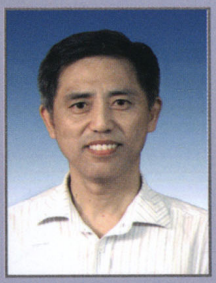


电网自动电压控制(AVC)技术及案例分析

丁晓群 周玲 陈光宇 著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



丁晓群，男，河海大学能源与电气学院教授、博士生导师，长期从事电力系统无功电压优化运行与控制、电力系统降损节能方面的教学与研究工作，多次获得省、部级科技进步奖。其开发的无功电压自动控制（AVC）系统、降损节能系列产品已经在全国电力系统推广应用达160多家用户。



周玲，女，河海大学能源与电气学院副教授、硕士生导师，多年从事电力系统继电保护、电力系统降损节能方面的教学与研究工作，发表学术论文20多篇。



陈光宇，男，硕士，南京河海电力软件有限公司工程师，具有丰富的省级电网无功电压自动控制（AVC）系统研发和工程经验，并擅长潮流和优化算法。

电网自动电压控制（AVC）技术及案例分析

丁晓群　周　玲　陈光宇　著

机 械 工 业 出 版 社

本书对电网自动电压控制（AVC）技术领域的最新研究成果进行了总结和提炼，结合作者多年对无功优化在线控制理论的研究和工程应用经验，充分阐述了自动电压控制中的建模、算法、控制等理论问题，以及在实际工程中的一些工程化的特别处理方法。此外，还对长久以来电力系统中争执不下的无功优化和电压稳定的关系等问题进行了讨论，并提出了自动电压控制系统在面对智能电网时可能遇到的问题和解决方法。

本书适合于电力系统管理人员、研发人员，以及高等院校相关专业本科生和研究生阅读。

图书在版编目（CIP）数据

电网自动电压控制 AVC 技术及案例分析/丁晓群，周玲，陈光宇著.
—北京：机械工业出版社，2010.10
ISBN 978-7-111-31461-5

Ⅰ.①电… Ⅱ.①丁… ②周… ③陈… Ⅲ.①电力系统-自动控制-研究 Ⅳ.①TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 147673 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：刘星宁 责任编辑：任 鑫
版式设计：张世琴 责任校对：李秋荣
封面设计：马精明 责任印制：杨 曦
北京蓝海印刷有限公司印刷
2010 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
169mm × 239mm · 21.25 印张 · 410 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-31461-5
定价：56.00 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
社服务中心：（010）88361066
销 售 一 部：（010）68326294
销 售 二 部：（010）88379649
读者服务部：（010）68993821

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

序

20 世纪末，我国电网得到了快速的发展，机组容量不断提高，电网规模不断扩大，电压等级不断提高，区域电网逐渐形成，为了提高电网的安全、优质与经济效益，1996 年 8 月 12 日，原电力工业部发布了《电力工业部关于调度机构开展安全文明生产达标和创一流工作的通知》，2001 年 10 月 24 日，原《国家电力公司建设国际一流电网调度机构考核标准〈试行〉》中的评价一流技术中增加了“电网 AGC（自动发电控制）和 AVC 功能得以成功应用，其控制水平、控制质量以及控制效果不断提高”的条款，2002 年 4 月 10 日，《国家电力公司建设国际一流电网调度机构考核标准〈试行〉实施细则》中又增添了关于电网 AVC 功能没有投运及 AGC、AVC 控制水平、控制质量及效果没有提高的扣分规定，从而推动了 AVC 在我国电网中的发展。

国外在 20 世纪 80 年代初开始将 AVC 用于电力系统，他们称之为二次电压控制系统，目标是在电力系统中实现无功功率及电压的区域性集中控制。例如，EDF（Electricite De France，法国电力集团）国家电力系统在 1978 年 12 月 19 日发生大停电事故后，开始研究并逐步实施了二次电压控制。到 1986 年，法国几乎全国电力系统都配置到了二次电压控制系统中。EDF 通过调节 27 个控制区中，共有约 100 台火电机组与 150 台水电机组，共 30000Mvar 的无功功率，控制各分区中分别设置的若干个主导节点的电压。二次电压控制系统是指，电压的快速变化均由具有系统意义的发电机组的一次作用进行调节。处理电压的慢变化，由二、三次无功/电压控制调节。二次控制由区域意义的动态无功补偿装置进行调节，手动操作的无功补偿装置为三次调节。由超高压系统提供参考电压，并作为全系统的电压调节的参考，防止电压调节的不协调。EDF 的运行实践证明，采用二次电压调节系统后，电力系统正常情况下的运行电压水平得到了较好的控制。

AVC 适应了 21 世纪初我国电网发展的实际情况，因为受端电网集中了很大比重和容量的负荷，负荷端电网需要的大量无功功率，却只能由提供大部分有功功率的外部电网提供。电网正常的电压水平，在很大程度上还主要依赖发电厂的无功调节及变电站的 VQC（电压/无功控制）独立进行控制，缺乏全电力系统无功/电压调节的协调控制，不仅电压质量差，而且线路损耗大。电网自动化控制水平很低，缺乏动态无功补偿装置，没有高度发达的电力通信网络和自动化条件，无论是传统的优化电力潮流（Optimal Power Flow，OPF），还是优化无功功率调度（Optimal Reactive Power Dispatch，ORPD）表示的多约束的非线性数学模

型理论的无功/电压调节方式，在实际电力系统中都是无法实现的。

作者抓住机遇，与福建电网合作。2001 年开始，把国外电网二次电压控制方法与我国电网的实际情况相结合，研究开发了 AVC。福建电网的 AVC 于 2002 年 9 月投入运行。2003 年 11 月 26 日通过鉴定。评审组专家给予了高度评价：该项目在福建电网的实施，提高了电网的电压质量，降低了网损，提高了电网的安全运行和自动化水平。该系统的总体技术和工程实践达到国际先进和国内领先水平，开创了我国大电网实施 AVC 的先河。十余年来，由作者领导的团队先后在县级、地区级与省级电网中安了 141 套 AVC，涵盖了 22 个省市的电网。AVC 实施采用区域无功/电压调节方式，最大限度地利用了全网无功补偿装置的出力，提高了电压水平，尤其是提高了主网的电压水平，保证了电网的电压稳定，也在一定程度上降低了线路损耗。AVC 的实施，标志着我国电网无功/电压调控具有了一定的系统意义。

本书是作者对十几年来在开发与实施 AVC 工作的理论与经验总结，也代表了电网 AVC 的先进水平。

本书在宽广的领域里为读者提供了关于 AVC 的基本概念、原理与功能，国内外研究现状、算法比较、控制策略、结构、软硬件、主站及子站、协调控制设计、工程化处理方法的详细资料。此外，读者还可阅读到电网 AVC 案例分析。特别是关于自动电压控制展望那一章，内容更为吸引人，阐述了无功优化和电压稳定与有功调度的协调关系，以及智能 AVC 等创新内容，可供探讨。

国民经济正处于调整经济结构、转变发展方式阶段中，对电网无功/电压调控问题提出了更高的要求，那就是安全、优质、经济三个指标同时达到最好，即传统的电网无功优化调度的目标，也是 AVC 的终极目标。

在交流电网中，只有在输电线路及变压器中通过最少量的无功状态下，才会有最好的电压质量、最小的线路损耗和最高的电压储备系数。在这种状态下，发电厂、变电站、用户的无功做到了就地平衡，输电线路的过剩无功在本线路的两端等量补偿。输电线路通过的无功最少，只有本线路过剩无功的一半；变压器中通过的无功最少，它等于高压母线上所连接的输电线路过剩无功之和的一半。无功做到了就地及分层平衡。电压质量最好，线路损耗最少，功角损失最小。这就是输电线路的经济压差（ΔU_j）无功潮流理论。

因此，作者提出了第二代 AVC 新概念。第二代 AVC 与 AVC 相比，增添了电网无功功率实时监测技术。目的是促进电网无功补偿装置布局逐步走向就地平衡，促进逐步采用动态无功补偿装置。没有合理的无功补偿布局，再好的控制理论及方法也无济于事，没有动态连续平滑调节的无功补偿装置，就不可能实现具有地点、时间与数量三维意义的无功就地平衡，就永远不能进入第三代 AVC，也就不可能实现安全、优质、经济三个指标同时达到最好的状态。

第二代AVC的基本做法是，用监控与数据采集（SCADA）装采集来的U、P、Q等数据，用ΔU_j潮流算法，按照监测与控制系统要求的刷新速度，以给定电压约束下的全网无功优化潮流为目标，求出发电厂、变电站应该注入电网界面的实时无功优化值（Q_{opt}），然后与实际值进行比较分析，求出偏差量，提出无功补偿装置的改进方案。本书对AVC的发展提出了宝贵的建议。

原湖南省电力公司调度中心教授级高级工程师
唐寅生

前　言

电压是电能质量的重要指标，长久以来，人们逐渐意识到电网低压运行会严重影响输变电设备送电能力，增加电网有功损耗，并且会导致电压崩溃等严重电力系统事故；而高压运行时，又会加速供电设备绝缘老化，影响生产过程的正常进行。可以说，电压质量在电能质量的考核中是第一位的，这种现象还将持续很长一段时间。

无功功率对电压损失影响很大，有功功率则对相角影响较大，对电压损失的影响较小。一般来说，减少无功功率在线路上的流动，合理地选择无功功率的就地平衡，是防止电压越限的主要手段。现在，世界范围内已形成共识：电压的水平由无功功率的水平决定。

既然无功功率和电压关系如此密切，那么电压的自动控制可以通过无功功率的自动控制来实现吗？答案是肯定的。2000 年我国便有了省级电压自动控制（AVC）系统项目的立项和一些地区级无功/电压自动控制系统的试运行。时至今日，AVC 系统已经诞生十年有余，在全国各省级、地级、县级区域得到了广泛应用，效果良好，产生了巨大的经济效益和社会效益。但是，智能电网的建设和电网的快速发展已经给 AVC 系统带来了新的问题和挑战：AVC 系统需要解决什么样的新问题，往哪个方向发展，需要应用哪些方面的技术等，这些本书都有涉及。

为了更好地帮助电力系统工程技术人员、科研人员以及高校学生掌握电力系统电压和无功功率的相关知识，深入研究和了解无功/电压自动控制系统在实际工程中的应用，以及对未来智能电网的电压控制的相关展望，作者潜心数年精心编写了《电网自动电压控制（AVC）技术及案例分析》一书。

本书对电网 AVC 技术领域的最新研究成果进行了总结和提炼，结合作者多年对无功优化在线控制的理论研究和工程应用经验，充分阐述了 AVC 中的建模、算法、控制等理论问题，以及在实际工程中的一些工程化的特别处理方法。此外，还对长久以来电力系统中争执不下的无功优化和电压稳定的关系等问题进行了讨论，并提出了 AVC 系统在面对智能电网时可能遇到的问题和解决方法。

本书在实际工程应用的介绍过程中阐述理论知识，介绍方法和模型，更有利于读者消化和理解。希望读者能在阅读本书的过程中体会到本书对实践操作的指导作用。

作者从事无功和电压方面的研究和教育工作已 20 余载，在 2000 年开发出了

用于地区电网的无功/电压自动控制系统，并随后在江苏省泰州市运行成功。在这20多年中，作者在无功优化、电压控制理论和实际工程应用方面积累了大量经验，本书也是作者这20多年的心血结晶，希望本书能够对广大读者有所帮助。

本书由河海大学能源与电气学院AVC课题组学术带头人丁晓群教授、周玲副教授组织和策划，其中第1、2章由周玲副教授撰写，第3、6章由南京河海电力软件公司的陈光宇撰写，第7、8章由丁晓群教授撰写，其余各章由河海大学能源与电气学院的刘寒寒、袁虎玲、刘洪亮、陆鹏程共同撰写。硕士研究生翟剑华、王小平、郭丽雅、蒋翔和顾乔根也参与了全书的校对工作，并最终由丁晓群教授审阅定稿。

由于作者水平有限，书中的疏漏和不妥之处在所难免，恳请广大读者不吝指正。

作　者

目　　录

序
前言
第 1 章　电网自动电压控制 …… 1
1.1　概述 …… 1
1.2　无功优化与电压控制 …… 1
1.2.1　无功优化与电压控制的重要性 …… 1
1.2.2　无功优化基本概念 …… 4
1.2.3　常用的无功补偿设备 …… 6
1.3　国内外无功优化研究现状 …… 9
1.3.1　国内外无功优化算法研究现状 …… 9
1.3.2　国内无功优化软件研究现状 …… 10
1.4　现代电网对 AVC 的需求 …… 11
1.5　电网 AVC 的基本原理和功能 …… 12
1.5.1　电网 AVC 基本原理与控制结构 …… 12
1.5.2　国外 AVC 系统发展现状 …… 16
1.5.3　国内 AVC 系统发展现状 …… 19
1.6　适应于不同电网的 AVC 算法比较 …… 20
1.6.1　无功优化算法综述 …… 20
1.6.2　人工智能算法 …… 22
1.6.3　无功优化混合算法 …… 25
1.6.4　适合地区电网 AVC 的无功优化算法 …… 25
1.6.5　适合省级电网 AVC 的无功优化算法 …… 28
第 2 章　地区电网 AVC 系统 …… 29
2.1　概述 …… 29
2.2　地区电网 AVC 模式和特点 …… 30
2.2.1　地区电网无功优化控制的特点 …… 30
2.2.2　无功优化在地区电网中的关键点 …… 33
2.2.3　地区电网 AVC 模式 …… 36
2.3　地区电网集中式 AVC …… 49
2.3.1　系统使用范围 …… 49

2.3.2　系统结构设计 …… 50
2.3.3　系统的功能 …… 53
2.4　地区电网分布式 AVC …… 56
2.4.1　系统使用范围 …… 56
2.4.2　系统结构设计 …… 57
2.4.3　地区电网分布式 AVC 系统主要功能 …… 65
2.5　地区电网 AVC 系统控制策略 …… 80
2.5.1　地区电网 AVC 系统控制策略概述 …… 80
2.5.2　地区电网 AVC 系统控制策略 …… 82
2.6　地区电网控制实验 …… 84
2.6.1　实施控制实验的原因 …… 84
2.6.2　控制实验的一般步骤 …… 85
第 3 章　省级电网电压/无功优化控制系统 …… 93
3.1　概述 …… 93
3.2　省级电网无功优化控制的特点 …… 93
3.3　省级电网无功优化控制的关键点 …… 94
3.4　省级电网无功优化控制主站系统 …… 95
3.4.1　系统的总体设计方案 …… 95
3.4.2　省网 AVC 系统的模型和主要算法 …… 98
3.4.3　系统控制策略 …… 114
3.5　省级电网无功优化控制子站系统 …… 117
3.5.1　电厂侧无功优化控制系统 …… 118
3.5.2　变电站侧无功优化控制 …… 123
3.6　结合电压稳定的省级电压/无功优化控制 …… 127
3.6.1　电压稳定裕度计算的方法 …… 127
3.6.2　无功优化和电压稳定的结合 …… 133
3.7　省级电压/无功控制和上下级电网的协调控制 …… 135
3.7.1　省地联调方案 …… 135
3.7.2　网省联调方案 …… 138
3.8　省级电压/无功控制工程实用化处理 …… 139
3.8.1　系统抵御异常的方法 …… 140
3.8.2　潮流改进与分析技术 …… 141
3.8.3　工程实用化策略 …… 142
3.8.4　引入负荷预测数据进行辅助控制决策 …… 144
第 4 章　电网 AVC 系统工程化处理 …… 145

4.1 概述 …… 145
4.2 输入数据的工程化处理 …… 145
4.2.1 数据的工程化处理 …… 145
4.2.2 量测数据和状态估计数据 …… 146
4.2.3 离散控制的工程化处理 …… 150
4.3 控制的工程化处理 …… 151
4.3.1 闭锁设置的应用 …… 151
4.3.2 主变压器并列运行的处理 …… 151
4.3.3 机组无功储备和进相工程化处理 …… 152
4.3.4 控制平稳的工程化处理 …… 153
4.4 精度的工程化处理 …… 153
4.4.1 负荷预测的应用 …… 153
4.4.2 外网等值的处理 …… 157
第5章 地区电网AVC系统应用案例分析 …… 165
5.1 概述 …… 165
5.2 衡水电网使用地区集中式AVC的案例分析 …… 165
5.2.1 衡水电网及集中式AVC应用概况 …… 165
5.2.2 集中式AVC在衡水地区应用案例分析 …… 166
5.3 某电网使用地区分布式AVC的案例分析 …… 177
5.3.1 某电网及分布式AVC应用概况 …… 177
5.3.2 分布式AVC在某地区应用案例分析 …… 178
第6章 省级电网无功优化系统实例介绍 …… 189
6.1 实例电网基本情况简介 …… 189
6.2 实例电网实施AVC系统的可行性 …… 189
6.2.1 调度自动化系统接入AVC系统的可行性研究 …… 190
6.2.2 AVC系统可行性研究 …… 191
6.3 实例系统的技术性能指标 …… 192
6.3.1 参考和引用的标准 …… 192
6.3.2 实施标准 …… 192
6.3.3 系统容量规模 …… 192
6.3.4 系统可用性指标 …… 192
6.3.5 系统可靠性指标 …… 194
6.3.6 系统信息处理指标 …… 194
6.3.7 实时性指标 …… 194
6.3.8 负荷率指标 …… 195

6.3.9　存储容量指标 …… 195
6.3.10　系统的冷启动、热启动和加电技术指标 …… 195
6.4　实例系统软硬件配置 …… 195
6.4.1　软件配置 …… 195
6.4.2　硬件结构图 …… 197
6.5　实例系统部分子系统和算例展示 …… 198
6.5.1　监视子系统部分功能展示 …… 198
6.5.2　维护子系统部分功能展示 …… 208
6.5.3　分析查询子系统部分功能展示 …… 215
6.5.4　权限管理子系统部分功能展示 …… 223
6.5.5　双机互备子系统部分功能展示 …… 225
6.5.6　跨越网络安全区实现数据同步方法展示 …… 226
6.5.7　控制实验子系统部分功能展示 …… 234
6.5.8　无功优化计算结果展示和分析 …… 239
第 7 章　AVC 辅助产品介绍 …… 245
7.1　概述 …… 245
7.2　动态无功优化配置软件 …… 245
7.2.1　经济压差优化潮流算法原理介绍 …… 245
7.2.2　系统结构设计 …… 246
7.2.3　系统实现的功能 …… 246
7.2.4　系统运行界面介绍 …… 247
7.3　实时线损分析和管理软件 …… 250
7.3.1　常用线损计算方法介绍 …… 250
7.3.2　系统结构设计 …… 252
7.3.3　系统功能特点 …… 252
7.3.4　实时线损分析与管理系统介绍 …… 253
7.4　电力变压器经济运行闭环控制系统 …… 271
7.4.1　系统概述 …… 271
7.4.2　系统主要特点 …… 272
7.4.3　系统正常运行流程 …… 273
7.4.4　系统控制策略 …… 275
7.4.5　系统展示 …… 277
7.4.6　控制流程展示 …… 277
7.4.7　主控界面 …… 283
7.4.8　参数配置与登录界面 …… 284

7.5 智能化降损节能软件集成包 …… 285
7.5.1 软件集成包概述 …… 285
7.5.2 软件集成包基本结构 …… 285
7.5.3 软件集成包主要特点与功能 …… 286
第8章 自动电压控制展望 …… 288
8.1 概述 …… 288
8.2 无功优化和电压稳定的协调 …… 288
8.2.1 电压稳定的定义 …… 288
8.2.2 无功优化和电压稳定 …… 288
8.2.3 无功和电压的关系 …… 289
8.2.4 无功传输特性 …… 290
8.2.5 考虑电压稳定约束的无功优化模型 …… 291
8.3 无功优化和有功调度的协调 …… 293
8.3.1 有功调度 …… 293
8.3.2 有功和无功解耦的优化协调 …… 296
8.4 SVC 在无功优化中的应用 …… 297
8.4.1 SVC 研究现状 …… 297
8.4.2 SVC 在电压控制方面的应用 …… 299
8.5 考虑谐波因素的无功优化 …… 301
8.5.1 谐波的模型及危害 …… 301
8.5.2 考虑谐波约束的无功优化模型 …… 304
8.6 第二代 AVC …… 305
8.7 智能 AVC …… 306
8.7.1 智能电网的概述 …… 306
8.7.2 智能 AVC …… 309
8.7.3 智能配电网 AVC …… 317
参考文献 …… 323

第 1 章　电网自动电压控制

1.1　概述

电力工业是国民经济的重要基础产业，近年来我国电力工业发展迅速，已进入大电网、大机组、西电东送、南北互济、全国连网的崭新发展阶段，供电量已经基本可以满足我国国民经济和社会发展的需求，而与此同时，电能质量成为日益突出的问题。电压是衡量电能质量的重要指标之一，电压过高会危及电气设备的安全，电压过低会影响设备的正常运行。电压能否维持在合格的范围内，不仅影响电力工业本身的安全，而且关系到千家万户。改善电压质量是节能的有效措施，也是防止电压崩溃提高安全运行水平的重要条件。本章对电压与控制的重要性、无功优化基本概念、无功功率的控制设备等电压/无功基础概念进行了综述性介绍，详细介绍了自动电压控制系统（Automatic Voltage Control，AVC）的基本原理与应用，最后对应用于 AVC 系统的算法进行了对比研究。

1.2　无功优化与电压控制

电压和无功功率的分布有着密不可分的关系。在许多情况下，无功功率是造成电网线路与变压器上电压损失和有功损耗的主要原因。由此可见，合理地调节无功，对于提高电压质量、降低系统网损具有重要的意义。无功优化就是其中的一个重要方面。通过无功优化可以优化电网的无功潮流分布，并降低电网有功损耗和电压损失，从而改善电压质量，使用电设备得到安全可靠的运行。在保证现代电力系统的安全性和经济性方面，无功优化的重要性已经得到全球各国的关注。随着电力市场改革的深化，厂网分开后，降低电网损耗（以下简称为网损）对电网公司来说变得非常重要。降低网损的重要途径就是降低电网的无功潮流流动，因此，电力系统无功优化的重要性越来越突出。

1.2.1　无功优化与电压控制的重要性

1.2.1.1　电压控制的重要性

随着电力工业的飞速发展，电力系统的规模日益扩大，其安全、经济和优质运行显得愈加重要。与此同时，随着电力体制改革的深入和电力市场的开放，用

电管理逐步走向市场，促使电力部门越来越重视电力系统的安全性和经济性。作为衡量电能质量的一个重要指标，电压质量对电网稳定运行、降低线路损耗、保障工农业生产安全、提高产品质量、降低用电损耗等都有直接影响。电压过高、过低或偏离一定范围都会影响用电设备的寿命和效率，严重时甚至会引起电压崩溃。国内外因此导致电力系统失去负荷甚至大面积停电的事故屡见不鲜，并造成了巨大的经济损失。

电压稳定问题的出现是与电力系统发展的趋势紧密相关的。近年来，随着科学技术的进步，为满足日益增长的电能需求，电力系统的发展出现了许多新变化。例如，电网电压等级的升高，电力系统的互连，大容量发电机组的普遍应用，远离负荷中心的水电厂、坑口电厂、核电厂的涌现，负荷容量的集中，直流输电和新型电力电子控制装置的应用等。这些新变化对合理利用能源、提高经济效益和保护环境都有重要意义。但受环境和建设成本的限制，电网结构相对薄弱，发电设备储备量较少，系统经常运行在重负荷条件下，同时国家对部分电力工业解除管制、实行市场化以后，电网的运行状态和当初的设计有了很大的差别，这些都给电力系统的安全运行带来了隐患，其中包括电压不稳定或电压崩溃引起的局部失去负荷或大面积停电。

我国虽然还没有发生过大范围的恶性电压崩溃事故，但电压失稳引起的局部停电事故却时有发生，例如 1972 年 7 月 27 日湖北电网、1973 年 7 月 12 日大连电网的停电事故等。目前，我国正处于经济快速发展的时期，电力系统也步入了大电网、超高压、大机组、远距离的时代。但由于当前的经济发展速度远远超出了在 1997 年亚洲金融危机时的预期，导致了今天甚至今后若干年内出现全国大范围内电力建设落后于经济发展水平的局面，电力系统运行在接近电网极限输送能力状态的几率大大增加，从而较大程度上威胁着电网的电压稳定。因此，在当前形势下，借鉴国外恶性电压崩溃事故和我国以往局部电压失稳的经验和教训，研究电压崩溃发生的机理、电压稳定的安全指标以及电压稳定的预防（紧急）校正控制措施，对于避免电压崩溃事故的发生，具有特别重要的意义。

就我国而言，社会主义现代化建设正蓬勃发展，各项技术也在不断进步，各行业用电量不断增加，我国将迎来电网建设的新高潮。根据我国电网目前的发展态势以及国民经济对电力负荷的增长需求，各地区电力系统的规模越来越大，系统间的互连将得到发展，电力系统无论在容量上、电网的复杂程度上，或者地区的跨度上都在迅速增加。展望今后电力系统的发展，多方面的原因会使系统稳定性问题变得愈加突出。如：①一些电源的位置将更加远离负荷中心，这一点在我国尤为突出；随着内陆和西部水利及煤炭资源的开发，必然形成由内陆向沿海工业地区远距离输电的局面。此外，从减少大气污染等出发，也要求电厂远离城市。这就造成线路电抗和传输功率的增大以及潮流的不合理分布，从而使系统电

压稳定性下降。②输电线路容量增大。但当线路因事故断开时，送、受端系统出现大的功率余额，增加了对电力系统稳定性的威胁。③输电线路的同杆并架增加了线路间多重事故的可能性，也给系统稳定性带来危害。

因此，借鉴国外恶性电压崩溃事故的经验教训，在我国加强电压稳定性及相关问题的应用研究，具有重要的理论和现实意义。

1.2.1.2　无功优化的重要性

在电力系统中，电源供给用户的功率可分为有功功率和无功功率，其中有功功率是用于转换成机械能、热能、光能等部分的能量；无功功率是指在交流电能的输送和使用过程中，用于电路内电场与磁场交换的那部分能量。在电力系统中，有功功率不足将引起频率下降，而无功功率不足将引起电压下降。系统中的无功电源主要是发电机及无功补偿装置。无功补偿装置有同步调相机、静止电容器和静止补偿器。无功负荷主要是异步电动机、变压器和线路无功损耗。其中异步电动机所占比重很大，变压器损耗也占了相当比重，线路电抗所消耗无功与线路等级和运行状况有关。

1. 无功功率的分布对电压有决定性的影响

由电压损失算式 $\Delta U = (PR + QX)/U$ 可见，在电网结构 $R + \mathrm{j}X$ 和电压 U 确定的情况下，电压损失 ΔU 与输送的有功功率 P 和无功功率 Q 成比例关系。当输送的有功功率一定的情况下，电压损失主要与输送的无功功率数值有关。当电力系统有能力向负荷供给足够的无功功率时，负荷的端电压就能够保持在正常的电压水平。如果系统无功电源容量不足，负荷的端电压就会降低。为此，要求电力系统必须有足够的无功电源容量（包括应有的无功电源备用容量），否则应增加必要的无功补偿设备，以保证电力系统的无功功率平衡。

2. 无功功率在线路中传输引起的功率损耗

根据功率损耗公式 $\Delta P = (P^2 + Q^2)R/U^2$，当有功功率 P 和无功功率 Q 通过网络电阻 R 时，都会产生有功功率损耗 ΔP。一方面，当输送容量 $P^2 + Q^2$ 和电压 U 一定时，功率损耗 ΔP 与网络电阻 R 成正比，即网络电阻 R 越大，功率损耗 ΔP 越大；反之，网络电阻 R 越小，功率损耗 ΔP 也越小。另一方面，当输送的有功功率 P 一定时，输送的无功功率 Q 越多，有功损耗 ΔP 就越大；反之，当输送的无功功率 Q 越小，有功损耗 ΔP 就越小。显然，当网络结构一定、输送的有功功率和电压也一定时，则有功功率损耗完全取决于所输送无功功率的变化。可见，在电力系统中，无功功率传输的数值对线路损耗有重要的影响。

3. 负荷无功功率对系统电压的影响

在额定电压附近，负荷从系统吸收的无功功率随电压的上升而增加，随电压下降而减小。当系统出现无功功率缺额，即无功电源不能提供足够的无功功率时，系统所接的各负荷的电压将下降，减少其向系统吸收的无功功率；当系统无