

PEIDIANWANG YUNXING XINHAO LUBO
YU GUZHANG ZHENDUAN JISHU

配电网运行信号录波 与故障诊断技术

■ 广东电网公司电力科学研究院 余南华 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

PEIDIANWANG YUNXING XINHAO LUBO
YU GUZHANG ZHENDUAN JISHU

配电网运行信号录波 与故障诊断技术

■ 广东电网公司电力科学研究院 余南华 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍了一种新型配电网运行信号录波与故障诊断技术,实现更为科学的配电网运行状态监测、故障预警、故障识别及定位。本书共分6章,主要内容包括概述、配电网系统及构成、配电网在线录波监测技术、配电网线路运行数据处理、配电网线路故障诊断技术、总结与展望。

本书可为配电网运行信号录波与故障诊断技术领域的研究学者及从事相关工作的人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

配电网运行信号录波与故障诊断技术 / 广东电网公司电力科学研究院, 余中华主编. —北京: 中国电力出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5123-5446-3

I. ①配… II. ①广…②余… III. ①配电系统—故障诊断 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 149518 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 岳 璐 (010-63412339) 刘亚南

责任校对: 王开云

装帧设计: 张俊霞

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市百盛印刷有限公司

版 次: 2017 年 8 月第一版

印 次: 2017 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 880 毫米×1230 毫米 32 开本

印 张: 6.75

字 数: 173 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 28.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

本书编写组

主 编：余南华

副主编：李传健 李 瑞 曾 强 邓惠华

詹雄铿 刘 明 贺 臣 甘团结

参 编：高立克 唐先武 张建良 何奕枫

刘 玮 谢幸生 叶万余 唐小亮

谢信霖 何伟斌 黎卫文 吴丹琪

于荣华 覃宗涛 樊伟成 秦 川

周克林 代仕勇 王彩强 林汝钊

郑文杰 吴杰辉 李德峰 林则忠

崔春生 陈云瑞 郭晋楠 张国新

刘石生 陶维青 张建平 曾瑞江

黄志文 张 然 杨 军 吕新杰



序

广东电网有限责任公司电力科学研究院余南华博士主编的《配电网运行信号录波与故障诊断技术》一书，阅后令人耳目一新。长期以来我国配电网的故障诊断能力不足，目前传统的故障指示器存在上线率不足以及误报率较高的问题，现场需要性价比高、运行可靠的故障诊断系统。本书提出的配电网信号录波装置以及后台故障诊断系统是一个很好的尝试，是对故障指示器技术的一次全面升级。书中所介绍的信号录波技术在监测信息的数据时间尺度方面要远大于故障指示器仅仅在故障时刻的一点信息，这样使得配电监测可以有足够的信息量进行二次加工，很好地支撑后台故障诊断系统实现更为复杂的故障判据算法和高级应用功能的扩展。书中所提的配电故障基因库就是建立在信号录波基础上的一种很有特色的高级应用功能。配电网信号录波装置不仅可以提供稳态的信息也可以进行暂态分析，这为配电网中一些传统难题，如中性点非有效接地系统的单相接地故障的判别和定位等问题也提供了非常有效的技术基础。随着配电网通信以及网络技术的发展进步，配电网大数据的应用也将成为智能配电网的一个热点，配电网运行信号录波可以为配电网大数据应用提供配电网全面的动态信息，从这个意义上看，本书的价值就显得尤为重要。

近几年，我与余南华博士所在的智能电网研究所有较多的交流与合作，亲身感受到这是一个非常有朝气的研究团队，他们不仅对高新技术有很敏锐的嗅觉，能够及时跟踪国际热点问题，而且非常注重实效，着力于现场问题的解决。本书的技术成果就是其中一个杰出代表，不仅提出一些全新的理念，而且相关装置与系统在多个现场得到了很好的应用。

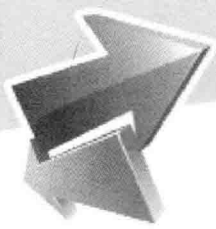
在配电网技术方面，广东电网有限责任公司电力科学研究院已

经成为国内一支重要的研究队伍，也希望未来能够看到他们开发出更多更好的智能配电新成果。

上海交通大学
国家能源智能电网（上海）研发中心

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, positioned below the institutional name.

2017年6月



前 言

配电网是电力系统的重要组成部分，担负着分配和输送电能的作用。与输电网不同，配电网要从变电站一直延伸到终端用户，造成其线路的接线方式十分复杂，管理难度较大，已成为影响供电可靠性的主要因素。因此，配电网发生故障时，如何快速、有效地对其及时识别和处理，一直是生产及科研人员关注的重要课题。

我国在电力系统发展的过程中，对发电和输电设施的建设力度较大，且规模、技术也非常完善。目前，我国输电网自动化程度已经得到了迅速发展和提高。随之而来的是对配电网的重要性有了新的认识，意识到了加快配电网自动化的发展，是提高供电可靠性的一个关键环节。但是，由于配电网线路设备点多面广，分支多，负荷多样，线路所处地形复杂，整体资产较大，造成改造需要投入的资金多而且周期长，远水难解近渴。此外，电力企业精细化管理要求不断提高，需要摆脱基于人海战术的管理方式，转变为实行定岗、定编、定员模式。但随着配电网线路及其设备老化程度的不断加深，生产及运行维护人员的管理压力不断加大，疲于应付线路设备故障查找及处理。目前，基于简单阈值法、特征量统计的传统故障指示器技术已无法满足现实需求。随着大数据信息处理技术的发展，通过数年的研究与实践，本书提出一种新型配电网在线实时监测与故障诊断技术，实现更为科学的配电网运行状态监测、故障隐患预警、故障识别及定位。

本书的编制基于广东电网有限责任公司电力科学研究院余南华博士主持的一项中国南方电网有限公司重点科技项目，并经过2011年2月~2013年12月为期三年的项目研究，以及在广东、广西、云南等多个供电局的试点实践，完成了一种基于暂态录波技术的配电网架空线在线录波监测器的研制与定型，在国家电网公司区

域称为暂态录波型故障指示器，在中国南方电网有限公司区域命名暂未统一，本书一律称为在线录波监测器；同时还完成了一系列关于各类故障的在线分析与诊断方法。

根据配电网线路特点 [见第 1、2 章，由广东电网有限责任公司电力科学研究院（简称广东电科院）、广西电网有限责任公司电力科学研究院（简称广西电科院）编制]，围绕配电网运行状态监测与故障诊断技术，从配电网在线录波监测器的开发（第 3 章，由北京映翰通网络科技股份有限公司、广州思泰信息技术有限公司联合编制）及配电网线路运行数据处理（第 4 章，由广州思泰信息技术有限公司、广东电网有限责任公司电力科学研究院、科大智能科技股份有限公司、武汉大学、汇网电气有限公司、广州航海学院联合编制）等角度进行了介绍与总结。首次提出建立基于配网运行信号特征基因库的配电网故障诊断专家系统 [第 5 章，由广东电科院、广西电科院、IBM 中国研究院，以及多个供电局（惠州、清远、东莞、佛山、肇庆、云浮、河源、江门、中山、茂名、汕头、湛江、桂林、北海、瑞丽、玉溪）联合编制]，并介绍了其现场应用效果。最后，对配电网在线监测及故障诊断技术的发展方向进行了展望（第 6 章，由广东电科院负责编制）。另外，本书简要介绍了常用的电力系统仿真工具（附录）。

本书由本书主编召集编制并执笔，并由广西电科院高立克高级工程师、北京映翰通网络科技股份有限公司唐先武博士、张建良博士，广州思泰信息技术有限公司技术顾问、广东电科院博士后、广州航海学院李瑞副教授，武汉大学杨军副教授，科大智能科技股份有限公司陶维青总工以及 IBM 中国研究院吕新杰博士在百忙之中积极参与编写，体现出他们严谨认真的学术态度。

本书旨在抛砖引玉，为配电网在线监测、故障诊断技术领域 的研究学者，以及从事智能配电网相关工作的人员提供参考。鉴于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。



目 录

序
前言

1	概述	1
1.1	配电网故障定位技术现状	2
1.2	配电网故障数据采集技术现状	3
1.3	配电网故障诊断技术现状	4
1.4	配电网运行信号录波与故障诊断技术的提出	6
2	配电网系统及构成	8
2.1	配电网设备	8
2.2	配电网典型网络结构	10
2.3	配电网自动化系统	14
2.4	配电网通信技术	25
3	配电网在线录波监测技术	31
3.1	馈线远方终端 FTU	32
3.2	配电网线路故障指示器	35
3.3	配电网在线录波监测器的研制	41
4	配电网线路运行数据处理	56
4.1	信息处理技术概述	56
4.2	配电网故障数据处理	61
5	配电网线路故障诊断技术	79
5.1	常用的故障诊断分析方法	80
5.2	基于改进矩阵运算的故障诊断技术	83
5.3	基于相关分析的故障诊断技术	87
5.4	基于运行信号特征基因库的故障诊断技术	91

5.5	专家系统在配电网故障诊断中的应用综述	124
5.6	配电网故障诊断专家系统的开发及应用	129
6	总结与展望	182
6.1	总结	182
6.2	展望	185
附录 A	配电网仿真	187
A.1	仿真软件概述	187
A.2	PSCAD 软件	189
A.3	PSCAD 配电网仿真	197
参考文献	202



1 概 述

配电网是电力系统的重要组成部分，它直接面向用户，是保证供电质量、提高电网运行效率、创新用户服务的关键环节。随着用电需求量的增长和电力供求市场化的发展趋势，用户对供电可靠性、电能质量的要求不断提高，传统的配电网技术和管理方法已经很难满足配电网安全、优质和经济运行的要求，亟待进一步提升，实现向智能配电网的转变。

智能配电网是智能电网的重要组成部分。目前，我国各地区配电设备水平、配电自动化水平参差不齐，造成配电网网架相对薄弱，还不能够做到配电网优化运行、自愈控制。配电线路是用电负荷变化与输电环节之间的传输介质，在用户侧、配电网线路自身及变电站侧发生的各种情况均导致配电网线路发生不同的工况变化，包括短路、接地、断线、合闸涌流、雷击过电压、大功率负荷投切、过负荷跳闸、负载电源等。到目前为止，配电自动化水平仍无法实现对各种工况的监测和诊断。尽管对于一些特征值变化明显的故障如两相短路故障还能进行判别和诊断，但对于更为复杂的工况如小电流接地故障，当前仍缺乏实用化的技术实现监测，更无法实施诊断分析。其基本原因如下：

(1) 配电网线路点多面广，环境工况恶劣，当前缺乏实用性强的数据采集装置，难以实现较为广域的信息化。如 10kV 架空线往往架设于广大农村、郊区或城郊结合处，通信条件难以保障，光纤敷设造价高且难以施工；现场供电电源难以获取，常规技术如 TA/TV 取电成本过高；一些典型技术如安装配网自动化馈线终端 DTU (distribution terminal unit, 配电远方终端)/FTU (feeder terminal unit, 馈线远方终端) 等，因施工停电问题、投资成本问题，也难以实现大面积建设。



(2) 一些复杂工况如小电流接地故障的瞬间变化迅速,特征量变化不明显,导致低频的数据采集设备如故障指示器难以捕捉其暂态信息,难以获得这些工况的完善数据信息,因而无法实现正确的诊断与分析。

(3) 长期以来,配电网线路故障处理技术以故障选线、故障定位、故障隔离等技术为主,这些技术都局限于其应用环境,在以“二遥(遥信、遥测)”“三遥(遥信、遥测、遥控)”为特征的配电网自动化技术已基本能够实现故障后的区段定位、隔离及分析,但仍然无法满足线路面临的各种工况动态变化分析和故障诊断的需要。

1.1 配电网故障定位技术现状

配电网密布于城乡及山区,终年处于户外,经受风雨冰霜、雷电及日益严酷的环境污染等恶劣环境影响,加上不可预测的人为因素,发生故障的概率很高,尤其是架空线路。统计数据表明,电网的故障大多发生在配电网,而配电网故障中80%是单相接地故障。所以配电网运行中的故障选线、故障巡查、故障排除,是供电企业面临的常见又重要的生产管理工作。目前,国内线路故障定位多采用故障指示器技术和故障选线技术。

(1) 故障指示器技术。故障指示器技术的工作原理是当线路某处发生故障时,在电源到故障点之间会流过故障电流,而故障点之后则没有故障电流。故障指示器在检测到故障电流信号后就会进行就地闪灯或翻牌指示,这样在故障点到电源之间的故障指示器会指示故障,而故障点之后的故障指示器则不会指示故障,据此指示和未指示之间即是发生故障的区段。故障指示器按功能分为就地型和通信型两种:前者依靠就地数据采集和就地判断,指示器能够发出相应翻牌、闪灯等指示;后者在此基础上,能够依靠配套的通信终端将就地诊断的结论、采集的数据远传至后台主站供分析诊断。故障指示器现场运行时间长、可靠性高,对于短路故障判断准确率高,可以用较低的成本实现配电网故障定位,批量安装故障指示器是一

种实用的配电自动化方案。现阶段故障指示器主要利用单相电流信号检测故障，采集的电流信号采样率低、准确度低，缺乏对接地故障发生时刻的暂态电流信号分析，对于接地故障，特别是小电流接地配电网接地故障识别准确率较低。而中国的配电网特别是架空线配电网，大部分都是小电流接地配电网，发生的故障大多数为接地故障，使得故障指示器的应用存在一定局限性。

(2) 故障选线技术。配电网故障选线技术主要针对故障所在线路进行分析诊断，目前已基本发展成熟，确定故障线路准确率较高。现有故障选线原理按照利用信号方式的不同，可以分为基于稳态量的选线方法和基于暂态量的选线方法。大多数故障选线系统尚未具备线路故障定位功能，部分选线系统通过与故障指示器配合，能够在故障发生后实现一定准确率的定位诊断。

电力系统的故障诊断总体上是一个执果索因、逐步求精的过程，考虑到故障信息的分层特性及实时性的要求，依据“大胆假设，小心求证，分层诊断”的思想，采用正反向混合推理的控制策略，进行故障元件以及故障类别的判断。配电网运行过程中，合闸涌流、过负荷、雷击、瞬时故障、盗电等引起电流、电压等重要参数的运行信号曲线变化，蕴含着众多的因素，这些因素能体现此时电网的运行状态。因此，通过对收集的大量配电网运行状态数据进行分析处理和分类识别，可统计出各种特征类型故障的发生情况，以掌握电网的运行状况，提高对配电网的故障诊断能力。

1.2 配电网故障数据采集技术现状

配电网线路发生故障后，相关的数据采集主要体现为以下 3 个方面：

(1) 电网能量调度管理系统(energy management system, EMS)的数据采集。变电站的电力系统自动故障录波装置记录变电站各 10kV 出线因短路故障、系统振荡、频率崩溃、电压崩溃等大扰动引起的系统电流、电压及其导出量，如有功功率、无功功率及系统



频率变化的全过程。同时，随着微机和通信技术的引入，各个厂站以及输出馈线的故障录波装置的信息能够实时送达电网调度端(EMS)。

(2) 配电网自动化主站系统(distribution automation system, DAS)的数据采集。配电网发生故障时，变电站采集出线母线电压、电流等电气量的变化，同时采集保护装置判断故障发生后的保护动作信息或报警信息，以及保护跳开响应开关的动作信息。随着近些年配电网自动化技术的大力发展与推广应用，装备配电网自动化装置的线路能够通过不同位置的配电终端记录上述信息并传送给配电网主站，为配电网故障诊断提供充足的信息源。这些信息源可分为测控信息、保护信息及录波信息3类。

(3) 配电管理系统(distribution management system, DMS)的数据采集。主要针对变电到用电过程进行监视、控制、管理的数据进行收集，包括配电自动化、地理信息系统、配电网网络重构、配电网信息管理系统、需求侧管理等。

(4) 故障指示器故障定位系统(fault location system, FLS)的数据采集。就地型故障指示器采集的电流数据供装置内置逻辑模块进行就地分析诊断；通信型故障指示器对采集的电流数据就地诊断后，将诊断结论及电流有效值等简单数据远传至后台主站。由于故障指示器所采集的数据为较简单的低频间歇性数据(如每15min采集1组数据)，难以记录故障发生过程前后的暂态特征信息，影响故障指示器正确诊断许多快变及暂态性工况，如小电流接地故障、大负荷启动等，很容易造成误判和错判，成为故障指示器用途受限的关键原因。

1.3 配电网故障诊断技术现状

实现配电网线路故障定位、故障类型识别及故障发生前隐患的智能分析，是开展配电网故障诊断技术的理想目标。从配电网故障数据的采集技术现状可知，通过EMS可以获取变电站低压配电母

线网出线的各类保护装置产生的报警信息、断路器的状态变化信息以及电压、电流等电气量录波数据；通过 DAS 可以获取配电自动化系统各处安装的配电自动化终端采集的各类电气量测量数据，当前绝大部分终端采集的数据为间歇性采集断点数据（如时间间隔为 5min/次）；通过故障指示器可以获取线路各处的电流数据及所触发的故障诊断信息。不同数据采集的信息具有不同的作用范畴，具体可归纳如下：

（1）由于通信条件的不同，变电站以光纤为通信介质，采用专用数据网传输，故数据采集具有很完整的信息特征，如高频录波波形。

（2）根据具体条件不同，配电终端可部分采用光纤传输，部分采用无线公网通信。前者采集的信息具有很完整的信息特征，后者采集的信息往往受限于资费及通信速率而缺乏完整性。

（3）对于故障指示器而言，其数据采集局限于就地采集、就地分析诊断，其信息以一周波的有效值为核心，与全过程的录波数据相比，无疑是无法实现较为复杂故障的诊断的。

综上所述，配电网故障的诊断离不开数据采集的信息完备性。在配网自动化建设进入蓬勃发展的今天，配电网自动化程度日益提高，配电终端部署范围越来越宽阔，信息化为故障诊断提供了有力的支持。然而，由于配电网网架分散、联结复杂、投资成本高、通信条件差以及运维工作量大等因素，导致配电网自动化建设难以一蹴而就，更难以实现全面推广。因此，在人口密度低、城市化程度不高的郊区及农村，甚至部分城区都难以实现配网自动化。对于实现更为理想的故障诊断技术而言，研究成本不高、信息完备、分析功能强的故障诊断技术，成为许多业内学者和技术开发人员的目标，也是本书的重要内容。

现代化的电网故障诊断系统，应充分利用整个电力系统时间上和空间上分布的广域信息，不仅能在电网发生故障时快速准确地判断故障，给出可靠的故障原因以及二次设备和各种自动装置的动作评价结果，而且还能对电网的异常情况进行识别，从而为故障恢复处理创造更有利的条件。



1.4 配电网运行信号录波与故障诊断技术的提出

近年来,基于现代电子、通信和计算机等技术和装备发展的配电网自动化技术得到了长足发展,遥信、遥测及遥控功能逐渐完善,不仅能在正常运行和事故情况下对配电网进行实时监控和自动化保护,提高供电质量,而且为建立系统的大数据平台提供了技术支撑。在此基础上,基于大数据平台的配电网故障诊断系统的研究在国内外受到了广泛关注,并取得了相关研究成果。综合国内外配电网故障诊断系统的发展现状,配电网故障诊断的研究还需要关注以下几个方面的问题:

(1) 信息源的数据庞大但不完善。随着我国配电网数字化和信息化进程的加快以及各类自动终端装置的安装,在系统发生故障时,将有大量的报警数据在短时间内上报配网主站,如故障录波数据、保护装置报警、开关跳闸数据等。这些数据数量庞大,蕴涵故障信息丰富,有利于结合多种数据进行配电网故障的诊断,但需要做好不同数据的融合及异常数据的筛选工作。目前在线采集的数据多为馈线主线数据,馈线支线多缺乏在线监测设备。对于复杂的配电网结构来说,传统诊断方案往往只能给出粗略的故障区域。如何合理布局配网监测设备,完善配电网信息采集,提高配网故障诊断的精度和准确度,是摆在研究者面前的一个课题。

(2) 故障诊断的范围和故障特征不明确。配电网运行过程中,合闸涌流、过负荷、雷击、瞬时故障、盗电等引起电流、电压等重要参数的运行信号曲线变化,蕴含着众多的因素,这些因素能体现此时电网的运行状态。目前,各类研究对配电网故障诊断范围还不统一,对故障状态的分类还不明确,对正常运行状态和不同故障状态对应的特征量和内在因素还缺乏系统性研究。有必要对大量的配电网运行数据进行分析处理和分类识别,形成一套配电网运行的特征基因库,为将来进行故障模式判断、故障建模、故障系统分析提供强大的数据支持。

(3) 智能故障诊断系统的实现化问题。智能技术的应用是配电网故障诊断的一个趋势,采用多种智能算法来实现配电网故障诊断是配电网故障诊断研究的发展趋势。配电网故障诊断是一个多层次、多类型问题的求解过程,需要综合利用多个信息系统的数据库,特别是 SCADA(数据采集与监视控制)系统的数据库。因此,在构建智能故障诊断专家系统时,要考虑通信、数据采集、数据特征提取、特征基因库的设计、智能算法的选取以及与其他系统的接口等多方面的问题。研究专家系统和人工神经网络等人工智能技术与方法在配电网故障诊断中的应用,建造一个基于 SCADA 系统的配电网故障诊断专家系统,对调度员处理故障是一个有力的辅助工具,可起到缩短故障处理时间、阻止故障扩大的作用,保证电力系统的稳定运行。

本书所述配电网智能诊断系统以自动化信息为基础,结合了故障录波、保护报警、开关跳闸等多种数据,通过智能算法实现对配电网故障的快速定位和判别,是实现配电网自愈的主要方法,是智能配电网的重要组成部分。配电网智能诊断系统实现与电力系统各个环节的协调和优化运行以及故障情况下的快速定位、隔离、恢复,从而为用户提供优质可靠的电能。