



电力科技专著出版资金资助项目



INNOVATIONS IN POWER SYSTEMS RELIABILITY

电力系统 可靠性新技术

George Anders Alfredo Vaccaro 合编
周孝信 李柏青 沈 力 等译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



电力科技专著出版资金资助项目

INNOVATIONS IN POWER SYSTEMS RELIABILITY

电力系统 可靠性新技术

George Anders Alfredo Vaccaro 合编
周孝信 李柏青 沈 力 等译



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从“在优化资源利用的同时满足不断增长的用电需求”的观点出发,介绍了平衡资源分配、电网可靠性的新方法。全书分为10章,主要内容包括电网可靠性研究技术,电力设备的优化维护策略,现代电力系统元件可靠性模型的数学及物理特性,具有风电接入的电网可靠性,电网中的关键输电线路和变电站,输电扩展规划,市场竞争环境下的系统安全标准经济性评估,基于概率方法的暂态稳定性评估和在线贝叶斯估计,动态安全体系中基于轨迹获取的系统描述更新,数据不确定性的环境下对潮流进行分析的可靠性算法。

本书可供从事电力系统规划、设计、运行的工作人员阅读使用,也可供相关领域科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统可靠性新技术/(波)安德斯(Anders G.), (意)瓦卡罗(Vaccaro A.)编;周孝侯等译. —北京:中国电力出版社, 2014.4

书名原文: Innovations in power systems reliability

ISBN 978-7-5133-4281-1

I. ①电… II. ①安…②瓦…③周… III. ①电力系统-系统可靠性-系统分析 IV. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第066102号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2012-7547号

Translation from English language edition:

Innovations in Power Systems Reliability

by George Anders and Alfredo Vaccaro

ISBN 978-0-85729-087-8

Copyright © 2011, Springer London

Springer London is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年4月第一版 2014年4月北京第一次印刷
710毫米×980毫米 16开本 21.25印张 370千字
印数 0001—3000册 定价 59.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

本书翻译工作组

组 长 周孝信

副组长 李柏青 沈 力

成 员 芦晶晶 孙 璐 荆朝阳 李勤新

宋云亭 安 宁 蔡 靖 白敬强

译者序

20 世纪末至本世纪初,伴随着全球气候变化加剧和传统能源日渐枯竭,一场新的能源革命悄然兴起。以可再生能源逐步替代化石能源,实现可再生能源和核能等清洁能源在一次能源生产和消费中占更大份额,建立可持续发展的能源系统,是这一新能源革命的主要目标。新世纪以来,面对新能源革命的挑战,我国电力系统的发展也面临向下一代的转型并呈现如下趋势:(1) 可再生能源电力发展迅速。我国用 5 年半时间走过了美国、欧洲 15 年的风电发展历程,实现了风电从 200 万 kW 到 5000 万 kW 的跨越。(2) “西电东送、全国联网”进展显著。2011 年已实现包括西藏在内的中国大陆电网互联。(3) 750kV、1000kV 超/特高压交流和 ± 660 kV、 ± 800 kV 超/特高压直流等大容量远距离输电技术取得重大突破。2009 年和 2010 年特高压交流和特高压直流示范工程相继投产,多项特高压直流输电工程将西部丰富的水电和煤电输送到中东部地区。(4) “智能电网”方兴未艾。国家电网公司和中国南方电网有限公司都在多项示范工程的基础上,推出智能电网的建设规划。

国家“十二五”规划纲要提出:“适应大规模跨区输电和新能源发电并网的要求,加快现代电网体系建设,进一步扩大西电东送规模,完善区域主干电网,发展特高压等大容量、高效率、远距离先进输电技术,依托信息、控制和储能等先进技术,推进智能电网建设,切实加强城乡电网建设与改造,增强电网优化配置电力能力和供电可靠性。”

与特高压交直流输电和互联电网的大发展相对应,我国电网的运行特性已经逐步由就地局部特性转变为广域全局特性,呈现出强相关、非线性、复杂化的大系统特点。大型互联电网面临着如下的运行风险:

- (1) 跨区互联电网的安全稳定问题;
- (2) 电网结构、运行方式以及电源类型和分布情况影响电网安全稳定运行;
- (3) 外部自然灾害、并发式电网故障危及电网安全稳定运行;
- (4) 设备跳闸等原因导致电网损失负荷,构成事故或事件;
- (5) 新能源的快速发展带来更多的不确定性因素。

随着国务院《电力安全事故应急处置和调查处理条例》(国务院令第 599 号)的发布,对电力事故风险的掌握和防控的要求更加提高。2009 年,中国电力科

学研究院系统所作为国家电网公司的科研技术支撑单位，配合国家电网公司安全质量监察部进行输电系统可靠性技术的研究工作，为此成立了专门的项目组。在研究过程中项目组成员深刻体会到，无论在管理体制还是技术发展上，我国的可靠性研究与发达国家相比还有一定的差距。特别是在输电系统可靠性的研究分析中，我国现阶段还主要进行可靠性指标统计工作，而欧美等发达国家更侧重于可靠性的预测评估，将电网作为一个整体资产，进行系统的可靠性评价与分析。在统计指标方面，我国现阶段的统计指标亟待进一步扩展丰富。

项目组在工作过程中翻阅了国内关于电力系统可靠性方面的许多专著，发现其出版时间大多较早，对电力系统的近期进展和科技进步成果未能纳入。随着智能电网、电力市场、可再生能源的快速发展，使得电力系统更加复杂多变，不确定因素急剧增加，这使我们感到我国急需一本全面的、系统的、能充分反映现代电力系统可靠性技术的、理论联系实际的著作。我和李柏青所长对项目组提出了向国际发达国家学习，借鉴发达国家的电力系统可靠性分析的经验和教训的要求。

项目组成员在与美国方西公司（eMIT, LLC）总工兼加州理工大学兼职教授荆朝阳博士的交流过程中，得知由国际著名出版社施普林格最新出版的《电力系统可靠性新技术》一书，收录涵盖了一系列可再生能源、智能电网可靠性、安全问题方面的文章。选题均来自于不同国家的著名研究人员、科学家和实际从业者。该书着重关注科技突破和新技术发展方向。

通过研读《电力系统可靠性新技术》，发现该书条理清晰，内容丰富，为读者提供了对电力系统可靠性问题的物理描述、理论表达和评价；讨论了实际工作中有兴趣的问题，并深入探讨了现代电力系统可靠性分析的路线图。该书共分10章，介绍了电网可靠性研究技术，电力设备的优化维护策略，现代电力系统元件可靠性模型的数学及物理特性，具有风电接入的电网可靠性，电网中的关键输电线路和变电站，输电扩展规划：一种使用了优化技术并包括安全标准和不确定性的方法，市场竞争环境下的系统安全标准经济性评估，基于概率方法的暂态稳定性评估和在线贝叶斯估计，动态安全体系中基于轨迹获取的系统描述更新，数据不确定性的环境下对潮流进行分析的可靠性算法。

我希望该书的译本能成为研究可靠性和风险评估技术的科研人员和电力系统工程技术人员的一本很好的参考书，同时也可作为高等院校电力系统专业本科和研究生的教学参考书。

周孝信

2013年11月

作者序

一般而言，电力网络是人类设计的最复杂同时也是最可靠的系统。然而这些大型的互联系统由于电力需求的不断增大、基础设施受限以及经济和环境的限制而越来越难以改善，时常在高负荷的环境下运行。目前电力工业的主要挑战是平衡供电裕量、安全性、电网可靠性、稳定性、经济性、环境效益等之间的关系，在优化资源利用的同时满足不断增长的用电需求。这种优化问题必须同时考虑可靠性判据和稳定裕度。

从上述观点出发，本书收录了涵盖一系列可再生能源、智能电网可靠性、安全问题方面的文章。选题均来自于不同国家的著名研究人员、科学家和实际从业者。本书着重关注科技突破和新技术发展方向，同时亦贯彻分享最新最优秀的做法的宗旨。

本书第一章描述了电网应对提供可靠能量这一挑战的新战略。文章基于现代技术的实际应用，例如使用广域测量系统、先进反馈控制策略、广域图形化技术和符合 IEC 61850 标准的智能操作工具和信息语义学，给出了应对的解决方法，其目标是通过应用全新的信息化设备提供一种易于理解且系统性的、与电网安全可靠判据相一致的思考方式。本章中的某些概念，例如先进信息服务配合用于电力设备在线维护诊断的计算机范式、海量传感器整合数据，将会落实成为未来电网实现可靠、高效和经济运行的工具。

在现今的竞争和二次管理环境中，资产价值和最佳投资策略的确定方法日益受到关注。传统的手段，例如设立维护和替换费用办法已经不能满足管理者或者一线决策者的需求，因此第二章提出了电力设备的优化维护策略。在日益临近的自由市场竞争环境下，每种管理决策都会带来一定的风险。我们需要评估这种风险并采取措施使其最小化，其中需要大量的涵盖经济、贸易风险的技术层面的决策，因此需要采用相应的分析工具来评估大规模的风险。

对于某个电力设备的功能维护问题，下面的问题将会显得更加重要：当选择设备维护的再投资方案时，采用哪种方案能使可靠性达到最高的同时花费的费用最少。决策者使用多种多样的判据来选择最佳投资策略。过去工程师操作电力系统时主要考虑的是设备的可靠性，而并不关注经济层面的影响。然而新经济环境下设备可靠性和费用因素已经变得同等重要，都应该在设备维护和更换时纳入考

虑范围。依据这个原则，人们开发出了合适的数学模型和决策支持工具，来平衡维护、更换新设备和投资之间的关系。

数学模型可以来自于确定性或者概率性的方法。由于维护模型是用于预测未来维护动作的，因此概率性的方法会比确定性的方法更加合适，即使使用这种方法的代价是增加了复杂性并丧失了透明度。基于以上原因，这种方法的应用范围不广。比较简单的基于定期维护间隔的数学模型和较复杂的状态监测（监测时间和规模取决于设备的实际情况）的模型的区别在于，一个是定期维护，而另一个是预测维护。这两种策略相结合可以优化模型参数，例如监测频率和周期使用成本。本章同时通过灵敏度分析和数学体系方法讨论了模型的优化问题。

电力系统设备可靠性模型选择问题的理论和实践的发展使其正成为一个非常活跃的研究领域。在第三章中我们讨论了这个问题。本章主要回顾了最新的主流可靠性模型的基础理论和实际应用情况，同时还介绍了一些在文献中很少见但在作者看来很实用的模型。也包含了对新模型以及改进旧模型的新方法的介绍。本章有实际的例子展示如何选择一个合理的模型。作者着重指出人们需要足够的时间来进行初步分析，以便充分估计在没有足够数据的情况下采用给定模型可能带来的影响。

随后的内容提出模型选择的依据是设备老化过程的物理特征和现象学特征。这些模型用概率的方法管理设备承压和器件老化的过程。作者认为这种在最近的文献中常被称作“间接可靠性评估”的技术可能是实际工程中由于数据的限制而唯一可行的手段，而数据获取受限是现今电力系统的普遍情况。本章同时讨论了纯粹数学模型和正在研究中的设备物理特性两者之间的关系。

完整的电力网络可靠性分析中的一个基础是设备可靠性模型。事实上代表电气设备可靠性特征的数学模型的发展和电力系统可靠性评估技术的发展是密不可分的。电力系统发输电新科技推动了可靠性评估方法的发展。尤其是在大电网系统持续发展和完善的过程中可再生能源越来越被人关注。目前最有前景的新能源是风能，并且全世界范围的政府都承诺在现有电网中发展相当数量的风能发电。在第四章中我们可以看到，风电使用量的不断增加要求对传统电力系统可靠性评估做出修改，将大量的风力发电源纳入考量而重新进行评估。

为了解决上述问题，第四章提出了整合了风电的混合系统充裕度评估的改进方法。混合系统充裕度评估是包含了具体发输电模型的复杂课题。目前风电成为一种重要电源，然而由于风电和传统电源的较大差别，它的应用给评估混合系统充裕度带来了新的挑战。本章探讨了混合系统充裕度评估的应用范围，以及评估加入风电的系统采用的新技术。文章通过使用两种常见的可靠性测试系统，阐述

了风电的发电机和混合系统充裕度评估建模。所展示的研究使用了连续和非连续的蒙特卡罗模拟，并尝试了将独立和相关联的风力发电机加入两种测试系统中。

大电网可靠性评估的一个目标是确定一个电网基础结构对新加投资的需求程度，第五章讨论了这个问题。管理者〔例如美国的北美电力安全委员会（NERC）〕可能会通过检查设施来确定电网运作中的关键输电线和变电站设备。发电机、输电线和变压器是大型输电系统的主要组成部分，为了保证大电网的高可靠性，上述设备应该维持良好的运行状态。这种高可靠性可以在预算不受限制的前提下达成。然而在很多情况中，预算是有限的，系统所有者需要考虑这些设备的作用而为其设置优先级。这种评级可能涉及大大小小的多个项目，并取决于要达到的目标和每个项目的重要程度。由于电网的配置不同且发电机及负载接入电网的方式不同，发电机和送电设备损耗造成的后果的严重性也不同。

设备评级过程可以帮助企业评估临界设备。有记录的设备识别和定级过程有助于企业修正评估结果。另外，经济和人力资源的缺乏要求可用的资金应投入在能够使整个电网效益最大化的部分。由于以上原因，评级的鲁棒性和准确性就显得尤为重要。这个话题会在第五章中加以讨论。推荐的方法是使用图谱论的思想来为高压电网中的变电站进行评级。这只是找出电网中最关键设施的方法之一。其他方法可能涉及与系统元件可靠性相关的附加信息。在第五章中介绍的对这种思想的扩展无疑是未来研究的主要方向。

讨论完识别电力网络中的关键基础设施的方法后，接下来的问题就是如何加固电网，使得网络能保证满足设计的裕量。输电系统的规划者主要需要关心这个问题。多层次输电系统扩展规划（TEP）的主要目标是确定在何时、何地、如何加固网络，来为顾客提供足够的裕量等级。在有竞争的电力市场中，TEP 是一个复杂的优化问题，它用于保证电力系统在满足预期负荷需求的同时满足安全标准的要求，并使投资、运行和停电费用最小化。这是当客户和监管要求冲突时所能采取的唯一合理的办法。

在一些文献中提到了应对 TEP 挑战的方法，然而，只有少数文献考虑了 TEP 问题的多阶段性。TEP 问题的多阶段性需要考虑多重时期来确定输电设备扩展的可能顺序。解决多阶段性问题时，对某一级可以采用静态分析方法来确定新设备的安装地点。不同于大多数静态规划方法，本章在解决 TEP 问题时考虑了设备扩展的时间表。这种方法不仅可以确定电网中需要新增何种设备及其准确安装地点，还可以确定在计划期内何时新增设备来确保足够的电力供应。最后，以成本值最小为目标函数选择最优的设备扩展计划。

虽然输电设备扩展计划是一个纯粹的系统规划问题，但致力于系统运行研究的学者对于电力系统日常运行的模型也有着浓厚的兴趣。在体制改革的环境下，提高电力市场经济效益成为当前各项研究的焦点。这些研究的主要目的是让人们更深刻地了解市场和系统运作之间的紧密关系。市场收益紧紧依赖于系统运行是这种相关性的重要体现。安全性判据是系统运作的重要指标，它必须得到保障。第七章主要研究了市场运行对系统可靠性的依赖。在这一章中，作者提出一种方法，用兼顾单设备和多设备环境的安全标准函数来量化市场绩效。

这一章研究了系统安全标准与经济学中的安全边际费用的相互作用，并且评估了系统安全预期成本。其中安全边际费用是用来确定安全价格的。文章从实证和理论两方面对问题进行了分析。实证研究探讨了市场参与者的行为对电力市场绩效造成的不利影响；理论研究从另一方面重点分析了系统安全标准对电力市场的影响，从而确定了电力市场的经济效益中哪些损失是不可避免的。

停电本身是随机的，在估计系统安全费用时显然要考虑对停电采取安全控制所需的花费。作者认为在体制改革的环境中，显然需要将市场的绩效量化为能准确体现区域输送运作的系统安全性函数。某个时期内可能会有不同的市场、不同的系统条件，进一步的量化需要考虑这些情况以得到该情况下受影响的范围。解决这一问题的办法之一是成本/效益分析，它考虑到了系统运行成本和预期停电成本。这种做法可能被视为“可靠性价值”概念的实际应用，这显然是市场参与者关注的重点。

能源需求的增长和自由市场的出现意味着现代电力系统的可靠性分析必须考虑到静态系统和动态系统两类极限。第八章讨论了电力系统暂态稳定概率评估的一般方法，总结了有关文献和作者先前的成果。该章的第一部分介绍了系统稳定性概率计算所涉及的基本概念，定义了相关的随机变量（如系统的负载、故障清除时间和临界切除时间等），并研究了分析方法和数值计算方法。然而，这些参数的值是不确定的，本章的讨论表明，忽略这种不确定性可能会导致严重低估系统失稳概率。

然后，本章提出了一种基于贝叶斯统计推理的暂态稳定概率评估方法，并重点讨论了给定系统暂稳概率的点估计和区间估计。贝叶斯方法在这方面是非常有用的，因为影响暂态稳定概率的参数（例如上述随机变量的均值和方差）一般是未知的，必须要估计这个参数。作者还提出了合理描述负载实时变化的系统模型的应用。

第八章的第二部分介绍了新的在线暂态稳定概率统计评估方面的研究。我们的目标是借助先进的建模工具来预测系统是否会失稳定，这个建模工具包括一个

使用了系统负载随机变化的动态线性模型的新贝叶斯方法。

广泛应用的概率暂态稳定分析方法的一个主要缺陷是经典模型的计算效率非常低。作者在本章中讨论了数值研究，结果表明涉及“跟踪”的时变的暂态稳定计算可以加快计算速度。

该报告的结果可能是非常重要的，预计一个负荷和发电都快速大规模变化的现代化自由市场将对系统暂态稳定概率有显著影响。本章的结尾简要分析了评估程序的鲁棒性，结果表明，系统参数分布的假设并不影响其方法的有效性。

为确保系统暂态稳定性的概率分析法的准确和有效，必须有效定义网络参数。从 2003 年停电事件的众多分析报告能得到一个明显的结论：如今在出现大量的新的不确定性的情况下，一些独立国家电网和跨国电网却没有使用足够的实时数据进行管理。用于系统动态监测的可靠实时数据的缺失使得运营方没有足够的时间采取决定性的正确补救措施。很显然，尽管在 2003 年的大停电之后发生了以电力产业重组和电力市场的重新规划为目标的改革，但是电力系统的安全总体上没有发生大的改变，其关键还是缺少系统核心参数的动态数据。

第九章探讨了动态系统的参数估计问题。在本章中作者提出一种优化方法，即使用非线性算法取得参数的估计值。这种方法比较了时域仿真轨迹和在线测量系统，以此来估计动态参数。它的主要优点是在估计同步电机常数、外部等值网络、频率常数和电压依赖性负载的数值时具有较好的灵活性。作者演示了如何将这种方法应用于在线电力系统运行，该方法能提供更可靠的数据库用于实时动态安全控制。事实上，一定频率的更新系统动态模型能保证仿真的可靠性和由此带来的控制的有效性。

最后第十章提出了包含不确定度的可靠性系统潮流分析的改进方法。潮流分析用于确定在指定的负载和发电量情况下电力系统是否稳定，它是电力工程应用（包括网络优化、电压控制、状态估计和市场调查）中使用最广泛的一种工具。

最常见的潮流问题是确定性潮流问题，即在选出的时间断面明确所有的输入数据。同样，分析过程中可以构造一些数据来反映某一负荷峰值预期的生产/负荷曲线。这些方法在某些系统条件下通常可以解决问题。然而，当输入条件不确定时，就需要分析不同情况来涵盖众多方案的不确定性因素。在这种情况下，就需要使用考虑数据不确定性影响的可靠潮流算法。这种可靠潮流估计算法既要能分析输入数据的不确定性，又要使结果在允许的误差范围内。这样，既能考虑不确定性因素，又能提高潮流计算的可信性。

声明：感谢 Dr. Giosuè di Franco 在编辑本书时所提供的富有价值的支持。

目 录

译者序

作者序

第一章 电网可靠性研究技术	1
第一节 引言.....	1
第二节 影响电网可靠性的因素.....	2
第三节 可靠性研究技术基础.....	3
第四节 技术发展方向.....	9
参考文献	10
第二章 电力设备的优化维护策略	12
第一节 优化维护的概念	12
第二节 优化维护的策略	13
第三节 优化维护的目标、方法、粒度	16
第四节 系统维护优化	23
第五节 元件、系统维护优化方法	30
第六节 结论	46
参考文献	48
第三章 现代电力系统元件可靠性模型的数学及物理特性	51
第一节 元件可靠性建模的沿革	53
第二节 直接可靠性评估的建模方法	64
第三节 基于磨损随机过程的寿命概率模型的辨识	75
第四节 物理量对可靠性的影响	97
第五节 算例分析.....	107
参考文献.....	111
第四章 具有风电接入的电网可靠性	124
第一节 风力发电研究.....	125

第二节	风速建模和仿真·····	126
第三节	风力发电机组建模·····	127
第四节	风电机组对电网可靠性的影响·····	130
第五节	含风电的系统可靠性分析·····	132
第六节	结论·····	146
	参考文献·····	147
第五章	电网中的关键输电线路和变电站·····	151
第一节	引言·····	151
第二节	图线性代数·····	153
第三节	大规模电力系统中发电站的重要性级别·····	154
第四节	图划分·····	162
第五节	结论·····	170
	参考文献·····	171
第六章	输电扩展规划：一种使用了优化技术并包括安全标准和 不确定性的方法·····	173
第一节	引言·····	173
第二节	输电扩展规划问题·····	174
第三节	基于元启发式算法的优化方法·····	179
第四节	结果·····	184
第五节	大电网系统·····	191
第六节	结束语·····	195
	参考文献·····	198
第七章	市场竞争环境下的系统安全标准经济性评估·····	201
第一节	引言·····	201
第二节	对系统运行点的市场评估·····	204
第三节	日前市场及相关实时市场的市场表现量化·····	206
第四节	建议对策·····	211
第五节	应用研究：ISO-NE 系统·····	217
第六节	结论·····	229
	参考文献·····	230

第八章 基于概率方法的暂态稳定性评估和在线贝叶斯估计	234
第一节 引言	236
第二节 暂态稳定分析的概率建模	238
第三节 高斯负荷的 IP 评估分析和对数正态分布的 FCT	243
第四节 电力系统暂态稳定的贝叶斯推理	247
第五节 应用于 VST 的 CCT 均值和 IP 的动态贝叶斯估计	256
第六节 贝叶斯递推动态模型的数值应用	260
第七节 一些数值的鲁棒性分析	265
第八节 IP 的分析性研究	270
第九节 高斯模型的贝叶斯点估计	273
第十节 一个使用 Beta 分布的 IP 景气指数	275
第十一节 贝叶斯估计的递归应用	279
参考文献	280
第九章 动态安全体系中基于轨迹获取的系统描述更新	283
第一节 引言	283
第二节 方法和体系结构	285
第三节 测试结果	290
第四节 结论	294
参考文献	295
第十章 数据不确定性的环境下对潮流进行分析的可靠性算法	298
第一节 引言	298
第二节 问题定义	299
第三节 潮流分析中不确定性来源	300
第四节 区间潮流	301
第五节 仿射算术潮流	313
第六节 结论	321
参考文献	322

第一章

电网可靠性研究技术

VahidMadani, Roger L. King

第一节 引言

当我们设想某个电力系统或系统的某个运行状态时，通常期望所研究的对象在一个不确定的条件下能产生一个确定的结果，最好达到或超过某一设想的运行标准，并希望系统能够持续维持在一个稳定的可靠性水平。但通常情况下，系统可靠性水平是不确实的，它有与其相关联的不确定因素。

随着终端用户对能源需求的持续增长及供电质量要求的提高，为其提供持续的、稳定的电力服务日渐成为一个严峻的挑战。现阶段，电网有时会满负荷运行，在一些严重的情况下，甚至会出现停电的现象。图 1-1 展示了北美电力安全委员会（North American Electric Reliability Council, NERC）扰动分析工作组（Disturbance Analysis Working Groups, DAWG）收集的电力系统大规模停电事件的统计数据。在美国，功率损失在 100~1000MW 的停电事件每年大约出现

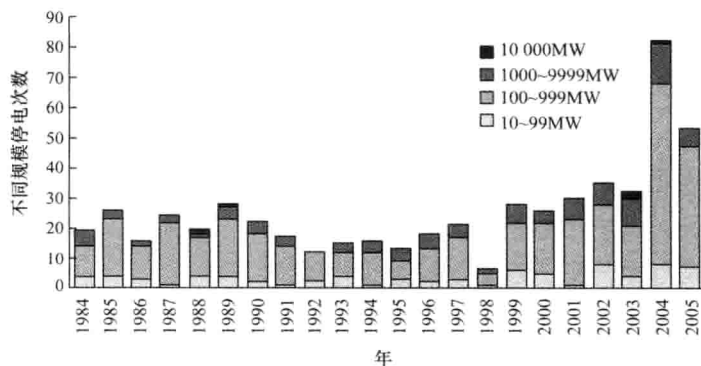


图 1-1 1984~2005 年停电频率（负荷损失超过 10 000MW 的大规格停电相对很少发生，而损失在 100~10 000MW 之间的停电事故较为频繁）

24 次，功率损失在 1000~10 000MW 的停电事件大约出现 5 次，而每 4 年会有 1 次功率损失超过 10 000MW 的大停电^[1]。大范围的停电对于一个国家、地区或世界的某些区域来说并不陌生^[2]，它可能由电力系统网络的自身的设备故障引起，也可能由外力如自然灾害（地震、飓风等）引起，亦或由最近常发生的人为破坏产生的威胁（如网络攻击）引起。

电网在规划设计的时候就考虑到能够通过保护和控制系统来抵御一些单独的或双重的偶发故障事件。在电网事故分析报告中经常使用的措辞是“继电保护装置误动作”。其实，这种表达并不准确。继电保护装置误动作一般包含“拒动”和“误动”两种含义。在一次故障事件中，继电保护装置的误动作可能会对电网的运行和可靠性带来巨大的冲击。在众多大规模停电事故中，继电保护装置误动作往往会扩大事故的影响，甚至使情况更加恶化。

在过去的几年中，如果不是因为未预料到的保护系统的糟糕表现，北美和世界其他地区发生的一些电力事故是可以得到遏制的。通常情况下，保护系统的正常运转性能测试总是在发生紧急事故后或故障以后才进行。在电网遇到干扰时，人们期望保护系统（保护继电器和其相关的继电保护系统）能够保持可靠运行。为确保电网安全、可靠地运行，维持保护系统最大程度的可靠性应最先予以保证。

第二节 影响电网可靠性的因素

在提高电网可靠性的有效措施中，掌握互联电网的复杂性、合理的规划、良好的系统维护和熟练的运行操作是关键要素。电力系统可靠性措施的形成应该从准确的系统建模和对系统优缺点、系统约束条件、预期以及相互作用的分析开始。当前，电力系统需要使用一个多层面多角度的系统方法来定义一系列提高系统可靠性的技术解决方案。这些层面包括：

（1）蓝图：具有明确边界同时又兼具互联的电力网络，以及针对互联电网整体的基础设施和远程通信基础设备的前瞻性解决方案。

（2）电力供应商：单个发电厂和发电公司，以及相关的技术支持公司。

（3）个体因素：能够影响系统的个体因素，如电厂选址、变电站容量、终端用户等。

（4）标准化及开放性的解决方案：逐步趋向系统的使用标准化，并使用开放的解决方案，来支持系统的和谐性、透明性和互用性。

通过上述途径,我们将有能力提供明确、标准的解释以及工作定义,作为负责运行、规划和保护的各类不同部门所使用的常规信息。

广域测量系统(Wide-area Measured Systems, WAMS)(例如同步相量测量)带动了智能电网保护装置和自动恢复装置的技术革新。通信系统基础设施的投资增长和技术进步,使得电力系统保护装置的安全性和可靠性可以得到不断的调整。对电力系统基础理论的研究,进一步提高标准规范,促进数字继电器设备的技术更新,以及运行跟踪记录和分布数据源的进一步发展,也有助于提高可靠性。

充足的发电资源和完备的传输电网是系统可靠并且经济地供给电能的必要组成部分。尽管可靠性和市场经济是由不同的政策和激励来驱动的,但是当系统的目的是可靠性和可得性时,它们就是不可分开的。当前,在产业结构的调整中,对于市场经济和地区化的关注总能影响众多决策,而电网规划要在这样的环境下,将会变得极其艰难。

通过创建一个全维度的方案对电力系统进行整体评估是十分重要的。该方案通过实施多样规划、运行、维护管理,并权衡成本、影响力以及每项措施的风险来实现。

本章融汇电力系统运行和控制系统人员的相关知识及经验,并结合来自不同领域的数据和知识,为提高电网运行可靠性提供了一个设想和路线图。本章的理论形成要归功于一个跨学科的团队:电力、计算机工程、工业和系统的专家,通过跨行业合作发现的研究方法。其中大部分研究成果的准确性和有效性已经被其他文献证实(见文献[3]和其他参考资料)。希望本章提供的新观点能够有启迪作用,从而促进系统可靠性和整个系统表现的提高。

第三节 可靠性研究技术基础

早期的能源管理系统,如数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA),都是通过专门开发的电子通信设备和专业的操作系统来实现的。其只能实现基本功能,如实时数据的采集和处理,而高级计算管理功能几乎没有实际应用。由于近年来实时数据库接口的专利技术的限制,新型的用于电力系统实时数据交换的软件开发受到了制约。专业软件在某些领域的应用,如客户关系管理系统(Customer Relationship Management, CRM)、地理信息系统(Geographic Information Systems, GIS)、配电管理系统(Distribution Management Systems, DMS)、调度管理系统(Outage Management Sys-