



国家电网公司
电力科技著作出版项目

继电保护系统 状态诊断及维修决策方法

Methods of
Condition Diagnosis and Maintenance Decision
for **Protection System**

熊小伏 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

继电保护系统 状态诊断及维修决策方法

Methods of
Condition Diagnosis and Maintenance Decision
for Protection System

熊小伏 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

继电保护系统是由继电保护本体装置、传感器、信号连接设备、通信系统、工作电源等多个设备、器件构成的整体,任一环节的失效均可能导致保护系统的失效或功能异常。提升继电保护系统的运维水平必须从完善继电保护系统在线状态诊断和基于运行统计的保护装置可靠性评估两个方面同时进行。本书根据作者多年在继电保护方向的理论研究、设备开发及运维技术研究等方面的工作积累,结合智能变电站技术发展趋势,对继电保护系统的状态诊断及维修决策方法进行了论述。

本书分为6章,主要介绍智能变电站继电保护状态诊断系统体系架构,智能变电站继电保护关键环节故障诊断,基于扰动激励响应的继电保护系统隐藏故障诊断方法,智能变电站环境下的继电保护系统失效重构方法,继电保护系统可靠性模型及维修决策方法,计及一次系统风险的继电保护状态维修策略。

本书可作为电力系统继电保护领域的工程技术人员和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

继电保护系统状态诊断及维修决策方法/熊小伏著. —北京:中国电力出版社,2017.1
ISBN 978-7-5198-0353-7

I. ①继… II. ①熊… III. ①继电保护装置-检修 IV. ①TM774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 032707 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:雷 锦 牛梦洁(010-63412530)

责任校对:太兴华

装帧设计:张 娟

责任印制:吴 迪

印 刷:汇鑫印务有限公司

版 次:2017年1月第一版

印 次:2017年1月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:11.75

字 数:149千字

定 价:47.00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

9585805105

前言

电力系统继电保护装置及其传感器、信号传输通道、工作电源等构成的二次系统是保障电力系统运行安全的重要装备。当电力一次系统出现异常运行、设备故障时,要依赖继电保护装置识别异常或故障,实现报警和故障元件隔离功能。当继电保护装置失效时,一次系统这些异常或故障后果可能被放大,导致设备损坏甚至电力系统瓦解。运行经验表明,世界上的电网大停电事故往往与继电保护装置的不正确动作行为有关。因此,如何保证继电保护装置或系统的完好性、使继电保护装置随时处于正确的工作状态,是电力系统设备运维领域必须攻克的关键技术之一。

随着继电保护装置的数字化、智能化、信息获取的广域化,继电保护装置识别故障的能力得到了很大提升,装置的可靠性水平和运行寿命指标也得到了相应提高。在继电保护装置的设计、制造过程中,还考虑了较为完善的装置自诊断功能,为继电保护设备运维提供了方便。微机继电保护装置从设计之初十分注重自身的可靠性,采取了多种措施避免因自身失效导致错误发送跳闸命令,保障了其安全运行。但遗憾的是,微机继电保护装置的设计对运维需求的考虑较少,继电保护装置具有黑箱特点,电力系统在设备入网检测中主要考查其保护功能、环境适应性等指标,在相关标准中也未就装置的运维要求做出完善的规定。

由于继电保护是一个由多个环节组成的系统,单个装置的完好并不能代表整体系统状态正常。例如继电保护装置作为一个信号处理设备,难以对输入信号的正确性做出判断,因此当传感器或信号输入回路出现故障时,保护装置可能会给出错误的输出。由此可见,要保障继电保护系统的正常工作,必须站在继电保护整体系统的角度来构建在线监视及相关运维

技术体系。

电力系统继电保护系统的运行实践表明，继电保护系统硬件、软件或辅助系统可能存在缺陷，而在线监视和运维技术尚不完善，不能及时发现这些隐藏故障。这些隐藏故障在平时并不表现出来，而是在一次系统故障或扰动情况下才导致保护误动或拒动。由此引发的一次设备烧损、停电范围扩大的事故仍无法杜绝。

目前，继电保护设备的隐患排查、元器件更换还需要依赖定期巡视、定期试验来保障，因此需要耗费大量的人力物力，同时还需要停运一次设备后让保护装置处于离线状态来进行试验。在这种情况下，继电保护设备的定期检验周期就是一个关键的因素了。定检周期过长，继电保护的缺陷得不到及时发现和处置，一次系统的风险加大；定检周期过短，则造成一次系统停运次数增多，一次系统可靠性指标降低。同时，定检周期越短，人力物力资源的消耗越大，影响电网企业的运营效益。因此，如何确定最佳的定期检验周期是继电保护运维技术的另一重大需求。

由上可见，提升继电保护系统的运维水平必须从完善继电保护系统在线状态监视和基于运行统计的设备状态评估两个方面同时进行。在线状态监视目的在于发现继电保护系统内部存在的隐藏故障，而基于运行统计的设备状态评估则是为了获取保护装置或部件的状态指标从而确定维修时间。

智能变电站技术的发展，为完善继电保护系统的状态监测和智能运维提供了前所未有的机会。一方面智能变电站各设备之间的信息交互具有标准化的信息模型；另一方面，基于网络的信息传递方式为状态监测系统的信息获取提供了方便。实现智能变电站二次系统状态监测无需过多的设备投入和复杂的信号连接，更多的是构建信息处理方法。

作者有幸伴随我国改革开放的历程，参与了微机继电保护装置的研究与技术开发工作；2007年以来又与电网公司一道开展了智能变电站二次

系统状态诊断技术的研究，在多座智能变电站保护系统中开展了状态诊断工程实验，在理论和实践方面积累了一些体会。作者深刻认识到，尽管继电保护装置自身具有较强的信号处理能力，但装置的自检不能代替系统的监视；继电保护系统不仅要原理先进，还需要运维的智能。继电保护运维技术的完善与标准化将是继电保护技术体系中不可缺少的组成部分。

过去几年，学术界和电力行业也对继电保护系统特别是智能变电站二次系统的状态诊断给予了高度关注，促进了本领域理论与技术的快速发展；在智能变电站工程应用中，从网络报文分析装置到站域后备保护，无不反映了广大学者和工程技术专家对继电保护二次系统安全运行的重视和推广实用化措施的急迫。

为推动本方向的技术发展，受国家电网公司资助，在此将作者的一些思考和研究成果编写成此书供继电保护领域的工程技术人员、研究生等参考，力求为继电保护系统运维技术带来一些有益的启发，为提升电力系统的安全水平发挥作用。

本书以智能变电站继电保护系统状态诊断技术为重点，围绕继电保护系统隐藏故障诊断及状态评价方法进行介绍，结合智能变电站的体系架构、信息特点，论述智能变电站继电保护系统状态诊断的构建方法；从影响继电保护动作安全性的测量回路出发给出隐藏故障的诊断方法，由此可以看到，智能变电站的跨间隔信息应用可以获得意想不到的好处；电力系统扰动是对继电保护系统实战状态下的最好考验，基于站间信息可以在线分析保护装置的反应行为是否正确。为此，本书给出了检验扰动情况下保护系统动作行为的分析模型。

继电保护装置能否长期稳定运行直接关系到电力用户的安全与经济性。当获得多年的运维数据后，评价继电保护系统的可靠性必须建立在科学的数学模型上。本书给出了继电保护系统不同配置模式下的可靠性分析模型，可用于分析继电保护系统的可靠性指标。此外，继电保护系统的维

修决策将直接关系到是否停运一次设备问题，直接影响到一次系统的风险水平。书中给出了综合考虑一次系统、二次系统协调及考虑不同外部因素（例如气象因素）下的维修决策模型，为更科学地建立二次系统的维修决策体系提供了参考。

本书绪论总结了国内外在电网故障诊断和继电保护安全运行保障方面的理论和技术方法，对各种方法进行评价，分析各种方法的适应性和局限性。

在此基础上，第1章从智能变电站的体系架构入手，比较传统变电站和智能变电站的区别，分析智能变电站继电保护的新特征。从智能变电站信息结构出发，提出通过获取SV网、GOOSE网、MMS网数据的智能变电站故障诊断系统结构。进一步阐明继电保护传感器环节、保护装置、命令出口环节故障诊断的数据流模式。对继电保护隐藏故障诊断所需数据的预处理技术进行了分析，给出了数据预处理的方法。

运行经验表明，继电保护系统中不同环节出现隐藏故障的概率不一样，且不同类型的隐藏故障所造成的后果的严重程度也不相同。第2章分析智能变电站继电保护各环节故障模式，对关键环节之一的保护电流测量回路的隐藏故障诊断方法进行深入研究，提出测量回路广义变比的概念，并基于变电站母线的电流约束，建立广义变比的状态矩阵，通过获取二次回路电流量测及求解广义变比状态矩阵，实现对连接在母线上的各间隔回路的保护电流测量值可信度的判断，由此监视保护电流测量回路的硬件及软件是否存在隐藏故障。智能变电站中的电子互感器是决定保护装置能否正确动作的另一关键环节。本书还针对电子互感器在保护系统中的作用，提出一种电子互感器的故障诊断方法，并给出算例，验证所提方法的有效性。

继电保护能否在电网故障时正确动作，其在电网扰动过程中的动态反应行为十分关键。但在已有的研究中，由于难于获取继电保护的动态数据

而难以对这一过程中的保护行为进行科学的评判。此外，电力系统扰动引起的多个变电站保护启动及由此所产生的大量信息未能用于保护的隐藏故障分析。针对这一现状，第3章提出充分利用扰动激励下不同地域变电站继电保护所产生的广域大数据同步进行继电保护状态分析的思想，可以方便地发现各个保护在同一激励下的反应灵敏性、可靠性及保护之间的配合关系是存在隐藏故障。为了实现这一思想，必须解决大数据的精简问题并构建合适的指标体系。通过对继电保护状态区域的划分，分别构建表征故障启动、故障测量和故障反应时间的指标模型，提出从保护的可靠性、选择性、灵敏性和快速性要求出发建立的多个继电保护隐藏故障诊断与运行状态评估方法。所提方法能够直观反应继电保护系统的动态过程，反映单个保护及多个保护之间的测量和定值正确性，也为提升广域保护的可靠性提供了新的思路。

智能变电站的体系架构为继电保护的逻辑开放和硬件标准化提供了可能。在继电保护装置失效情况下，利用保护系统的硬件冗余，在线实现继电保护系统的功能重构，是作者提出的一个新概念。第4章分析电力系统对继电保护系统重构的潜在需求，提出继电保护系统失效重构的通用模型；提出继电保护系统重构的四个准则。再以广域保护通信系统失效为例，根据所提出的可靠性准则，论述广域通信网络失效重构的数学模型及求解过程，证明保护系统重构的可行性。

为了较准确地获得保护装置的定期检验周期，评价继电保护系统的长期工作性能，需要建立基于统计观察的继电保护装置可靠性模型。第5章介绍继电保护系统不同配置模式下的可靠性模型构建方法，即通过列写状态空间的方法建立其可靠性模型。继电保护装置在维修或试验时往往会失去对一次设备的保护作用，因此希望找到对一次系统造成影响最小的维修时刻。而电力一次系统运行实践表明，其在恶劣气象条件下更容易发生故障，个别地区因气象因素造成的输电线路故障比例高达70%以上。因此

选择继电保护的维修时刻应避开一次设备的高风险时段，或在一次设备高风险来临之前完成保护设备的维修工作。

第6章有针对性地研究了考虑气象影响的继电保护维修决策方法。

作者的研究生陈飞、欧阳前方、刘晓放、夏莹、侯艾君、陈星田、曾星星、王建等参与了本方向的科研工作，为本书内容做出了辛勤努力和贡献；国家电网公司为本书的出版提供了资助，国家自然科学基金委、重庆市科委、重庆电力科学研究院等单位资助了本方向的研究，作者在此真诚感谢他们的支持和帮助！

由于作者水平所限，书中不当之处在所难免，欢迎读者给予批评指正。

熊小伏

二〇一六年十二月于重庆大学

目 录

前言

绪论	1
0.1 背景	3
0.2 继电保护隐藏故障诊断与状态评价研究现状	6
0.2.1 现有故障诊断方法	6
0.2.2 变电站继电保护设备状态分析及评价	9
0.2.3 智能变电站继电保护系统的安全运行技术	15
0.3 本书内容与章节安排	18

1 智能变电站继电保护状态诊断系统体系架构	21
1.1 引言	23
1.2 智能变电站体系架构及继电保护特征	24
1.2.1 智能变电站体系架构	24
1.2.2 传统变电站和智能变电站的比较	26
1.2.3 智能变电站继电保护特征	28
1.3 智能变电站继电保护故障诊断体系架构	29
1.3.1 智能变电站继电保护故障诊断系统结构	29
1.3.2 基于数据流分析的继电保护隐藏故障诊断原理	32
1.3.3 基于单站信息和多站广域信息的智能变电站继电保护 故障诊断结构	34
1.4 智能变电站继电保护故障诊断信息预处理方法	36
1.4.1 智能变电站继电保护隐藏故障诊断数据预处理方法	36

1.4.2	智能变电站数据预处理实现方法	42
1.5	本章小结	44
2	智能变电站继电保护关键环节故障诊断	45
2.1	引言	47
2.2	继电保护系统的关键环节	48
2.2.1	继电保护系统的构成	48
2.2.2	继电保护的关键环节及其隐藏故障诊断研究现状	48
2.3	继电保护电流测量回路分析	51
2.3.1	电流测量回路广义变比	51
2.3.2	电流测量回路故障分析	53
2.3.3	电流测量回路误差模型	54
2.4	基于广义变比辨识的电流测量回路故障诊断	55
2.4.1	电流测量回路广义变比的辨识方法	55
2.4.2	电流测量回路故障判别	58
2.4.3	算例分析	60
2.5	基于小波变换的电子式互感器突变型故障诊断方法	63
2.5.1	电子式互感器突变故障诊断原理	64
2.5.2	电子式互感信号的小波处理方法	67
2.5.3	仿真分析	68
2.6	本章小结	70
3	基于扰动激励响应的继电保护系统隐藏故障诊断方法	73
3.1	引言	75
3.2	基于扰动激励响应的继电保护状态分区及隐藏故障 识别原理	76

3.3	基于扰动激励响应数据的继电保护故障诊断指标·····	82
3.4	基于扰动激励指标数据的继电保护故障诊断与运行状态 评价方法·····	86
3.4.1	继电保护系统可靠性评价·····	86
3.4.2	继电保护系统快速性评价·····	87
3.4.3	继电保护系统选择性评价·····	89
3.4.4	继电保护系统灵敏性评价·····	89
3.4.5	跳闸回路完好性评价·····	90
3.5	仿真算例·····	91
3.6	本章小结·····	97

4 智能变电站环境下的继电保护系统失效重构方法 ····· 99

4.1	引言·····	101
4.2	继电保护系统重构原理·····	102
4.2.1	继电保护系统在线重构的需求·····	102
4.2.2	继电保护系统重构通用模型·····	104
4.2.3	继电保护系统的重构准则·····	105
4.3	保护功能失效重构·····	106
4.3.1	共享备用保护单元·····	107
4.3.2	互感器回路故障的软后备(SB)方案·····	108
4.3.3	实现两种技术方案的关键技术·····	109
4.3.4	备用功能切换过程数据流延时特性仿真·····	112
4.4	广域保护通信系统失效重构·····	115
4.4.1	广域保护实时通信系统·····	115
4.4.2	广域保护通信网络拓扑结构及其失效模式·····	118
4.4.3	广域保护信息传输路径重构模型·····	119

4.4.4 路径重构模型的求解与算例分析	121
4.5 本章小结	123

5 继电保护系统可靠性模型及维修决策方法 125

5.1 引言	127
5.2 继电保护系统可靠性模型的状态空间图	128
5.3 不同配置方案的继电保护系统可靠性分析	130
5.3.1 两套主保护情况	130
5.3.2 2套主保护及1套近后备保护情况	131
5.3.3 2套主保护及1套远、近后备保护情况	132
5.3.4 继电保护系统可靠性分析算例	134
5.4 继电保护检修决策方法	136
5.4.1 检修级别定义	138
5.4.2 状态转移途径及转移率分析	139
5.4.3 检修决策判据	141
5.5 算例分析	142
5.6 本章小结	144

6 计及一次系统风险的继电保护状态维修策略 147

6.1 引言	149
6.2 气象条件对电力系统设备运行状况的影响	149
6.3 继电保护维修与一次设备的关系	152
6.4 计及气象条件的继电保护装置维修风险分析	152
6.4.1 风险指标	152
6.4.2 未考虑气象因素的可靠性参数	153
6.4.3 计及不同气象因素的继电保护装置维修风险分析	153

6.4.4 基于不同气象阶段的继电保护装置维修风险分析 155

6.5 算例分析 157

6.6 本章小结 161

参考文献..... 163

绪 论

0.1 背 景

继电保护是电力系统安全运行的重要保障,要求能够在一次系统处于任何状态时都能够具有很好的适应性,在一次系统故障或异常时能够按预定的保护范围快速、可靠地切除故障或发出信号。继电保护系统由硬件装置、软件、数据通信装置、互感器、出口操作回路、工作电源等部分组成。继电保护装置是继电保护系统中的一个组成部分。继电保护系统要正确地发挥作用,必须保证各环节都处于正常工作状态。然而遗憾的是,到目前为止,继电保护系统尚不能做到百分之百的正确动作。

电力系统的重大安全事故原因分析表明,继电保护的拒动、误动仍是主要因素之一。继电保护的错误动作可能造成的大面积停电,给电力系统安全运行带来了巨大的挑战。多年来的继电保护运行实践表明,因继电保护系统的硬件(含所有回路)故障及缺陷、软件缺陷、整定错误等导致的不正确动作事件时有发生。北美电力可靠性协会(NERC)在对1988~1996年电网重大事故的分析报告中指出,约70%的N-2停运事件是由继电保护的误动造成^[1]。

在造成继电保护错误动作的原因中,隐藏故障是主要原因之一。继电保护隐藏故障是潜伏在继电保护系统中的缺陷,会在一定条件触发下导致继电保护装置误动或者拒动,其直接后果是被保护元件错误断开或导致故障元件长时间不能从系统中隔离,从而使故障停电区域扩大。继电保护隐藏故障具有威胁性大、隐蔽性高等特点。

尽管制造企业已在产品的硬件质量和硬件自检技术上开展了长期不懈的努力,使继电保护装置本体可靠性得到了很大提高;然而,在软件缺陷识别、装置外部回路缺陷监视等方面仍研究不足,可采用的技术手段有限。此外,继电保护装置的老化及其后果方面的研究还十分欠缺,继电保