



国际电气工程先进技术译丛

WILEY



IEEE

电力系统操作实践

Practical Power System Operation

[加拿大] 易卜拉欣·瓦赫迪 (Ebrahim Vaahedi)

张海峰 张虎

著
译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

电力系统操作实践

[加拿大] 易卜拉欣·瓦赫迪 (Ebrahim Vaahedi) 著
张海峰 张虎 译



机械工业出版社

Copyright © 2014 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Practical Power System Operation, ISBN: 978-1-118-39402-1, by Ebrahim Vaahedi, Published by John Wiley & Sons, Inc. 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 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。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: 01-2014-6479 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统操作实践/ (加) 易卜拉欣·瓦赫迪 (Ebrahim Vaahedi) 著; 张海峰, 张虎译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Practical Power System Operation

ISBN 978-7-111-56485-0

I. ①电… II. ①易… ②张… ③张… III. ①电力系统运行 IV. ①TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 068350 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: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧

责任校对: 刘秀芝 封面设计: 马精明

责任印制: 李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·13 印张·245 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-56485-0

定价: 85.00 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

本书是一本经典的将电气工程理论用于日常电力系统操作的图书，它从整体上介绍了电力系统操作过程，尤其专注于操作员的需求以及满足这些需求所需的技术。本书共包含 12 章和一个附录。书中前 8 章重点介绍操作员需求、过程和相应的技术解决方案。第 9~11 章提供了控制中心、能源管理系统以及配电管理系统的完整描述。最后，第 12 章概述了电力系统操作中目前正在发展的和加拿大非常先进的解决方案。附录主要介绍基础理论概念，以此加深对每一章的理解。

书中使用简单、实用以及电力系统中常见的一些实际问题作为每章开头，详细分析电力系统操作过程中遇到的问题和难点，同时配合使用大量商业软件界面对操作过程进行解读，具有很高的实用价值。

本书适用于电力企业中的专业人士、独立系统操作员、咨询公司、电力监管机构，以及和电力系统操作处理相关的其他电力公司，也可作为大专院校相关教师、研究生和本科生的教材和参考用书。

译者序

随着我国工业水平的不断提升，电力系统作为工业动力的主要来源，其规模也在不断扩大。从建国初期的几个孤立电网，到目前发展为全国范围的大电网互联，实现相互调节交换潮流，在减少电力系统总装机容量的同时也增加了系统的可靠性。本书从电力系统操作实践入手，深入剖析了电力系统实践操作过程中所要重点研究的课题，主要包括电力系统可靠性分析，如静态安全性、功角稳定性和电压稳定性等，以及电力系统优化运行和能量运行管理系统、输配电系统的运行规范等内容。

全书共包含 12 章和一个附录，书中前 8 章重点介绍操作员的需求、过程和相应的技术解决方案。第 9~11 章提供了控制中心、能源管理系统以及配电管理系统的完整描述。最后，第 12 章概述了电力系统操作中目前正在发展的加拿大非常先进的解决方案。附录主要介绍基础理论概念，以此加深对每一章的理解。可以说本书较全面地涵盖了电力系统实践操作中几乎全部的内容，对于系统操作员来说是很好的应用培训手册，对于电力系统类高等院校本科生、研究生以及高校教师具有一定的参考价值。

本书由张海峰和张虎翻译，全书由张海峰和张虎统一校对定稿，另外，董志、董然、孙天硕、吴文胜也参与了部分工作。同时，还要感谢周京华教授在翻译过程中给予的帮助和支持。

由于译者水平有限，翻译中必有错误和不妥之处，衷心希望读者批评指正。

张海峰 张虎

2017 年 1 月

原书序言

经历过工科教育的人们，许多人都在课本上花费了大量的精力。几乎所有人都赞同我们从这些教科书上学到了很多“工程”，并且我们中的大部分人，包括我自己还可以告诉您，这些我们由爱而生恨的教科书自从我们毕业以后就一直被束之高阁，甚至很少被挑选和重新翻阅来帮助我们解决实际问题。当我们使用教科书中的例子去告诉那些追随我们的脚步将要成为工程师的孩子们，我们在许多许多年以前所学的科目时，它们有时会被证明是有用的。但是有一本不同于其他教材的教科书，它不是那种有着精美封皮和很好封装并且价格昂贵的教科书，而是使用在英属哥伦比亚大学电力工程课程之一的手写笔记合集。它包含了一个电力工程师所需要掌握的所有基础理论知识。那本书伴随我通过了工程-训练的轮换，它是我在工程实践中从工程规划到工程操作过程中使用最频繁的技术参考书。我经常疑惑为什么没有出版更多的此类教材。

Vaahedi 博士的新书《电力系统操作实践》很完美地满足了我的要求。此著作是一本“经典的电气工程理论结合日常电力系统操作”的书。

这本书是一本经典的电气工程理论满足日常电力系统操作的著作。书中以一种易于遵循的方式，首先使用简单、实用和电力系统运行中常见的实际问题来作为每章开始的描述；其次允许开放的日常业务流程，或许配合较大的商业图片；然后进入一些核心的数学公式和计算方法去详细阐述每个简单任务的信息，这些任务是目前电力系统专业操作员和工程师们在计划和操作中不断执行的。这个被称作电网的最复杂的系统是建立在我们之前几代科学家和工程师所发明的基本工程概念基础上的，为了我们产品用户的利益和人类的进步，我们必须通过创新对它进行持续的改进。

《电力系统操作实践》这本书也提出了一个电力系统操作革新的重大历史观点：从主从模拟控制系统到控制技术数字化，从随机选择的数据点到电网的同步相量系统微秒采样的 4s 数据采样系统，从带有保守方法的离线研究到资产利用最大化和允许精确系统姿态的系统实时评估。它描述了在电力系统操作中传统和现代的挑战，提供了一个前沿技术的展示。读者会发现它是一本关于电力系统操作的非常完整且实用的图书。

Vaahedi 博士能够实现这一惊人成就并不令我感到惊奇。他总是能热情地给出有关电力系统日常操作方面的创新型解决方案。他的学术研究背景、对于新兴技术的理解以及接受最前沿技术挑战的能力，使他能够对我们控制中心的管理提

出长远和全面的技术策略以及具体措施。许多年来他一直致力于在我们的实时系统操作领域中采用前沿技术。这本教材是对他所取得成绩的一个很好的证明，祝贺 Ebrahim!

Martin Huang 副教授
BC Hydro 电网操作室

原书前言

大约 10 年前，我在英属哥伦比亚大学教授关于“电力系统操作中决策支持工具”的一些课程。通过这几年在不列颠哥伦比亚水电站（BC Hydro）与系统操作员紧密的工作接触，我逐渐意识到一门技术课程在一个正在运行的电力系统中，只能提供部分控制中心所发生的情况。为了提供一个完整的电力系统操作的场景，我们需要建立操作员函数、过程传递函数以及使能这些过程的解决方案。与电力系统操作相比，一个很好的例子是汽车的驾驶，如果只是单纯地关注它的技术细节而不去讨论汽车完成的功能或者操作汽车的流程（驾驶规则和准则）以及如何给出这些功能，那么想要给出一个好的汽车驾驶情景是不可能的。环顾四周，我意识到事实上没有一本书在电力系统操作中能够提供一个完整的场景。大约两年前，我有了一个想法，是时候挑战写一本关于将系统操作从业者观点和解决方案细节相结合的书了。

本书的写作过程非常艰难。如果没有那些我非常感激的组织和个人的支持，将很难想像本书能够完成。首先，我要感谢 BC Hydro 的副教授 Martin Huang 先生，是他鼓励我撰写此书并且提供了很多有见地的意见，使本书成为 BC Hydro 操作员培训计划的要素之一。我也要感谢我的雇主——BC Hydro，在书中允许我使用了许多有关水电站控制中心的画面。我也要感谢 BC Hydro 的许多同仁：Tohru Harada 先生，他严格地审阅了此书；Ska - Hiish Manuel 先生，他给出很多的开发实例；Wenyuan Li 博士，他提出许多有价值的鼓励和建议；以及 BC Hydro 操作培训经理 Brett Hallborg 先生，他给予关于课程内容的评论。

我也非常感谢阿尔斯通电网，他们对于教育和培训是如此的慷慨和专注，允许我使用能量管理系统和配电管理系统的截图，以便更好地强化书中所讨论的概念。这要特别感谢我的朋友，阿尔斯通电网的 Ali Sadjadpour 先生，是他促成了此事。

最后，我要感谢那些给本书提供过宝贵意见的专业同事：西班牙卡斯蒂利亚拉曼查大学教授，IEEE 电力系统操作委员会主席，Antonio Conejo 博士；伊利诺伊理工学院首席教授，Mohammad Shahidehpour，Bodine 博士；以及阿尔斯通电网首席科学家，David Sun 博士。

Ebrahim Vaahedi

简介

本书是一本从整体上贴近电力系统操作的书，它专注于操作员的需求、满足这些需求的过程以及推进这些过程的相应技术。它已经被视为电力系统领域的本科生、研究生，以及电力企业中的专业人士、独立系统操作员、咨询公司、电力监管机构和涉及电力系统操作处理的其他电力公司的一本教科书。

本书共包含 12 章和一个附录。书中前 8 章重点介绍操作员需求、过程和相应的技术解决方案。第 9~11 章提供了控制中心、能源管理系统以及配电管理系统的完整描述。最后，第 12 章概述了电力系统操作中目前正在发展的和加拿大非常先进的解决方案。附录主要介绍基础理论概念，以此加深对每一章的理解。

过去 10 年中，在英属哥伦比亚大学，这本书的内容已经被用作教授本科生和研究生的永久性课程。

- 1) EECE499：电力系统操作中的决策支持工具；
- 2) EECE498：电力系统中优化的应用；
- 3) EECE553：高级电力系统分析。

课堂采用的潜在拓展超出了这些课程。其他采用的可能形式，即大学课程或者继续教育课程形式包括：

- 1) 现代电力系统操作；
- 2) 电力系统控制中心；
- 3) 能源管理系统和配电管理系统；
- 4) 电力系统操作中的计算机应用。

世界上几乎所有在本科和研究生阶段教授电力系统课程的大学都可以采用这本书作为教材。

这本书也可以被电力企业中的专业人士、独立系统操作员、可靠性协调员、咨询公司以及所有涉及电力系统操作的其他企业所使用，同时也能够作为操作员培训和认证的一本参考书。

目 录

译者序	
原书序言	
原书前言	
简介	
第1章 导论	1
1.1 电力系统操作概述	1
1.2 操作员	2
1.3 流程	3
1.4 技术	4
1.5 电力系统操作标准	4
1.6 本书概述	5
第2章 电力系统监测	6
2.1 电力系统监测中操作员的职责	6
2.2 电力系统监测流程	6
2.3 电力系统监测技术	8
2.3.1 系统控制和数据采集的作用	8
2.3.2 状态估计	10
2.3.3 状态估计最小二乘法	11
2.4 不良数据辨识	16
2.5 可观性	17
问题和难点	17
第3章 电力系统方案分析	19
3.1 操作员在电力系统方案分析中的职责	19
3.2 电力系统方案分析过程	19
3.3 电力系统控制技术	20
3.3.1 电力系统控制的基础设施	20
3.3.2 电力系统方案分析技术：潮流	22
3.3.3 系统建模	22
3.3.4 潮流技术	25
3.3.5 因式分解	36
3.3.6 稀疏	39
3.3.7 不同潮流方案和应用	39
问题和难点	40
第4章 电力系统姿态：静态安全性	41
4.1 关于电力系统姿态的操作员问题：静态安全性	41
4.2 电力系统姿态过程：静态安全性	41
4.3 电力系统姿态技术：静态安全性	42
4.3.1 故障分析	42
4.3.2 故障定义	43
4.3.3 故障选择	45
4.3.4 故障评估	48
4.3.5 补救计划的执行	51
问题和难点	52
第5章 电力系统姿态：功角稳定性	53
5.1 关于电力系统姿态的操作员问题：功角稳定性	53
5.2 电力系统姿态过程：功角稳定性	53
5.3 电力系统姿态技术：功角稳定性	57

5.3.1 功角稳定性评估	57	7.3.1 自动发电控制应用	98
5.3.2 电力系统稳定性	58	7.3.2 自动发电控制基础设施 ...	101
5.3.3 功角稳定性	59	7.3.3 关于 AGC 操作的例子	102
5.3.4 暂态稳定性	59	问题和难点	103
5.3.5 小型系统	59	第 8 章 电力系统运行优化	105
5.3.6 积分法	61	8.1 关于电力系统实践优化操作员	
5.3.7 等面积准则法	64	问题	105
5.3.8 其他组件模型	70	8.2 电力系统发电操作过程	106
5.3.9 多机系统	71	8.2.1 简介	106
5.3.10 小信号稳定性	71	8.2.2 电力公司模型	106
5.3.11 功角稳定性极限推导	73	8.3 发电充分性流程	108
5.4 功角稳定极限的实现	74	8.3.1 操作计划的发电	
问题和难点	75	充分性流程	109
第 6 章 电力系统姿态:		8.3.2 近似实时系统的	
电压稳定性	77	发电充分性流程	109
6.1 关于电力系统姿态的操作员问题:		8.3.3 实时系统的发电	
电压稳定性	77	充分性流程	110
6.2 电力系统姿态过程:		8.4 发电充分性技术	110
电压稳定性	77	8.4.1 发电充分性应用	110
6.3 电力系统姿态技术:		8.4.2 发电充分性的基础设施 ...	129
电压稳定性	79	问题和难点	130
6.3.1 电压稳定性评估	79	第 9 章 系统运行控制中心	132
6.4 电压稳定性极限推导和执行	86	9.1 介绍	132
6.4.1 电压稳定极限推导	86	9.2 现代控制中心属性	133
6.4.2 电压稳定性极限的实现 ...	87	9.3 控制中心冗余配置	134
问题和难点	90	9.4 现代控制中心配置	135
第 7 章 电力系统发电负荷平衡 ...	92	9.5 现代控制中心设计细节	137
7.1 关于发电负荷平衡的		问题和难点	140
操作员问题	92	第 10 章 能源管理系统	141
7.2 发电负荷平衡过程	92	10.1 介绍	141
7.2.1 介绍	92	10.2 EMS 功能概述	142
7.2.2 发电自动控制的		10.2.1 系统监控	143
NERC 标准	95	10.2.2 决策支持系统	144
7.2.3 自动发电控制过程	96	10.2.3 EMS 控制动作	144
7.3 发电负荷平衡技术	98	10.3 EMS 可用性标准和	

体系结构	145	12.2.5 同步相量系统	175
10.3.1 硬件概述	145	12.2.6 配电自动化	177
10.3.2 软件概述	147	12.2.7 动态热功率系统	178
10.3.3 EMS 中的应用程序序列	150	12.2.8 分布式能源	178
10.3.4 软件集成	151	12.2.9 需求响应	179
问题和难点	152	12.2.10 微电网	180
第 11 章 配电管理系统	153	12.2.11 实时姿态和控制	180
11.1 介绍	153	12.2.12 关键系统应用和 设施中心	181
11.2 DMS 功能概述	154	12.2.13 概率极限的计算	181
11.2.1 系统监控	156	12.2.14 管理的重要操作知识: 操作代码手册	182
11.2.2 决策支持系统	157	附录 A 基本概念	184
11.2.3 DMS 控制动作	162	A.1 介绍	184
11.3 DMS 架构	163	A.2 相量表示	184
11.3.1 硬件概述	163	A.3 标幺制	185
11.3.2 软件概述	163	A.4 矩阵代数	187
11.3.3 DMS 应用集成	164	A.5 稳态组件模型	188
问题和难点	167	A.5.1 输电线	188
第 12 章 不断发展的电力系统 操作解决方案	168	A.5.2 变压器和移相器	189
12.1 介绍	168	A.5.3 发电机	190
12.2 不断发展的操作解决方案	168	A.5.4 分流器和同步调相机	190
12.2.1 在线暂态稳定	168	A.5.5 负荷	190
12.2.2 在线电压稳定	171	A.5.6 网络方程	190
12.2.3 总传输能力计算器	172	参考文献	191
12.2.4 输电中断调度系统	174		

第 1 章

导 论

1.1 电力系统操作概述

电力系统操作的主要目标是保障其安全性、可靠性和效率。在世界各国的电力企业中，系统操作一直被视为一个重要的功能，因为它能显著地改善企业的底线。系统操作影响着人身安全和系统可靠性，以及与输电和发电配置相关的运营成本。

过去十年电力管制的解除为能源行业的发展创造了新的前景。这一变化再加上正在增加的海量集成的渗透，变量的生成以及智能电网的发展，包括推进发电、输电、配电技术和客户支持技术等都不断增加着电力系统操作的复杂性。

电力系统操作中有 3 个主要的因素：

- 1) 操作员，负责执行不同的功能；
- 2) 过程，它提供如何执行这些功能的细节描述；
- 3) 技术，使能和推进流程。

简而言之，电力系统操作通过测量不同系统信号，诸如潮流和电压，去建立目前系统操作条件的场景。使用这个场景，操作员通过两种方式执行不同的操作功能。

- 1) 服务于操作员在不同条件下详细操作的流程操作书或操作命令书。
- 2) 使能和便于操作命令的技术和决策支持工具。

这个练习将最终导致由系统所直接给出的自动控制动作或者由系统操作员所给出的手动控制动作，如图 1.1 所示。和这种操作很相似的一个比喻是操作或者驾驶一辆汽车。驾驶员通过观察汽车周围的环境来检查行驶条件。他很满意这种

如汽车仪表盘似的信息来源方式，因为它提供了诸如速度、发动机温度以及气体含量等车辆的主要操作条件。然后操作者对这些基于交规课本中所指定规则的主要条件进行响应，使用技术来完成书本上诸如转向和制动系统的操作。在一定条件下，汽车能够直接采取自动控制动作，例如紧急时在没有操作员直接参与的情况下触发安全气囊。

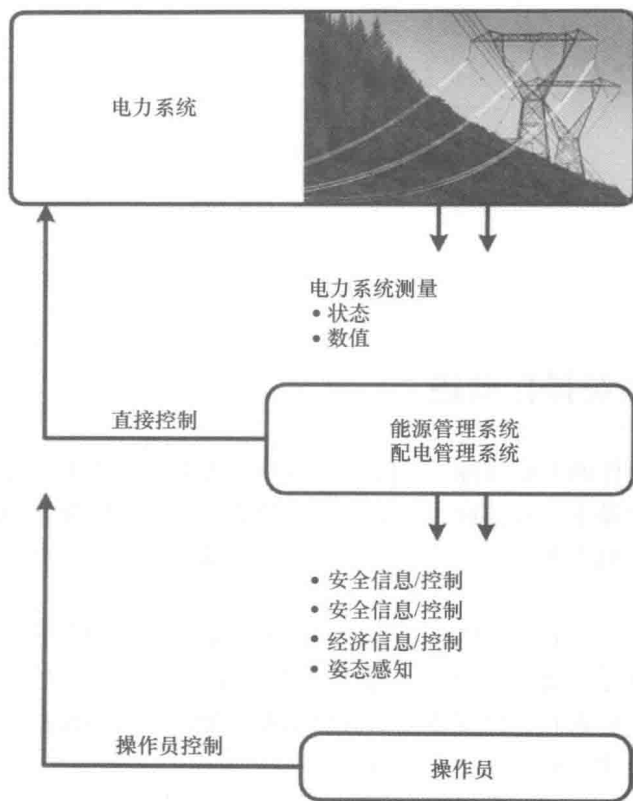


图 1.1 电力系统操作功能

1.2 操作员

操作员以安全、可靠和操作效率为目标，负责管理系统操作。为了实现这些目标，他们需要执行一些功能及与其相关的任务。操作员需要执行的主要功能包括：

- 1) 输电监测；
- 2) 输电极限评估；

- 3) 输电电压管理;
- 4) 输电阻塞管理;
- 5) 输电中断管理;
- 6) 负荷脱离管理;
- 7) 发电负荷平衡;
- 8) 发电操作;
- 9) 发电储备管理;
- 10) 发电中断管理;
- 11) 交换通信;
- 12) 交换监测;
- 13) 交换阻塞管理;
- 14) 交换操作;
- 15) 应急发电量管理;
- 16) 应急甩负荷管理;
- 17) 应急输电管理;
- 18) 恢复。

北美电力可靠性委员会 (North American Electric Reliability Council, NERC) 颁布了一个系统操作员需要执行系统操作的所有功能的详细通用任务清单^[1]。

任务清单包含大体 400 项分离的任务, 主要分为以下几大类:

- 1) 通用控制中心操作;
- 2) 输电;
- 3) 发电;
- 4) 交换;
- 5) 恢复。

1.3 流程

为了履行职能, 操作员需要对每一个功能开发业务流程。业务流程是一套设计产生一个产品或者服务的相互关联的活动。在 18 世纪, 描述业务流程最重要的人物之一是亚当·斯密^[2], 他使用如下方式描述了一个大头针的生产过程。

一个人抽线, 另一个人捋直, 第三个人切割, 第四个人削尖, 第五个人研磨顶部以获得头部 (为了得到头部要求两个或三个不同的操作), 为了获得较高的价格, 另一个流程是把大头针表面美白。以这种方式, 制作一个大头针的重要业务被分成大约 18 个不同的操作流程。在一些工厂中这些都通过不同的手来执行, 但在其他方面同样的人有时也会执行其中的两个或三个流程。

从第 2 章开始, 每个操作关键性功能的相应流程将被检验。

1.4 技术

为了启用和促进业务流程, 技术解决方案是必需的。例如为了使用最小化的手动工作来完成大头针制作, 需要采取一些技术解决方案。同样, 对于电力系统操作来说, 每个流程的启动或许需要一个或多个技术解决方案。

1.5 电力系统操作标准

NERC 是随着美国东北部大停电后对于开发电力系统操作以及规划可靠性标准的授权而建立起来的。这些是电力公司在—个可接受的可靠性等级上所要遵循的操作和规划标准。起初 NERC 的标准是自愿的, 但是在 2007 年, 联邦能源监管委员会 (Federal Energy Regulatory Commission, FERC) 将它们变为强制标准。这给了 NERC 强制执行 NERC 可靠性标准的另—个授权, 它通过严格的程序监控、审计、调查和实施对违规行为的经济处罚等执法行为。NERC 同时也管理系统操作员的认证程序, 为了确保他们拥有所需的知识和技能去履行职责。NERC 定义的可靠性是输电充分性和输电安全性的结合。

这里, 输电充分性被定义为在所有时间里, 电力系统所能提供的对于用户的能源需求以及总需求的能力, 同时要考虑系统单元和组件预定的和合理预期的计划外停机状态。

输电安全性被定义为, 大部分电力系统所能抵御的, 如短路、系统组件或开关操作是意料之外的损坏等突如其来干扰的能力。

对于可靠的电力系统操作来说, 电力系统必须保持完好, 并具有能抵御多种干扰的能力。因为考虑所有的故障是不切实际的, 所有我们只考虑—组可能的故障情况。这些故障我们称之为 $N-1$, 意思是在—个具有 N 个组件的电网中只考虑只有—个单元损坏的这种事件。但是人们认识到, 比 $N-1$ 故障更严重的情况很有可能发生, 对于—个可靠的电力系统操作来说或许无法处理。在这种条件下, 应采取措施减小冲击。当系统还没有经受任何故障和故障后的条件时, NERC 标准^[3]定义了正常系统的性能要求。这些性能要求可能包括电压波形、故障后允许的电压跌落、系统频率阻尼等。图 1.2 所示为故障后电压波形性能要求的—个例子。该图显示了施加在最大瞬态电压跌落上的极限、电压跌落超过设定极限 (例如 20%) 的持续时间, 以及后期瞬态电压偏差。

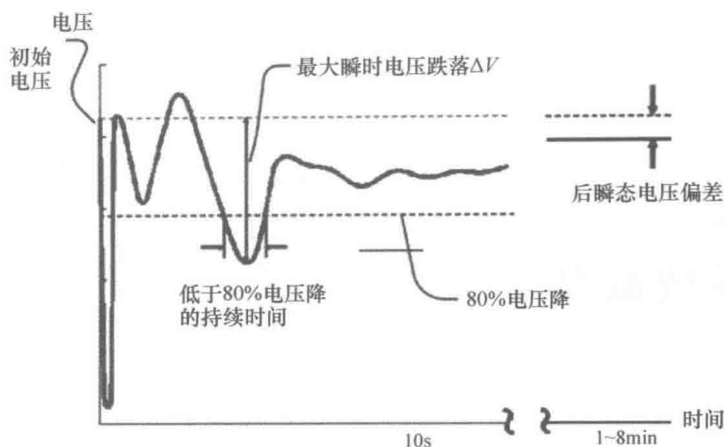


图 1.2 故障下 NERC 电压性能要求

1.6 本书概述

本书由 12 章和附录组成。书中从操作人员功能和需要的观点来描述电力系统操作。这种实际的方法提供给读者对于电力系统操作目标、实现这些目标所制定的流程，以及使能这些流程所需技术的一个深层的理解。

本书前 8 章涵盖了一个操作员的职能以及履行这些职能所需要的知识。这之后是通过已建立的流程细节来执行这些职能，以及使能这些流程所需要的技术方案。从第 2 章开始，每章将专门介绍操作员的重要功能、操作流程及使能技术。第 9 章将讨论现代电力系统操作控制中心的要求和设计特点。第 10 章和第 11 章将提供能源管理系统和配电管理系统完整的说明。每一章都将提供对于输配电各自操作同时进行的一个技术解决方案组合。第 12 章将论述关于电力系统操作中不断发展的技术解决方案。最后，附录将论述基本理论概念去强化对各章节的理解。