

Power System
Operational Reliability Theory

电力系统运行可靠性理论

孙元章 程林 何剑 著

Sun Yuanzhang Cheng lin He Jian

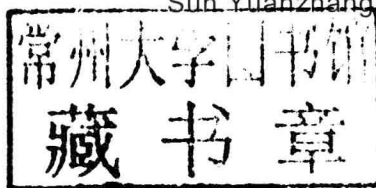
清华大学出版社

Power System Operational Reliability Theory

电力系统运行可靠性理论

孙元章 程林 何剑 著

Sun Yuanzhang Cheng lin He Jian



7111582

清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电力系统运行可靠性理论/孙元章,程林,何剑著. --北京:清华大学出版社,2012.6
ISBN 978-7-302-26338-8

I. ①电… II. ①孙… ②程… ③何… III. ①电力系统运行—可靠性理论 IV. ①TM732
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第155009号

责任编辑:张占奎
封面设计:常雪影
责任校对:刘玉霞
责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:14.75 插 页:2 字 数:305千字

版 次:2012年6月第1版 印 次:2012年6月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:59.00元

产品编号:042447-01

作者简介



孙元章,1954年出生于湖南,武汉大学教授,博士生导师,武汉大学电气学院院长,清华大学兼职教授。2000—2005年教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,IEEE和CSEE高级会员,中国电机工程学会电工数学专业委员会副主任,清华大学“电力系统及发电设备控制与仿真”国家重点实验室副主任。1999年获国家杰出青年基金,2000年获海外合作青年基金。2000年担任“973”项目首席助理,2005年担任“973”项目首席科学家助理,国家自然科学基金重大项目负责人。合作出版专著2部,在国内外刊物上发表论文100余篇。2004年获北京市教学成果一等奖、二等奖,教育部自然科学成果一等奖,2005年获国家级教学成果一等奖,2008年获得国家自然科学基金二等奖。



程林,1973年出生于湖南,清华大学副教授,中国电工技术学会电工产品可靠性研究会常务理事,IEEE和CIGRE会员。1996年本科毕业于天津大学自动化系电力系统及其自动化专业,2000年12月于清华大学电机系获工学博士学位(电力系统及其自动化专业),主要从事电力系统可靠性分析、电力系统稳定性分析与控制的教学与科研工作。承担和参与了包括国家自然科学基金重大项目、“973”项目子课题、国家科技支撑计划等在内的多项电力系统可靠性分析和安全稳定分析科研项目,获得教育部科技进步奖三等奖一项,中国南方电网公司科学技术奖三等奖一项,在国内外学术期刊和学术会议上以第一、二作者发表论文50余篇。



何剑,1983年出生于云南,中国电力科学研究院工程师。2005年本科毕业于清华大学电机系电气工程及其自动化专业,2010年7月于清华大学电机系获工学博士学位(电气工程专业),博士期间曾于2008年9月至2009年9月获得国家公派留学资格,赴英国曼彻斯特大学访问学习。目前就职于中国电力科学研究院电力系统研究所,主要从事电力系统分析与控制、电力系统可靠性等方面的研究和工作。参与了包括国家“973”项目、国家科技支撑计划等在内的多项电力系统可靠性分析和安全稳定分析科研项目,已在IEEE、IET、中国电机工程学报等学术期刊和国际会议上以第一作者发表有关电力系统可靠性、电力系统分析与控制等方面的论文十余篇。

内 容 简 介

本书系统地介绍了电力系统运行可靠性理论研究的最新成果,全书共 10 章,分别为绪论、运行可靠性的概念与理论框架、运行可靠性理论的数学基础、电力系统元件的运行可靠性模型、电力系统运行的可靠性指标、系统状态选择的快速算法、电力系统运行可靠性评估、电力系统运行可靠性最优控制、电力系统运行可靠性的软件平台、结论与展望,并附有参考文献以方便读者查阅。

本书可供从事电力系统规划、运行及管理人员在实际工作中参考,也可供电力专业科技人员、高等院校有关专业教师和高年级研究生参考。

ABSTRACT

This monograph systematically presents the latest research advances in the field of power system operational reliability. There are 10 chapters in this monograph. Chapter 1 introduces the background and motivation of power system operational reliability and gives a thorough literature review on related topics. Chapter 2 introduces the concept and framework of power system operational reliability. Chapter 3 introduces mathematical foundations of power system operational reliability theory. Chapter 4 introduces operational reliability models of power system components. Chapter 5 introduces the index system of power system operational reliability. Chapter 6 introduces fast algorithms for system-state selection. Chapter 7 introduces power system operational reliability evaluation techniques. Chapter 8 introduces the optimal control based on power system operational reliability. Chapter 9 describes the software platform for power system operational reliability. Chapter 10 gives conclusion and perspective. References are listed at the end of the book to suit the convenience of the readers.

This book is aimed at students of undergraduate and graduate levels as well as practitioners, including engineers, economists, managers, officers in power facilities and governments. For both, it is an excellent source of knowledge.



Preface

Reliability evaluation plays an important role in the planning, design, and operation of power systems. Over the past 50 years, numerous papers and text books have been published to describe the models and techniques of power system reliability evaluation and their applications. However, most developments and applications of probabilistic reliability techniques are in the planning domain. Apart from the historical, other possible reasons for emphasis on planning are:

- ✓ Planning horizon is typically long leading to higher levels of uncertainties.
- ✓ Importance of risk assessment is generally proportional to the level and significance of uncertainty.
- ✓ Engineers have more time to examine alternatives and conduct studies in the planning phase than in operations.
- ✓ Availability of computational power and computational resources.

Fewer reliability techniques are available for applications in operations. During the short-term framework of power system operation and dispatch, load level variation, integrated wind power fluctuation, component failure or scheduled maintenance have great impact on system security and stability. Reliability of system components may deteriorate under adverse weather conditions or other external environmental factors. Thus systems may become less

reliable, and conventional planning reliability methods cannot accommodate this change. Then power system cascading failures and blackouts are usually short-term processes-before blackout, system will go through several system states. If short-term reliability level of each state can be evaluated, this information will be beneficial for blackout prediction and prevention.

In China, Special Fund of the National Basic Program (“973” Program) has illustrated the importance of bulk interconnected power system operational reliability evaluation, and presented the conceptualization of operational reliability of power systems under real-time operating condition and external environment.

I was invited to give a keynote speech at the academic conference supported by the “973” Program in May 2008 in China, and have cooperated with Professor Sun’s research group at Tsinghua University since then. I am also a Guest Professor with the State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University. This book includes the research productions achieved by this excellent research group since 2005, and most of them have published on IEEE, IET and other well-known international journals.

It gives me great pleasure to write a preface to this timely book. I believe that it will be of great value to practicing engineers and students in the field of power engineering.



Chanan Singh PhD, DSc., Fellow IEEE
Regents Professor & Irma Runyon Chair Professor
Department of Electrical and Computer Engineering
Texas A&M University, U.S.A.

前言

随着电网互联规模和复杂性的提高,电力系统安全运行问题日益突出。继美国西部电网 1996 年两次大停电之后,2003 年 8 月,美国东部 8 个州以及加拿大的安大略省又发生了大规模的停电事故,共计损失负荷 61.8 GW,受停电影响人数达 5000 万。随后又相继在瑞典、丹麦、意大利、希腊雅典、西班牙马德里、俄罗斯莫斯科、印度尼西亚、中国海南、日本东京等地发生了较大范围的停电事故。2006 年 11 月,西欧 8 个国家发生了欧洲 30 年来最严重的停电事故,损失负荷高达 16.72 GW,约 1500 万用户受到影响。2008 年初,我国南方一些省份遭遇了 50 年一遇的罕见冰冻灾害,电力设施损害严重,国家电网直接财产损失达 104.5 亿元。2009 年 11 月 10 日,巴西、巴拉圭发生了大规模停电事故,事故导致巴拉圭几乎全国陷入一片黑暗,而巴西 18 个州均受到停电事故影响,影响面积达 375 万 km^2 ,巴西共损失负荷 2883 万 kW,影响人数 6000 万人。

这些大停电事故造成了巨大的经济和社会损失,引起了各国电力学者对电网安全可靠运行的广泛关注。为了预防大停电事故的发生,美国于 1999 年成立了电力可靠性解决方案研究合作组织 (consortium for electric reliability technology solutions, CERTS),开展输电网可靠性的研究,其中实时电网可靠性管理是研究的重点。2000 年美国电力科学研究院 (electric power research institute, EPRI) 发起了“电力传输可靠性” (power delivery reliability initiative) 项目,并得到了北美电力可靠性协会 (north american electric reliability corporation, NERC) 和国际电工与电子协会 (institute of electrical and electronics engineers, IEEE) 等许多研究机构和电力公司的支持,该项目的主要成果就是概率可靠性评估方法。

改革开放 30 年来,我国电力工业发展迅速,基本满足了国民经济和社会发展的电力需求,发电装机容量和年发电量已位居世界第二。随着西电东送、全国联网战略的实施,我国电网将成为世界上规模最大、最复杂的电网之一。但另一方面,我国还是一个发展中国家,电网的总体设计水平与发达国家相比还有很大的差距。电网结构薄弱,电气设备和线路故障率较高,部分电网电源供应紧张,应对电网突发事件的运行备用不足,存在着停电的隐患。我国也曾多次发生大面积停电事故,且伴随电网规模的扩大,每次大停电事故造成的平均负荷损失也随之增大。因此,提高电网运行可靠性、确保电网经济安全运行已成为我国电力系统当前面临的紧迫问题。

在此背景之下,2004 年由中国电力科学研究院(China Electric Power Research Institute, CEPRI)发起并由清华大学、浙江大学等十几家科研单位和高校参与的“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”项目得到了科技部的支持,是我国电力领域第 2 个得到“973”计划资助的项目。本书作者所在课题组承担了该项目第 8 子课题“大型互联电网在线运行可靠性的基础理论研究”的主要研究工作。本书是作者及其课题组成员在历时 5 年研究电力系统运行可靠性的基础上编写的一部专著,旨在介绍电力系统运行可靠性研究的最新进展,系统地阐述了运行可靠性的概念和理论框架,以及在元件建模、指标体系、快速算法、系统评估、辅助决策、软件平台等方面取得的创新性成果。

全书分 10 章。第 1 章绪论,介绍了运行可靠性理论的研究背景、意义以及相关领域的研究进展;第 2 章提出了运行可靠性的概念和理论框架以及需要研究的关键问题;第 3 章介绍了运行可靠性理论的数学基础,包括概率与随机过程以及可靠性数学基础;第 4 章建立了电力系统元件的运行可靠性模型,包括保护动作致停运模型、偶然失效模型和老化失效模型,并探讨了模型的数据需求;第 5 章提出了电力系统运行可靠性指标体系;第 6 章研究了系统状态选择的快速算法,提出了快速排序算法和状态空间分割算法;第 7 章研究了电力系统运行可靠性评估方法,提出了运行可靠性短期评估、条件相依的运行可靠性评估以及运行可靠性综合评估方法;第 8 章研究了基于运行可靠性的辅助决策,在运行可靠性成本价值评估的基础上,提出了运行可靠性最优控制的模型和算法;第 9 章介绍了运行可靠性软件平台,包括平台设计思路和框架、软件模块功能和可视化技术;第 10 章总结了本书的主要成果,并对电力系统运行可靠性未来的研究方向做了展望。

本书是课题组成员的共同研究结果,除本书作者外,还有刘海涛博士、孙荣富博士、邹欣博士、叶小晖、秦兴美等参加了本课题的研究,没有他们的工作是不可能形成本书的。在课题研究过程中,我们与美国得州农机大学的 Chanan Singh 教授、英国曼彻斯特大学的 Daniel S. Kirschen 教授、新加坡南洋理工大学的 Wang Peng 教授等国际电力系统可靠性领域的知名学者专家开展了互访研究合作,并在国际会议上与可靠性权威 Roy Billinton 教授进行了深入的交流,在此对他们的启迪和帮助表示衷心的感谢。课题研究承蒙国家重点基础研究发展计划(“973”计划)

(2004CB217908)和国家留学基金委员会资助,特此致谢。

电力系统运行可靠性是一个全新的领域,很多方面的研究还没有涉及或深入展开。由于作者水平和已进行的研究工作有限,书中错误和不当之处,恳请读者批评指正。

著 者

2012年3月于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 运行可靠性理论的背景与意义	1
1.2 电力系统评估理论的研究进展	3
1.2.1 发展趋势概述	3
1.2.2 确定性的静态安全评估	4
1.2.3 常规可靠性评估	6
1.2.4 基于风险的静态安全评估	12
1.3 电力系统控制决策研究进展	14
1.3.1 基于确定性准则的静态安全控制	15
1.3.2 基于概率风险的决策优化	15
第 2 章 运行可靠性的概念与理论框架	17
2.1 运行可靠性的概念与特点	17
2.1.1 相对于确定性静态安全评估的特点	18
2.1.2 相对于常规可靠性评估的特点	18
2.1.3 相对于基于风险的静态安全评估的特点	19
2.2 运行可靠性的理论框架与关键问题	19
第 3 章 运行可靠性理论的数学基础	23
3.1 概率与随机过程	23
3.1.1 概率的定义与性质	23
3.1.2 随机变量及其分布	25
3.1.3 随机过程	28
3.1.4 马尔可夫过程	31

3.2	可靠性的数学基础	37
3.2.1	不可修复元件的可靠性	38
3.2.2	可修复元件的可靠性	45
第4章	电力系统元件的运行可靠性模型	51
4.1	保护动作致停运模型	52
4.1.1	线路过负荷保护动作模型	52
4.1.2	发电机电压、频率保护动作模型	54
4.1.3	减载装置动作模型	59
4.2	偶然失效模型	63
4.2.1	发电机偶然失效模型	63
4.2.2	线路、变压器偶然失效模型	67
4.3	老化失效模型	69
4.3.1	发电机老化失效模型	69
4.3.2	变压器老化失效模型	70
4.3.3	输电线老化失效模型	72
4.4	模型数据需求	75
4.4.1	常规可靠性模型数据统计	75
4.4.2	运行可靠性模型数据需求	75
第5章	电力系统运行可靠性指标	78
5.1	常规可靠性的指标体系	78
5.2	运行可靠性的指标体系	80
5.3	运行可靠性指标的计算公式	83
5.3.1	状态类指标	83
5.3.2	程度类指标	83
第6章	系统状态选择的快速算法	89
6.1	快速排序算法	89
6.1.1	基本思想	89
6.1.2	基于两状态元件模型的快速排序技术	90
6.1.3	计及多状态元件模型的快速排序技术	97
6.1.4	基于快速排序技术的系统状态选择算法	103
6.1.5	算例分析	104
6.1.6	算法小结	106
6.2	状态空间分割算法	107

6.2.1	基本思想	107
6.2.2	状态空间分割算法及流程	109
6.2.3	算法收敛性证明	113
6.2.4	算例分析	115
6.2.5	算法小结	123
第7章	电力系统运行可靠性评估	125
7.1	运行可靠性短期评估	125
7.1.1	元件瞬时状态概率	126
7.1.2	系统状态概率随时间变化分析	127
7.1.3	短期评估算法	128
7.1.4	计及运行备用的短期评估	128
7.1.5	算例分析	130
7.2	条件相依的运行可靠性评估	132
7.2.1	条件相依的运行可靠性评估算法	133
7.2.2	算例分析	133
7.3	运行可靠性综合评估	139
7.3.1	基于支持向量机的天气预测技术	140
7.3.2	运行可靠性薄弱环节定位	143
7.3.3	运行可靠性综合评估算法	145
7.3.4	算例分析	146
第8章	电力系统运行可靠性最优控制	159
8.1	运行可靠性最优控制的概念与功能定位	160
8.2	运行可靠性最优控制的技术基础	161
8.2.1	运行可靠性成本和价值的概念	161
8.2.2	运行可靠性成本价值指标	162
8.2.3	运行可靠性成本价值评估算法	162
8.3	运行可靠性最优控制数学模型	164
8.4	P - Q 解耦的粒子群优化算法	165
8.5	算例分析	169
8.5.1	六母线测试系统	169
8.5.2	IEEE RTS 测试系统	176
8.5.3	MRTS 测试系统	178
8.5.4	算例小结	179

第 9 章	电力系统运行可靠性的软件平台	181
9.1	软件平台设计思路和主要框架	181
9.2	模块功能介绍	183
9.2.1	数据导入导出模块	183
9.2.2	潮流计算模块	183
9.2.3	元件可靠性模型模块	184
9.2.4	输出显示模块	184
9.3	可视化技术	184
9.3.1	网架结构可视化	185
9.3.2	网络潮流可视化	185
9.3.3	可靠性指标可视化	185
9.3.4	数据报表可视化	187
第 10 章	结论与展望	188
附录 A	IEEE RTS 测试系统数据	191
A.1	系统概况	191
A.2	负荷模型	192
A.3	发电系统	194
A.4	输电系统	196
A.5	其他数据	201
参考文献		203



Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and motivation of power system operational reliability theory	1
1.2 Review on power system evaluation theory	3
1.2.1 Overview	3
1.2.2 Deterministic steady-state security evaluation	4
1.2.3 Traditional probabilistic reliability evaluation	6
1.2.4 Risk-based steady-state security evaluation	12
1.3 Review on power system control and decision-making	14
1.3.1 Steady-state security control based on deterministic criterion	15
1.3.2 Optimal decision-making methods based on probabilistic criterion	15
Chapter 2 Concept and framework of power system operational reliability	17
2.1 Concept and features of power system operational reliability	17
2.1.1 Features compared to deterministic steady-state security evaluation	18
2.1.2 Features compared to traditional reliability evaluation	18
2.1.3 Features compared to risk-based steady-state security evaluation	19

2.2	Framework and key points of power system operational reliability	19
-----	--	----

Chapter 3 Mathematical foundations of power system operational reliability theory **23**

3.1	Probability and stochastic process	23
3.1.1	Definition and properties of probability	23
3.1.2	Random variable and its distribution	25
3.1.3	Stochastic process	28
3.1.4	Markov process	31
3.2	Mathematical foundations of reliability	37
3.2.1	Reliability of non-repairable component	38
3.2.2	Reliability of repairable component	45

Chapter 4 Operational reliability models of power system components **51**

4.1	Protection outage model	52
4.1.1	Overload protection outage model of a transmission line	52
4.1.2	Voltage and frequency protection outage model of a generator	54
4.1.3	Load-shedding protection outage model	59
4.2	Random failure model	63
4.2.1	Random failure model of a generator	63
4.2.2	Random failure model of a transmission line/transformer	67
4.3	Aging failure model	69
4.3.1	Aging failure model of a generator	69
4.3.2	Aging failure model of a transformer	70
4.3.3	Aging failure model of a transmission line	72
4.4	Date requirements	75
4.4.1	Statistics in traditional reliability model	75
4.4.2	Data requirements in operational reliability model	75

Chapter 5 Power system operational reliability indices **78**

5.1	Index system of traditional reliability	78
5.2	Index system of operational reliability	80