专门有一节用来增强对电力系统扰动分析功能的理解。

系统扰动分析都是基于 60Hz 电力系统故障相关的现象。因此，应设置数字故障记录仪（DFR）的采样率满足上述要求。除传统 DFR 和数字继电器之外，高频电力系统的暂态分析还需要与常规电力系统扰动分析不同的其他专用设备。

为分析继电保护系统的性能，需要正确采用高速数字故障与扰动记录装置。在发生故障或电力功率摆动或开关操作时，该设备可用于连续监测电力系统中的继电保护特性。同时，该设备还可用于解释意外运行，并在校正过程中观察系统性能。故障录波分析将有助于采取合理的运行和保护措施，从而确保大容量电力系统的可靠运行。另外，DFR 的配置布局还应能够提供适用于任何类型电力系统故障或大范围系统扰动的整体系统响应。为此，DFR 在大容量电力系统中的应用和实现是通过行业标准和法规授权的。

及时检查系统中每项操作的 DFR 录波将有助于隔离早期发生的问题，以使得在发展成严重问题之前及时校正，并且还能提供有关继电保护系统性能的基本信息。检查系统扰动的所有故障录波还能提高继电保护系统的可靠性。当扰动发生在分析的早期阶段时，应在导致大范围中断和系统断电前及时处理继电保护和系统问题。这可以通过分析正确操作和查找不正确操作的原因来实现。此外，扰动检查还能够对继电保护整定的计算、电流互感器（CT）与电压互感器（PT）比率的修正和断路器正常运行的有效性进行更好的评估。同时，还能够通过提供故障类型和故障定位以及更好地衡量电能质量来加快系统恢复过程。

北美电力可靠性公司（NERC）提出的可靠性标准 PRC-002-02 “扰动监测与报告规定”是一份关于区域性可靠性组织机构建立所需条件的文档，以确保扰动监测设备的安装和扰动数据的提交，便于分析电力系统事件和验证系统模型。

1.1 电力系统扰动分析的作用

电力系统的扰动分析大致包括以下 5 个主要作用：