



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

风力发电并网 运行的无功管理

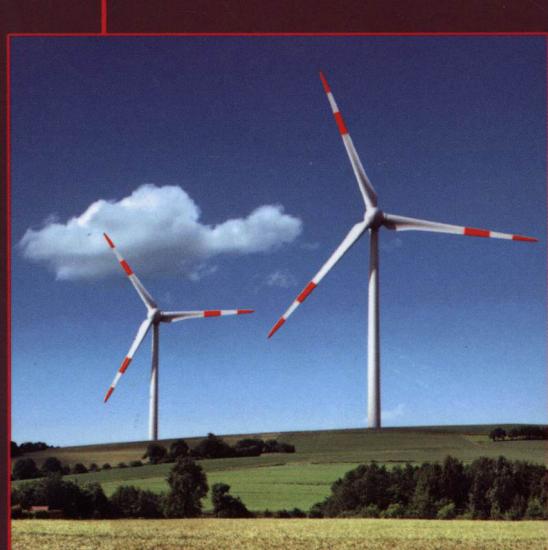
**Reactive Power Management of
Power Networks with Wind Generation**

Hortensia Amaris

(西) Monica Alonso 著

Carlos Alvarez Ortega

温春雪 胡长斌 朴政国 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



关于作者

Hortensia Amaris博士是马德里卡洛斯三世大学的教授和新能源系统电能质量研究小组的带头人。她的研究领域是可再生能源并网尤其是风力发电并网技术。她在这些研究领域内建树颇多并具有丰富的国际合作经验。她是数个国内和国际委员会的会员，是国际电工技术委员会IEC TC 88/MT 21“并网风力发电机电能质量特性测量与评估”专委会的西班牙代表，也是可再生能源系统与电能质量不同研究机构指导委员会的代表。她在卡洛斯三世大学电气、电子与自动化系承担了数门风电场无功功率管理的研究生课程。

Monica Alonso博士是马德里卡洛斯三世大学电气工程系的副教授。她的研究领域是风能和电动汽车等分布式能源的电力系统优化。她在风力发电预测和可再生能源并网方面做了大量的工作，在各种相关的期刊、会议发表了论文并出版了专著。她在马德里卡洛斯三世大学承担了数门电气工程专业本科生的电力系统分析课程。

Carlos Alvarez Ortega博士是马德里卡洛斯三世大学电气工程系的副教授。他的研究领域是风力发电系统的电气和电子技术。他也参与了数个国际合作项目。



国际电气工程先进技术译丛

风力发电并网运行的无功管理

Hortensia Amaris

(西) Monica Alonso 著

Carlos Alvarez Ortega

温春雪 胡长斌 朴政国 等译



机械工业出版社

大量风力发电接入电力系统会带来电压稳定性方面的问题，如何更好地解决这个问题近年来已经成为电力系统无功功率规划管理所必须要考虑的事情。本书在介绍各国电网运行规范、各种无功功率补偿设备以及风力发电机的基础上，重点介绍了风力发电并网运行情况下的无功功率规划管理控制策略及其相关的电压稳定性问题，最后分析了有大量风力发电接入电力系统后无功功率优化管理所带来的效益。本书既有传统无功功率补偿方法的介绍，也有风力发电并网运行后无功功率优化管理的新型控制策略分析。因此，本书非常适合于从事电气工程、新能源发电并网运行方向研究的工程师、研究生及高年级本科生阅读。

Translation from English language edition:

Reactive Power Management of Power Networks with Wind Generation

by Hortensia Amaris, Monica Alonso and Carlos Alvarez Ortega

Copyright © 2013 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社出版，未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字：01-2013-4245 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电并网运行的无功管理/(西) 霍滕西亚 (Amaris, H.), (西) 莫妮卡 (Alonso, M.), (西) 卡洛斯 (Ortega, C. A.) 著；温春雪等译. —北京：机械工业出版社，2014.4

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文：Reactive Power Management of Power Networks with Wind Generation

ISBN 978-7-111-46091-6

I . ①风… II . ①霍…②莫…③卡…④温… III . ①风力发电系统-电力
系统运行 IV . ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 044269 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：王 琪

版式设计：赵颖喆 责任校对：佟瑞鑫

封面设计：马精明 责任印制：李 洋

北京市四季青双青印刷厂印刷

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 7 印张 · 127 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-46091-6

定价：48.00 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

社 服 务 中 心：(010) 88361066 教 材 网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：(010) 68326294 机 工 官 网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010) 88379649 机 工 官 博：<http://weibo.com/cmp1952>

读 者 购 书 热 线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

到目前为止，风力发电仍然是具有竞争力和有效的新能源之一。风力发电的应用在稳步发展中，世界各国的风力发电装机容量都在不同程度地增加。但是，随着大规模风力发电接入电力系统，大容量风力发电的并网运行不仅会影响电力系统潮流，也会造成并网节点处出现电能质量和电压稳定性问题。无功功率补偿一直以来就是解决这些问题的传统方法，随着风力发电这种带有间歇性特点的新能源接入，电力系统的无功功率规划管理已经成为电力系统安全可靠运行所必须要考虑的重要问题。因此，如何更好地实现风力发电并网运行的电力系统的无功功率优化管理，如风力发电并网运行优化控制，风电场和无功功率补偿设备数量、容量、位置等的优化配置等正成为国内外高等院校、科研院所及相关企业的重点研究方向。本书即针对电能质量和电压稳定性问题，以风力发电机和无功功率补偿装置为基础，重点介绍了风力发电并网运行的电力系统的无功功率管理优化控制策略，并分析了通过风电场和无功功率补偿装置优化配置、减缓电压不稳定，进而防止电压崩溃的问题。本书共 6 章，从各个角度分析了无功功率优化管理的控制策略。

本书第 1~3 章由温春雪翻译，第 4 章由胡长斌翻译，第 5 章由朴政国翻译，第 6 章由刘欣博翻译。全书由温春雪统一校对定稿。另外，罗珊娜、刘志英、霍振国、王鑫、张明、王乃鑫等研究生也参与了修改整理及部分翻译工作。为了尽量保持原书的风格，书中图表以及公式中的符号、标注等并未完全按照国家标准统一，还请读者注意。同时，需要特别指出的是，译者严格按照原书的意思进行翻译工作，书中内容并不代表译者及译者所在单位的观点。

由于译者水平有限，翻译中必有错误不妥之处，衷心希望读者批评指正。

译者

前　　言

本专著的读者对象主要是从事风力发电及其并网运行研究的工程师和科学家。本书的内容主要集中于带有大量风力发电的电力系统的无功功率管理。如今，风力发电已经被证明是最有竞争力和最有效的新能源之一，因此，风力发电的应用在稳步增长。例如，截至 2010 年 6 月，全世界的风力发电总装机容量达到了 175000MW。进入配电网的风力发电不仅会影响电力系统潮流，也会同时导致某些电网节点出现低电压或高电压。此外，并网运行的风力发电可能会带来电能质量问题并产生任意类型的电压稳定性变化。

无功功率补偿系统是减缓电压稳定性问题的不错选择。无功功率规划管理近些年已经成为大型电力系统中的一个非常重要的任务，因此很有必要研究一些新技术以应对其中的问题。

大量风力发电的并网过程需要对应用于电力系统的这一新技术进行电力系统影响分析。据此，某些国家已经制定了一系列的电网运行规范来满足风电场并网的需求。此外，带有大量风力发电的电力系统需要明确规范数个方面的问题，如风力发电并网运行的最佳技术、并网的最优数量和规模。

目前，通过电力电子变换器，并网运行的变速风力发电机可以为电力系统提供无功功率。这种无功功率支持能力允许风力发电机参与常规同步发电机的无功功率辅助调节。然而，对于这种变速风力发电机的无功功率辅助调节功能的研究还较少。

本书第 1 章介绍了不同国家电网运行规范要求。第 2 章介绍了应用于 FACTS（柔性交流输电系统）中的各无功功率补偿装置，如静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）以及动态电压恢复器（DVR）。第 3 章简要介绍了风力发电机，其中分析了定速风力发电机和双馈感应发电机构成的风电场的无功功率管理和全功率变换器技术。

第 4 章分析了电力系统无功功率管理的优化控制策略。此外，对于无功功率的优化管理而言，元启发式技术是一个很好的选择，这种算法包括了这些无功功率补偿装置的运行、分布和容量优化。在这些技术中，遗传算法由于简单且运算速度快脱颖而出。本书所提的优化策略不仅可以优化无功功率补偿装置的分布，而且可以优化管理各装置的无功功率以实现电力系统中不同负荷和供电情况下的功率平衡。

第 5 章简述了电压稳定性问题，这一问题在电力系统处于重负荷、故障或缺乏无功功率补偿情况下是非常严重的。作为解决方案之一，本章表明通过功率变换器接入电网的风力发电机可以为电力系统提供快速动态的无功功率，因此它们在电力系统中的优化配置可以减缓电压不稳定问题甚至可以防止电压崩溃。

最后，第 6 章分析了带有大量风力发电的电力系统的无功功率管理优化带来的相关效益。

本书对上述章节中所提方法的有效性进行了仿真验证，这些验证都是基于电网安全运行标准，并以实际电力系统为模型进行的仿真。

目 录

译者序

前言

第1章 引言	1
1.1 无功功率和电压稳定性	1
1.2 电网对无功功率的规范要求	2
参考文献	7
第2章 柔性交流输电系统装置	8
2.1 静止无功补偿器 (SVC)	8
2.2 静止同步补偿器 (STATCOM)	11
2.2.1 运行模式	11
2.2.2 控制方法	12
2.2.3 运行限制条件	13
2.2.4 STATCOM 在风电场中的应用	13
2.3 STATCOM 与 SVC 的对比	14
2.4 动态电压恢复器 (DVR)	15
2.4.1 DVR 控制	15
2.4.2 数值结果	17
2.4.3 定速机组风电场在电压跌落时无功功率的支撑	21
参考文献	24
第3章 风力发电机	26
3.1 风力发电机原理	26
3.2 机械模型	27
3.3 定速风力发电机	28
3.4 双馈感应发电机	29
3.4.1 双馈感应发电机的稳态模型	30
3.4.2 输送到电网的有功功率	31
3.4.3 输送到电网的无功功率	31
3.4.4 双馈感应发电机传输功率极限	31
3.4.5 双馈感应发电机的最大容量	35
3.5 直驱式风力发电机	37

3.5.1 直驱式风力发电机的发电容量.....	38
3.5.2 PQ 容量	40
参考文献	43
第4章 无功功率的优化	44
4.1 潮流优化概述.....	44
4.2 公式化.....	44
4.3 限制条件.....	45
4.4 基于电压稳定概念的模型.....	46
4.5 目标函数的选择.....	46
4.5.1 最小化可变成本.....	47
4.5.2 可变成本和有功功率损耗最小化.....	47
4.5.3 可变成本和燃料成本最小化.....	47
4.5.4 与设定点偏离的最小化.....	48
4.5.5 多目标方程.....	48
4.6 解决无功功率规划的方法.....	49
4.6.1 传统方法.....	49
4.6.2 改进方法.....	50
4.7 实例.....	54
4.7.1 初始群体.....	54
4.7.2 评估.....	55
4.7.3 选择.....	55
4.7.4 交叉操作.....	56
4.7.5 突变.....	57
4.7.6 新群体.....	57
4.7.7 最终解.....	58
参考文献	59
第5章 风电并网电力系统的电压稳定性	61
5.1 电压稳定的定义和概念.....	61
5.2 双母线电力系统的电压稳定.....	62
5.3 风电场电压稳定的增强.....	64
5.4 最优稳定电压.....	66
5.5 案例研究.....	68
5.5.1 IEEE-14 母线电力系统	68
5.5.2 应用案例.....	72
参考文献	75

VIII 风力发电并网运行的无功管理

第6章 无功功率管理	77
6.1 无功功率规划.....	77
6.1.1 目标函数.....	77
6.1.2 现有的 140 母线系统结果.....	79
6.2 多目标规划.....	84
6.3 无功功率辅助设备.....	86
6.3.1 低谷期电力需求和最大风力发电量.....	87
6.3.2 低谷期电力需求和最小风力发电出力.....	88
6.3.3 高高峰期电力需求和最大风力发电出力.....	88
6.3.4 高高峰期电力需求和最小风力发电出力.....	89
6.4 无功功率调度.....	90
参考文献	93
附录	94
附录 A 母线负荷数据	94
附录 B 线路数据	98

第1章 引言

欧洲的有效能源管理，可再生能源的广泛应用与节能共同建立起了旨在减少温室气体排放和履行在联合国气候变化框架公约下批准通过的京都议定书的一些强制性的基础措施。这一系列的措施旨在到 2012 年以及随后几年中进一步减少温室气体排放^[1]。

据国际能源机构研究，风能到 2030 年将占有欧洲电能产量供应的 14%，并且其对 2006 ~ 2030 年期间发电总量的贡献将达到 60%。此外，该机构还表明直到 2050 年风能都将会是被广泛开发的能源，达到每年高于 70000MW 装机容量。其中的 30% 将由海上风电场产生。这一评估是在多种可持续能源发展方案（如 BLUE 方案）的背景下提出的，其主要目的是在 2005 ~ 2050 年里进一步减少温室气体排放，其中依靠风力发电减少 26%。

在考虑这个背景的前提下，指导性文件 2009/28/CE^[2] 的重点是聚焦在可再生能源的推广上，即到 2020 年年底欧盟各成员国的电能总消耗的 20% 将由可再生能源提供。为了满足这一欧洲标准，该指导性文件为每个成员国设置了相应的目标。

1.1 无功功率和电压稳定性

由于电力需求的不断增加，电力系统的运行和操作工况正逐渐接近于其最大容量。由于受这样的电力系统运行条件的影响，在过去的几年中出现了许多电压稳定性问题，这些问题甚至导致了电压崩溃。例如，在不列颠哥伦比亚（1979 年）、比利时（1982 年）、瑞典（1983 年）、布列塔尼和东京（1987 年）等国家和地区发生的电压稳定性事故，在已有文献中都是有据可查的。

电压稳定性，也称负荷稳定性，与电力系统中的无功功率缺额有密切关系。以前，无功功率的校正通常是结合无功补偿器（如电容器组）进行的。然而除了常规的电容器外，现在可以使用被称为柔性交流输电系统（FACTS）的电力电子装置来提高电压稳定性。这些元器件装置的主要特性包括改善电网电压的分布、增强电力系统的动态性能以及提高电力系统的电能质量。FACTS 装置的安装是否合理通常是指它们对无功功率的动态补偿、电压控制和它们的快速响应性来判断的。

无功功率源是改善电力系统的电压稳定性最好的设备。因此风力发电对电力系

统的影响也主要集中在安全、稳定、电能质量和对电力系统运行等几个相关问题。

1) 所有的设施必须保持电压在一定范围的频率和幅值内稳定可靠。风电场的并网可能会导致电压发生变化。因此，一些国家已经定义了一个较高的并网点短路容量，该容量通常是风电场容量的 20 ~ 25 倍。现在已经有了一些用较低短路容量并网运行的例子^[3]。

2) 电能质量主要与电力系统的电压变化和谐波失真有关。然而，并入电网的风力发电会影响用户端的电能质量。为了减少这种影响，带有电力电子装置的变速风力发电机已经被广泛地应用于风力发电系统中。这些电力电子装置由于可以被控制以减少谐波失真、电压波动或闪变，故而能提高电能质量。

3) 保护系统也会受到风电场的影响，这是因为风力发电的并网改变了电力潮流，从而使常规的保护系统可能在有电网故障的情况下失灵。

4) 在过去，电网在大多数情况下处于被动运行和保持稳定状态。然而，随着风力发电渗透率的增加，电网不应再处于被动运行的水平。目前，风力发电机组设计的新要求，如低电压穿越能力，已经考虑了在几种干扰情况下能保持电网运行稳定。

1.2 电网对无功功率的规范要求

为了提高风力发电在电网中的渗透率并同时确保风力发电供电的连续性和安全性，许多国家已经针对风电场制定了具体的电网规范^[4]。通常，这些电网规范集中在功率的可控性、电能质量和在电压骤降情况下风力发电机组通过对电网进行无功功率支撑进而实现故障穿越的能力上。图 1.1 给出了风力发电机组的功率因数、电压、有功功率相关的技术要求。

在电压变化的条件下，电网规范要求风力发电机应具有和传统发电机相似的性能，即风力发电机必须在提供最大的额定有功功率的同时还具有提供一定无功功率的能力。

图 1.2 比较了这些基于功率因数的技术要求，即德国电网规范（E.ON 规范^[4,5]）和英国电网规范 [NGT（国家电网输电）规范^[6]]。E.ON 规范定义了 380kV、220kV 和 110kV 电网，它描述了风电场在并网公共连接点（PCC）应该能够运行在滞后与超前的功率因数下。德国电网规范对于海上风电场^[6]有特殊要求，即其标称电压为 155kV。在英国电网规范下，NGT 要求^[7]对于电压等级为 400kV、275kV 和 132kV 的电网，风电场应该能够提供最大容量的无功功率以维持连接点处的电压水平在标称值即标幺值为 1 的范围。此外，英国电网规范要求每一个风电场在连接点处都有自动电压控制。最后，ESB（英国国家电网）制定的爱尔兰电网规范^[8]适用于 400kV、220kV 和 110kV 的电压等级电网。

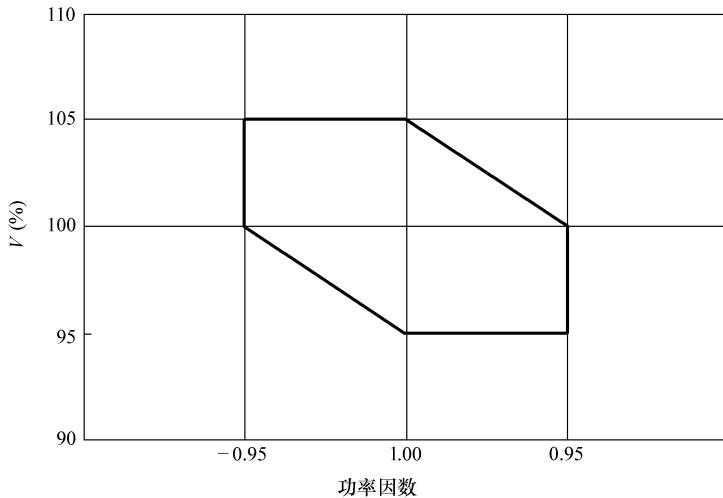


图 1.1 风力发电机组电压与功率因数的标准要求

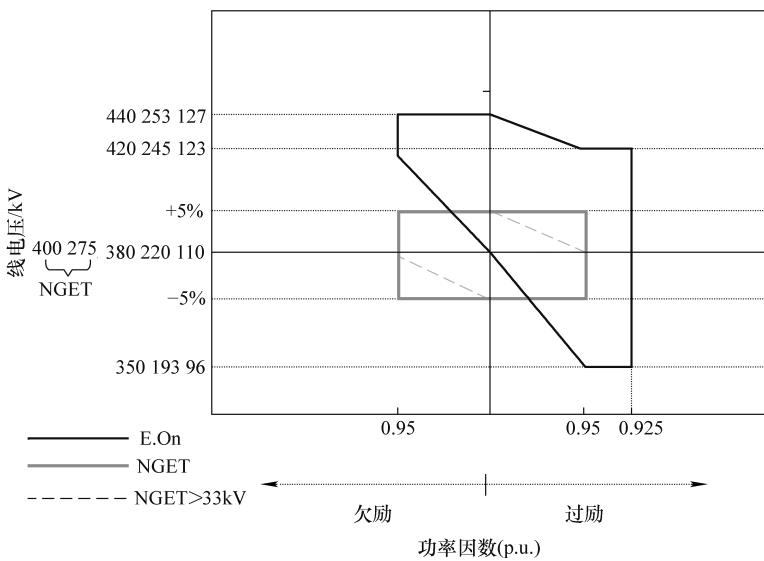


图 1.2 德国和英国的功率因数并网要求

图 1.3 给出了 ESB 和 NGET 电网规范关于无功功率容量变化的要求。被点 A、B、C 和 D 分隔的区域对应着爱尔兰电网规范要求的基于功率因数的无功功率容量。有功功率的 10% 以下的黑色三角表示无功功率输出在运行期间一定要在 10% 的范围内变化。点 A 表示处于超前功率因数为 0.95 额定有功功率下的无功功率输出，点 B 对应于滞后功率因数为 0.95 额定有功功率下的无功功率输出。同样的，

点 C 和 D 表示无功功率输出为 $\pm 5\%$ 的功率因数，点 E 表示 12% 标称容量下的功率因数。对于爱尔兰电网规范要求的运行，风力发电机运行在超前或滞后 0.835 功率因数时应至少能提供 50% 的额定功率。

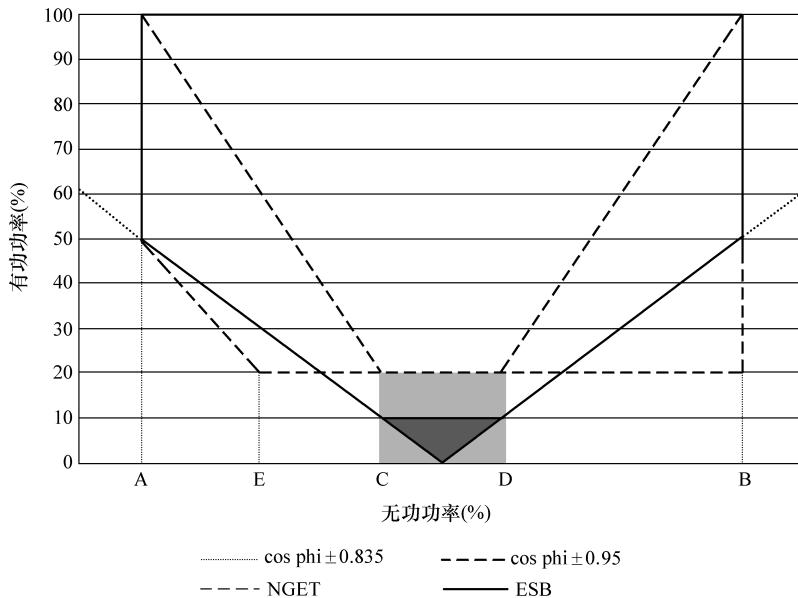


图 1.3 英国和爱尔兰的无功功率要求

Nordel (北欧电力协会) 电网规范^[9]描述了瑞典、丹麦、挪威、芬兰等 4 个斯堪的纳维亚半岛国家的电网规范要求。Nordel 电网规范规定风力发电机应控制其无功功率的输出来调节并网连接点的电压，以便风力发电机运行在下面的功率因数情况下可以保持连续的额定运行：

- ① 并网连接点处电压在 90% ~ 100% 的额定值范围内，功率因数为 0.95；
- ② 并网连接点处电压在 100% ~ 105% 的额定值范围，功率因数为 0.95 过励。

Eltra 公司的电网规范^[10,11]规定发电机注入的无功功率应该在图 1.4 所示的整个范围内都能够被控制。图中对应功率因数为 0.995 的那条线，其无功功率可以认为是保持平均值超过 10s。无论是一台风力发电机组还是整个风电场，其无功功率控制都可以单独进行。

比利时输电系统运营商——ELIA 系统运营商 S. A 公司负责着国家电压等级为 380kV、220kV、150kV 输电网和 94% 的 30 ~ 70kV 配电网运行^[12]。比利时电网规范规定容量超过 25MW 的风电场应该能够控制其 -10% ~ 45% 容量的无功功率。换句话说，风电场必须有能力从电力系统中吸收或者注入无功功率^[4]。

魁北克电力公司^[13]规定，容量超过 10MW 的风电场必须配备能够在相应的滞

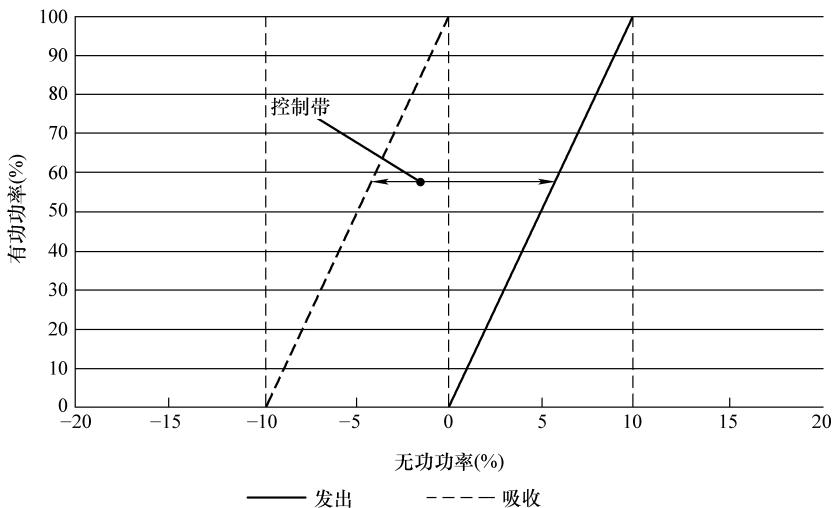


图 1.4 ELTRA 公司风电场在并网连接点处的无功功率要求

后或超前 0.95 额定功率因数区间内操作运行的电压自动控制装置。此外，这个规范重申了风电场无论在电力系统正常运行还是动态变化情况下都可以对电网电压控制有所贡献的要求。

加拿大的电网规范（即 AESO 规范^[14]）规定风电场中电压调节和无功功率调整必须要在并网变压器的低压侧进行。图 1.5 给出了加拿大 AESO 电网规范对无功

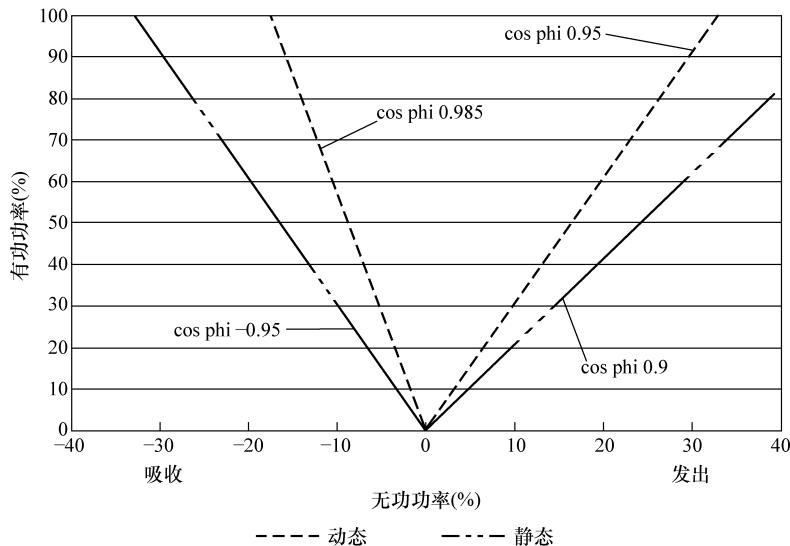


图 1.5 加拿大的 AESO (阿尔伯塔省电力系统运营商) 电网规范要求

功率的要求。电压调节要求的目的是为了使电压扰动调节的合理响应能达到如同被控电压稳定调节在 $\pm 0.5\%$ 一样的效果^[14]。两个区域要加以区分：一个区域对应于系统的连续运行，在额定有功功率输出时功率因数在超前 0.95 和滞后 0.9 的间隔范围内变化；另一个区域的无功功率是动态变化的，即在额定有功功率输出时功率因数是在 $-0.985 \sim 0.95$ 的间隔范围内变化。

图 1.6 简要总结了对应于不同分析状态下并网规范的相关功率因数的所有要求。

可以看出，加拿大的电网规范在额定有功功率输出时对无功功率有更多的要求，即风力发电机被要求提供从滞后 0.90 到超前 0.95 的无功功率支撑。这个无功功率限制是有功功率在 70% ~ 100% 的范围内得到的。与此同时，在负荷减少的情况下爱尔兰的电网规范要求将超过加拿大规范，即对于爱尔兰电网风力发电机要能提供超前 0.95 到滞后 0.90 范围的无功功率支撑。

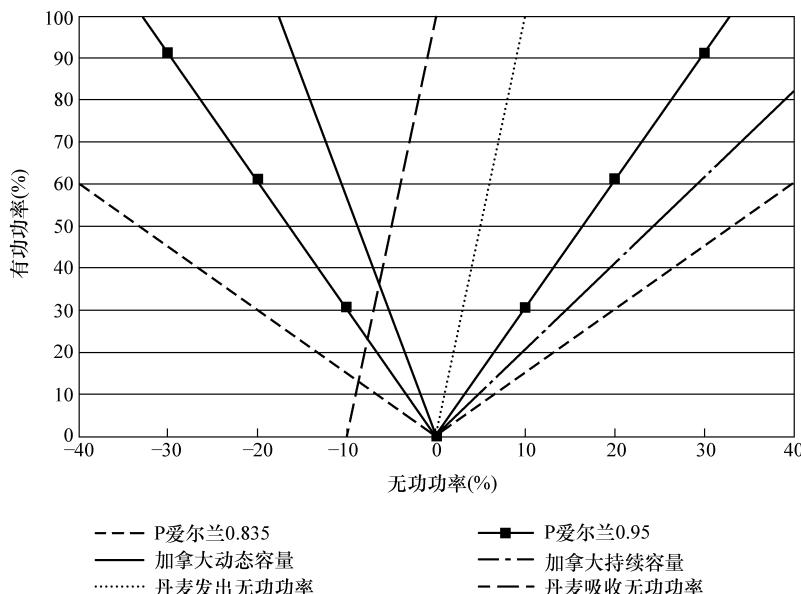


图 1.6 不同电网规范要求总结

就无功功率控制而言，对于定速风力发电机并网连接技术的要求是通过连接在风力发电机组或风电场终端安装 FACTS 装置来实现。对于双馈异步发电机和全功率变流器，其无功功率的控制可以通过调节变速风力发电机组的变流器来实现。

参考文献

1. Bianchin R, Azau S (2011) EU energy policy to 2050: achieving 80–95% emissions reductions. EWEA, March 2011
2. DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. 23 Apr 2009
3. Anaya-Lara O, Jenkins N, Ekanayake J, Cartwright P, Hughes M (2011) Wind energy generation: modelling and control. Wiley, Chichester
4. Tsili M, Papathanassiou S (2009) Review of grid code technical requirements for wind farms. IET Renew Power Gener 3(3):1–25
5. EON Grid Code – High and extra high voltage. April 2006
6. Requirements for Offshore Grid Connections in the E.ON Netz Network. April 2008
7. Grid code, issue 3, rev.24. National Grid Electricity Transmission plc, UK, Oct 2008
8. Grid code-version 3.0. ESB National Grid, Ireland, Sept 2007
9. Nordic Grid Code. Nordel, Jan 2007
10. Grid connection of wind turbines to networks with voltage below 100 kV, Regulation TF. 3.2.6. Energinet, Denmark, May 2004
11. Grid connection of wind turbines to networks with voltage above 100 kV, Regulation TF. 3.2.5. Energinet, Denmark, Dec 2004
12. Fulli G, Ciupuliga A, L'Abbate A, Gibescu M (2009) REseArch, methodoLogies and technologieS for the effective development of pan-European key GRID infrastructures to support the achievement of a reliable, competitive and sustainable electricity supply. Deliverable Report 2009
13. Transmission provider technical requirements for the connection of power plants to Hydro- Quebec transmission system. Hydro Quebec Transenergie, 2006
14. Wind power facility technical requirements. Revision 0. Alberta Electric System Operator (AESO), Canada, November, 2004

第2章 柔性交流输电系统装置

近年来，随着电力电子技术的进步，大功率电力电子装置飞速发展。因此，这些电力电子技术和装置在电力系统中的应用越来越广泛。这些称为柔性交流输电系统（FACTS）的电力电子装置，主要是基于电力电子功率变换器对电力系统实现快速调节和控制。FACTS 装置可以串联、并联或串并联。它们对电网运行的改善作用已经在大量科学文献中被讨论过。这些改善作用包括提高电网的稳定性、控制电网有功功率和无功功率的潮流、减小损耗和提高电网运行效率。

由于输电系统运营商（TSO）的电网规范要求风力发电机组应提供与传统同步发电机类似的辅助设备服务，所以 FACTS 装置（串联或并联）在风电场变电站或风力发电机组终端上安装的数量迅速增长。

2.1 静止无功补偿器（SVC）

根据 IEEE 的定义，静止无功补偿器（SVC）定义为一种并联型的静止无功发生器或吸收器，其输出可以调节交换容性或者感性电流，从而维持或者控制电力系统中的某些特定参数（一般为母线电压）^[1]。

典型的 SVC 分为晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电抗器（TSR）和晶闸管投切电容器（TSC）。TCR 的单相等效电路如图 2.1 所示，并联电抗器通过控制双向晶闸管导通实现从最小值（通常为零）到最大值范围内的动态控制。通过这种控制方式，SVC 相当于一个可变的并联电抗，其基本结构就是并联电容电抗 X_C 和通过晶闸管开关动态控制的有效的感抗 X_L 的并联。

运行模式

SVC 电流的瞬时值可用下式表示：

$$I = \begin{cases} \frac{U}{X_L} (\cos\alpha_{SVC} - \cos\omega t) & \alpha_{SVC} \leq \omega t \leq \alpha_{SVC} + \varepsilon \\ 0 & \alpha_{SVC} + \varepsilon \leq \omega t \leq \alpha_{SVC} + \pi \end{cases} \quad (2.1)$$

式中 U ——公共连接点（PCC）处 SVC 的电压；

X_L ——SVC 的总电感值；

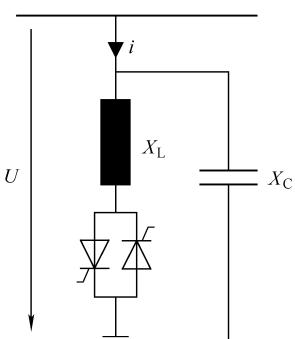


图 2.1 并联 SVC (TCR)
单相等效电路

α_{SVC} ——触发延迟角；

ε ——SVC 导通角。

$$\varepsilon = 2(\pi - \alpha_{\text{SVC}}) \quad (2.2)$$

由上式可见：随着触发延迟角 α_{SVC} 的增大，晶闸管的导通角 ε 相应减小。

图 2.2 ~ 图 2.4 给出了不同的触发延迟角下，TCR 注入电网的电流波形。

通过控制晶闸管的触发延迟角，可以调节 SVC 的输出电流。故当触发延迟角为 90° （晶闸管完全导通）时，此时 SVC 的电流最大；当触发延迟角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间变化时，晶闸管部分导通，此时，相当于增大了装置的感抗，进而减少了其无功功率和电流的输出。

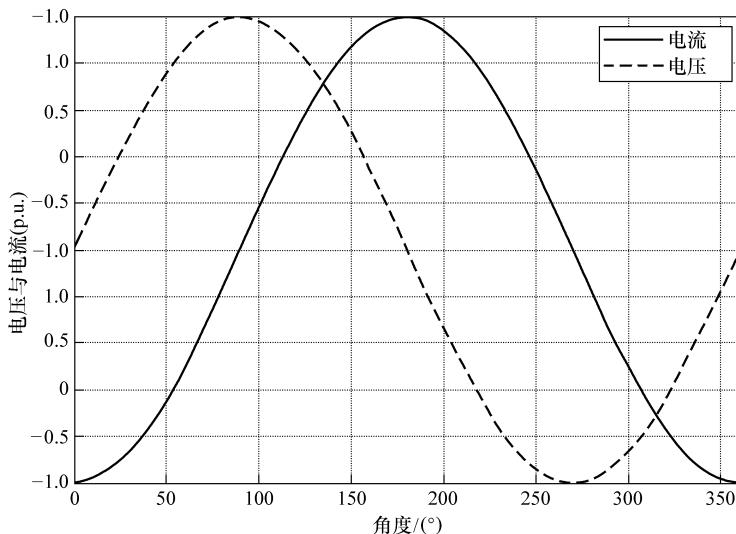


图 2.2 $\alpha_{\text{SVC}} = 90^\circ$ 时交流电流波形

对上述电流进行傅里叶分解或通过其简化形式化简可以得到电流的基波分量为

$$I_1 = \frac{2(\pi - \alpha_{\text{SVC}}) + \sin 2\alpha_{\text{SVC}}}{\pi X_L} U \quad (2.3)$$

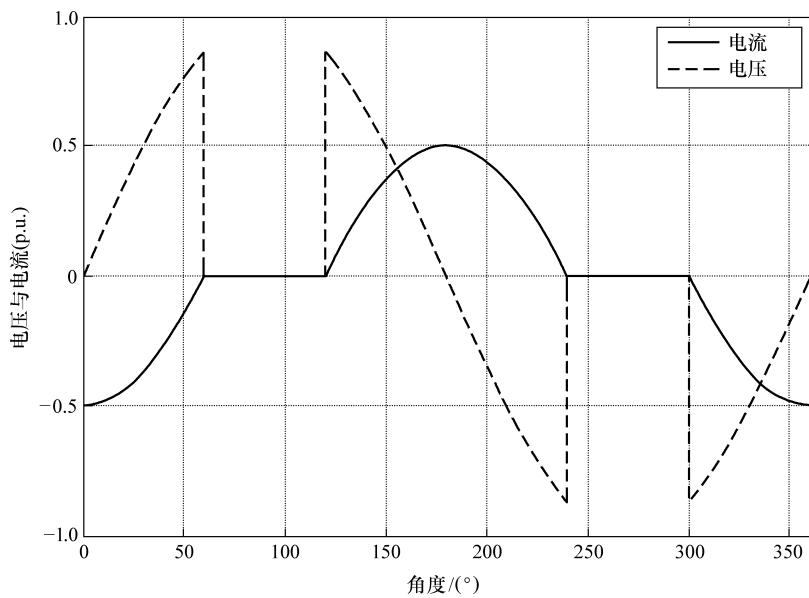
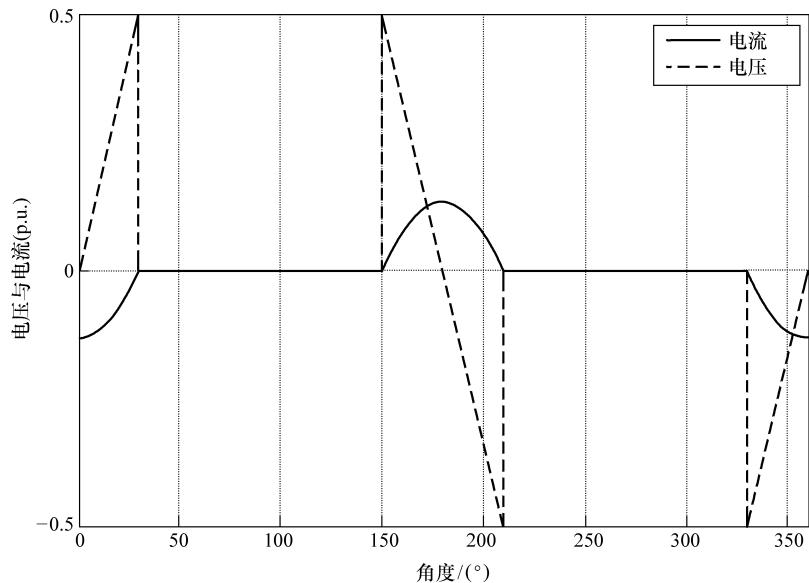
上式又可改写为

$$I_1 = B_{\text{SVC}}(\alpha_{\text{SVC}}) U \quad (2.4)$$

其中：

$$B_{\text{SVC}}(\alpha_{\text{SVC}}) = \frac{2(\pi - \alpha_{\text{SVC}}) + \sin 2\alpha_{\text{SVC}}}{\pi X_L}$$

当导通角为 180° 时，晶闸管组完全导通，此时等效导纳最大，其值 $B_{\text{SVC}} = 1/X_L$ 。当导通角等于 0° 或者触发延迟角为 180° 时，等效导纳最小，其值 $B_{\text{SVC}} = 0$ 。晶闸管的触发延迟角在小于 90° 时会产生含有高次谐波的不平衡电流，因此触发延

图 2.3 $\alpha_{\text{SVC}} = 120^\circ$ 时交流电流波形图 2.4 $\alpha_{\text{SVC}} = 150^\circ$ 时交流电流波形

迟角不得小于 90° 。

在整个控制范围内电压与 SVC 补偿电流之间的斜率变化可以通过电压-电流特

性表述：

$$U = U_{\text{ref}} + X_{\text{SL}} I \quad (2.5)$$

SVC 的电压 - 电流特性曲线如图 2.5 所示， X_{SL} 的值在以 SVC 的基准值为基准的 0.02 ~ 0.05 标幺值之间变化。在极限情况下，SVC 相当于一个固定的电抗。

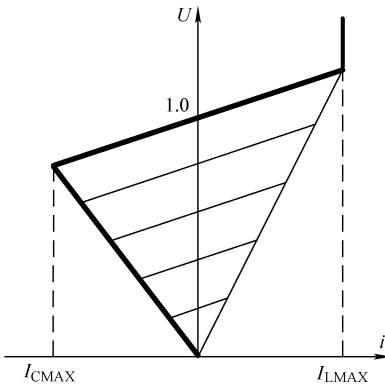


图 2.5 SVC 的电压-电流特性

TCR 产生的无功功率表达式如下：

$$Q_{\text{SVC}}(\alpha_{\text{SVC}}) = \frac{U^2}{X_c} - U^2 B_{\text{SVC}}(\alpha_{\text{SVC}}) \quad (2.6)$$

从电力系统的规划来看，FACTS 装置的选址和容量优化对有高风力发电渗透率的电力系统运行以及维持整个电力系统安全有效运行至关重要。

2.2 静止同步补偿器 (STATCOM)

STATCOM 的概念是美国学者 L. Gyugyi 于 1976 年提出的。IEEE 将 STATCOM 定义为一种运行效果相当于并联了静止无功补偿装置的静止同步发电机，并且能在不依赖于电网交流电压的情况下对感性或容性输出电流进行控制的装置。

STATCOM 并联于电网中，是一种补偿电力系统所需无功功率的静态补偿器。它可以在不依赖于电网电压的情况下，控制注入或吸收电网中的无功功率^[1,2]。STATCOM 的基本形式为电压源型变流器 (VSC)，它将直流侧电压转换成给定幅值和可控相位的基频交流电压。STATCOM 对交流侧电压实现动态控制，以补偿电网所需的无功功率。

2.2.1 运行模式

VSC 产生的基频电压 $\dot{U}_{\text{st}} = U_{\text{st}} \angle \delta_{\text{st}}$ ，其幅值和相位均可控。其等效电路如图 2.6 所示，VSC 通过一个串联感抗 Z_{sh} 连接到电网上 $\dot{U}_i = U_i \angle \delta_i$ ，其感抗代表耦合

变压器和滤波器的感抗值。

VSC 与电网交换的有功、无功功率可以表示如下：

$$P_{st} = U_i^2 g_{sh} - U_i U_{st} [g_{sh} \cos(\delta_i - \delta_{st}) + b_{sh} \sin(\delta_i - \delta_{st})] \quad (2.7)$$

$$Q_{st} = -U_i^2 b_{sh} - U_i U_{st} [g_{sh} \sin(\delta_i - \delta_{st}) - b_{sh} \cos(\delta_i - \delta_{st})] \quad (2.8)$$

式中

$$Y_{sh} = \frac{1}{Z_{sh}} = g_{sh} + jb_{sh}$$

如图 2.7 所示，注入电力系统的无功功率的大小受电力半导体开关最大电压和最大电流的限制。

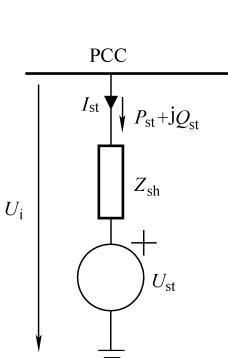


图 2.6 STATCOM 等效电路

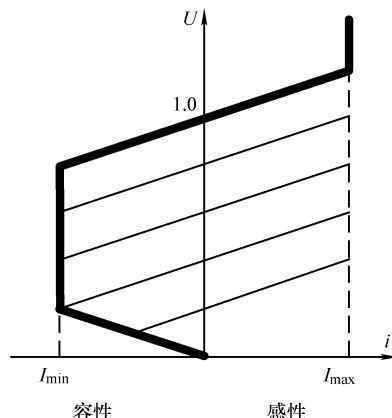


图 2.7 STATCOM 的电压-电流特性

基于 VSC 的 STATCOM 的工作原理取决于变流器和电网之间功率交换的控制策略，还取决于变流器输出交流电压的大小。如果变流器电压的幅值与电网电压的大小相等，即 $U_{st} = U_i$ ，那么 STATCOM 与电网之间交换的无功功率等于零。

相反，如果变流器的电压小于公共连接点处的电网电压，即 $U_{st} < U_i$ ，STATCOM 将吸收无功功率（吸收滞后电流）。可是，如果 STATCOM 变流器的输出电压高于公共连接点处的电网电压，那么它将向电网注入无功功率。

实际中，同样有必要通过调节 VSC 电压 $\dot{U}_{st} = U_{st} \angle \delta_{st}$ 和 PCC 电压 $\dot{U}_i = U_i \angle \delta_i$ 之间的相位角 $\delta_{i-st} = \delta_i - \delta_{st}$ ，来控制 STATCOM 交换的有功功率，以便 VSC 从电网中吸收有功功率以维持直流环节电压恒定。

2.2.2 控制方法

如参考文献 [4] 所述，STATCOM 的控制方法多种多样。下面列出的是其中最典型的两种方法：

(1) PCC 处电压就地控制 在这种控制策略中，目的是为了调节 PCC 的电压

U_i , 使其保持为常数, 即参考值 U_i^{ref} 。在数学意义上, 这种状态可以表示为一个运行限制条件:

$$U_i - U_i^{\text{ref}} = 0 \quad (2.9)$$

(2) PCC 处无功功率控制 在许多情况下, STATCOM 需要根据 TSO 的技术要求向电网注入无功功率。例如, 这种控制方式可以用于 FACTS 装置的协调控制或者风电场向整个电网输出无功功率^[5]。如果想要得到这种运行状态, 则必须遵从如下的运行限制条件:

$$Q_{\text{st}} - Q_{\text{st}}^{\text{ref}} = 0 \quad (2.10)$$

2.2.3 运行限制条件

STATCOM 所能提供给电网的最大无功功率, 取决于功率半导体器件所允许的最大电压和电流, 所以 STATCOM 的运行有必要包含以下内部约束条件:

- 1) VSC 的输出电压必须在允许限值范围之内:

$$U_{\text{st},\text{min}} \leq U_{\text{st}} \leq U_{\text{st},\text{max}} \quad (2.11)$$

式中 $U_{\text{st},\text{min}}$, $U_{\text{st},\text{max}}$ —— 分别表示功率半导体器件允许的最小和最大电压的极限值。

2) STATCOM 注入电网的电流 I_{st} 必须小于功率半导体器件允许的最大电流 $I_{\text{st},\text{max}}$:

$$I_{\text{st}} \leq I_{\text{st},\text{max}} \quad (2.12)$$

式中

$$I_{\text{st}} = \left| \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{\text{st}}}{Z_{\text{st}}} \right| \quad (2.13)$$

3) 相反, STATCOM 的运行还需要包含 PCC 处电网电压的外部约束条件。根据电网运营商的运行条例, PCC 处的电网电压必须维持在一定的允许范围之内:

$$U_{i,\text{min}} \leq U_i \leq U_{i,\text{max}} \quad (2.14)$$

2.2.4 STATCOM 在风电场中的应用

最开始关于分析 STATCOM 在风电场应用的研究始于 20 世纪 90 年代末, 目的是为了改善电压闪变和定速风力发电机组的电能质量(见图 2.8)。在这种情况下, 变流器控制为单位功率因数运行, 以便风电场和电网之间没有任何无功功率交换。通过向电网注入无功功率的这种策略已经在参考文献 [6] 中被证实可以提高电网稳定性并改善风电场变电站(风力发电机和 STATCOM)的动态运行。

丹麦的 Rejsby Hédé 风电场在 1998 年安装了一台额定功率为 8Mvar 的 STATCOM 用以补偿风电场中的无功功率。该风电场由 40 台 600kW 的风力发电机组组成, 总装机容量为 24MW^[7]。装设 STATCOM 的主要目的是提高电能质量并提供风电场运行所需的无功功率。值得注意的是, 风电场所需的无功功率低于 STATCOM 的最大容量时, 才有可能使风电场运行在单位功率因数下(而不是调节风电场和电网

之间交换的无功功率)。不管怎样, 风电场都需要大约 8Mvar 的无功功率容量去吸收电网的无功功率。

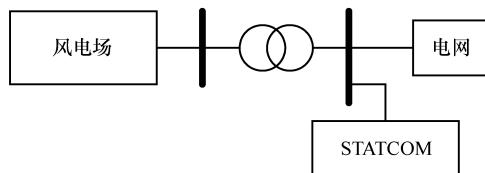


图 2.8 风电场变电站安装的 STATCOM

近年来, 有关无功功率调节和低电压穿越能力 (LVRT) 的新电网规范导则使得 SVC 和 STATCOM 装置在风电场中的应用再次引起人们的兴趣。参考文献 [8] 讨论了应用 STATCOM 改善电压波动的作用; 参考文献 [9] 分析了如果安装在风电场 PCC 处的是 STATCOM 装置而不是 SVC 时将如何提高定速风力发电机的低电压穿越能力。后一篇参考文献强调了这样一个事实, 那就是 STATCOM 的固有特性, 即在不考虑电源电压等级的前提下通过向电网注入可调的无功电流增加系统暂态稳定裕度; 因此, 它们是在电网电压跌落时为风力发电机提供低电压穿越能力的理想设备。

参考文献 [10] 分析研究了 STATCOM 配合 DFIG 变速风力发电机协调控制注入电网无功功率的可能性。STATCOM 向 PCC 点注入无功功率的主要目的是为了减小风电场终端的电压跌落深度, 使 DFIG 风力发电机在电压跌落的情况下始终保持并网连接。

2.3 STATCOM 与 SVC 的对比

STATCOM 与 SVC 之间最主要的区别在于它们的运行方式: STATCOM 可以等效为一个可控电压源, 而 SVC 则等效为一个动态型可控并联电抗器。

与 SVC 相比, STATCOM 即使处在低电压水平仍可以向电网发出最大有效无功电流, 这是因为在每一个平衡条件下, 公共连接点 (PCC) 处注入的无功功率与电压是线性变化关系^[11]。相反, 对于 SVC, PCC 处的无功功率与电压成二次方关系, 这意味着在注入相同的无功功率情况下, SVC 的额定容量必须高于 STATCOM。

关于最大暂态容性电流, 研究发现在 SVC 中容性电流受电容器的容量和交流电压幅值的限制。对于 STATCOM, 可注入的最大容性电流受限于所使用的电力半导体器件的最大载流量^[12], 而不受 PCC 处电压等级的影响。

STATCOM 的另一个特点是直流侧电容也承担着有功功率存储的作用。因此在某些情况下, 根据电容的容量大小, STATCOM 也可以调节与电网交换的有功功率。

STATCOM 装置比 SVC 有更快的动态响应时间 ($1/4 \sim 1$ 周期)。STATCOM 的响应速度受限于 IGBT 整流器的开关频率 (通常是 1kHz)。

2.4 动态电压恢复器 (DVR)

DVR 由一个带有直流环节储能的电压源型变流器 (VSC) 组成。VSC 与电网通过串联变压器和耦合滤波器连接。一个 DVR 可能由 3 个 VSC 组成^[14]，其中每个 VSC 通过一个 LC 滤波器 (L_f 、 C_f) 和一个变压器与电网相连。电容滤波器连接在耦合变压器的二次绕组，如图 2.9 所示。

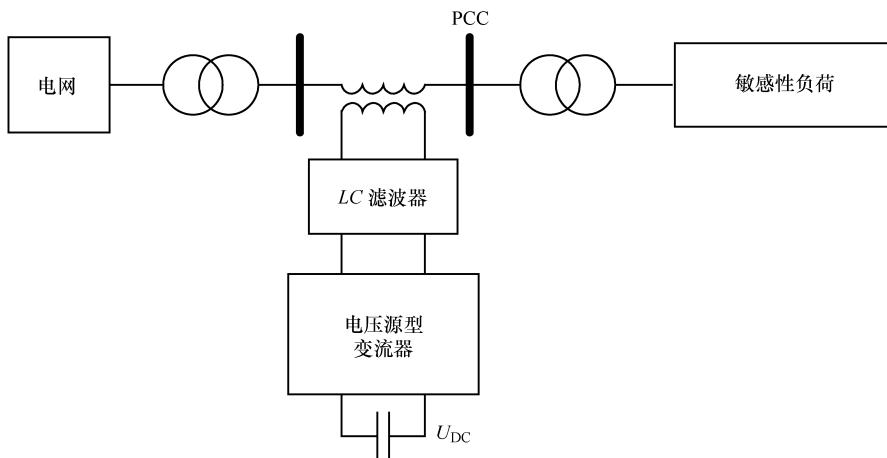


图 2.9 DVR 并入电网的等效电路

DVR 通常用于公共连接点处故障影响下对临界负载或灵敏负载的保护。在电压暂降时，DVR 能注入所需的电压将负载电压恢复到正常值。

典型的 DVR 主要是基于 PWM 变流器结构的 IGBT 固态电力电子开关，它能够在其交流输出端独立、可控地发出或吸收有功功率或无功功率。当其线电流超过变流器的额定值时，集成的旁路结构可以用来保护电力电子变流器。

安装在风电场的 DVR 主要是保证其低电压穿越能力^[14]，如图 2.10 所示。

2.4.1 DVR 控制

DVR 的控制结构包括以下几个部分 (见图 2.11)：在 DVR 变压器之前测量的相电压反馈给锁相环 (PLL)，据此测定出电压的相位角并产生同步信号 U_{ref} 。此外，DVR 变压器之前的电压测量也可以测定和判断电压跌落。这些测量信息被发送到参考电压模块进行处理。其结果最终驱动 VSC 的脉宽调制 (PWM) 控制器向 IGBT 发送开关驱动信号。测量的直流电压反馈给参考电压控制器^[15]。

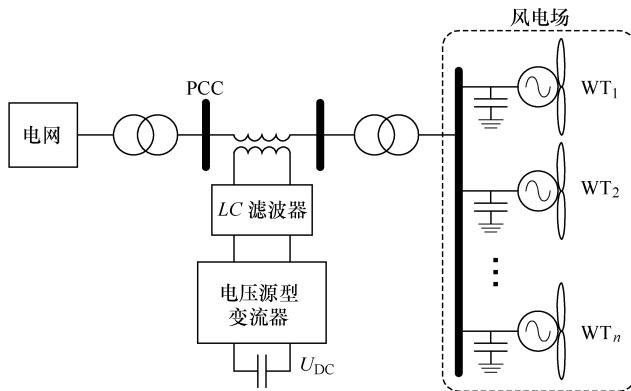


图 2.10 并入风电场变电站的 DVR 方案

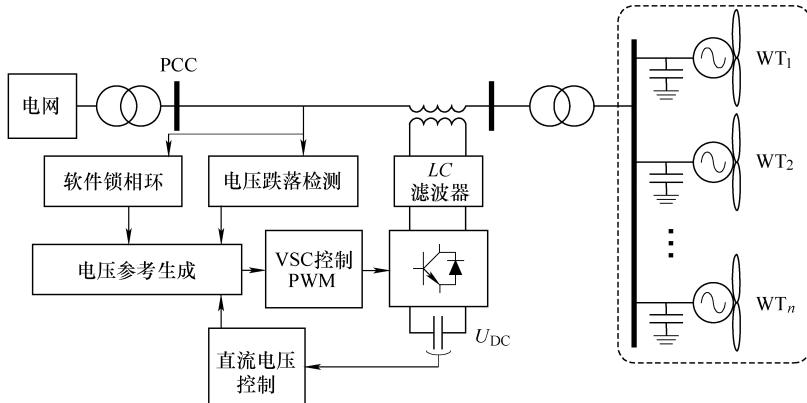


图 2.11 DVR 控制结构

2.4.1.1 VSC 控制

用于控制交流输出电压的技术通常是基于 Park 变换的 PWM 技术^[16]。

2.4.1.2 电压跌落检测

该检测的目的是要以最快的速度捕捉到在 PCC 处电压跌落的开始和结束的时间。这个过程对干扰和噪声信号非常敏感。由于这个原因，电压跌落检测模块必须可靠，尽可能减少误操作。一些如卡尔曼滤波和小波变换等方法已经应用于检测电压跌落的瞬时时间^[17]。

2.4.1.3 参考电压生成

这个模块负责为 VSC 控制器计算参考电压信号。该模块的性能取决于所选择的补偿策略，基本策略如下^[18]：

(1) 预跌落补偿 如图 2.12 所示，最简单的解决方案是在电压（幅值和相位）出现偏差前重新建立精确的电压。通过不断追踪公共连接点电压 (U_{PCC}) 计

算 DVR 的注入电压 (U_{DVR})，进而维持预跌落情况下的风电场终端的电压。

$$U_{\text{DVR}} = U_{\text{WindFarm}} - U_{\text{PCC}} \quad (2.15)$$

(2) 同相位补偿 这种方法是在电压跌落后使补偿的电压与电网电压同相位。应该注意的是，使用这种补偿策略可以将电压幅值减小到最小，但是对于相位跳变却起不到补偿作用。

(3) 能量优化补偿 这一策略是通过从电网吸收尽可能多的有功功率来向电网注入最大的无功功率。使用这种补偿策略可以恢复电压，但在发生相位跳变的情况下仍起不到补偿作用。这种补偿策略只有在电压跌落深度小的时候才能正常工作。

DVR 的单相等效电路如图 2.13 所示，其中考虑了以下参数：

- 1) U_e 对应于在交流变换器端产生的开关电压。
- 2) L_T 表示串联变压器的漏感。
- 3) LC 滤波器由一个滤波电感 L_f 和一个滤波电容 C_f 组成。滤波电容上的电压表示为 U_f 。
- 4) 阻抗 $Z_f = R_{\text{in}} + j\omega L_f$ 是由表示变流器开关损耗的电阻 R_{in} 和滤波器电感 L_f 组成。

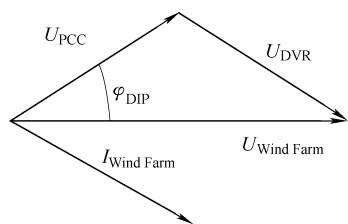


图 2.12 DVR 的预跌落补偿策略

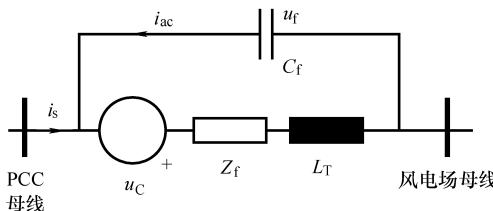


图 2.13 DVR 的单相等效电路

由单相等效电路可以得到采用状态空间解析法的控制器的微分方程：

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1/C_f \\ -1/L_T & -R_{\text{in}}/L_T \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 & -1/C_f \\ U_{\text{dc}}/L_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ i_s \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

式中，状态矢量是

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} u_f \\ i_{ac} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

式 (2.16) 用于得到串联补偿器的控制规律。控制器则确定了补偿电压跌落而注入电网的电压。

2.4.2 数值结果

本节对由定速风力发电机组的额定电压为 11kV 的 20MVA 风电场进行了不

同的模拟仿真。每台风力发电机都是一台 690V 和 750kW 的感应发电机。感应发电机用电容器组进行无功补偿。配电线路用其 π 形等效电路表示，并且在风电场终端安装了串联型 DVR。它的性能在三相对称短路和不平衡故障的情况下进行了测试。

假设风电场由具有相同特征的 n 个风力发电机并联而成。所有的模拟仿真条件都假设整个风电场运行在 0.99 超前功率因数下。简言之，即假定每个风力发电机有相同的风速，因此，整个风电场可由等效的感应发电机表示。

2.4.2.1 无 DVR 故障情况下风力发电机的性能

在第一个仿真中 DVR 没有连接在风电场总线上。因此当风电场终端发生三相故障时（见图 2.14），定速机组风电场不能承受电压跌落并且在故障条件下转子的角速度开始增加，如图 2.15 所示，由此增加了系统稳定性出现问题的概率。

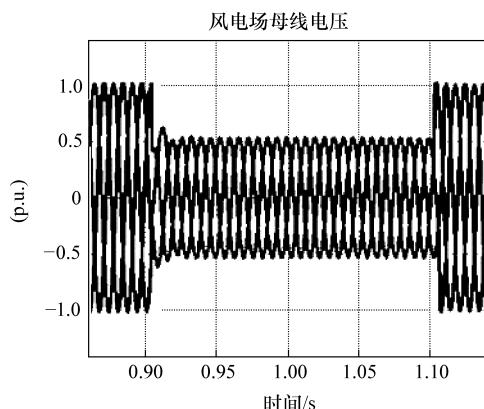


图 2.14 无 DVR 故障下母线电压仿真

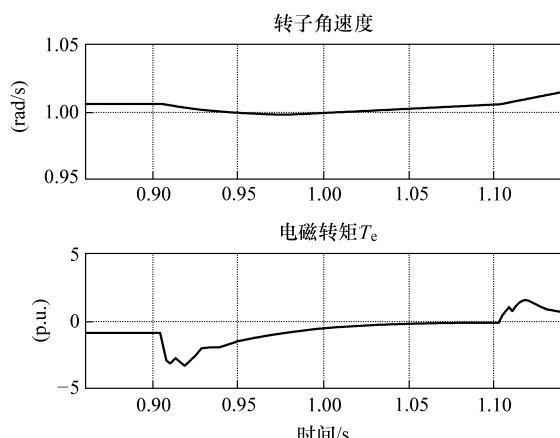


图 2.15 无 DVR 故障下角速度和电磁转矩仿真

2.4.2.2 有 DVR 三相故障情况下风力发电机的性能

在这种情况下，DVR 连接在风电场的母线上。在风电场终端模拟一个对称的三相电压跌落故障，电压跌落深度为 50% 并且相位跳变 20° 。PCC 处的电压跌落从 $t = 0.9\text{ms}$ 持续到 $t = 1.1\text{ms}$ 。

从图 2.16 中可以看出，DVR 有效地检测到了电压下降并且注入了系统所需的电压使风电场的电压恢复到了正常范围。

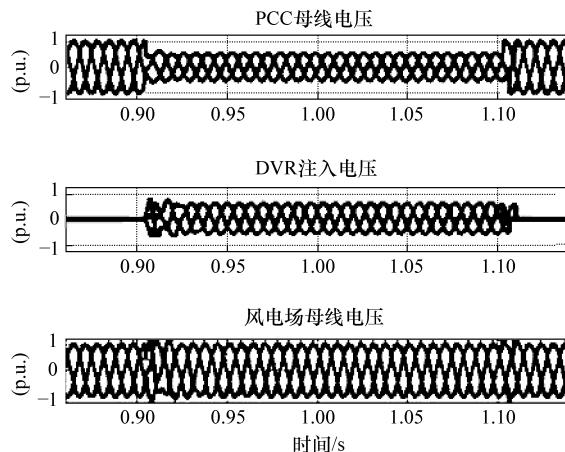


图 2.16 有 DVR 三相故障下母线电压仿真

应该强调的是，通过使用预跌落补偿策略，风电场注入电网中的有功和无功功率不受电压跌落的影响（见图 2.17），参考电压也几乎保持恒定。等效风力发电机的角速度和电磁转矩（见图 2.18）在电压跌落后恢复到额定值。

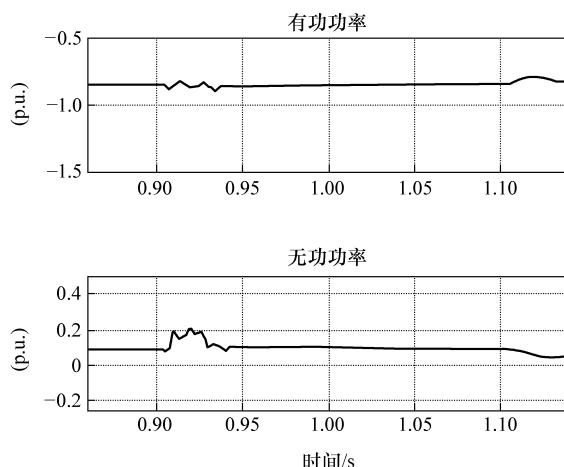


图 2.17 有 DVR 三相故障下 PCC 处的有功和无功功率仿真

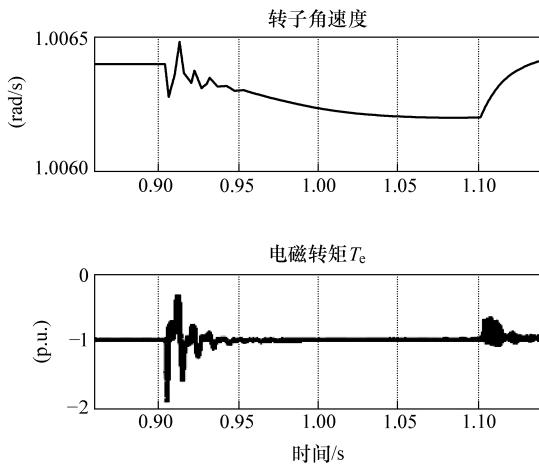


图 2.18 有 DVR 三相故障下角速度和电磁转矩仿真

2.4.2.3 有 DVR 单相接地故障时的风力发电机性能

最后一个仿真中，在风电场终端模拟出一个发生单相接地不平衡故障的情况，进而对 DVR 的性能进行测试。如图 2.19 所示，从 PCC 处的电压可以看出，DVR 检测到了电压跌落发生、电压深度和受影响的相。因此，它只在受影响的相注入所需的补偿电压即可。

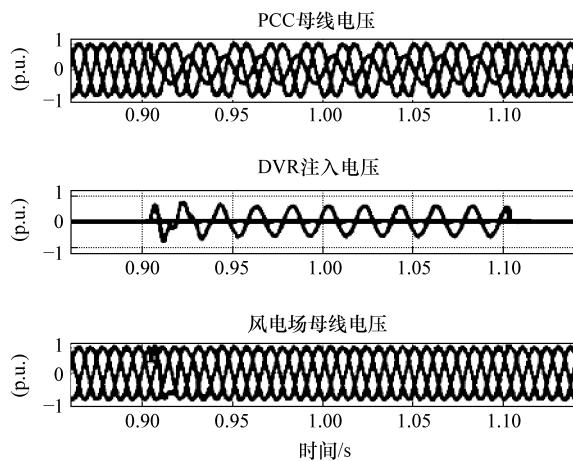


图 2.19 有 DVR 单相接地故障下母线电压仿真

风电场注入的功率和等效风力发电机的角速度分别如图 2.20 和图 2.21 所示。值得注意的是，风电场的稳定性不受电压跌落的影响。

这两个例子说明，在风电场中安装串联的 DVR 可以有效地改善和提高在故障

情况下定速机组风电场的低电压穿越能力。

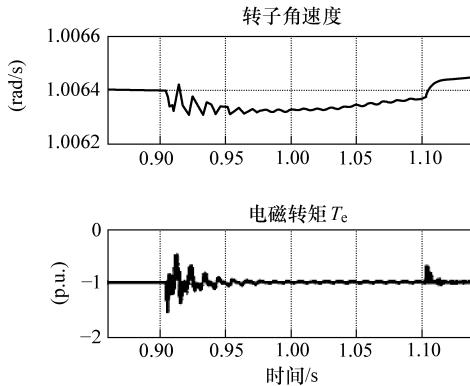


图 2.20 有 DVR 单相接地故障下角速度和电磁转矩仿真

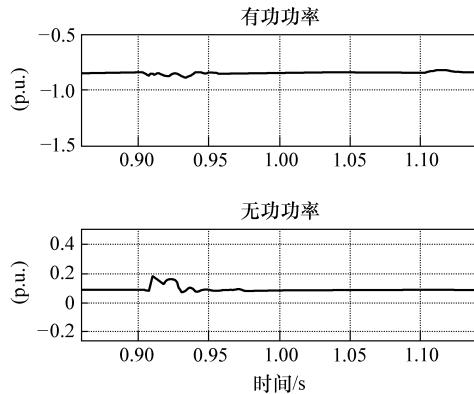


图 2.21 有 DVR 单相接地故障下 PCC 处有功和无功功率仿真

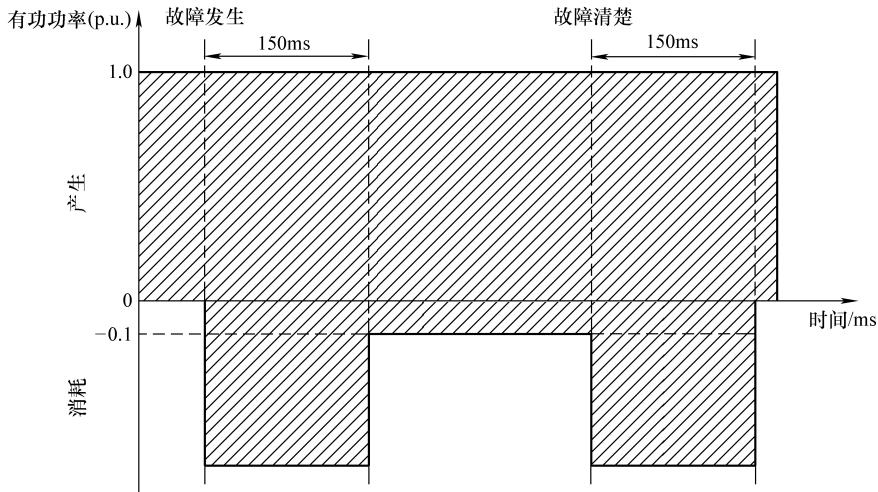
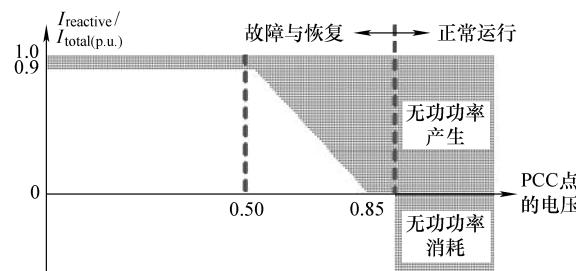
2.4.3 定速机组风电场在电压跌落时无功功率的支撑

大多数电力公司为他们的国家电网建立了电网规范，即要求风电场在故障期间应该能对电网电压提供无功功率支撑。因此在发生电压跌落时需要它们在故障发生时和故障发生后的一段时间内不脱离电网并向电力系统注入所需的无功功率。

西班牙电网规范^[19]要求风力发电机必须遵守电压跌落补偿要求，在系统电压骤降时提供系统所需有功和无功功率（见图 2.22 和图 2.23）。

因为定速机组风电场自身没有低电压穿越能力，串联 DVR 在电压骤降时起到支撑 PCC 处电压和向系统注入所需的无功功率的作用。

DVR 的运行条件取决于风电场的工作环境。风电场的工作环境由风电场所产生的视在功率 $S_{WindFarm}$ 建立，如式 (2.18) 所示。这一视在功率将形成一个从风电场流向串联 DVR 变压器的电流。

图 2.22 电压跌落期间风电场变电站所需的有功功率^[19]图 2.23 电压跌落期间风电场变电站所需的无功功率^[19]

$$\dot{S}_{\text{WindFarm}} = S_{\text{WindFarm}} \angle \varphi_{\text{WindFarm}} = P + jQ \quad (2.18)$$

仿真结果如图 2.24 和图 2.25 所示。在图 2.24 中，描述了在 PCC 处的电压、风电场终端的电压和 DVR 注入的电压分布，从图中可以看出风电场的电压是如何保持在参考电压 (1.0 p. u.) 一定范围内的。图 2.25 则给出了定速机组风电场在电压骤降期间如何振荡以使得注入的有功功率满足电网规范的要求。电网规范中明确了 PCC 处的有功和无功功率可以在 150 ms 的短时间内被消耗或产生^[19]。而对于其余的故障都将产生有功和无功功率。

必须注意的是，风电场不会向电网提供无功功率，图 2.26 给出了通过 DVR 向电网注入无功电流以满足无功功率的需求（见图 2.23）。

前述的图 2.24 ~ 图 2.26 所绘制的结果表明了 DVR 性能的优越性取决于电网规范中对低电压穿越能力的要求^[19]。

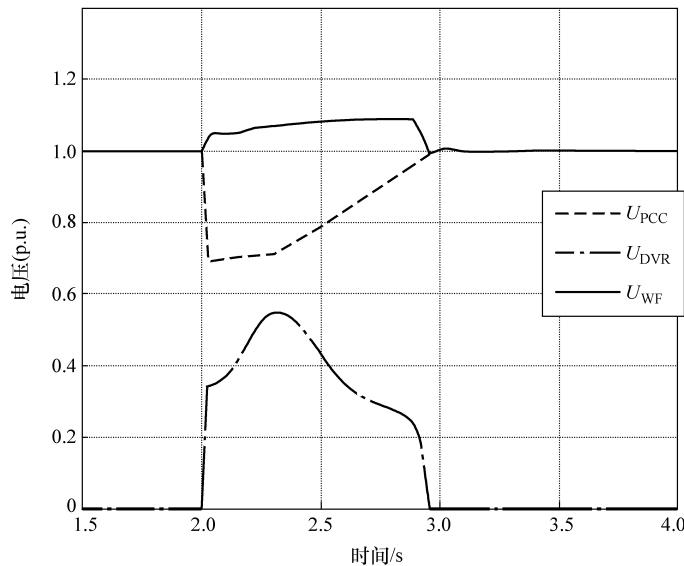


图 2.24 PCC 处电压（虚线）、DVR 注入的电压（点画线）和
风电场终端的电压（实线）

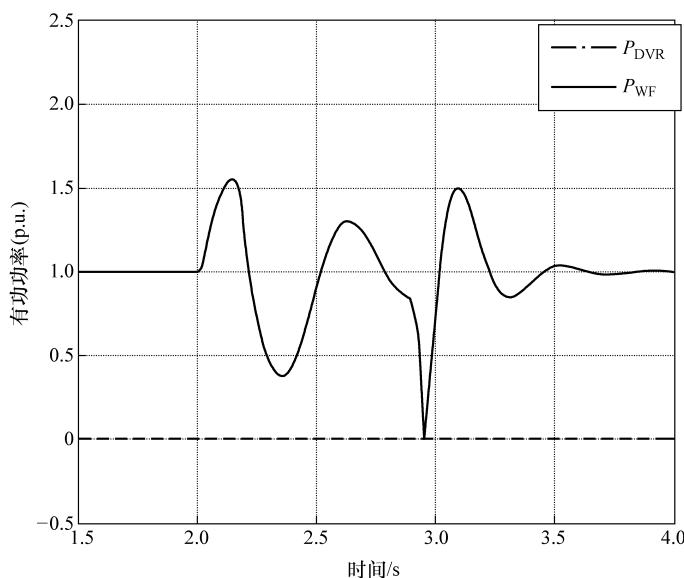


图 2.25 风电场注入的有功功率（实线）和 DVR 注入的
有功功率（虚线）

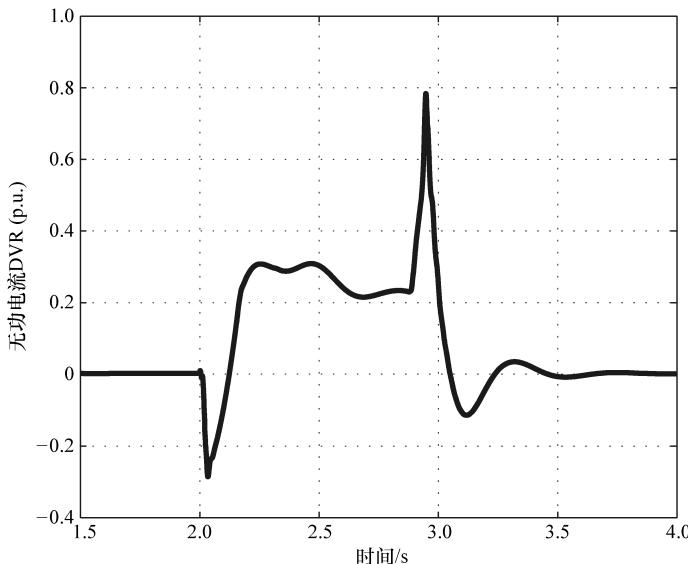


图 2.26 DVR 注入的无功电流

参 考 文 献

1. Hingorani NG, Gyugyi L (1999) Understanding FACTS. IEEE Press, New York
2. Mithulananthan N, Canizares CA, Reeve J, Rogers GJ (2003) Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations. *IEEE Trans Power Syst* 18(2):786–792
3. Moore P, Ashmole P (1998) Flexible AC transmission systems. 4. Advanced FACTS controllers. *Power Eng J* 12(2):95–100
4. Zhang X-P, Rehtanz C, Pal B (2006) Flexible AC transmission systems: modelling and control. Springer, Berlin
5. Amaris H, Alonso M (2011) Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices. *Energ Convers Manage* 52(7):2575–2586
6. Saad-Saoud Z, Lisboa ML, Ekanayake JB, Jenkins N, Strbac G (1998) Application of STATCOM's to wind farms. *IEE Proc Gener Trans Distrib* 145(5):511–516
7. Sobtink KH, Renz KW, Tyll H (1998) Operational experience and field tests of the SVG at Rejsby Hede. In: International conference on power system technology proceedings, POWERCON'98, vol 1, Zhejiang, pp 318–322
8. Han C, Huang AQ, Baran ME, Bhattacharya S, Litzenberger W, Anderson L, Johnson AL, Edris A (2008) STATCOM impact study on the integration of a large wind farm into a weak loop power system. *IEEE Trans Energ Convers* 23(1):1266–1272
9. Molinas M, Are Suul J, Undeland T (2008) Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC. *IEEE Trans Power Electron* 23(3):1104–1117
10. Qiao W, Harley RG, Venayagamoorthy GK (2009) Coordinated reactive power control of a large wind farm and a STATCOM using heuristic dynamic programming. *IEEE Trans Energ Convers* 24(2):493–503
11. Molinas M, Vazquez S, Takaku T, Carrasco JM, Shimada R, Undeland T (2005) Improvement of transient stability margin in power systems with integrated wind generation using a

- STATCOM: an experimental verification. In: International conference on future power systems, vol 1, pp 1–6
- 12. Zhang W (2007) Optimal sizing and location of static and dynamic reactive power compensation. PhD thesis, University of Tennessee, Knoxville
 - 13. Han C, Yang Z, Chen B, Song W, Huang AQ, Edris A, Ingram M, Atcitty S (2005) System integration and demonstration of a 4.5 MVA STATCOM based on emitter turn-off (ETO) thyristor and cascade multilevel converter. In: 31st annual conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005, Raleigh, pp 1329–1334
 - 14. Lam C-S, Wong M-C, Han Y-D (2004) Stability study on dynamic voltage restorer (DVR). In: Proceedings of the first international conference on power electronics systems and applications, Hong Kong, China, pp 66–71
 - 15. Alvarez C, Amaris H (2006) Voltage dips compensation in wind farms using dynamic voltage restorer. In: Proceedings of the 5th international Nordic workshop on power and industrial electronics, NORPIE 2006, Aalborg
 - 16. Nielsen JG, Newman M, Nielsen H, Blaabjerg F (2004) Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level. *IEEE Trans Power Electron* 19(3):806–813
 - 17. Lobos T, Rezmer J, Janik P, Amaris H, Alonso M, Alvarez C (2009) Application of wavelets and prony method for disturbance detection in fixed speed wind farms. *Int J Electron Power Energ Syst* 31:429–436
 - 18. Meyer C, De Doncker RW, Wei Li Y, Blaabjerg F (2008) Optimized control strategy for a medium-voltage DVR – theoretical investigations and experimental results. *IEEE Trans Power Electron* 23(6):2746–2754
 - 19. P.O. 12.3. Requisitos de Respuesta frente a Huecos de Tensión de las Instalaciones Eólicas, Resolución del Ministerio de Industria, Oct 2006. (In Spanish)

第3章 风力发电机

有大型风电场的电力系统性能要求可以通过有效的风力发电机技术来进行评估以确定每种技术下的电力性能以及它们的运行范围。风力发电机可分为定速（发电机转差引起的速度有微小变化）和变速两种类型。

习惯上，风电场可以在电力潮流研究中表示为 PV 和 PQ 节点^[1,2]。目前为止，这个方法实现起来似乎很简单，但其最大缺点是可用的无功功率范围既受到了最大功率因数的限制，又受到固定调节带的限制^[3-5]。此外，这种表示也并不完全正确，因此其不能充分利用风力发电机注入电网的无功功率。

一些电网规范建立了最低等级的无功功率控制要求；这一要求是与风力发电机组工作在超前功率因数 0.95 和滞后功率因数 0.95 之间有关的。变速风力发电机的无功容量会由于变速技术（双馈感应发电机或直驱发电机）而不同。现代风力发电机组通过电力电子变流器将变速发电机连接到电网。这些变流器可以通过改变电压的大小和频率来控制风力发电机组的无功功率输出。双馈感应发电机（DFIG）是在风力发电机组中使用最广泛的发电机，它可以通过电网侧变流器提供动态无功功率控制。本章主要分析了定速和变速风力发电机的无功功率能力。

3.1 风力发电机原理

风力发电机的可利用风能随风速的增加而增加^[6]，如下式所示：

$$P_{\text{mech}} = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda_v, \beta) A v^3 \quad (3.1)$$

式中 ρ ——空气密度；

λ_v ——叶尖速比， $\lambda_v = \lambda_v(\omega, v)$ ；

ω ——转子转速；

v ——风速；

A ——转子扫掠面积；

C_p ——根据 λ_v 和桨距角 β 确定的功率系数值。

现有文献中介绍了数个用于寻找风速函数的最佳工作点的优化策略，采用这种方法可以将式 (3.1) 看做是转子转速的相关函数：

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{mech}}(\omega) \quad (3.2)$$

因此，它的逆函数为

$$\omega = \omega(P_{\text{mech}}) \quad (3.3)$$

式(3.3)的一般关系可进一步细化以便包括限制条件,例如:最低和最高机械转速、安全运行限制以及其他的设计方面的限制。为方便应用上述公式,式(3.3)可近似表示为指数函数(见图3.1):

$$\omega = K_s P_{\text{mech}}^\gamma, \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \quad (3.4)$$

式中 K_s , γ —取决于风力发电机机械设计参数的常量;

ω_{\min} , ω_{\max} — ω 变量的限制范围。

设 ω_1 为电网角频率, 转差率 s 可定义为

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega} \quad (3.5)$$

所以转子转差 s 可以看做是 P_{mech} 的函数:

$$s = s(P_{\text{mech}}) \quad (3.6)$$

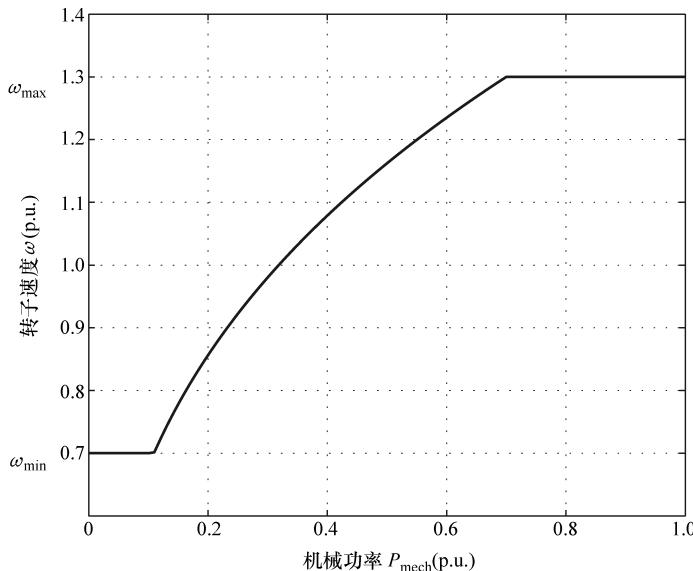


图3.1 转速的变化

3.2 机械模型

轴系统表示了风力发电机的机电耦合部分, 其可以用靠近的双质点来精确表示。在这种双质点模型中, 轮毂和桨叶组成低速轴质点, 转子和发电机组成了高速轴质点, 如下所示:

$$\frac{d\theta_{tg}}{dt} = \omega_g - \omega_t \quad (3.7)$$

考虑到：

$$\begin{aligned}\frac{d\omega_g}{dt} &= \frac{1}{2H_t} [T_{mec} + k\theta_{tg} + D(\omega_g - \omega_t)] \\ \frac{d\omega_t}{dt} &= \frac{1}{2H_g} [-T_e - k\theta_{tg} - D(\omega_g - \omega_t)]\end{aligned}\quad (3.8)$$

式中 ω_t , ω_g ——分别是风机和发电机的速度；

H_t , H_g ——分别是风机和发电机的惯性常量；

θ_{tg} ——风机和发电机之间的夹角；

K ——驱动链的刚度；

D ——驱动链的阻尼；

T_{mec} ——风能作用下的空气动力学转矩；

T_e ——感应电机的电磁转矩。

3.3 定速风力发电机

在 20 世纪 90 年代，定速风力发电机成为主流技术^[7]，它们由与电网直接相连的笼型感应电机组成。因此，控制这些发电机的唯一方法是调节风机的桨距角进而调节其气动效率 (C_p) 或改变定子的电压。这种风力发电机的速度随风速在有限范围内变动（通常达 1%）。

感应电机的动态性能可以用五阶模型详细描述^[8]。采用发电机惯例，考虑到定子电流流向电网时取正，描述方程式可转化至以同步速度 ω_s 旋转的直轴 d 轴和交轴 q 轴参考坐标系下。

定子电压 U_{ds} 和 U_{qs} 可以计算如下：

$$\begin{aligned}U_{ds} &= R_s i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \\ U_{qs} &= R_s i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt}\end{aligned}\quad (3.9)$$

转子电压 U_{dr} 和 U_{qr} 计算如下：

$$\begin{aligned}U_{dr} &= R_r i_{qr} - s\omega_s \lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} = 0 \\ U_{qr} &= R_r i_{qr} + s\omega_s \lambda_{dr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} = 0\end{aligned}\quad (3.10)$$

其中，下标 s、r 分别表示定子和转子；下标 d、q 分别表示相应的 d 轴和 q 轴

的旋转坐标； s 表示转子转差率。

定子磁链 λ_{ds} 和 λ_{qs} 计算如下：

$$\begin{aligned}\lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr}\end{aligned}\quad (3.11)$$

转子磁链 λ_{dr} 和 λ_{qr} 计算如下：

$$\begin{aligned}\lambda_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \lambda_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs}\end{aligned}\quad (3.12)$$

感应电机的电气参数 R_s 、 L_s 、 R_r 、 L_r 、 L_m 分别表示定子的电阻和电感，转子的电阻和电感以及互感。

这个详细的模型包括了定子和转子电流的电磁暂态。参考文献 [9] 中使用了忽略定子暂态的简单的三阶模型。该模型表示了感应电机的主要动态特性，而且也降低了计算的复杂性；于是，式 (3.9) 定子电压中的两个派生电压可以设置为 0。

定速风力发电机要消耗大量的无功功率，尤其是在电机励磁时。在电压跌落情况下，异步发电机是去磁的，所以消耗的无功功率会显著增加，从而会导致电压的进一步下降。在这种恶性循环下，电网的电压很难恢复。电容器组可以用于此时无功功率的补偿。

定速机组风电场的无功补偿可通过加装额外的无功源来实现，如 SVC 或 STATCOM^[10]。在这种情况下，额外增加的 FACTS 装置的无功功率补偿能力限制了无功功率补偿的大小。

3.4 双馈感应发电机

最常见的变速风力发电机是双馈感应发电机 (DFIG)，它可以高效地运行在较宽的风速范围并且在转子转速改变时可以输出恒定电压和频率的功率。这种双馈结构是由绕线转子异步发电机和转子侧的背靠背功率变流器构成，而发电机定子直接与电网相连（见图 3.2）。功率变流器可以将发电机转速控制在亚同步和超同步（转速稍高于同步转速）之间，一般来说，该速度变化范围在 $-40\% \sim +30\%$ 同步转速之间^[11]。这种变流器的设计容量仅为 20% ~ 30% 的发电机额定功率，具有很好的经济性和技术性。

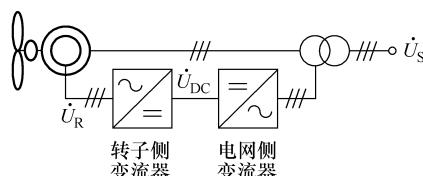


图 3.2 双馈感应发电机

3.4.1 双馈感应发电机的稳态模型

考虑到对称三相系统，定子和转子的稳态方程可以写成下面复合的相量方程^[12]：

$$\dot{U}_S = (R_S + j\omega_1 L_S) \dot{I}_S + j\omega_1 L_0 \dot{I}_R \quad (3.13)$$

$$\frac{\dot{U}_R}{s} = \left(\frac{R_R}{s} + j\omega_1 L_R \right) \dot{I}_R + j\omega_1 L_0 \dot{I}_S \quad (3.14)$$

引入定子和转子的漏磁因数，定子和转子的自感可定义为

$$L_S = (1 + \sigma_S) L_0 \quad (3.15)$$

$$L_R = (1 + \sigma_R) L_0 \quad (3.16)$$

因此其数学模型为

$$\dot{U}_S = (R_S + j\omega_1 \sigma_S L_0) \dot{I}_S + j\omega_1 L_0 (\dot{I}_S + \dot{I}_R) \quad (3.17)$$

$$\frac{\dot{U}_R}{s} = \left(\frac{R_R}{s} + j\omega_1 \sigma_R L_0 \right) \dot{I}_R + j\omega_1 L_0 (\dot{I}_S + \dot{I}_R) \quad (3.18)$$

如图 3.3 所示。忽略定子和转子的电阻，上述模型可表示为

$$\dot{U}_S = j\omega_1 \sigma_S L_0 \dot{I}_S + j\omega_1 L_0 (\dot{I}_S + \dot{I}_R) \quad (3.19)$$

$$\frac{\dot{U}_R}{s} = j\omega_1 \sigma_R L_0 \dot{I}_R + j\omega_1 L_0 (\dot{I}_S + \dot{I}_R) \quad (3.20)$$

定义定子磁化电流 \dot{I}_{ms} 是与定子磁链包括定子漏磁相关的磁化电流相量^[12]：

$$\dot{I}_{ms} = (1 + \sigma_S) \dot{I}_S + \dot{I}_R \quad (3.21)$$

为了简化方程，相量坐标系广泛地应用于磁场定向控制中。用 d-q 参考坐标系下的 \dot{I}_{ms} 相量，如图 3.4 所示，式 (3.19) 的定子电压可写成如下形式：

$$\dot{U}_S = j\omega_1 L_0 \dot{I}_{ms} \quad (3.22)$$

需要注意 \dot{I}_{ms} 等于它的模 I_{ms} ：

$$|\dot{I}_{ms}| = |I_{ms}| = I_{ms} \quad (3.23)$$

因此，定子电压相量是纯虚部并且和 q 轴重合：

$$\dot{U}_S = j\omega_1 L_0 I_{ms} \quad (3.24)$$

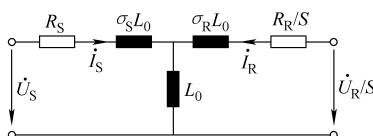


图 3.3 双馈感应发电机的稳态等效电路

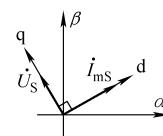


图 3.4 d-q 参考坐标系下的相量 I_{ms}

3.4.2 输送到电网的有功功率

双馈感应发电机定子输送的有功功率可以由定子端的视在功率实部得到。

$$P_s = -\operatorname{Re}\{\dot{U}_s \dot{I}_s^*\} \quad (3.25)$$

所以, \dot{U}_s 用式 (3.24) 代替, \dot{I}_s 用其 d-q 分量代替: $\dot{I}_s = I_{sd} + jI_{sq}$, 则定子侧有功功率为

$$P_s = -\omega_1 L_0 I_{ms} I_{sq} = -U_s I_{sq} \quad (3.26)$$

同理, 转子传递的有功功率可以由转子端的视在功率实部得到:

$$P_R = -\operatorname{Re}\{\dot{U}_R \dot{I}_R^*\} \quad (3.27)$$

所以, \dot{U}_R 用式 (3.20) 代替, \dot{I}_R 用式 (3.21) 代替, 转子传递的有功功率表达式为

$$P_R = s\omega_1 L_0 I_{ms} I_{sq} = sU_s I_{sq} \quad (3.28)$$

注意, 转子功率 P_R 是取决于转差率 s 的定子功率 P_s 的一部分:

$$P_R = -sP_s \quad (3.29)$$

用这种方法可以得到传递到电网的总有功功率为

$$P = P_s + P_R = U_s I_{sq} (s - 1) \quad (3.30)$$

3.4.3 输送到电网的无功功率

定子传递的无功功率是视在功率的虚部:

$$Q_s = -\operatorname{Im}\{\dot{U}_s \dot{I}_s^*\} = -U_s I_{sd} \quad (3.31)$$

转子传递的无功功率取决于双馈感应发电机电网侧变流器的控制策略。它通常设计为保持两个变流器之间的直流电压恒定进而使有功功率从转子流向电网 $P_{GSC} = P_R$ 。由于无功功率的参考值通常为 0, 因此调节发电机并网公共耦合点 (PCC) 的总功率因数的唯一适合方法是通过式 (3.31) 控制定子的无功功率。

然而电网侧变流器可以用于控制无功功率并提高风力发电机的总无功功率支撑能力^[13,14]。这种潜在的能力对于风力发电机的运行非常重要, 因为它对执行全电网无功功率管理协调控制的系统调度员非常有用。对于目前商业化运行的双馈感应发电机变流器来说, 这种方法很适合用于设计不做过物理更改设计的变流器。因此, 电网侧变流器可以看成是一个动态控制的无功功率源。

注入电网的无功功率由两部分叠加而成, 即感应发电机 (定子) 注入的无功功率和电网侧变流器 (GSC) 注入的无功功率:

$$Q = Q_s + Q_{GSC} \quad (3.32)$$

3.4.4 双馈感应发电机传输功率极限

DFIG 风力发电机的最大容量由下列条件限制:

- (1) 定子侧 定子绕组的功率容量对最大电压和最大电流的限定。

$$I_s < I_{s,\max} \quad (3.33)$$

$$U_s < U_{s,\max} \quad (3.34)$$

根据电网电压规定，公共耦合点（PCC）的电压 U_s 容许有 10% U_{PCC} 的波动。

(2) 转子侧变流器 最大电压和最大电流由转子绕组功率容量和转子侧变流器（RSC）功率等级限制：

$$I_R < I_{R,\max} \quad (3.35)$$

$$U_R < U_{R,\max} \quad (3.36)$$

(3) 电网侧变流器 电网侧变流器的视在功率不应超过它的额定值或标称值：

$$S_{\text{GSC}} < S_{\text{GSC,nominal}} \quad (3.37)$$

(4) 转差率范围在最大值和最小值 $\{s_{\min}, s_{\max}\}$ 之间波动，其值由制造商给定。双馈感应发电机的转差率运行点由式 (3.6) 决定。

为了更好地理解每个约束条件的影响，下面的章节将对每个条件独立地获得并分析它们的 PQ 图。

3.4.4.1 转子电流限制

转子电流相量可以用最大复模量来表示，其中相位 φ 在运行范围内变动。

$$\dot{I}_R = I_{R,\max} e^{j\varphi} = I_{R,\max} (\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (3.38)$$

对于每一个工作条件都可以得到双馈感应发电机的稳态，并可绘制其有功和无功的 PQ 轨迹。

定子电流可以用 d-q 轴参考坐标表示：

$$\dot{I}_s = I_{sd} + jI_{sq} \quad (3.39)$$

由式 (3.31)，其 d-q 分量为

$$I_{sd} = \frac{I_{msd} - I_{R,\max} \cos\varphi}{(1 + \sigma_s)} \quad (3.40)$$

$$I_{sq} = \frac{-I_{R,\max}}{(1 + \sigma_s)} \sin\varphi \quad (3.41)$$

将式 (3.40) 和式 (3.41) 代入式 (3.30) 和式 (3.32)，则有功功率和定子无功功率的表达式如下：

$$P = -\frac{U_s I_{R,\max}}{1 + \sigma_s} (s - 1) \sin\varphi \quad (3.42)$$

$$Q_s = \frac{U_s I_{R,\max}}{1 + \sigma_s} \cos\varphi - \frac{U_s^2}{\omega_1 L_0 (1 + \sigma_s)} \quad (3.43)$$

由此可得功率 PQ 图轨迹方程为

$$\left[\frac{P}{s_o^{I_r} (s - 1)} \right]^2 + \left[\frac{Q_s - Q_o^{I_r}}{s_o^{I_r}} \right]^2 = 1 \quad (3.44)$$

其中, $s_o^{I_r}$, $Q_o^{I_r}$ 定义为

$$s_o^{I_r} = \frac{U_s L_o}{L_s} I_{R,\max} \quad (3.45)$$

$$Q_o^{I_r} = \frac{U_s^2}{\omega_1 L_s} \quad (3.46)$$

考虑到转子电流的限制, PQ 图是以 $[0, Q_o^{I_r}]$ 为交点, $[s_o^{I_r}(s - 1), s_o^{I_r}]$ 为半轴的椭圆, 如图 3.5 所示。此外, 当转差率为 0 时 (同步转速), 则 PQ 图变成了一个以 $[0, Q_o^{I_r}]$ 为圆心, $s_o^{I_r}$ 为半径的圆。

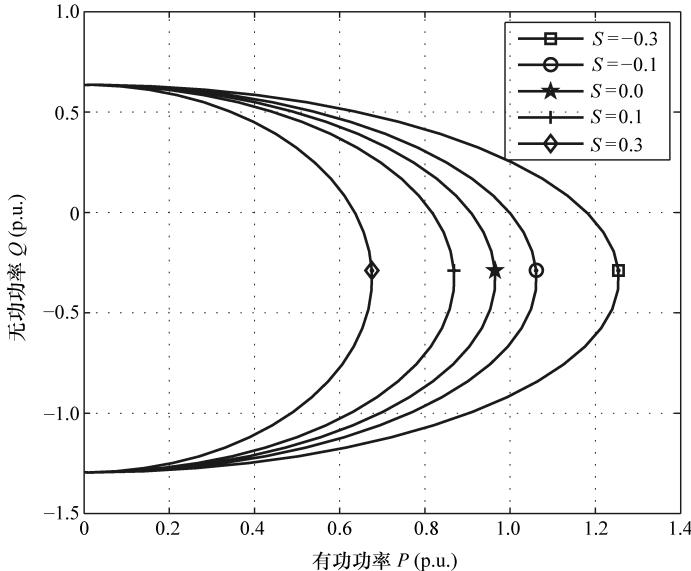


图 3.5 转子电流 $I_{R,\max}$ 的 PQ 轨迹

3.4.4.2 转子电压限制

用式 (3.21) 的 \dot{I}_s 和式 (3.24) 的 \dot{U}_s 重新表示式 (3.20) 的转子电压相量可得:

$$\dot{U}_R = js[(1 + \sigma_R) U_s + \dot{I}_s \alpha] \quad (3.47)$$

上式中, α 定义为

$$\alpha = \omega_1 L_o [1 - (1 + \sigma_s)(1 + \sigma_R)] \quad (3.48)$$

考虑到转子电压相量 \dot{U}_R 为

$$\dot{U}_R = U_{R,\max} e^{j\varphi} = U_{R,\max} (\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (3.49)$$

利用式 (3.47) 可得 d-q 轴分量为

$$U_{Rd} = -\alpha s I_{sq} \quad (3.50)$$

$$U_{Rq} = s[\alpha I_{sd} + (1 + \sigma_R) U_s] \quad (3.51)$$

有功功率和定子无功功率可重写为

$$P = \frac{U_s(1-s)}{s\alpha} U_{R,\max} \cos\varphi \quad (3.52)$$

$$Q_s = \frac{1 + \sigma_R}{\alpha} U_s^2 - \frac{U_s}{s\alpha} U_{R,\max} \sin\varphi \quad (3.53)$$

于是可得 PQ 图的功率轨迹为

$$\left[\frac{P}{s_o^{U_r}(s-1)} \right] + \left[\frac{Q_s - Q_o^{U_r}}{s_o^{U_r}} \right] = 1 \quad (3.54)$$

其中, $s_o^{U_r}$, $Q_o^{U_r}$ 定义为

$$s_o^{U_r} = \frac{U_s}{s\alpha} U_{R,\max} \quad (3.55)$$

$$Q_o^{U_r} = \frac{1 + \sigma_R}{\alpha} U_s^2 \quad (3.56)$$

PQ 图是以 $[0, Q_o^{U_r}]$ 为交点, 以 $[s_o^{U_r}(s-1), s_o^{U_r}]$ 为半轴的椭圆, 如图 3.6 所示。当转差率为 0 时, PQ 图变成了一个以 $[0, Q_o^{U_r}]$ 为圆心, 以 $s_o^{U_r}$ 为半径的圆。

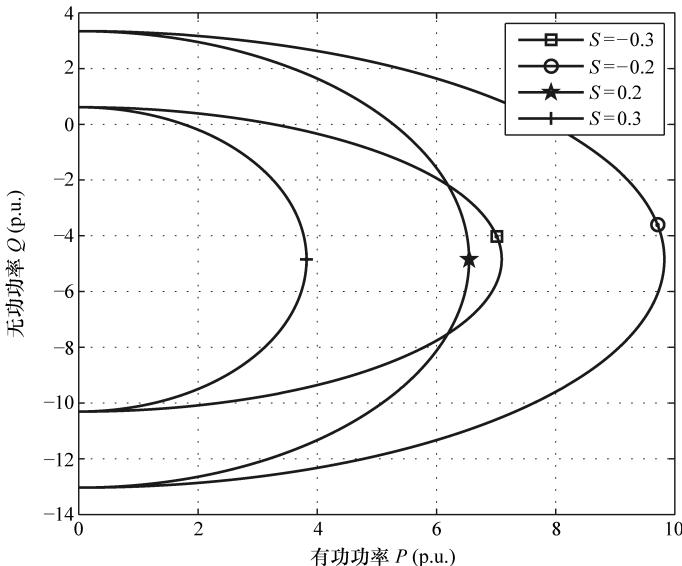


图 3.6 转子电压的 PQ 轨迹

3.4.4.3 定子电流限制

有功功率和定子无功功率可重新写为

$$P = U_s(1-s) I_{S,\max} \sin\varphi \quad (3.57)$$

$$Q_S = -U_S I_{S,\max} \cos \varphi \quad (3.58)$$

PQ图功率轨迹为

$$\left[\frac{P}{s_o^{I_S}(s-1)} \right]^2 + \left[\frac{Q_S}{s_o^{I_S}} \right]^2 = 1 \quad (3.59)$$

其中, $s_o^{I_S}$ 定义为

$$s_o^{I_S} = U_S I_{S,\max} \quad (3.60)$$

PQ图是以 [0,0] 为交点, $[s_o^{I_S}(s-1), s_o^{I_S}]$ 为半轴的椭圆, 如图 3.7 所示。当转差率为 0 时, PQ 图变成一个以 $s_o^{I_S}$ 为半径的圆。

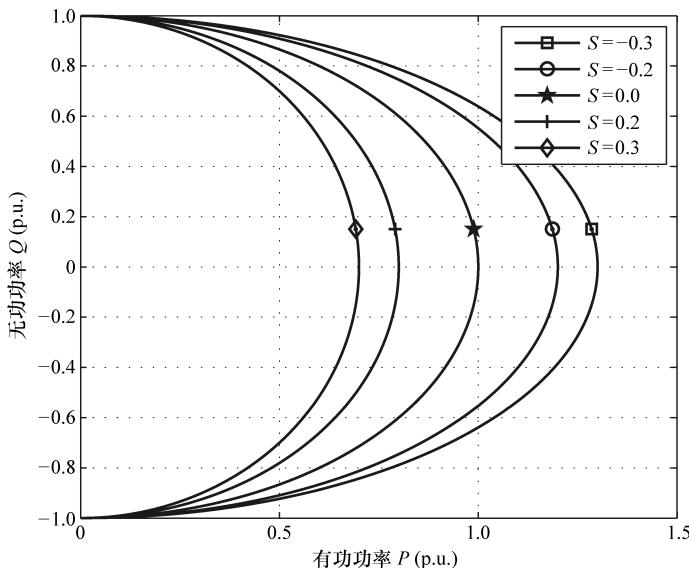


图 3.7 定子电流的 PQ 轨迹

3.4.4.4 电网侧变流器限制

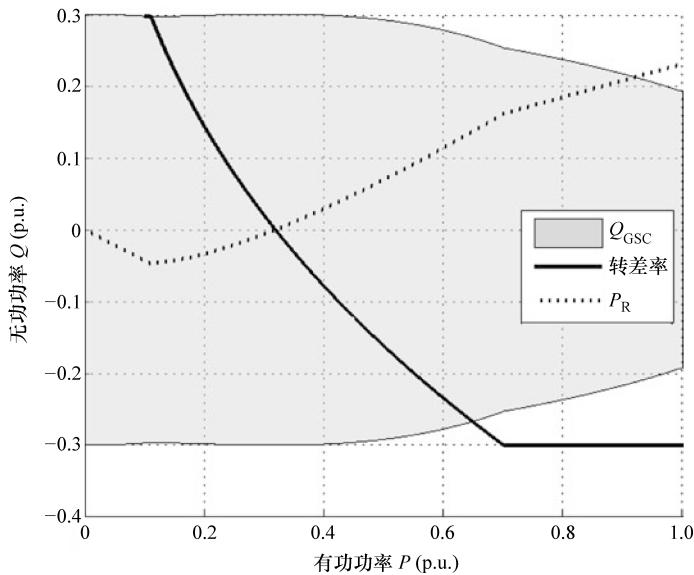
电网侧变流器额定视在功率 S_{GSC} 根据式 (3.61) 决定了注入电网的无功功率的限制, 如图 3.8 所示。

$$Q_{GSC} = \pm \sqrt{S_{GSC}^2 - P_R^2} \quad (3.61)$$

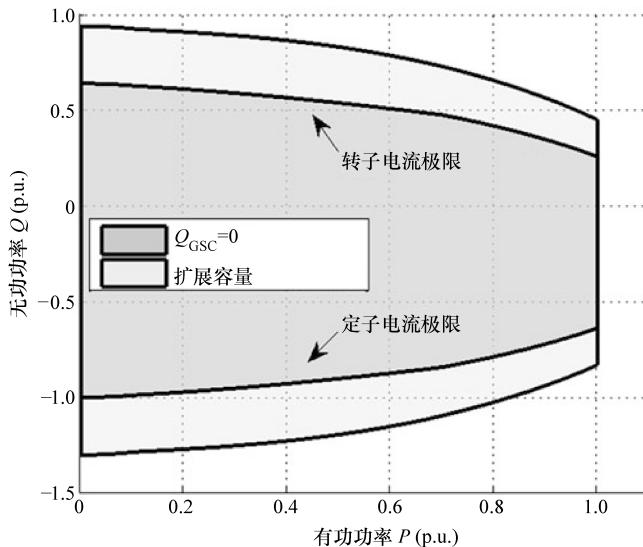
3.4.5 双馈感应发电机的最大容量

考虑到前述所有的约束条件, 可以得到如图 3.9 所示的容量曲线。需要强调的是, 当发电机向电网注入无功功率时, 转子电流是约束条件; 当发电机消耗无功功率时, 定子电流是约束条件。

在同一个图中, 可以标注出两个区域: PQ 图对应的内部区域没有考虑 GSC 注入的无功功率, 外部区域则考虑了 GSC 的无功功率容量 (见图 3.9 的扩展区域)。

图 3.8 电网侧变流器的 PQ 轨迹

这一扩展容量对系统运行是非常有用的，这不仅体现在电压稳定性或意外事故分析中，也体现在保持电网稳定的关键即无功功率储备的各种运行情况。

图 3.9 PQ 轨迹容量

3.5 直驱式风力发电机

过去几年中，大容量直驱式风力发电机由于电力电子变换器的应用已经开始逐步有所安装。根据报告^[15]，在2011年直驱式风力发电机提供了21.2%的风力发电量。此外，它们在海上风电场的应用使它们有很高的装机增长预期。

此类发电机的一个主要优点是可以对风力发电机实现全控，即不仅可以对无功功率进行控制，而且可以在风机的所有运行范围内对其机械转矩进行全面的控制。上述这种控制能力使其成为可以很好地适应电网输电系统运营商（TSO）要求的技术。

另一方面，由于这种风力发电机通过功率变流器与电网直接相连，所以它不需要额外的无功补偿装置（如FACTS），因此，它可以减少基础建设所需的花费，并能满足电网运营商的要求。

直驱式发电机可分为：

(1) 感应发电机 这种感应发电机的转子是无电刷的笼型转子，其通过电力电子变换器连接到电网。这种技术有较好的鲁棒性，并且在部分负荷情况和降低发电机成本方面都非常有效。至于缺点，必须指出的是其需要大直径的风机与其配合安装（这带来了具体的安装问题），这意味着其成本会更高；变流器容量也必须适应日益增长的发电机功率以及电机磁化过程中所需的功率^[16]。

(2) 绕线转子同步发电机 目前，这种绕线转子同步发电机可以利用自励磁电路来调节自身的磁化水平，因此它可以较好地控制发电机的转矩。其转子是应用广泛的多极的隐极或凸极式转子。凸极机主要是一些大容量的低速发电机^[17]。这一技术因为不需要永久磁铁并且可以降低购买和维护成本^[18]脱颖而出，此外它还有以下优点：

- ① 由于发电机速度较低，其机械振动也有限；
- ② 不需要变速器所以有效地降低了成本、维护和噪声问题；
- ③ 可根据电网的需求来调节无功功率。
- ④ 可以独立地控制有功和无功功率。

存在的缺点：

- ① 发电机尺寸和重量较大；
- ② 在低速状态下需要提供高的电磁转矩；
- ③ 变流器成本高。

(3) 永磁同步发电机 永磁同步发电机的永磁体嵌放入转子中，而其励磁不用外部连续励磁电流提供。这种配置减少了电损耗，提高了设备的热特性^[19]。同步发电机连接的电力电子变流器，由一个整流器（AC-DC变换器）、一个斩波器

(DC-DC 变换器) 和一个逆变器 (DC-AC 变换器) 组成 (见图 3.10)。根据永磁体的安装位置可以首先将永磁同步发电机分为表贴式和内嵌式两类。只要考虑了磁场流，则如参考文献 [20] 所述有不同的励磁技术。

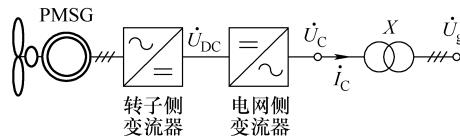


图 3.10 变速直驱式风力发电机的等效电路

1) 径向励磁永磁体：这种技术在永磁体中得到了最广泛的应用。这种同步电机的气隙磁场是径向的，定子磁场是纵向的。磁体安装于转子内。

2) 定子轴向永磁体：它们也可称为横向磁场永磁体，其特点是转子磁场是横向的，定子磁场是纵向的。磁体安装于转子内，由于气隙的存在，磁场的走向被推着径向运动。这种电机的转子是外置的而定子是内置的。磁体位于转子内部，并且每相两个绕组，主要目的是让磁场循环穿过定子。

3) 转子轴向永磁发电机：其转子是两个外置的盘形转子。永磁体位于盘形转子的表面，所以磁场沿转轴平行分布。

永磁同步电机是一个多极且与风机转子相匹配的大直径结构，其主要优点是：

- ① 轻量化设计；
- ② 功率/重量比高，高效率；
- ③ 减小了运行和维护的成本；
- ④ 转子损耗可以忽略不计；
- ⑤ 由于减少了机械部分（集电环、电刷），可靠性更高；
- ⑥ 不需要额外的电源提供绕组的励磁磁场。

主要缺点：

- ① 永久磁铁成本高，初始投资较高。
- ② 在高温，过载或短路时，电机有退磁的风险。
- ③ 二极管整流器的运用降低了可控性。
- ④ 施工难度高。

3.5.1 直驱式风力发电机的发电容量

直驱式风力发电机的主要特点是发电机定子通过电力电子功率变换器与电网直接相连。这种变换器由一个整流器、一个 DC-DC 变换器和一个脉宽调制 (PWM) 器或空间矢量调制 (SVM) 器，并采用三相绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 逆变器组成。

发电机和电网的无功功率交换取决于那些应用于功率变流器的控制技术并且应考虑变流器的运行限制条件，应该强调的是直驱式风力发电机的发电容量不受发电

机的特性或特点限制。运行在这种方式，直驱式变速风力发电机可以针对不同的电网条件或在风电场中央控制中心的调控指令下提供整体的无功功率调节和有功功率调节^[21]。

3.5.1.1 直驱式发电机的传输功率限制

全功率变流器的最大功率容量受如下公式所限：

1) 变流器电流不能超过最大电流 $I_{c,\max}$:

$$I_c < I_{c,\max} \quad (3.62)$$

2) 变流器电压不能超过最大电压 $U_{c,\max}$:

$$U_c < U_{c,\max} \quad (3.63)$$

3) 直流母线电压不能超过其最大值 $U_{DC,\max}$:

$$U_{DC} < U_{DC,\max} \quad (3.64)$$

3.5.1.2 电流变换器限制

对于每个工作条件，传输到电网的功率：

$$\dot{S} = \dot{U}_g \dot{I}_c^* \quad (3.65)$$

其中，PCC 点的电压 (\dot{U}_g) 介于最大电压和最小电压之间。

$$\dot{U}_{g,\min} < \dot{U}_g < \dot{U}_{g,\max} \quad (3.66)$$

电网侧变流器传输到电网的功率如下式所示：

$$P^2 + Q^2 = (U_g I_c)^2 \quad (3.67)$$

其中，变流器的电流为

$$I_c = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U_g} \quad (3.68)$$

其最大值在最小电网电压时获得：

$$I_{c,\max} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U_{g,\min}} \quad (3.69)$$

3.5.1.3 电压变换器限制

变换器通过一个纯电抗性 (X) 的变压器连接到电网，其输出电压 (\dot{U}_c) 为

$$\dot{U}_c = jX \dot{I}_c + \dot{U}_g \quad (3.70)$$

变换器电流为

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c - \dot{U}_g}{jX} \quad (3.71)$$

电网侧变换器输出的复功率可表示为

$$\dot{S} = \dot{U}_g \dot{I}_c^* = \dot{U}_g \left(\frac{\dot{U}_c - \dot{U}_g}{jX} \right)^* \quad (3.72)$$

其实部和虚部形式为

$$P + jQ = \dot{U}_g \left(\frac{\dot{U}_c - \dot{U}_g}{jX} \right)^* \quad (3.73)$$

如果变换器电压根据下式表示为 d-q 轴的形式：

$$\dot{U}_c = U_c \exp(j\varphi) \quad (3.74)$$

将式 (3.74) 代入式 (3.73)，则功率的实部和虚部可表示为

$$P = \frac{U_g U_c}{X} \cos(\pi 2 - \varphi) \quad (3.75)$$

$$Q = \frac{U_g U_c \sin(\pi 2 - \varphi) - U_g^2}{X} \quad (3.76)$$

可得生成功率 PQ 轨迹图：

$$P^2 + \left(Q + \frac{U_g^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{U_g U_c}{X} \right)^2 \quad (3.77)$$

电网规范要求风力发电机在每个工作点甚至在最大有功功率输出情况下都可以提供无功功率输出。因此，这一规范要求可以表述为在额定有功功率输出 (P_R) 时，风力发电机应具有一定的功率因数 ($\cos\varphi_R$)。

通过使用式 (3.77) 中 U_c 的额定值，变换器的输出电压为

$$U_c = \frac{X}{U_g} \sqrt{P_R^2 + \left(P_R \tan\varphi_R + \frac{U_g^2}{X} \right)^2} \quad (3.78)$$

图 3.11 给出了随电网电抗和电压变化而变化的 U_c 。电网电抗 (X) 和电网电压 (U_g) 的允许工作范围已经发生变化。值得注意的是，对于电网电抗的变化，电网电压的下降如何引起变换器电压的下降。图中还表明，电感性更强的电网所需变换器的电压越高。 $U_{c,\max}$ 最大值在 X_{\max} 和 $U_{g,\max}$ 处。

3.5.1.4 直流母线电压限制

为了获得最大的变流器电压 $U_{c,\max}$ ，考虑到 PWM 或 SVM 调制策略，直流母线电压应该是 $U_{DC,\max} = \sqrt{2} U_{c,\max}$ 。

3.5.2 PQ 容量

考虑到前述的限制条件， PQ 容量将限制在电流变流器限制式 (3.67) 和电压变流器限制式 (3.77) 范围内，并且其功率因数为 $\cos\varphi_R$ 。

为了获得取决于电网电压、电网耦合阻抗和所需的功率因数的 PQ 容量，需要对此进行一系列的测试。在每一个测试中，只允许一个参数可以改变并超出运行范围，而其余参数保持不变。

3.5.2.1 电网电压的影响

图 3.12 给出了电网电压标幺值在 0.90 ~ 1.05 之间变化时的 PQ 轨迹。在这种

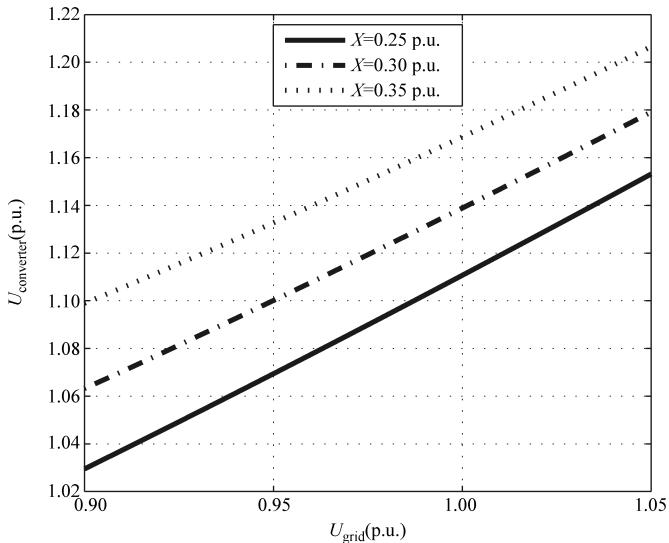
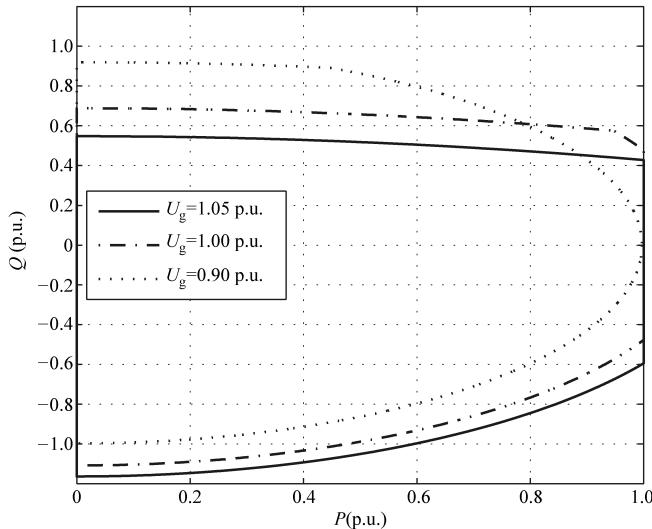


图 3.11 与电网阻抗和电压相关的变换器电压

图 3.12 电网电压对 PQ 容量的影响

情况下，所有工作状态下的电网无功功率和额定功率因数都固定不变。从这些 PQ 曲线可以看出， PQ 容量被限定在电流变换器的限值（上限）和电压变换器的限值（下限）。如果直驱式风力发电机设计合适，虽然它的无功功率支持能力依赖于电网电压，其仍然可以在发出额定有功功率的同时提供无功功率支持，当然如果电网电压降低其无功支持能力也会随之降低。

3.5.2.2 电网阻抗的影响

在这项测试中，电网耦合阻抗标幺值在 $0.25 \sim 0.35$ 之间变换，其他参数（电网电压和功率因数）固定在其额定值。图 3.13 表明当全功率变流器连接到较低感性电网时有较高的无功功率支持能力。

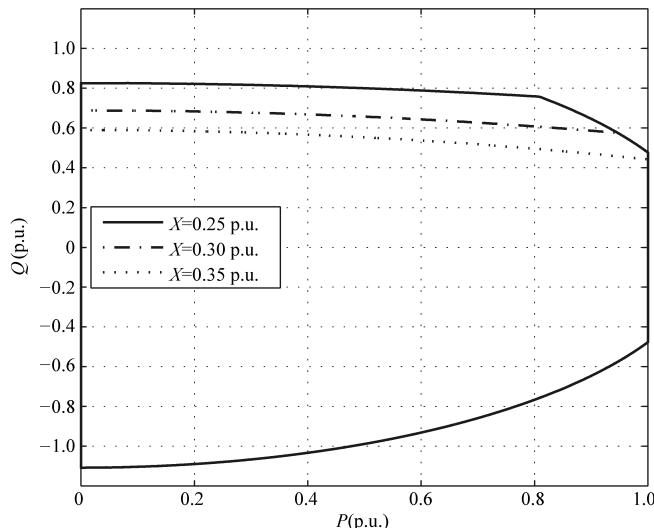


图 3.13 电网阻抗对 PQ 容量的影响

3.5.2.3 功率因数的影响

图 3.14 给出了功率因数对全功率变流器 PQ 容量的影响。值得注意的是，风

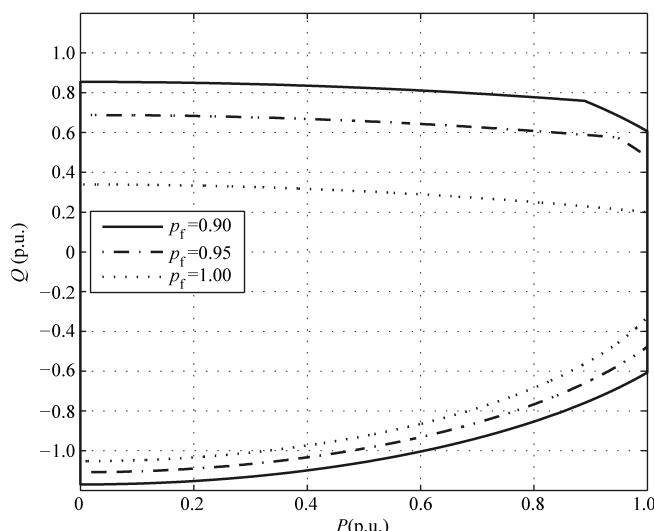


图 3.14 功率因数对 PQ 容量的影响

力发电机如何在单位功率因数时发出无功功率。在这种情况下，要求风力发电机工作在超前或滞后功率因数 0.95 的区间，可以看出此时即使风力发电机处在额定工作状态 ($P_{\text{rated}} = 1.0 \text{ p. u.}$)，其也有能力向电网提供无功功率支持。

参 考 文 献

1. Braun M (2008) Reactive power supply by distributed generators. In: Proceedings of IEEE power and energy society general meeting, Pittsburgh, PA, USA, pp 1–8
2. Hedayati H, Nabaviniaki SA, Akbarimajd A (2008) A method for placement of DG units in distribution networks. *IEEE Trans Power Deliv* 23(3):1620–1628
3. Vijayan P, Sarkar S, Ajjarapu V (2009) A novel voltage stability assessment tool to incorporate wind variability. In: Power energy society general meeting. PES '09, IEEE, Calgary, AB, Canada, pp 1–8
4. Sangsarawut P, Oonsivilai A, Kulworawanichpong T (2010) Optimal reactive power planning of doubly fed induction generators using genetic algorithms. In: Proceedings of the 5thIASME/WSEAS international conference on energy, Cambridge, UK, pp 278–282
5. Ping-Kwan Keung, Yury Kazachkov, Senthil J (2009) Generic models of wind turbines for power system stability studies. In: Proceedings of the 8th international conference on advances in power system control, operation and management (APSCOM 2009), London, UK, pp 1–6
6. Vilar Moreno C, Amaris Duarte H, Usaola Garcia J (2002) Propagation of flicker in electric power networks due to wind energy conversions systems. *IEEE Trans Energ Convers* 17:267–272
7. Freris LL (1990) Wind energy conversion systems. Prentice Hall, New York
8. Kundur P (1994) Power system stability and control. McGraw-Hill, New York
9. Krause PC, Nozari F, Skvarenina TL, Olive DW (1979) The theory of neglecting stator transients. *IEEE Trans Power Apparatus Syst PAS-98(1)*:141–148
10. Slepchenkov MN, Smedley KM, Jun W (2011) Hexagram-converter-based STATCOM for voltage support in fixed-speed wind turbine generation systems. *IEEE Trans Ind Electron* 4:1120–1131
11. Ackermann T (2005) Wind power in power systems. Wiley, Hoboken
12. Leonhard W (1990) Control of electrical drives (Electric Energy Systems and Engineering Series). Springer, Berlin
13. Ullah NR, Thiringer T (2008) Improving voltage stability by utilizing reactive power injection capability of variable speed wind turbines. *Int J Power Energy Syst* 28(3):289–229
14. Bharat S, Singh SN (2009) Reactive capability limitations of doubly-fed induction generators. *Electric Power Comp Syst* 2009:427–440
15. International Wind Energy Development (2011) World Market Update 2011 Forecast 2012–2016. BTM Consultant ApS
16. Technical characteristics Siemens Bonus SWT-3.6-120
17. Enercon: Product Overview E-126/7.5 MW. Apr 2012
18. Baroudi JA, Dinavahi V, Knight AM (2007) A review of power converter topologies for wind generators. *Renew Energy* 32(14):2369–2385
19. Vas P (1992) Electrical machines and drives. Oxford University Press, Oxford, UK
20. Saleh SA, Khan MASK, Rahman MA (2011) Steady-state performance analysis and modeling of directly driven interior permanent magnet wind generators. *IET Renew Power Gener* 5 (2):137–147
21. Ullah NR, Bhattacharya K, Thiringer T (2009) Wind farms as reactive power ancillary service providers – technical and economic issues. *IEEE Trans Energ Convers* 24:661–672

第4章 无功功率的优化

电力系统研究中的每一个优化问题，都包含一个目标函数和该目标函数要遵循的一组约束条件，同时，我们也用这个目标函数和这组约束条件来定义这个优化问题。与无功功率规划有关的主要约束条件都涉及了潮流方程。这些问题就是众所周知的潮流优化问题。尽管无功功率系统在正常运行条件和故障扰动下的表现尚可，但是其当前的运行条件也隐含着重新定义无功功率规划的必要性。无功功率规划中约束条件的应用产生了第二种最优化模型，即所谓的安全约束条件下的潮流优化。最后，越来越多的研究提出了一种把电压稳定既包含进目标函数又包含到无功功率规划约束问题的可能性，从而最大限度地提高电压稳定裕度。于是，第三种优化问题被提出了，也就是安全约束条件和电压稳定约束条件下的潮流优化。这种优化方法旨在保证系统故障和扰动下具有一定的电压稳定裕度。

4.1 潮流优化概述

在电力系统的研究中，最开始使用的优化方法是最佳潮流法^[1,2]，最佳潮流法由 $2n$ 个未知控制变量和 $2n$ 个方程定义，其中， n 指的是系统中的母线数量。通常，根据传统的潮流计算要达到一个可行的系统解决方案只需考虑技术限制。于是，这种方法就抛开了如系统运行成本之类的目标函数。为了得到最优解，一种通过最小化目标函数如减小成本的最佳潮流法被提出用来获得可行的解决方案。在这种情况下，由于电力系统中元件本身的影响， $4n$ 个已知变量的值不是稳定的，而是在一定范围内变化。发电机组注入电力系统中的有功和无功也被认为是在一定范围内变化的。这意味着，系统的解决方案建立了一系列可能的解，而最终的解就在其中。因此，最佳潮流法可被认为是一种有静态限制条件的非线性最优化问题。

4.2 公式化

对应于数值优化一般问题的数学公式受到如下条件限制：

$$\text{Minimize } f(u, x) \quad (4.1)$$

$$g(u, x) = 0 \quad (4.2)$$

$$h(u, x) \geq 0 \quad (4.3)$$

式中 u ——系统控制变量；

x ——系统变量；

$f(u, x)$ ——目标函数；

$g(u, x)$ ——等式约束，如潮流方程；

$h(u, x)$ ——不等式约束，如控制变量的固有限制和系统设备的运行限制。

应用最多的控制变量是：

- ① 发电机的输出功率；
- ② 系统母线的电压调节；
- ③ 变压器分接头调节变比；
- ④ 换相变流器；
- ⑤ 并网连接的无功设备；
- ⑥ 在系统特殊运行条件下的负载。

就状态变量而言，最有代表性的是：

- ① 系统母线上的电压幅值；
- ② 系统母线电压相角；
- ③ 线路的传输功率。

4.3 限制条件

应用在最佳潮流法中的主要约束条件可以由式(4.2)和式(4.3)表示，也即通过使用一组如对应于传统潮流方程那样的等式或一组如控制系统变量 u 以及状态变量 x 的物理限制不等式来进行约束。

(1) 潮流的等式约束

$$P_{gi} - P_{di} - P(U, \theta) = 0 \quad (4.4)$$

$$Q_{gi} + Q_{Ci} - Q_{di} - Q(U, \theta) = 0 \quad (4.5)$$

(2) 不等式约束

1) 控制变量的限制范围：

$$P_{gi,\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi,\max} \quad (4.6)$$

$$U_{gi,\min} \leq U_{gi} \leq U_{gi,\max} \quad (4.7)$$

$$T_{l,\min} \leq T_l \leq T_{l,\max} \quad (4.8)$$

$$Q_{Ci,\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci,\max} \quad (4.9)$$

2) 状态变量的限制范围：

$$Q_{gi,\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi,\max} \quad (4.10)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (4.11)$$

$$LF_1 \leq LF_{1,\max} \quad (4.12)$$

3) 其他限制：功率因数的限制等。

上述约束表达式中：

P_{gi} —— i^{th} 发电机注入的有功功率；

P_{li} ——负载所需的 i^{th} 母线上的有功功率；

Q_{gi} —— i^{th} 发电机注入的无功功率；

Q_{Ci} ——与 i^{th} 母线相连的并联无功补偿装置所提供的无功功率；

Q_{li} ——负载所需的 i^{th} 母线上的无功功率；

U_{gi} —— i^{th} 母线处的发电机电压；

T_i ——变压器抽头位置；

U_i —— i^{th} 母线电压；

LF_i ——传输线上的潮流。

4.4 基于电压稳定概念的模型

许多基于分歧理论的计算方法已被证明是一种用在研究电压稳定当中非常有效的工具。但是，从技术角度来看，包含限制条件的这种方法非常复杂，而且就这种连续方法而言，它的花费将很大，特别是在有多重限制的大型系统中尤其如此。最优化方法在这种研究中的应用表现出多种优点，这些优点大部分都与处理限制条件的能力有关。在所有与无功功率管理和电压稳定相关的文献中都提到了把电压稳定裕度转换成一个电压指数的可能性，这种转换是为了检测那些对所研究系统中加入的无功补偿单元^[3,4]较为敏感的母线。传统上，包含安全限制的最佳负荷潮流并没有考虑加入新无功补偿装置到系统后能影响电压崩溃点的变化。由于这种变化影响的需求，通过研究含有突发事件的个案，一种新的最优化模型被发展起来，这种模型包含了不同的与电压稳定相关的约束条件。这种模型被称为安全和电压稳定限制条件下的最优负荷潮流。参考文献 [5, 6] 将电压稳定裕度 (VSM) 整合到系统约束中有两个主要原因：第一个原因是在正常运行条件下，要保证系统母线的电压水平在一定范围内的需求；第二个原因是确保突发事件后系统运行点和电压崩溃点之间的距离要在预先设定的范围（电压稳定裕度）之内。为了确保系统每次都能满足安全条件，最优化问题包含了两组约束条件，这些约束条件与正常运行下的系统性能和突发事件后的系统性能相关。通过增加限制条件，同时复制与两种运行条件相关的变量，解决无功功率规划的最优化模型将会显著地复杂化。

4.5 目标函数的选择

无功功率管理的目标函数通常基于一个成本函数，现举例如下。

4.5.1 最小化可变成本

基本的目标函数是将无功补偿装置并入系统后的可变成本最小化。有两种可表示这种目标函数的模型。第一种模型把发出无功功率的成本认为是随无功源 (Q_c) 的容量变化而线性变化的，如式 (4.13)^[1]：

$$\text{Cost per hour}_{\text{model1}} = C_1 Q_c \quad (4.13)$$

式中， C_1 的单位是 \$/Mvar · h； Q_c 的单位是 Mvar。

需要特别强调的是，这个模型只关注并入系统无功发生单元的整体容量，即关心总无功功率的容量。因此，不管选择并入两个 200Mvar 的无功补偿单元还是一个 400Mvar 的无功补偿单元，成本是一样的。

第二种模型把产生无功功率的成本看做是与设备寿命有关的固定成本 (C_0) 加上按它的使用寿命分配的可变成本 (C_1)。这个模型可用式 (4.14) 表示^[5,7,8]。

$$\text{Cost per hour}_{\text{model2}} = (C_0 + C_1 Q_c)x \quad (4.14)$$

式中， C_0 的单位是 \$/h； C_1 的单位是 \$/Mvar · h； Q_c 的单位是 Mvar； x 是一个表征是否接入无功发生单元的状态变量。

事实上二进制变量 x 的应用只表示两种成本模型之间的微小变化，尽管如此，它仍然暗示了这是不同的求解模型的应用。因此，第一种成本模型所用的解决方法是与传统的线性或非线性设计方法相关的；同时，第二种成本模型的解决方法则表现了整体混合优化技术的应用。

4.5.2 可变成本和有功功率损耗最小化

系统中有功损耗所带来的成本增加，意味着基本目标函数的变化。从之前提到的两种可变成本模型来看，获得两个包含系统有功损耗的新的目标函数是可能的^[2,9]。

$$\text{Cost per hour}_{\text{model3}} = C_1 Q_c + C_2 P_{\text{loss}} \quad (4.15)$$

$$\text{Cost per hour}_{\text{model4}} = (C_0 + C_1 Q_c)x + C_2 P_{\text{loss}} \quad (4.16)$$

式中 C_2 ——与电力系统有功损耗相关的成本。

有研究表明有功损耗所带来的成本不仅要在正常运行时考虑，而且在突发情况下的不正常运行时也要考虑^[10]。如果有突发情况发生，其目标函数为公式 (4.17)：

$$\min F = C_1 Q_c + \sum_{k=0}^{N_e} C_2 (P_{\text{loss}})_k \quad (4.17)$$

式中， k 表示所有可能发生的突发情况和突发情况之后的运行情况。

4.5.3 可变成本和燃料成本最小化

在某些研究中^[11-13]，燃料消耗的成本被视作系统运营成本的指示器。把损耗所带来的花费降低到最小也不总意味着系统运行成本的降低。但是，把系统运行成本降到最低就意味着要把损耗带来的成本降到最低。

这种情况下，通过应用两种系统成本的基本模型，目标函数能被表示为式

(4.18) 和式 (4.19) :

$$\text{Cost per hour}_{\text{model5}} = C_1 Q_C + C_T \quad (4.18)$$

$$\text{Cost per hour}_{\text{model6}} = (C_0 + C_1 Q_C)x + C_T \quad (4.19)$$

式中, 燃料成本 C_T 来源于独立单元成本 [见式 (4.20)] 的总和, 这些独立单元成本可通过二次逼近公式 (4.21) 表示^[11]。

$$C_T = \sum_{i=1}^n f_i P_{gi} \quad (4.20)$$

$$f_i(P_{gi}) = a_{0i} + a_{1i}P_{gi} + a_{2i}P_{gi}^2 \quad (4.21)$$

4.5.4 与设定点偏离的最小化

把系统成本引入到目标函数的一种选择是应用与控制变量有关的偏离指数来表示与设定值的偏离。这个设定值与系统正常运行条件或特定运行条件对应。在参考文献 [14] 的一个例子中, 目标函数用来最小化每条 (i^{th}) 母线的电压幅值和其电压极限之间的视在距离, 简单表示为

$$p = \sum_i U_{i,\max} - U_i \quad (4.22)$$

式中, i 表示系统的 i^{th} 母线。

4.5.5 多目标方程

无功功率管理的主要目的是为系统的平衡提供必要的无功功率, 以使系统稳定运行, 并保持其经济和安全的平衡。

前述各节整理了关于无功功率规划的目标函数的状态简介。其中的一些研究应用了多目标方程, 比如, 有的方程把可变成本和系统损耗结合在一起, 其中每个目标的权重系数可以简单地定义为将目标函数的每个变量转化为成本。在同样的函数中, 当把一些关于成本和系统安全的变量考虑进去时, 问题就会变得更加复杂。

举一些例子:

1) 在参考文献 [15] 和 [16] 中, 目标函数 F 包含了与无功补偿源扩容、系统损耗以及母线电压偏离设定值有关的成本, 由式 (4.23) 和式 (4.24) 表示:

$$\min F = (C_0 + C_1 Q_C)x + C_2 P_{\text{loss}} \quad (4.23)$$

$$\max |U_{i,\max} - U_i| \quad (4.24)$$

2) 在参考文献 [17] 中, 式 (4.25) 定义的目标函数要把电压变化降至最低, 同时无功变化和有功损耗也要最小。

$$\min F = k_1 \sum (\text{voltage violations})^2 + k_2 \sum (\text{Reactive Power violations})^2 + P_{\text{loss}} \quad (4.25)$$

3) 在参考文献 [18] 中, 目标函数由可变成本、系统有功损耗、母线电压偏离和来自设定值的传输线潮流共同产生:

$$\begin{aligned} \min F = & (C_0 + C_1 Q_C)x + C_2 P_{\text{loss}} + \rho_1 \sum_i \left(\frac{|U_i - U_{i0}|^2}{\Delta U_{i\max}} \right)^2 \\ & + \rho_2 \sum_i \left(\frac{|LF_i - LF_{1,\text{set point}}|}{\Delta LF_{i\max}} \right) \end{aligned} \quad (4.26)$$

式中 U_i , U_{i0} , $U_{i\max}$ —— 分别表示 i^{th} 母线电压、参考电压和最大母线电压偏离；
 LF_i , $LF_{1,\text{set point}}$, $LF_{i\max}$ —— 分别表示当前运行条件下的传输线潮流、传输线参考潮流和传输线最大潮流偏离。

4.6 解决无功功率规划的方法

应用在无功功率规划和系统潮流问题的最优化方法大致可分为：

1) 传统方法：

- ① 基于线性规划的方法；
- ② 基于非线性规划的方法；
- ③ 基于非线性混合整体规划的方法。

2) 改进方法。

4.6.1 传统方法

4.6.1.1 线性规划

线性规划方法是一种可靠性高且鲁棒的技术，该方法通过线性目标和线性条件特性来解决较宽范围的最优化问题。

但是，线性规划在电力系统里的应用范围仍然受到很多限制，主要由于这种方法对系统损耗的估计是不准确的，此外还可能使线性规划陷入局部最优化的情况。当然，有很多文献中确实也在处理无功功率规划问题时运用了线性规划法，如参考文献 [19, 20]。在参考文献 [21] 中，联合应用了线性规划和参数规划来找到解决问题所需无功功率发生单元的最小数量。

4.6.1.2 非线性规划

尽管事实上在电力系统领域线性规划有很多实际应用，但电力网络最优化过程中大部分变量和约束都是非线性的。非线性规划可以解决任何包含非线性目标函数和约束条件的最优化问题。就不等式表示的约束条件来说，确定出上限和下限是必要的。

在应用非线性规划的最优化方法中，下面的几个技术非常重要：

- 1) 序列二次规划法；
- 2) 基于增广拉格朗日的方法；
- 3) 基于广义梯度的方法；
- 4) 内点算法。

4.6.1.3 非线性混合整体规划

分解法已经在大电力系统的最优化领域中发展起来。这种方法可把问题分解为两个分别有不同的线性特性的子问题。这些方法的应用减少了解决问题所需的迭代次数，也减少了计算的时间和存储空间。此外，分解过程考虑到了为每一个单独问题的分解方式寻求不同解决方法的应用，这也正是这种方法的引人之处。分解法适用于大型电力系统。在参考文献 [22] 中，Benders 分解法已经用来解决关于发电每日规划、整体混合变量和非线性约束的技术限制。

4.6.2 改进方法

4.6.2.1 试探法

目前，某些组合分析问题仍然较难用某种特定方法解决，无功功率管理问题就是其中之一，但是尽管如此这一问题仍然需要一种解决方法。为解决这些问题，某种特定的数学技术可用来获得一个解决问题的可行办法。换句话说，这种技术方案能够解决问题的约束条件，尽管其不能使目标函数最优化。这种技术方案在短时间内以较小的计算代价得到问题的最优解。这些运算法则的一种可能性解释为从常识上理解的“简化过程”，该过程可以有效地为复杂的问题提供一种好的解决办法（尽管对于最优化是非必要的）。

与传统的最优化技术相比，为获得准确的解决方案，试探法的一个主要优点是针对问题的不同特征其具有足够的灵活性。试探法能应用于线性系统和非线性系统，并且能够提供不止一种的解决办法。在某些情况下，能提供多种方法本身由于扩展了解决方法的渠道而具有很大的优势。

在试探法的主要缺点中，要特别指出的是这种方法不能预知解决方案的质量，换句话讲，就是不能知道运算法则所给出的解决方案是否接近最优。但是，有些技术包含了一些所选方案的信息引征。其中，松弛度就是凸现的一点。如果这种评估过程不能被实施，还有简单的办法能用来评估试探法的质量，如随机产生不止一种解决方案，然后检查它们与试探法所提供的解决方案的接近度。总而言之，可以得出结论，在寻找一种精确的方法解决问题的情况下，试探法的选择常常是必要的，特别是在那些经济因素是关键的问题中。

4.6.2.2 模拟退火法

模拟退火法是一种能通过概率性的运动从局部最小量里分离出所需量的局部搜索算法（元启发式算法）。从数学角度来看，Kirkpatrick、Gellatt 和 Vecchi 等人在 1983 年提出的模拟退火法是一种随机算法，该方法设法通过跨越式空间把大量变量的数值函数最小化，并使最终解与可能的局部最小值偏离开来^[23]。因此，该方法能以概率 1 渐近收敛到最优解^[24]。

这项技术基于一种广泛应用于冶金行业里的冷却概念，即为获得有序的固态金属而使用低能量的金属并避免任何亚稳状态出现的方法。这项技术通过高温使金属

软化，然后让它非常慢地冷却直到金属粒子开始固定到自己的位置并达到固体的“基态”。为了使材料达到热平衡，就需要放缓冷却过程；如果过快达到平衡，实际上那是一种亚稳态而不是一种粒子被完美排列并且系统处在低能量水平的基态。

模拟退火算法把这种冶金技术应用到了数学规划中。因此，其主要目标是最小化问题的目标函数，类似于物质的能量，通过应用一个假定的温度作为算法中的可控参量来最小化该能量。实际上，基于蒙特卡洛技术的 Metropolis 算法就是模拟材料的冷却过程。该算法能在一个特定的温度下采用描述热平衡的玻尔兹曼分布来扩展大量转换，进而描述物质的平衡热性能。

这种模拟冷却方法的实施过程可总结为：从初态开始，如果此状态的发展是由比当前状态更低的能量提供的（指更低的能量评估函数值），则此状态将被认为是当前状态。相反，如果产生状态在目标函数中产生一个增量 δE ，则此状态将会被以一个确定的概率 $e^{-\delta E/T}$ 接受，这里 T 表示温度。这种取决于温度的接受概率考虑了每种状态达到的温度，但是由于不同状态的温度不同，其概率也是不同的。

因此，模拟退火算法是 Metropolis 算法的一种迭代过程，Metropolis 算法主要是为了减小控制参量值（温度）。概念上，模拟退火算法会引起一个相邻的搜索过程，这个过程的选择标准来自于 Metropolis 算法给定的转化规则。就这点而言，如果增大初始解的评估函数值和备选值的差别，其接受概率就会降低。搜索时这个随机因素的存在可以使备选值减小陷入局部最优的可能性。

该方法的主要缺点与控制参数（温度）的调整有关，而这取决于负责算法的编程人员的能力和知识。此外，这个算法的计算时间会比较长，因此一些并行计算技术将应用于其中。最后，灵活因子从这种方法的所有优点中突显出来，它可以促进问题的发展并利于用户方面执行。

在现有的文献中，有几篇讲到了通过模拟退火法来进行无功功率规划。在参考文献 [25] 中，模拟退火法用来获取类型、位置和无功功率发生单元的最优容量；在参考文献 [18] 中，无功功率规划被当做一种受约束的未分化的多目标问题，且能被基于一种扩展的模拟冷却技术的两相算法来解决。

4.6.2.3 禁忌搜索法

禁忌搜索算法是 F. Glover 在 1986 年提出的^[26]，禁忌搜索法就是“通过局部搜索过程探索到局部最优”。它是一种基于人类记忆机制的算法。这里主要分析该算法与模拟退火法的区别，这些都是已有的知识。禁忌搜索法的基本原则很简单：通过不断迭代更新得到唯一解。每次迭代从当前解 “ i ” 转化到新解 “ $i + 1$ ” 需要两个状态：

- 1) 首先，要生成一组可能的解 {邻域，邻域 (i)}，这些解可以从当前解开始通过增量运算获得。
- 2) 每一个集成到邻域的可能解 $\{f(\text{Neighbourhood } (i))\}$ 都已被评估，可以

最小化目标函数的解将被选中。值得注意的是，这种选择没有考虑目标函数得到的值是否能改善第 i 状态。因此，这种方法得到的解会超出局部最优值和算法策略上的搜索解。

为使搜索过程能回到旧的局部最优值，禁忌搜索法把一定数量的最近运动归类为“禁忌运动”，这些运动在特定的时间框架内不能重复。这一事实考虑了算法以一种系统的、非随机的方式偏离局部最优值。对过去事件的记忆允许禁忌搜索法改变当前解的搜索邻域，并能据此修正搜索过程。

存储结构可以采取许多形式：它们能存储总信息（外显信息）或者只存储部分信息，还能在从一个解到另一个解转化时防止信息的某些属性的改变（属性记忆）。这种结构能够允许选择性地记忆和遗忘。

伴随着上述所提事件相关的短期存储，两种额外的存储机制（集约化和多样化），可以支持算法拥有长期存储功能。这些机制主要使用与频率相关的信息和在搜索过程中保持在不同解的一种特定属性有关的信息。集约化意味着在解空间的特定区域搜索，并且假定能找到全局最优解。就此部分而言，多元化则改善了解空间特定区域的搜索，这种搜索的属性一直都较差，现在经过改善后其主要的导向搜索过程可以覆盖到不同的区域。通过对最优解的不同属性分配权重，就有可能使该方法在很大效益的区域里探索。

与模拟退火法相比，禁忌搜索法所用的参数更少，因此更容易实施。但是，多样化和集约化这样的机制应用会增加算法的复杂度。参考文献 [27] 中就介绍了这种方法应用于无功功率规划的例子。

4.6.2.4 进化算法

自然进化是一个基于群体的优化过程。进化算法不同于传统优化办法的区别在于它对目标函数和约束进行了合并处理。理论上，这些技术以概率 1 收敛到全局最优解。

进化算法出现于 19 世纪 50 年代后期，由于计算机设备成本的下降和计算能力的提高，而且还由于计算过程的平行大规模架构的发展，这种算法的应用得到了稳步扩展。

进化算法的基本原则很简单：从搜索区域内随机选取数量为 “ N ” 的个体组成初始群体。进一步，选中的个体会被逐个分析以确定其对环境的适应等级。后一代将通过对这一代群体进行突变、重组、复制、交叉和选择来获得。突变能随机地修改个体的某个属性；重组能把一些个体的信息结合起来；复制能使最好的个体属性通过连续的几代保留下来；交叉能使两个个体的信息随机互换；最后，选择能淘汰掉群体中最不能适应的个体。正如所观察到的，每一步操作都突出了一种进化。

根据哪一种基因操作被应用，进化算法可以被分为：

(1) 进化规划 进化的完成要基于群体，应用短期概率规则来选择后代，用这种方式每一个后代都和先前群体中的个体竞争，同时也和突变后的群体竞争。先

前群体中的获胜者将会进入新的群体。

(2) 进化策略 进化的完成要根据个体进行父母选择到繁殖过程的突变，根据选择的变量，进化也被引入到新的群体。

(3) 遗传算法 根据染色体进行操作。遗传算法的显著特征是对于解决带有连续或离散变量的多目标最优化问题而言是一个有用的工具。最优化的搜索是通过一个群体执行的，而不只是个体，这保证了该算法可以迅速地探索解空间。这些算法只使用与目标函数相关的信息而不需要计算导数或梯度。最后，遗传算法采用了引导搜索过程的转化概率规则。

进化算法主要是在探索算法不能提供解或者其解不符合要求的情况下使用。与非线性规划相比，进化算法确实是解决那些非连续和突变最优化函数的最好办法。

与前述启发式算法相似，在文献中有很多实例应用进化算法解决关于无功功率规划的问题。参考文献 [28] 中描述了如何用进化策略解决无功功率规划问题，同时该文献也给出了进化算法与线性规划的比较。最后，参考文献 [29, 30] 中介绍了几种运用遗传算法来处理无功功率规划的实例，也给出了几种这些最优化算法的改进措施。

遗传算法不同于传统数值最优化方法之处有 4 点：

1) 遗传算法运用属于最优化问题的算法规则变量，同时也联合操作多个参数。

2) 遗传算法在可能解组成的群体中运算，而不是仅仅使用潜在的解。换句话说，遗传算法本质上是并行计算的。这个特点使遗传算法能脱离局部最优值，因为该算法使用不同的搜索方向，而不仅仅是一个方向。那些不能产生足够解的搜索方向会很快被遗传运算移除，就像在自然界中，适应环境最差的个体会被淘汰一样。这种并行性使遗传算法能在大搜索空间内运行，而这个大搜索空间对于密集搜索方法将不会在合理的时间内产生一个解。

3) 遗传算法不像传统方法那样，它既不使用导函数也不使用其他属性的函数，而只使用目标函数本身。这个特点使遗传算法能通过不连续的时间响应的函数运算或者多重局部最优值运算。在逃离局部最优值中交叉遗传算子扮演着重要的角色，因为它可以在连续几代的有用候选值之间传递信息。

4) 遗传算法观测规则与概率性转化有关并且是不确定的。

在进化算法技术中，遗传算法被广泛使用有如下原因：

1) 进化算法的基本思想是运用一个主要的基因算子以自然的方式编译，基因算子有重组和交叉。

2) 遗传算法很灵活并且很容易应用于属于不同区域的大量不同问题。遗传算法能与其他非进化算法结合使不同最优化技术结合起来。

3) 遗传算法有很广泛的理论基础。它基于霍兰于 1975 年提出的图式理论。参

考文献 [31] 中有这个理论的详细描述。

- 4) 遗传算法是多样的，因为运算它所需要的相关特定问题很少。
- 5) 该算法通过一个中等容量的计算机就可以运行，并且也可以得到可观的结果。

4.7 实例

图 4.1 所示的系统描述了一个 4 条母线的微网，每条母线都有负荷。系统总的有功和无功负荷分别是 500MW 和 309.86Mvar。这个微网有一条联络线接到本地电网，在 4 号母线还有平衡节点。需要追踪的目标函数与一个风电场相连，该风电场的最优母线的最大无功容量为 250Mvar，其目标是为了最大化系统的带负载能力而不至于过载，同时，对于电网所提供的额定电压 (230kV)，允许其有 5% 的裕度。

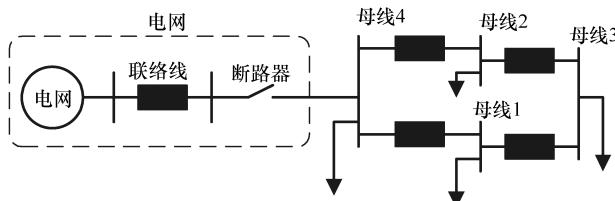


图 4.1 四母线微网

4.7.1 初始群体

遗传算法实施的第一步是产生初始群体，有多种方法可以产生初始群体。在本例中，考虑到系统不同变量的限制，随机选择被视为是最合适的。对于给定的例子，群体由 5 个个体组成，每个个体有 3 个基因，分别对应于负荷参数、风电场母线配置和注入的无功功率。

表 4.1 给出了初始群体。可以看出，1 号个体与染色体 1 对应，该染色体会定位到风电场母线 2，其注入无功功率为 149.537Mvar，带载能力参数为 13.2%。带载能力参数表示了考虑到初始负载下的系统过载量。

表 4.1 四母线系统的原始群体

	λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$
染色体 1	0.13205	2	149.537
染色体 2	0.69965	2	187.455
染色体 3	0.4859	2	233.818
染色体 4	0.18272	3	209.539
染色体 5	0.10121	3	221.811

4.7.2 评估

评估过程会为群体中的每个个体依据适应度函数 $FF(y) = \lambda$ 和目标函数 [见式 (4.27)] 分配一个适当的值 (见表 4.2 的第 2 列和第 3 列)。评估过程结束之后, 通过使用范围运行 [见式 (4.28)] 将群体中的个体进行收缩。群体中具有较大适应度值 (FF) 的最好的个体将被分配一个较高范围的值。

$$\min F(y) = (1 - FF(y)) \quad (4.27)$$

$$range = \frac{1}{\sqrt{i}} \quad (4.28)$$

表 4.2 四母线系统的评估过程

	$FF(y)$	$F(y)$	阶次	范围
染色体 1	0	1.0000	3	0.557
染色体 2	0	1.0000	4	0.350
染色体 3	0	1.0000	5	0.407
染色体 4	0.18272	0.8173	1	1.000
染色体 5	0.10121	0.8988	2	0.707

4.7.3 选择

选择操作用于群体中是为了获得群体中的亲代。在这个选择中采用了轮盘赌式方法。选择过程的第一步是依据个体的范围确定每个个体的频率。之后, 计算出每个个体的累计频率 (见表 4.3) 并考虑到其能表示每个个体的概率, 并在一个饼状图中进行表示 (见图 4.2)。

表 4.3 四母线系统的累计频率

	范围	频率	累积频率
染色体 1	0.557	0.1787	0.1787
染色体 2	0.500	0.1547	0.3333
染色体 3	0.407	0.1384	0.4718
染色体 4	1.000	0.3094	0.7812
染色体 5	0.707	0.2188	1.0000

一旦每个染色体的累计频率被计算出来, 会给群体中的每个个体分配一个数字 r (在 0~1 之间)。在给定的例子中, 亲代组由 5 个个体形成, 所以就会选出 5 个随机数 (见表 4.4 中的 r 列)。亲代的选择不仅依赖于随机数 r , 累积频率也是一个因素。每个染色体所选亲代的累计频率大于随机数 r 。在表 4.4 中可以看到, 对于染色体 1, 其随机数 $r=0.8631$, 被选中的亲代的累计频率要大于 r 的值, 在表中与 5 号染色体对应。

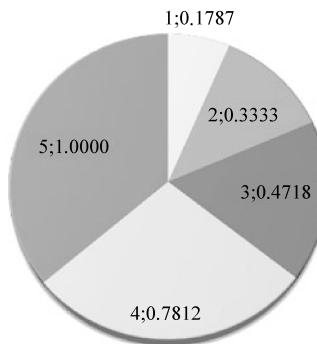


图 4.2 累计频率饼状图

一旦亲代被选中，为了增加整个过程的随机性，亲代将随机地重组（见表 4.5）。就这个研究而言，进入交叉过程的亲代有 $1/4$ ，余下的会留给突变过程。

表 4.4 四母线系统的选择过程

	累积频率	r	亲代
染色体 1	0.1787	0.8631	5
染色体 2	0.3333	0.3807	3
染色体 3	0.4718	0.749	4
染色体 4	0.7812	0.1567	1
染色体 5	1	0.0581	1

表 4.5 四母线系统选择过程中的亲代

	λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$	
染色体 5	0.10121	3	221.811	交叉过程
染色体 4	0.18272	3	209.539	
染色体 1	0.13205	2	149.537	
染色体 3	0.48590	2	233.818	
染色体 1	0.13205	2	149.537	突变过程

4.7.4 交叉操作

这个操作从亲代那里获得一个新的个体。交叉过程的第一步是选择一对亲代和一个随机点来开展交叉操作。在例子中，选择的亲代是前两个个体——染色体 5 和染色体 4，被选择的交叉点位于基因 1 和基因 2 之间。所以，一个新个体可以从 5 号个体的基因 1 以及 4 号个体的基因 2、基因 3 复制产生（见表 4.6）。对于第二对亲代，要展开交叉过程的随机点在基因 2 和基因 3 之间，一个新个体可以从 1 号个体的基因 1 和基因 2 以及 3 号个体的基因 3 复制产生（见表 4.7）。最终解决方案

见表 4.8。

表 4.6 第一对亲代

	λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$
染色体 5	0.10121	3	221.811
染色体 4	0.18272	3	209.539

表 4.7 第二对亲代

	λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$
染色体 1	0.13205	2	149.537
染色体 3	0.48590	2	233.818

表 4.8 交叉过程的进化

	亲代			子代			
	λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$	λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$	
染色体 5	0.1012	3	221.81	0.1012	3	209.53	子代 1
染色体 4	0.1827	3	209.53				
染色体 1	0.1320	2	149.53	0.1320	2	233.81	子代 2
染色体 3	0.4859	2	233.81				

4.7.5 突变

突变过程包含了演化过程中的新的信息。为简化案例研究，在例子中选择了一个高的突变率 ($p_m = 0.5$)。在突变过程的开始阶段，要为个体分配一个介于 0 ~ 1 之间的随机数 m 来参与突变过程。在研究的案例中就是 1 号染色体。之后，突变率会与每个个体的随机数比较，如果随机数低于突变率，个体的所有基因都会突变。

表 4.9 给出了本例中的突变过程。亲代群体由 5 个个体组成，其中的 4 个用于交叉过程，因此，只有一个会进行突变，即 1 号个体。它的随机数是 0.05，比给定的突变率 (0.5) 要低，所以 1 号染色体的所有基因都会突变，从而会产生一个新的后代。

表 4.9 四母线系统的突变过程

亲代			m	子代		
λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$		λ (p. u.)	Bus_{WF}	$Q_{WF}/Mvar$
0.13205	2	149.537	0.05	0.89842	3	151.358

4.7.6 新群体

评估、选择、交叉和突变之后，一个新的群体就产生了。这个新群体（见表

4.10) 由交叉过程得到的两个个体，一个由突变获得的个体以及另外两个应用了所谓精英化的新操作产生的个体组成。在例子中，精英化过程选择了群体中获得了进化过程中的最高适应度值的两个个体。在研究的案例中，精英化过程所选择的两个个体是4号染色体和5号染色体，这两个个体就被包含在新群体中。

表 4.10 四母线系统的新群体

基因算子	λ (p. u.)	Bus _{WF}	Q_{WF} /Mvar
精英子代	0.18271	3	209.539
	0.10121	3	221.810
交叉子代	0.10121	3	209.539
	0.13205	2	233.817
突变子代	0.89842	3	151.358

4.7.7 最终解

进化过程会不断进行直到得出解或者达到了某参数的终止值。最常见的终止条件是达到了产生个体的最大极限，或者达到了两个连续群体的收敛极限。表 4.11 给出了本例的进化过程。

可以看到，最终的优化解是在3号母线增加一个无功容量为 282.95Mvar 的风电场，从而使系统的带载能力增加 20%。

表 4.11 四母线系统群体的进化

		λ (p. u.)	Bus _{WF}	Q_{WF} /Mvar	F
原始群体		0.132	2	149.54	1
		0.699	2	187.46	1
		0.485	2	233.82	1
		0.182	3	209.54	0.8173
		0.101	3	221.81	0.8988
群体 1	精英	0.182	3	209.54	0.8173
		0.101	3	221.81	0.8988
	交叉	0.101	3	209.54	0.8988
		0.132	2	233.82	1
群体 2	突变	0.898	3	151.36	1
	精英	0.182	3	209.54	0.8173
		0.101	3	221.81	0.8988
	突变	0.182	3	209.54	0.8173
		0.101	3	151.36	0.8988

(续)

		λ (p. u.)	Bus _{WF}	Q_{WF} /Mvar	F
群体 3	突变	0.132	3	213.05	0.8671
	精英	0.182	3	209.54	0.8173
		0.182	3	209.54	0.8173
	交叉	0.132	3	213.05	0.8671
群体 4		0.182	3	209.54	0.8173
	突变	0.829	3	135.23	1
	精英	0.182	3	209.54	0.8173
		0.182	3	209.54	0.8173
群体 10	交叉	0.182	3	209.54	0.8173
		0.182	3	209.54	0.8173
	突变	0.793	3	155.33	1
			
最好的个体	精英	0.204	3	282.95	0.7958
		0.204	3	282.95	0.7958
	交叉	0.182	3	282.95	0.8173
		0.204	3	209.54	0.8173
最好的个体	突变	0.552	2	180.46	1
		0.204	3	282.95	0.7958

参 考 文 献

- Pudjianto D, Ahmed S, Strbac G (2002) Allocation of var support using LP and NLP based optimal power flows. IEE Proceed Gener Trans Distrib 149(4):377–383
- Hsu CU, Yan YH, Chen CS, Her SR (1993) Optimal reactive power planning for distribution systems with nonlinear loads. In: TENCON '93. Proceedings. IEEE Region 10 conference on computer, communication, control and power engineering, Beijing, China, vol 5, pp 330–333, Oct 1993
- Chen Y-L (1996) Weak bus oriented reactive power planning for system security. IEE Proceed Gener Trans Distrib 143(6):541–545
- Ajjarapu V, Ping Lin Lau S, Battula S (1994) An optimal reactive power planning strategy against voltage collapse. IEEE Trans Power Syst 9(2):906–917
- Chakrabarti BB, Chattopadhyay D, Krumble C (2001) Voltage stability constrained var planning—a case study for New Zealand. In: 2001 large engineering systems conference on power engineering. LESCOPE '01, Halifax, Canada, pp 86–91
- Obadina OO, Berg GJ (1989) Var planning for power system security. IEEE Trans Power Syst 4(2):677–686
- Aoki K, Fan M, Nishikori A (1988) Optimal var planning by approximation method for recursive mixed-integer linear programming. IEEE Trans Power Syst 3(4):1741–1747
- Delfanti M, Granelli GP, Marannino P, Montagna M (2000) Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms. IEEE Trans Power Syst 15(3):1041–1046
- Degeneff RC, Neugebauer W, Saylor CH, Corey SL (1988) Security constrained optimization: an added dimension in utility systems optimal power flow. Comput Appl Power IEEE 1 (4):26–30

10. Gomez T, Perez-Arriaga IJ, Lumbrieras J, Parra VM (1991) A security-constrained decomposition approach to optimal reactive power planning. *IEEE Trans Power Syst* 6(3):1069–1076
11. Chattopadhyay D, Bhattacharya K, Parikh J (1995) Optimal reactive power planning and its spot-pricing: an integrated approach. *IEEE Trans Power Syst* 10(4):014–2020
12. Lee KY, Bai X, Park Y-M (1995) Optimization method for reactive power planning by using a modified simple genetic algorithm. *IEEE Trans Power Syst* 10(4):1843–1850
13. Granville S, Pereira MVP, Monticelli A (1988) An integrated methodology for var sources planning. *IEEE Trans Power Syst* 3(2):549–557
14. Zhu JZ, Chang CS, Yan W, Xu GY (1998) Reactive power optimisation using an analytic hierarchical process and a nonlinear optimisation neural network approach. *IEE Proceed Gener Trans Distrib* 145(1):89–97
15. Chen YL, Ke YL (2004) Multi-objective var planning for large-scale power systems using projection-based two-layer simulated annealing algorithms. *IEE Proc Gener Trans Distrib* 151 (4):555–560
16. Jwo W-S, Liu C-W, Liu C-C, Hsiao Y-T (1995) Hybrid expert system and simulated annealing approach to optimal reactive power planning. *IEE Proc Gener Trans Distrib* 142(4):381–385
17. Iba K (1993) Reactive power optimization by genetic algorithm. In: Conference proceedings on power industry computer application conference, Scottsdale, AZ, USA, pp 195–201, May 1993
18. Hsiao Y-T, Chiang H-D, Liu C-C, Chen Y-L (1994) A computer package for optimal multi-objective var planning in large scale power systems. *IEEE Trans Power Syst* 9(2):668–676
19. Mantovani JRS, Garcia AV (1996) A heuristic method for reactive power planning. *IEEE Trans Power Syst* 11(1):68–74
20. Thomas WR, Dixon AM, Cheng DTY, Dunnett RM, Schaff G, Thorp JD (1995) Optimal reactive planning with security constraints. In: 1995 I.E. conference proceedings on power industry computer application conference, Salt Lake City, UT, USA, pp 79–84, May 1995
21. Venkataramana A, Carr J, Ramshaw RS (1987) Optimal reactive power allocation. *IEEE Trans Power Syst* 2(1):138–144
22. Kazempour SJ, Conejo AJ (2012) Strategic generation investment under uncertainty via benders decomposition. *IEEE Trans Power Syst* 27(1):424–432
23. Kirkpatrick S, Gelatt C, Vecchi M (1983) Optimization by simulated annealing. *Science* 220(4598):498–516
24. Drexl J (2006) Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies. Springer, Berlin
25. Hsiao Y-T, Liu C-C, Chiang H-D, Chen Y-L (1993) A new approach for optimal var sources planning in large scale electric power systems. *IEEE Trans Power Syst* 8(3):988–996
26. Glover F (1986) Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comp Operat Res* 13(5):533–549
27. Zhang W, Liu Y, Liu Y (2002) Optimal var planning in area power system. In: International conference on power system technology. Proceedings. PowerCon 2002, Kunming, China, vol 4, pp 2072–2075
28. Lee KY, Yang FF (1998) Optimal reactive power planning using evolutionary algorithms: a comparative study for evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm, and linear programming. *IEEE Trans Power Syst* 13(1):101–108
29. Ajjarapu V, Albanna Z (1991) Application of genetic based algorithms to optimal capacitor placement. In: Proceedings of the first international forum on applications of neural networks to power systems, Seattle, WA, USA, pp 251–255, July 1991
30. Dong Z-Y, Hill DJ (2000) Power system reactive scheduling within electricity markets. In: 2000 international conference on advances in power system control, operation and management. APSCOM-00, Hong Kong, China, vol 1, pp 70–75, Oct–1 Nov 2000
31. Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley, Reading

第 5 章 风电并网电力系统的电压稳定性

毫无疑问，21 世纪是一个致力于开发可再生能源的世纪。国际能源机构（International Energy Agency, IEA）预测^[1]，到 2020 年可再生能源所提供的电量将约占欧盟总电量的 35%，其中风能约占可再生能源发电总量的 35%，是所有可再生能源中贡献最大的一种能源。

能源利用的这种变化是基于全球可持续发展的大环境而形成的，如减少温室气体排放的绿色工程^[2]。然而，如何合理、高效地将可再生能源发出的电能并入电网仍然是现在电力系统运营商（PSO）和规划者所面临的主要问题。

电网在重负荷时可能会变得不稳定甚至会导致电压崩溃。间歇性发电对电网的冲击导致电网电压的稳定性问题已经在全世界范围内普遍存在。大多数对电压稳定性的分析或对电压崩溃的研究都是把注意力集中在电力系统中的已确定参数上。很少有人研究关于风力发电系统中电网电压的稳定性分析。

本章有两个目标，首先，分析了重负荷时电网电压的稳定性问题；其次，揭示了风能可通过电力变换器耦合到电网，给电网提供一个快速的动态无功功率，实现电网的优化配置，缓解电网电压的不稳定性甚至可以防止电压崩溃。

5.1 电压稳定的定义和概念

根据 IEEE/CIGRE 中关于电力系统稳定的定义^[3]，电压稳定是指电力系统在给定的初始运行条件下受到一个扰动能够继续维持系统所有母线上电压稳定的能力。

导致电压不稳定的主要因素是电力系统在重负荷条件下无法继续满足无功功率负荷的要求并维持电压在所需等级。通常，电压稳定取决于负荷，因此通常它也被称为负荷稳定^[4]。

根据 IEEE 的定义，“电压崩溃是一个电力系统的重要组成部分由一系列不稳定电压事件导致的异常低电压的过程”^[4]。在某些情况下，负荷的轻微变化、负荷受到电压或发电机无功功率的限制以及其他因素也会在一个系统的初始运行阶段产生较低的电压值，其结果将可能导致电网部分或全部电压崩溃。

电压稳定性分析有两种不同的方法：动态法和静态法^[5]。动态分析执行时域模拟，将电力系统的动态模型（载荷、发电机、控制行为、补偿器动态模型）认为是非线性微分代数方程。这种方法提供了精确的时域结果，它似乎是分析特定电

压崩溃问题的最好方法。然而，它的缺点是计算昂贵和费时，因此这种方法通常不适用于去确定电压稳定极限。

静态分析是基于求解代数方程组，如传统的潮流方程，它的优点是计算高效，因此，这种方法通常用来确定电压不稳定的薄弱区域。必须指出，应用静态分析工具来研究电压稳定的动态现象时，由于考虑到系统受小扰动的影响，结果应被限制在特定的条件下取得。在这种情况下，该方法能够提供有关稳定裕度的信息（电压崩溃下如何关闭运行点）或确定出现电压不稳定的点。

5.2 双母线电力系统的电压稳定

如图 5.1 所示，考虑风电场通过无损耗传输线连接在一个无限大容量母线上。这个风电场在母线 2 上分别注入有功功率 (P_{WT}) 和无功功率 (Q_{WT})。连接到母线 2 的单一负荷需要有功功率 (P_D) 和无功功率 (Q_D)。

为了简便起见，负荷被看做是一个阻抗，而且负荷的消耗功率不依赖于频率或母线 2 上的电压变化。

无限大容量母线（母线 1）被表示为一个电压和频率不变的理想电压源 \dot{E} 。假设三相稳态正弦条件下此电压源相量是 $\dot{E} = E \angle 0$ 。

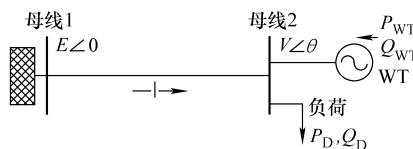


图 5.1 单一双母线风电系统

当负荷试图吸收超出电力传输线和发电系统传送能力的电能时就会导致电压不稳定^[6]。负荷越增加，负荷母线电压降低越多，直到其达到对应于最大功率传输的临界值。这个最大功率传输与电压不稳定相关。当电压在这一电压范围之外，电压会不稳定而且很容易发生电压崩溃。

从图 5.1 可知：

$$\dot{U} = \dot{E} - jX\dot{I} \quad (5.1)$$

母线 2 吸收的复功率：

$$\dot{S} = P + jQ = U\dot{I}^* = U \frac{\dot{E}^* - U^*}{-j} = \frac{j}{X}(EU\cos\theta + jEUsin\theta - U^2) \quad (5.2)$$

其中

$$P = P_D - P_{WT}$$

$$Q = Q_D - Q_{WT}$$

其可以分解为：

$$P = -\frac{EU}{X} \sin \theta \quad (5.3)$$

$$Q = -\frac{U^2}{X} + \frac{EU}{X} \cos \theta \quad (5.4)$$

消除给定的 θ ：

$$(U^2)^2 + (2QX - E^2)U^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (5.5)$$

这是一个关于 U^2 的二阶方程。至少有一个解的条件是：

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (5.6)$$

两个解是：

$$U = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XE^2Q}} \quad (5.7)$$

如果风电场不工作，风电场输入的有功和无功功率 $P_{WT} = Q_{WT} = 0$ ，在这种情况下母线 2 上的有功和无功功率只对应负荷消耗功率， $P = P_D$ 和 $Q = Q_D$ 。

负荷消耗的无功功率取决于有功功率和负荷功率因数 $Q = P \tan \varphi$ 。通过这个表达式，可以得到不同 $\tan \varphi$ 下负荷电压作为有功功率 (P_V) 函数的曲线（见图 5.2）。这些曲线被称为 $P-V$ 曲线，而且，当负荷增大时，允许它们在一个特定的区域里计算电压和负荷之间的关系。

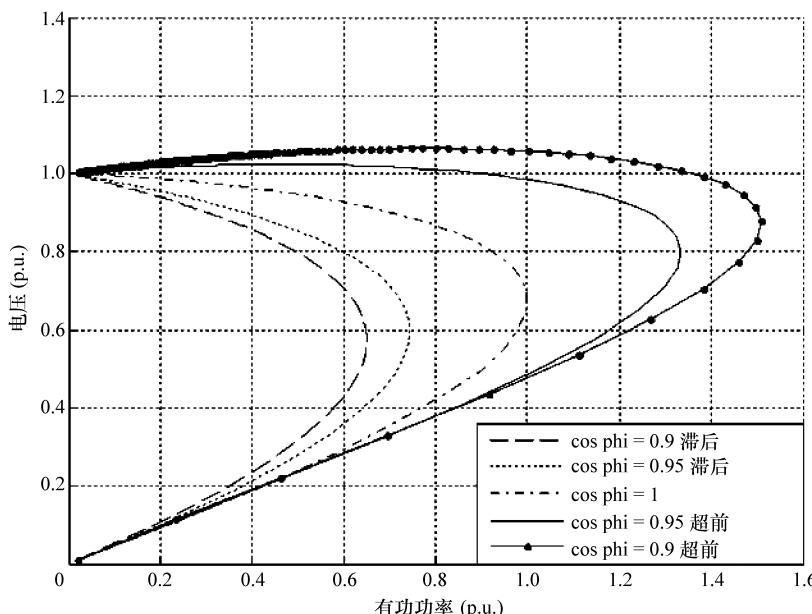
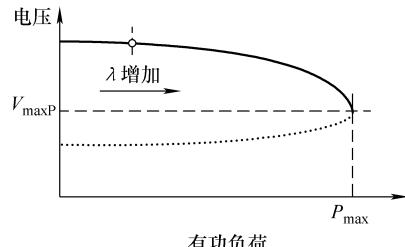


图 5.2 $P-V$ 曲线

由 $P-V$ 曲线图可得到数据和 $U_{\max P}$ (见图 5.3)。 P_{\max} 是最大传输功率, $U_{\max P}$ 是此时的最大电压。

P_{\max} 通常被称为电压崩溃点 (PoC), 该点对应着电压的迅速下降和负荷的增加。电压不稳定的风险度可以通过计算初始工作点 (基本情况) 到电压崩溃点的距离来定义, 这个距离称为电压稳定裕度 (VSM)。

图 5.3 $P-V$ 曲线

5.3 风电场电压稳定的增强

当连接到母线 2 的风电场有处理无功功率 Q_{WT} 设备时, 其最大可传送的功率 P_{\max} 将增大, 且电压稳定裕度也会上升。此时, 负荷潮流方程为

$$P = -\frac{EU}{X} \sin \theta \quad (5.8)$$

$$Q - Q_{\text{WT}} = -\frac{U^2}{X} + \frac{EU}{X} \cos \theta \quad (5.9)$$

如果假设负荷是恒功率的, 对于电压 U 的每一个值, 首先获得 θ , 然后计算无功功率 Q_{WT} 。 $V-Q$ 曲线表示了给定母线的电压和无功补偿量的关系。

图 5.4 给出了不同负荷下的 3 条 $V-Q$ 曲线 ($P = 0.5 \text{ p.u.}$; $P = 3.0 \text{ p.u.}$; $P = 5.3 \text{ p.u.}$)。图中两个与 V 轴的交点相当于没有无功补偿 ($Q_{\text{WT}} = 0$)。

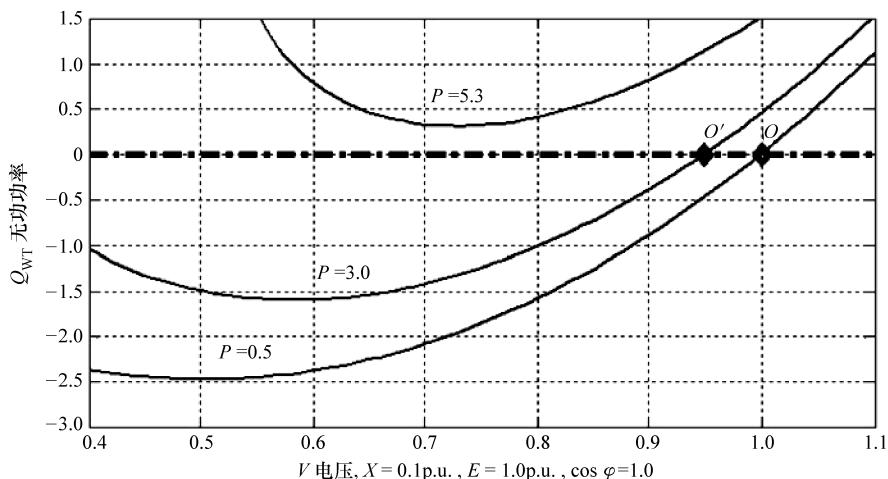


图 5.4 母线 2 上的电压和无功功率之间的关系

从图中可以观察到 $P = 3.0 \text{ p.u.}$ 对应的负荷比 $P = 0.5 \text{ p.u.}$ 时更大。在这种情况下，没有无功补偿的交点 O' 在公共耦合点（Point of Common Coupling, PCC）上的电压值约为 0.95 p.u. 。此时，为了恢复额定电压有必要注入一定量的无功功率 Q_{WT} （约 0.5 p.u. ）。

第三条曲线表示如果没有无功功率注入就不能长时间运行的负荷条件 ($P = 5.3 \text{ p.u.}$)。

无功补偿装置的主要功能是提供电压支撑，以避免电压不稳定或大规模的电压崩溃。

定速风力发电机组能以不同的方式实现无功功率的补偿：通过连接并联电容器、SVC（静止无功补偿器）和 STATCOM（静止同步补偿器），这些内容在第2章中均有介绍。变速风力发电机组则利用第2章介绍的无功功率注入方法在公共耦合点（PCC）提供电压控制。变速风电机组的控制中包含了 STATCOM 的功能，所以它可被认为是和 STATCOM 相似的可控无功功率源。

图5.5给出了STATCOM运行的风电场P-V曲线，曲线表明了当风电场在运行并且相当于STATCOM提供无功补偿能力时，母线2上电压与负荷消耗功率(P_D)的关系。

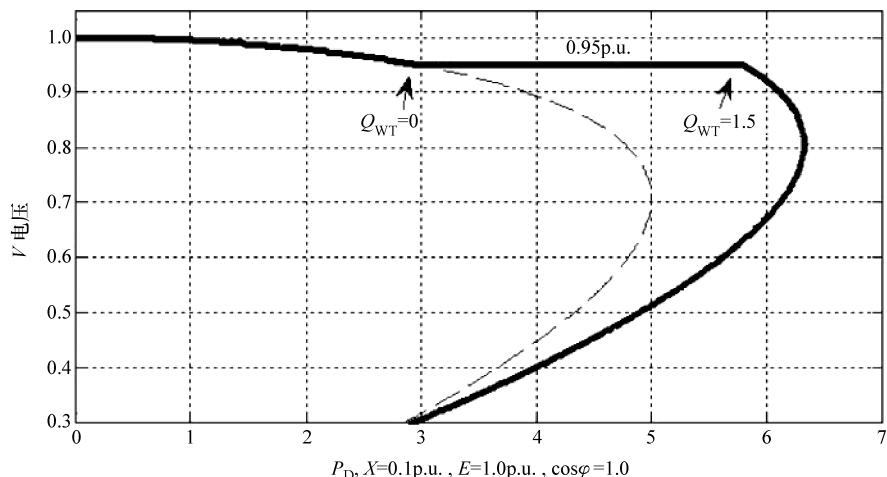


图 5.5 STATCOM 运行的风电场 P-V 曲线

初始情况对应于 $Q_{\text{WT}} = 0$ （没有无功功率注入）的点。在这种情况下，为了保证风电场的电压值为 0.95 p.u. ，连接的最大负荷应该是 $P_D = 3.0 \text{ p.u.}$ 。从图中可以观察到电压稳定裕度从初始情况到最大无功功率注入值 ($Q_{\text{WT}} = 1.5 \text{ p.u.}$) 时增加了，同时还保持了 0.95 p.u. 的电压恒定值。

需要指出的是，随着更高的无功功率注入，平衡运行点逐步接近 P - V 曲线的突出点。

5.4 最优稳定电压

前面已经定义了载荷能力极限是负荷达到最大值的点。如果负荷被认为是恒功率的，那么载荷能力极限对应于母线上能传输的最大功率。电压稳定的极限值很难通过传统的潮流计算方法获得，因为潮流计算不收敛于电压崩溃（PoC）点。获取 P - V 和 Q - V 曲线的经典方法是连续法^[7]，包括两个步骤（见图 5.6）。

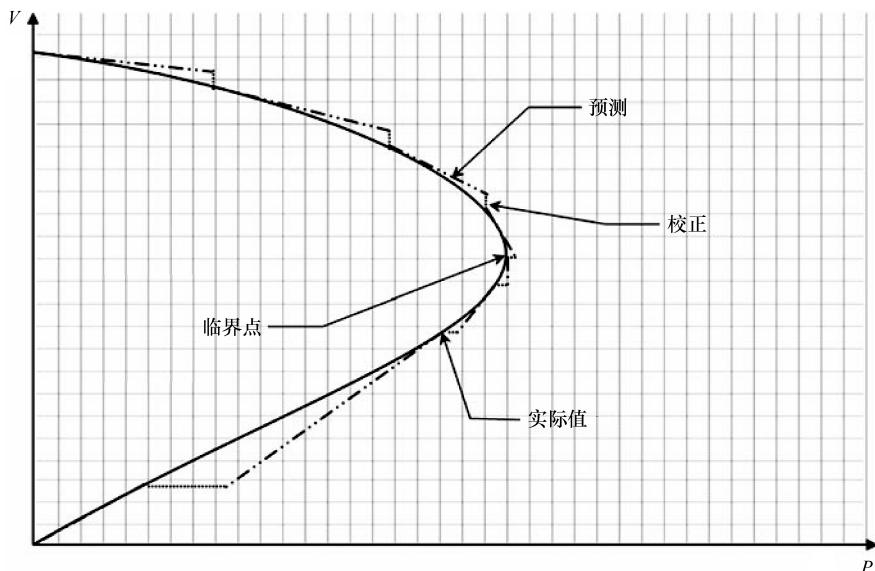


图 5.6 连续潮流法

1) 预测步骤：从最初的运行点，通过估计潮流传输的变化，找下一个负荷 P 的增加点。

2) 校正步骤：通过使用初始值对应的预测步骤获得的估计值，为下一个运行点求解潮流方程。

另一种计算最大载荷能力点的方法是第 4 章中介绍的 OPF 或启发式技术的优化方法^[8-10]。在这些情况下，该优化问题可以表述为达到电压崩溃时的电力系统最大安全距离。

使电力系统达到最大载荷条件的参数为

$$P_D = P_{D0}(1 + \lambda) \quad (5.10)$$

$$Q_D = Q_{D0}(1 + \lambda) \quad (5.11)$$

其中表示负荷变化率的乘数在所有节点上都是恒定的。所有母线上的负荷从初始负荷等级开始按比例增长，发电机的输出也如此。

目标函数为

$$\begin{aligned} & \text{maximize } f(x) = \lambda \\ & \begin{cases} f(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5.12)$$

约束条件分为

(1) 等式约束条件 每条母线上的等式约束条件都与潮流方程对应：

$$P_{Gi} - P_{Di} = P_{Lik} \quad (5.13)$$

$$P_{Gi} - Q_{Di} + Q_{FACTS,i} = Q_{Lik} \quad (5.14)$$

母线 i 与母线 k 之间的连接传输线的导纳为

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik} \quad (5.15)$$

母线 i 和母线 k 的母线电压是： $\dot{U}_i = U_i \angle \theta_i$ 和 $\dot{U}_k = U_k \angle \theta_k$ ，其中 $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$ 。

母线 i 和母线 k 之间传输的有功和无功功率为

$$P_{Lik} = U_i \sum_{i=1}^N U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (5.16)$$

$$Q_{Lik} = U_i \sum_{i=1}^N U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (5.17)$$

(2) 不等式约束条件

1) 电网技术约束条件：根据电网电压规定，母线上的电压等级不允许超出最大值和最小值的范围。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (5.18)$$

2) 发电机的物理限制：风电场的最大输入功率受到每台风力发电机最大功率的限制。风力发电机的有功功率将取决于每台机组的风能利用率。

有功功率输出有上下限的限制： $P_{gi,\min}$ ， $P_{gi,\max}$ 分别是最小和最大运行功率。

$$P_{gi,\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (5.19)$$

$$Q_{gi,\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (5.20)$$

3) FACTS 设备的物理限制：来自 FACTS 设备的无功功率受上下限制约。

$$Q_{FACTSi,\min} \leq Q_{FACTSi} \leq Q_{FACTSi,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{FACTS} \quad (5.21)$$

4) 风电场连接点 (LocWF) 约束条件：从风电场到电网的潜在连接点受限于可用风资源较高的地理区域。

$$Bus_{LocWFi,\min} \leq Bus_{LocWFi} \leq Bus_{LocWFi,\max} \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (5.22)$$

5.5 案例研究

5.5.1 IEEE-14 母线电力系统

OPF 公式被应用于改进的 IEEE-14 母线电力系统^[11]，母线 8 上的原始同步发电机被移除且安装了额定功率 $P_{WT} = 30 \text{ MW}$ 的风电场（见图 5.7）。

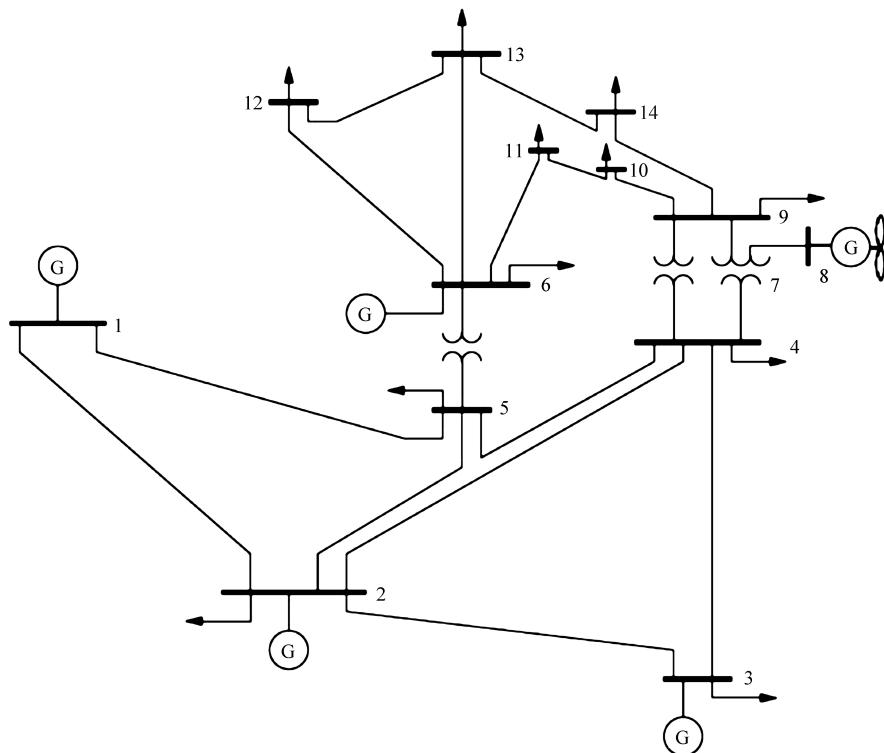


图 5.7 改进的 IEEE-14 母线测试系统

考虑到两种不同的方案：

方案 1：母线 8 上的风电场用于调整并维持恒定的功率因数 $\cos\theta = 1$ ($Q_{WT} = 0$)。

方案 2：母线 8 上的风电场提供类似于一个 SVC 设备的无功功率。它也可以被视为一个可控无功功率源。

图 5.8 给出了考虑初始条件的 IEEE-14 母线上的电压分布图，与之相关的母线 8 上连接的风电场为单位功率因数 ($Q_{WT} = 0$)。可以观察到，所有母线上的电压在额定电压的 $\pm 10\%$ 范围内。母线 3 的电压较低。

最优潮流公式被应用于这两个情况，结果见表 5.1 和 5.2。

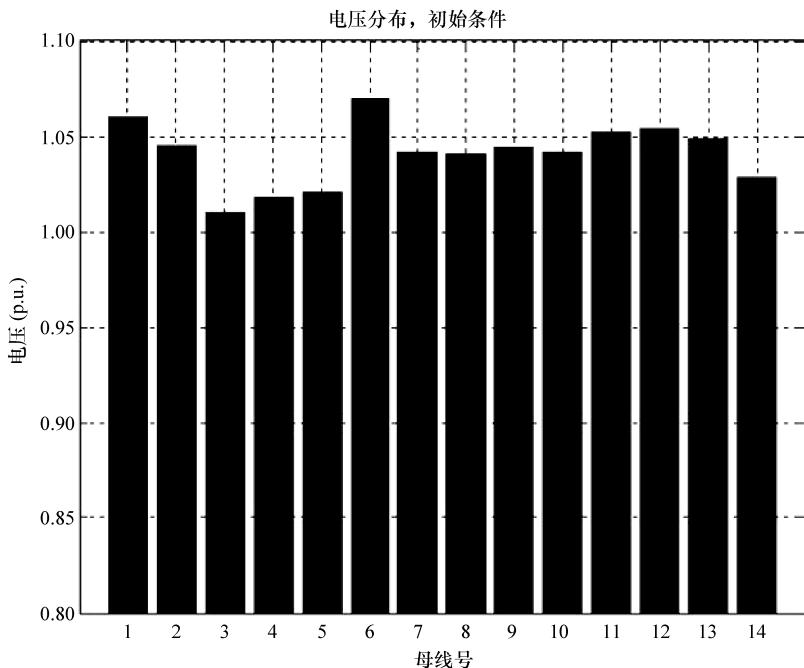


图 5.8 母线上初始电压的分布

表 5.1 方案 1 的最优载荷能力

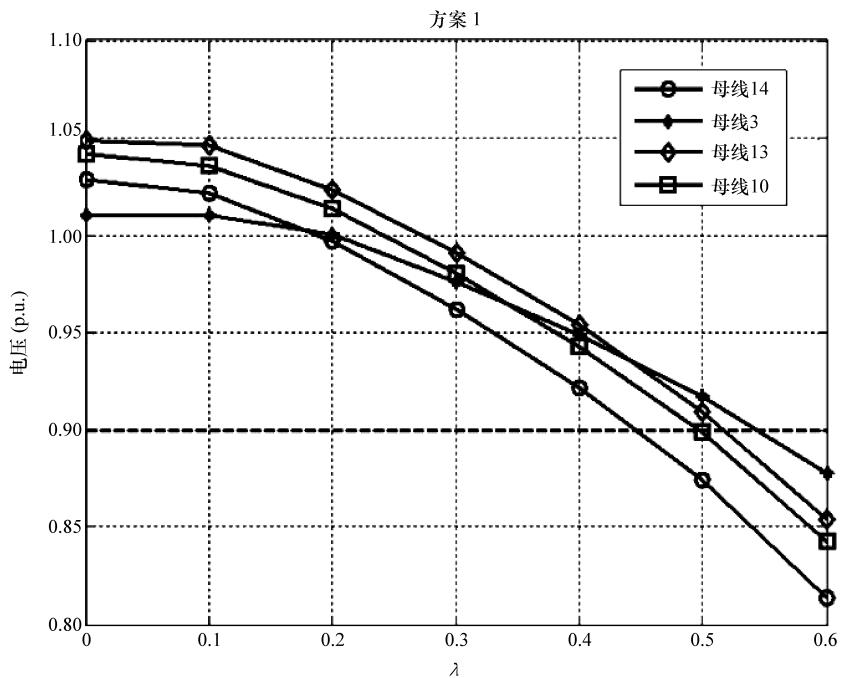
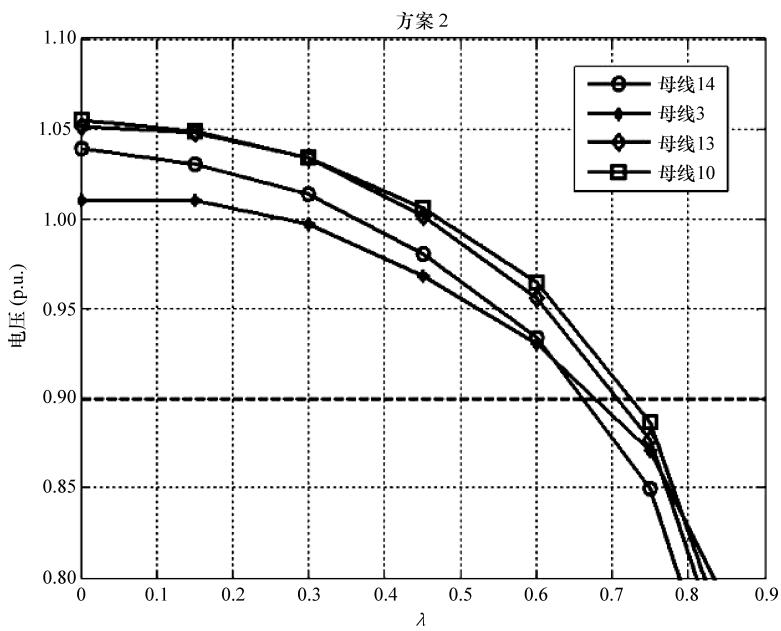
方案 1	$\lambda \lambda_{\text{OPFmax}} = \lambda_{\text{critical}}$	最大载荷能力/MW	临界母线
初始条件	0	259	—
OPF 解	0.45	374	14

表 5.2 情况 2 的最优载荷能力

方案 2	$\lambda \lambda_{\text{OPFmax}} = \lambda_{\text{critical}}$	最大载荷能力/MW	临界母线
初始条件	0	259	—
OPF 解	0.66	430	14

图 5.9 给出了方案 1 下电压变化与负荷参数 λ 的关系，临界母线是 3[#]、10[#]、13[#] 和 14[#]。可以看出，如果保持所有母线额定电压在 $\pm 10\%$ 内，则系统的最大载荷能力对应于 $\lambda = \lambda = \lambda_{\text{OPFmax}} = 0.45$ 。这个结果意味着其最大载荷能力为 374MW。此外，要注意的是母线 14[#] 是在 OPF 中达到限值的一条临界母线。

方案 2（见图 5.10）中的最大载荷能力比情况 1 大。也可以看到，负荷参数 $\lambda = \lambda = \lambda_{\text{OPFmax}} = 0.66$ 意味着达到最大载荷能力 430MW。第二个方案包含了风电场的无功补偿能力。从中可以看到风电场的无功功率补偿可以显著改善系统电压稳定

图 5.9 电压与 λ 的函数关系 (方案 1)图 5.10 电压与 λ 的函数关系 (方案 2)

性。这个数据表示电力系统具有了更高的处理干扰的能力，即提高了电压稳定性。

总而言之，风电场具有调整无功功率的能力，其集成到电力系统里时可以通过最优算法确定最大功率，同时还可以保持系统稳态电压，正常或紧急情况下还可以使系统保持工作在一个固定的预定电压范围内。

负荷模型的影响

众所周知，负荷模型对电压稳定性研究有重要影响^[12,13]。第一个要考虑的重要方面是选择一个静态或动态模型。静态负荷模型被应用在负荷功率需求没有明显变化的情况下，因此它能够描述电压和频率任何时间段的同时刻的有功功率和无功功率之间的关系。

相反，动态负荷模型必须考虑到任意时刻下作为电压和频率随时间变化的函数的有功功率和无功功率的关系。

常见的静态负荷模型将有功和无功功率需求表示成与电压成指数关系的表达式：

$$P_d = P_{d0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{a_1} \quad (5.23)$$

$$Q_d = Q_{d0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{a_2} \quad (5.24)$$

式中，参数 a_1 、 a_2 可以有不同的值（见表 5.3）， U_0 是额定电压， Q_{d0} 和 P_{d0} 分别是在额定电压下负荷消耗的有功和无功功率。

表 5.3 静态指数负荷模型参数

模 型	$a_1 = a_2$
恒功率模型	0
恒流模型	1
恒阻抗模型	2

一个更典型的静态负荷模型可以表示为多项式，如：

$$P_d = P_{d0} \left[b_1 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_2 \left(\frac{U}{U_0} \right)^1 + b_3 \right] \quad (5.25)$$

$$Q_d = Q_{d0} \left[c_1 \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + c_2 \left(\frac{U}{U_0} \right)^1 + c_3 \right] \quad (5.26)$$

$$b_1 + b_2 + b_3 = c_1 + c_2 + c_3 = 1$$

这个模型被称为 ZIP 模型，包括如表 5.4 所示的指数关系模型。

表 5.4 ZIP 系数

模 型	$b_1 = c_1$	$b_2 = c_2$	$b_3 = c_3$
恒功率模型	0	0	1
恒流模型	0	1	0
恒阻抗模型	1	0	0

为了证明所选负荷模型对电压稳定分析的影响，不同的负荷模型应该在有风电场连接的 14 母线的电网中被考虑。

可以注意到（见表 5.5），恒功率模型能允许更大的载荷能力。相反，如果使用一个恒阻抗模型，较小的负荷增加就会使系统达到允许的临界载荷能力。这个结果对选择一个合适的负荷模型来进行电压稳定分析至关重要。

表 5.5 不同静态负荷模型的载荷能力

	允许载荷能力/MW	临界载荷能力 λ_{\lim} (p. u.)
恒功率模型	31.75	1.13
恒流模型	28	0.88
恒阻抗模型	25.8	0.73
ZIP 模型 ($b_1 = c_1 = 0.6$; $b_2 = c_2 = 0.1$; $b_3 = c_3 = 0.3$)	27	0.80

5.5.2 应用案例

在本案例中，前述方法被应用于一个 34 母线构成的配电网（见图 5.11，细节见附录）。优化方法的目的是在整个配电网中优化配置数个能提供无功功率的风电场。

染色体的长度取决于风电场的数量 n ，它将具有 $(1 + 2n)$ 个基因。

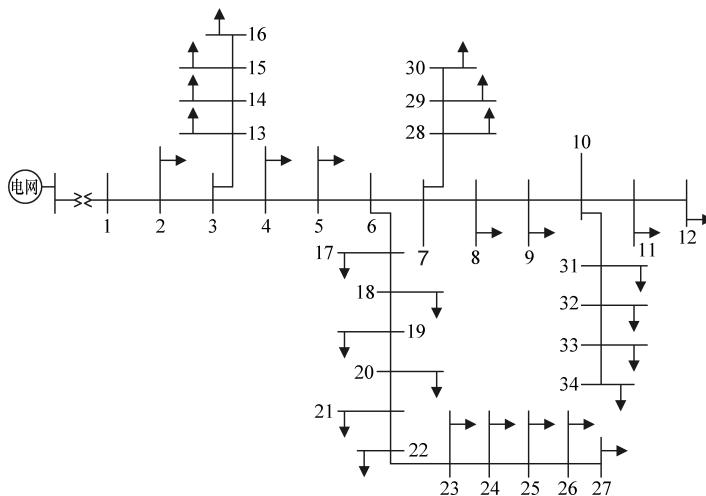


图 5.11 34 母线的配电网

5.5.2.1 电压稳定最大化

为了使电力系统载荷能力最大化，目标函数用式 (5.12) 定义，而问题的约束条件由式 (5.13) ~ 式 (5.22) 来定义。

表5.6给出了GA的解。从表中数据可以看出，随着风电场并网数量的增加，电压稳定性也相应提高。在增加3个风电场的情况下，电压稳定度增加到74%。此外，还可以观察到，风电场连接的最优母线位置非常接近于配电网，尽管最优化事实上取决于有多少个连接到系统上的风电场单元数量。

图5.12给出了不同仿真下的电压分布。应该强调的是，整合几个风电场的无功功率能提高电力系统电压曲线的平滑性。

最后，图5.13给出了不同情况下电压稳定性P-V曲线。可以说，随着风能渗透水平的提高，系统的载荷能力得到了提高，距系统电压崩溃点的距离即电压稳定裕度也提高了。所以，电力系统中的风电场可以提高电压的稳定性。

表5.6 GA的解

案例	λ_{\lim} (p. u.)	Bus _{WF}	Q_{WF}/Mvar
基本情况	0	—	—
没有风电场	—	—	—
一个风电场	0.06	27	2.77
两个风电场	0.3	11 25	2.95 2.79
三个风电场	0.74	10 23 26	2.15 2.45 2.71

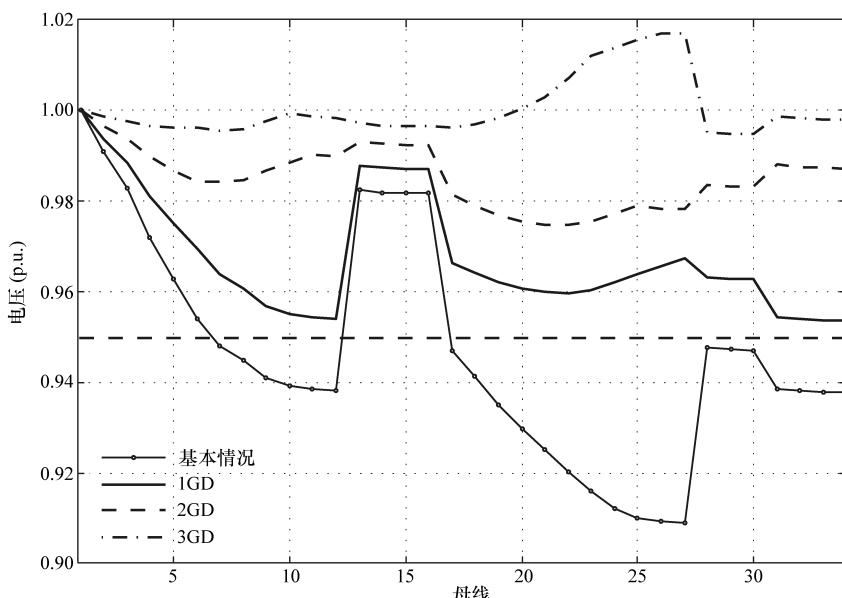


图5.12 34母线电网的电压曲线

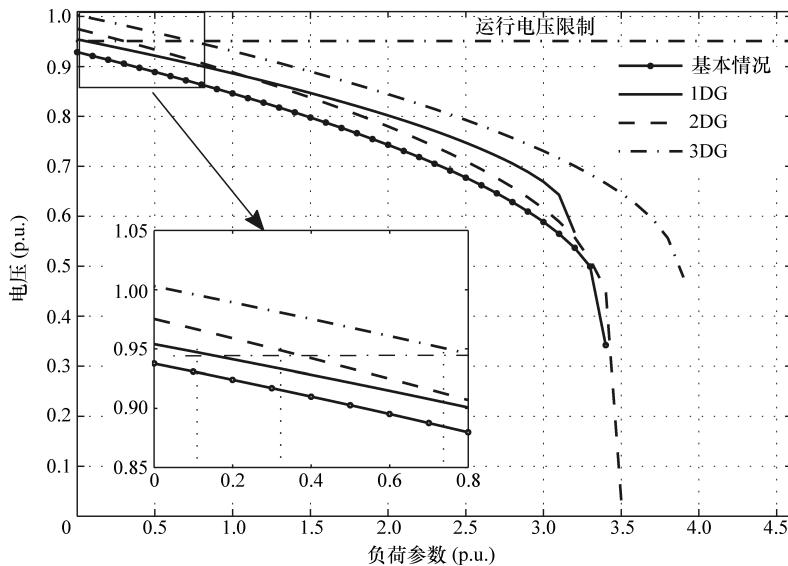


图 5.13 34 母线系统的 P-V 曲线

5.5.2.2 多目标方法：通过最大化风电场渗透等级提高电压稳定性

在这项研究中，应用于 34 母线电网的前述方法的主要目的是确定 4 个风电场的最优配置，同时为了最大化系统电压的载荷能力以及提高风电场渗透水平计算有功功率和无功功率的注入。在本案例中，结合了两个单一函数的多目标函数形式如下：

$$\min F(y) = \frac{1}{2}(1 - f(y)) + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{g(y)}\right) \quad (5.27)$$

式中 $f(y)$ —— 优化载荷参数；

$g(y)$ —— 表示渗透水平。

表 5.7 和表 5.8 给出了 GA 的结果，从中可以观察到电力系统最大载荷能力在最大渗透水平为 70.09% 时对应于过载 62.2%。当连接在母线 10# 的一个风电场的有功功率、无功功率输入为 1.49MW 和 1.8Mvar（见表 5.8）；连接在母线 25# 的第二个风电场的有功功率和无功功率输入为 1.5MW 和 1.72Mvar；连接在母线 21# 的第三个风电场的有功功率和无功功率输入为 1.44MW 和 1.94Mvar；连接在母线 22# 上的最后一个风电场的有功功率和无功功率输入为 1.42MW 和 2Mvar 时，就会达到这个条件。

表 5.7 最大载荷能力和渗透水平

λ (p. u.)	风电渗透率 (%)
0.62235	70.79

表 5.8 GA 的解

Loc ₁	P ₁ /MW	Q ₁ /Mvar	Loc ₂	P ₂ /MW	Q ₂ /Mvar	Loc ₃	P ₃ /MW	Q ₃ /Mvar	Loc ₄	P ₄ /MW	Q ₄ /Mvar
10	1.49	1.8	25	1.5	1.72	21	1.44	1.94	22	1.42	2

图 5.14 给出了初始状态（基本情况，无风电场）以及整合了 4 个风电场并在其优化配置下不增加负荷（点画线）情况和在最大载荷能力（实线，过载 62.2%）情况下的电网电压曲线。

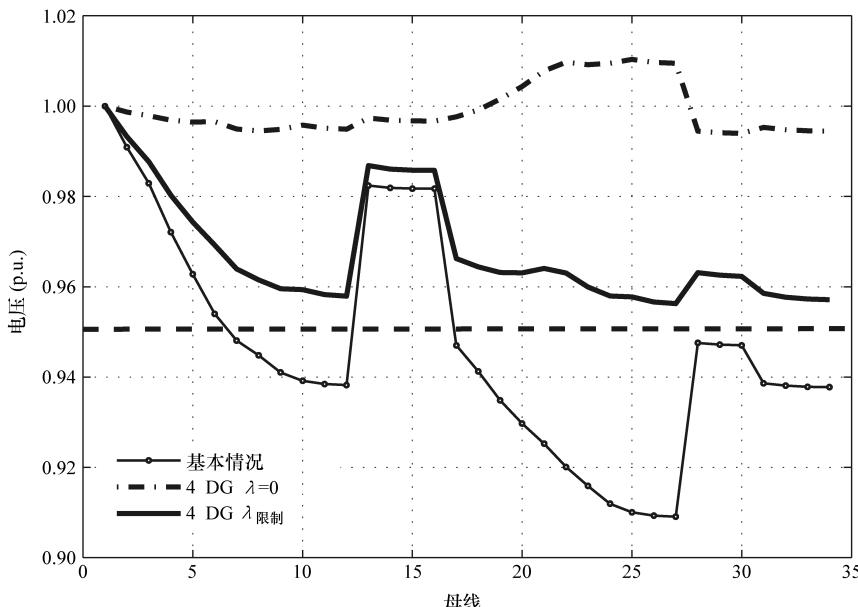


图 5.14 34 母线系统的电压曲线多目标研究

参 考 文 献

- Organization for Economic Cooperation & Development (2010) Energy technology perspectives: scenarios and strategies to 2050: 2010. Organization for economic cooperation & Development, Paris, France, July 2010
- International Energy Agency (2009) Ensuring green growth in a time of economic crisis – the role of energy technology. International Energy Agency, Siracusa, Italy
- Kundur P, Paserba J, Ajjarapu V, Andersson G, Bose A, Canizares C, Hatziargyriou N, Hill D, Stankovic A, Taylor C, Van Cutsem T, Vittal V (2004) Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. IEEE Trans Power Syst 19(3):1387–1401
- Ajjarapu V (2006) Computational techniques for voltage stability assessment and control. Springer, United States of America
- Kundur P (1994) Power system stability and control. McGraw-Hill Professional, New York
- Cutsem TV, Vournas C (1998) Voltage stability of electric power systems. Kluwer, Boston. ISBN 0792381394

7. Canizares CA, Alvarado FL (1993) Point of collapse and continuation methods for large ac/dc systems. *IEEE Trans Power Syst* 8(1):1–8
8. Qiao J, Min Y, Lu Z (2006) Optimal reactive power flow in wind generation integrated power system. In: Proceedings of the international conference power system technology PowerCon 2006, Chongqing, China, pp 1–5
9. Zhang W, Li F, Tolbert LM (2007) Review of reactive power planning: objectives, constraints, and algorithms. *IEEE Trans Power Syst* 22(4):2177–2186
10. Mariotto L, Pinheiro H, Cardoso G, Muraro MR (2007) Determination of the static voltage stability region of distribution systems with the presence of wind power generation. In: Proceedings of the international conference clean electrical power ICCEP '07, Capri, Italy, pp 556–562
11. Abu-Hashim R, Burch R, Chang G, Grady M, Gunther E, Halpin M, Harziadonin C, Liu Y, Marz M, Ortmeier T, Rajagopalan V, Ranade S, Ribeiro P, Sim T, Xu W (1999) Test systems for harmonics modeling and simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 14(2):579–587
12. Mansour Y (ed) (1990) Voltage stability of power systems: concepts, analytical tools, and industry experience. IEEE Press, New York
13. Carson WT (1994) Power system voltage stability. McGraw-Hill, New York

第6章 无功功率管理

在高风电渗透率下，无功功率管理已成为电网系统规划和运行的关键性问题。无功功率管理能够按照需求和计划执行各种操作，以改善电网的电压波形，增强系统稳定性^[1]。高效的无功功率规划可在规划阶段通过无功功率源的优化配置来得到，而高效的无功功率调度则需要通过优化设置发电机连接节点的电压设定点和无功功率设置来实现^[2,3]。

6.1 无功功率规划

无功功率规划（RPP）可以描述为下列优化过程，即最小化目标函数：

$$\begin{aligned} & \min_{x \in R^n} f(x, u) \\ & \text{满足：} \quad \begin{cases} g(x, u) = 0 \\ h(x, u) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6.1)$$

式中 u ——控制变量；

$x \in R^n$ ——系统的稳态变量；

$f(x, u)$ ——最小化的目标函数；

$g(x, u)$ ——等式约束条件；

$h(x, u)$ ——不等式约束条件。

6.1.1 目标函数

在本节中，为了提高电网的电压质量及稳定性，优化算法的目标是为电网配置一定数目的风电场和 SVC（静止无功补偿器）单元。为了避免系统出现任何可能的低效运行，算法会以一种协调的方式找出电网中风电场和 SVC 的最优配置和无功功率补偿方式。

在大多情况下，负荷是造成电压不稳定的主要原因，因此算法会根据公共电网的电压规定在考虑最小电压允许极限（通常取 $U_{\min} = \pm 10\% U_N$ ）的情况下最大化系统的载荷因数。

在负荷变化的情况下， P_D 、 Q_D 可被修改为

$$P_D = P_{D0}(1 + \lambda) \quad (6.2)$$

$$Q_D = Q_{D0}(1 + \lambda) \quad (6.3)$$

式中 P_{D0} 、 Q_{D0} ——初始负载（基本情况）；

λ ——载荷参数。

约束条件

1. 等式约束

基本的等式约束条件与每条母线的潮流方程相对应：

$$\Delta P_i = P_{gi} - P_{di} - P_i \quad (6.4)$$

$$\Delta Q_i = Q_{gi} - Q_{di} - Q_i \quad (6.5)$$

式中 P_{gi} 、 Q_{gi} ——第 i 条母线处发电机的有功功率和无功功率；

P_{di} 、 Q_{di} ——负荷的有功功率和无功功率；

P_i 、 Q_i ——第 i 个节点处的注入功率。

(1) 第 i 条和第 k 条母线之间传输的有功功率和无功功率 连接第 i 条母线和第 k 条母线的传输线，其导纳满足： $Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$ 。第 i 条和第 k 条母线的电压方程为： $\dot{U}_i = U_i \angle \theta_i$ 和 $\dot{U}_k = U_k \angle \theta_k$ 。

其中：

$$\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k \quad (6.6)$$

通过传输线在第 i 条母线和第 k 条母线之间传输的有功功率和无功功率分别为

$$P_{lik} = U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (6.7)$$

$$Q_{lik} = U_i \sum_{k=1}^N U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (6.8)$$

(2) 第 i 条母线上负荷消耗的功率 本章所用的负荷模型都采用静态指数模型，该模型考虑了恒定功率的模型 ($\alpha = \beta = 0$)，其消耗的有功功率和无功功率可表示为

$$P_{di} = P_{d0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^\alpha \quad (6.9)$$

$$Q_{di} = Q_{d0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^\beta \quad (6.10)$$

式中 U_0 、 P_{d0} 、 Q_{d0} ——第 i 条母线处的参考电压，有功功率和无功功率。

(3) 第 i 条母线上 SVC 单元注入的无功功率 SVC 单元注入的无功功率可表示为

$$Q_{svc}(\alpha_{svc}) = \frac{U^2}{X_C} - U^2 B_{svc}(\alpha_{svc}) \quad (6.11)$$

(4) 变速风电场的稳态工作点 每个工作点的风力发电电能产生详见第 3 章。优化算法包含了双馈异步风力发电机或者全功率发电机的稳态工作点。

2. 不等式约束

不等式约束规定了电力系统中元器件的物理限制或是运行约束条件。

(1) 母线的电压限制 根据电网的电压规定，母线的电压等级不允许超过规

定的最大值和最小值。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (6.12)$$

(2) 载荷因数限制 λ 是所有母线的负荷增加对应的负荷系数, $\lambda \geq 0$ 。

(3) 变速风力发电机的限制 风电场注入的最大功率受每台风力发电机最大容量的限制。

风力发电机注入的有功功率取决于其风能利用率。有功功率输出既有上限, 又有下限:

$$P_{gi,\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi,\max} \quad (6.13)$$

式中 $P_{gi,\min}$ 、 $P_{gi,\max}$ ——最小、最大运行功率。

如第3章所述, 容量限制与全功率变流器或双馈异步风力发电机组在各自工作状态下的无功功率容量有关。

(4) SVC 单元的限制 SVC 的无功功率受限于触发角的物理范围。一般认为, 触发角在最小值和最大值之间。

$$\alpha_{SVC_{i,\min}} \leq \alpha_{SVC_i} \leq \alpha_{SVC_{i,\max}} \quad (6.14)$$

(5) 风电场并网点的物理约束 从风电场到电网的连接仅限于风资源较好的区域。

$$Bus_{LocWF_{i,\min}} \leq Bus_{LocWF_i} \leq Bus_{LocWF_{i,\max}} \quad (6.15)$$

6.1.2 现有的 140 母线系统结果

6.1.2.1 测试系统描述和问题规划

在下一节, 所提出的无功功率规划方法被应用于一个实际电力系统。该系统是由从 380kV、132kV、45kV、15kV 到低压 380V 这 5 个等级电压的 140 个节点组成的。

图 6.1 是一个电压等级为 45kV 的环网结构。尽管大部分负荷连接到较低电压等级的母线, 但是仍有一些负荷连接在中压等级母线, 甚至有一些负荷连接在高电压等级的母线, 见表 6.1。

表 6.1 140 母线系统中的负荷分布

电压等级/kV	负荷功率/ [% $P_{\text{total Load}}$]
132	20
45	22
15	19
0.380	9

母线 2#可以选择为松弛节点, 因为本电网通过该母线经由 380kV 电网与电网其他部分相连。

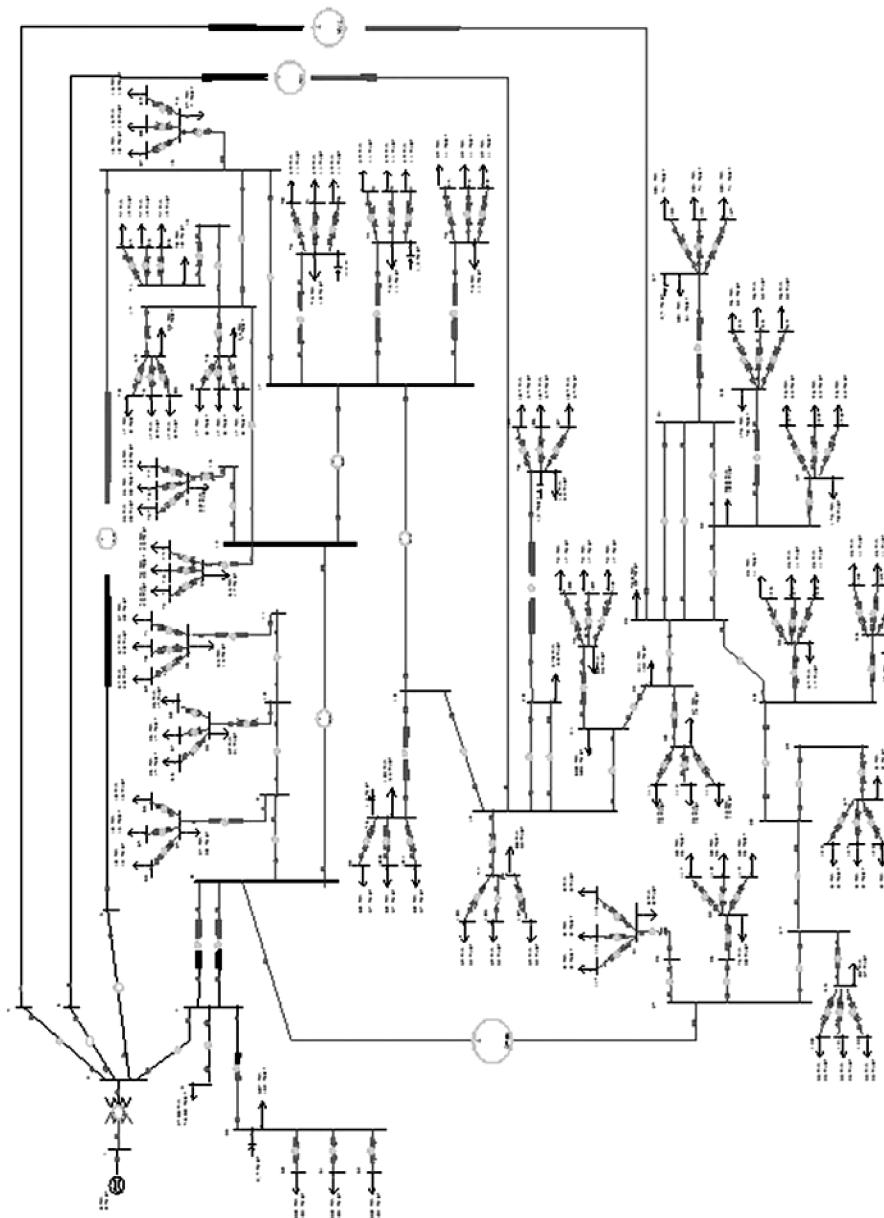


图 6.1 140 母线测试系统

根据相关法律规定，每个发电厂的输出电压偏差需在额定电压的 7% 之内。对于低压电网，国家标准规定电压允许的波动范围是 $\pm 10\% U_N$ 。图 6.2 为各节点的

初始电压标幺值波形。

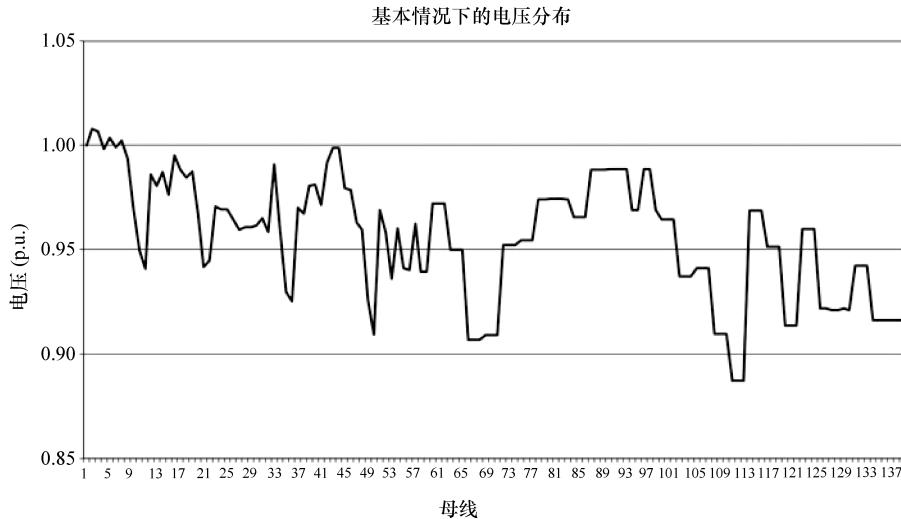


图 6.2 初始电压分布

优化目标是在 3 个风资源利用率较高的区域对 3 个风电场进行选址。

(1) 区域 1 计划在电网母线 8-9-10-11 之间的限制区域建立一个定速机组风电场。为了提高其无功容量，需给风电场增加一个 SVC。

(2) 区域 2 (VSWF2) 本区域的风能利用率较高，因此可以安装一台 5MW 的变速风力发电机（直驱式风力发电机或双馈式异步风力发电机）。风力发电机与电网的连接点局限于母线 23-24-25-26-27-28-29-30-31 或 32。

(3) 区域 3 (VSWF1) 本区域的风能利用率也很高，因此也可以安装一台 5MW 的变速风力发电机。风力发电机与电网的连接点只能是母线 12-13-14-15-16-17-18-19-21-22。

为了改善电压波形质量，需在电网中安装两台 SVC。之前章节和图 6.3 所描述的无功功率规划 (RPP) 优化方法可以用于获取 SVC 或风电场的配置和注入的无功功率（来自 3 个风电场和 2 个 SVC）。

随着各阶段问题复杂性的逐渐增加，GA 优化算法被认为是解决这一优化规划问题的有效方法。

(1) 阶段 1 旨在优化 SVC 的配置，从中找出优化的无功功率补偿，从而提高电网的电压稳定性。这一阶段中风电场与电网不相连。在参考文献 [5] 中就是使用这一 RPP 分析的经典方法，也是值得分析的首要问题。

(2) 阶段 2 除了阶段 1 中的目标，增加了优化风电场选址的问题，以提高电网的电压稳定性。在此阶段，VSWF 被建模为固定功率因数的 PQ 节点，这意味着

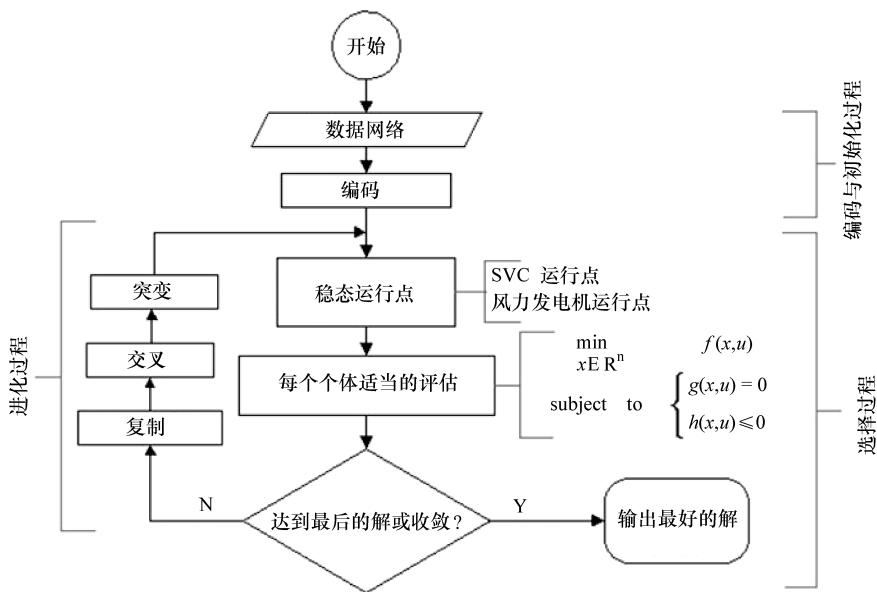


图 6.3 优化过程

VSWF 注入的无功功率是固定的，因此它在 RPP 算法中是常量。具体方法见参考文献 [6-8]。

(3) 阶段 3 除了阶段 2 中的目标，旨在优化 SVC 无功注入容量，以提高电网的电压稳定性。这一阶段发电机可以向电网注入无功功率，因此 VSWF 注入的无功容量也就包含在优化策略之中。具体方法见参考文献 [9-11]。

(4) 阶段 4 除了阶段 3 中的目标，增加了优化 SVC 和风电场联合注入无功功率的问题，以提高电网的电压稳定性。在这一阶段，双馈式异步风力发电机能够通过发电机侧和电网侧变流器向电网注入无功功率；对于直驱式变速风力发电机，电网侧变流器根据其物理限制注入所需的无功功率。双馈式异步风力发电机（发电机 + GSC）或全功率直驱式风力发电机可注入的无功容量也包含在最佳策略的范畴之内。关于此问题还没有相关文献研究。

6.1.2.2 仿真

表 6.2 给出了由遗传算法和前述 RPP 方法获得的最优结果。从中可以发现在 2、3、4 阶段中 SVC 的优化配置是相同的。只是在第一种情况（无风电场）有必要改变某个 SVC 的位置（从 14#母线到 2#母线）以便提高电网的电压质量和电压稳定性。然而，在第 1 阶段，只有两个 SVC 负责注入无功功率并提高全网的电压稳定性。

表 6.2 最优母线位置和无功功率注入容量

方案	三个风电场						两个 SVC			
	VSWE ₁		定速风电场		VSWF ₂		SVC ₁		SVC ₂	
	母线	Q/Mvar	母线	Q/Mvar	母线	Q/Mvar	母线	Q/Mvar	母线	Q/Mvar
1	—	—	—	—	—	—	2	8	21	10
2	13	0	11	1	31	0	14	8	21	9
3	13	1.45	11	0.53	31	1.45	14	7	21	9
4	13	3.06	11	0.66	31	3.06	14	4	21	9

VSWF₁ 的最优位置处于 13#母线，VSWF₂ 位于 31#母线。最优位置节点不受无功功率调节能力的影响。任何情况下定速机组风电场的最优位置都位于 11#母线。

此外，一旦 VSWF 的无功容量开始增加（在第 2、3、4 阶段），位于 14#、21#母线上的 SVC 只需要向电网注入更少的无功功率。这样 SVC 的容量和成本就降低了。

如在第 3、4 阶段提到的，优化算法试图使 VSWF 可用的无功功率注入容量最大化。由于这个原因，任何情况下风电场注入的无功功率都达到了最大值。

6.1.2.3 结果分析

图 6.4 给出了所有分析阶段 140 母线的电压分布曲线。值得注意的是，风力发电机组（第 3、4 阶段）无功功率容量的增加使其能在电网中更接近电压参考等级（1p. u.），并提高电压质量，减少电压偏差。

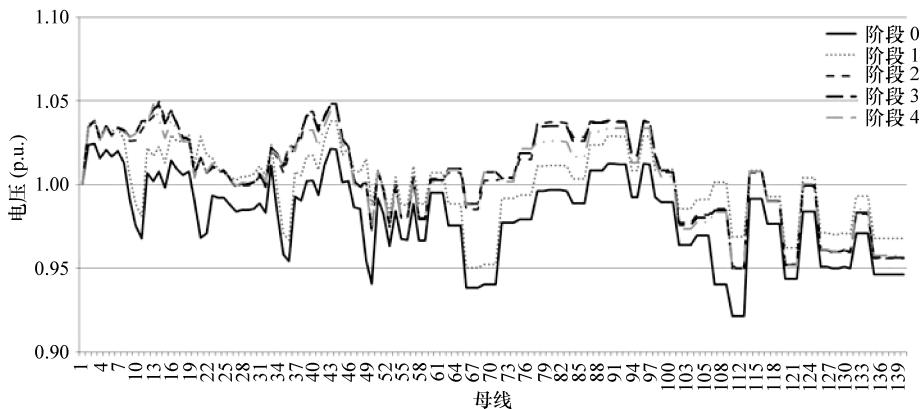


图 6.4 最优电压分布

表 6.3 为电压稳定结果：允许的最小电压 λ_{\min} 接近于 U_{\min} ； $\lambda_{\text{critical}}$ 为电压崩溃临界值。分析结果证明：变速风电机组无功容量的增加使负荷参数和电压稳定裕度都相应增加了。这种无功功率大幅度的增加效应使整个电网的电压稳定性也提

高了。

不难看出 VSWF (阶段 3) 无功功率容量的整合使电压稳定裕度从 1.2 p. u. 提高到了 1.4 p. u. , 进而使临界载荷 (相当于电压崩溃临界点) 增加到了 116.7%。与此同时, 如果网侧变流器的无功功率容量也考虑在优化过程中 (阶段 4), 在规划运行电压范围内, 系统的最大负荷提高到了 111.1%。

表 6.3 最优及临界载荷参数

阶段	$\lambda_{\text{limit}}/\text{p. u.}$	$\lambda_{\text{critical}}/\text{p. u.}$
阶段 1	0.04	1.2
阶段 2	0.17	1.2
阶段 3	0.18	1.4
阶段 4	0.20	1.4

6.2 多目标规划

若要规划一个无功功率问题, 目标函数的选择是最重要的。实际上, 许多不同的单目标函数已经在诸多文献中被提出了^[2,12,13]。在各个可选的方法中, 通常考虑的是如下这几类单目标函数:

- ① 电压载荷能力最大化^[14];
- ② 减少有功功率损耗^[15];
- ③ 无功功率投资成本最小化^[16]。

一般来说, 多目标优化问题都可用线性规划方法来解决, 此时一个目标被最优化而其他目标都在限制范围之内。不过这种方法有其不足之处:

- ① 对局限于线性规划的目标表述会导致不可行问题出现;
- ② 若优化用于大型系统内, 很难找出那些不可行问题的限制条件;
- ③ 如何选择适当的目标函数并没有明确的准则, 很多情况下某个单目标的实现会与其他的目标产生冲突。

多目标算法在解决这些问题上表现出色, 此时的最优解可以从一系列有效解中获得:

$$\min F(y) = \alpha f(y) + \beta g(y) + \gamma h(y) \quad (6.16)$$

式中 y ——决策变量;

$f(y)$ 、 $g(y)$ 、 $h(y)$ ——要满足的目标函数;

α ——电压稳定的最大化系数;

β ——有功功率损耗最小化系数;

γ ——无功功率投资成本的最小化系数。

从表 6.4 中可见，在不同的 α, β, γ 权重下解也不尽相同。

表 6.4 多目标结果权重值

	α	β	γ
G. 1	1	0	0
G. 2	0	1	0
G. 3	0	0	1
G. 4a	0	1/3	2/3
G. 4b	1/2	1/4	1/4
G. 4c	2/5	1/5	2/5
G. 4d	1/3	1/3	1/3
G. 4e	1/4	1/4	1/2

从表 6.5 中可以看出，如果单目标函数 G. 1 是要实现的唯一目标，GA 算法会得出将变速机组的风电场 VSWF₁（区域 1）设置在 10#母线上消耗无功功率；VSWF₂ 设置于 32#母线，其注入电网的无功功率是 3.08Mvar。定速机组风电场将设置于 21#母线，变电所的 SVC 功率为 8Mvar。两个额外的 SVC 连接在 24#母线和 32#母线上，总无功功率容量为 17Mvar。用单一目标函数 G. 2（减少有功损耗）或 G. 3（减少无功功率成本）也能得到类似的结论。GA 能找出各种情况下风电场、SVC 和注入无功功率的最优配置。

表 6.5 各目标下 GA 算法的结果

	VSWF ₁		VSWF ₂		定速风电场		SVC ₁		SVC ₂	
	P_{C1}	Q_1/Mvar	P_{C2}	Q_2/Mvar	P_{C3}	Q_3/Mvar	P_{C4}	Q_4/Mvar	P_{C5}	Q_5/Mvar
G. 1	10	-0.75	32	3.08	21	8	24	7	32	10
G. 2	9	0.249	32	1.642	21	7	19	7	57	5
G. 3	9	0	29	2	14	2	22	8	41	1
G. 4a	9	2	30	3	21	4	22	1	23	3
G. 4b	9	2	31	2	22	6	49	3	102	1
G. 4c	9	2	32	3	22	3	21	2	120	1
G. 4d	9	0	32	2	22	4	24	1	32	5
G. 4e	9	0	31	3	21	7	33	1	31	2

应该强调的是，不管策略函数怎样，风电场（VSWF₁）的配置位置非常相似或非常接近（VSWF₂，定速机组风电场）。主要区别出现在最优的 SVC 连接母线位置及其最优容量。

就多目标方法而言，SVC 的必需功率大幅下降了，从由单目标函数 G. 1 得到

的 $(7+10)$ Mvar 降低到多目标函数 G. 4c 得的 $(1+2)$ Mvar。

表 6.6 所示的不同方面取决于：每个目标函数、电压稳定裕度、有功损耗和连接的无功功率源（以 SVC 单元的功率来表示）的成本。

表 6.6 不同目标时的最大载荷能力、有功功率损耗和 SVC 的容量

	λ_{crit} (p. u.)	损耗/MW	$\sum Q_{\text{SVC}} / \text{Mvar}$
G. 1	1.25	3.39	25
G. 2	1.2	2.38	19
G. 3	1.1	2.87	11
G. 4a	1.1	2.53	8
G. 4b	1.1	2.63	10
G. 4c	1.2	2.5	6
G. 4d	1.1	2.61	10
G. 4e	1.2	2.52	10

图 6.5 给出了单目标和多目标优化 G. 4c 配置所对应的电压分布。

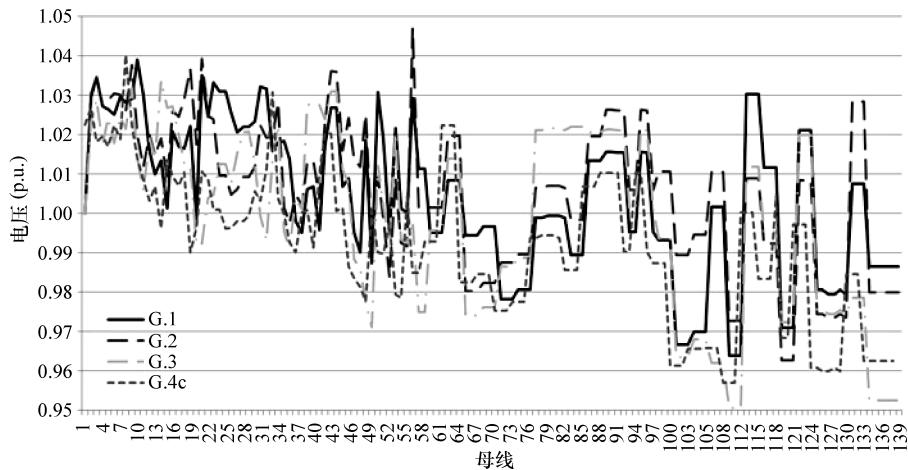


图 6.5 不同目标函数下 140 母线系统的电压分布

6.3 无功功率辅助设备

在优化过程中找到的最好的折中解决方式符合多目标优化方法，通过它可以同时获得良好的电压稳定裕度，最小的无功功率成本并减少有功功率损耗。在所有不同的多目标选项中，目标函数 G. 4c 被认为是最好的折中办法。

电网在设计时要考虑目标函数和之前 6.2 节所述的一些约束条件，同时把白天（高峰）到晚上（低谷）的负荷功率需求和最低（零电量）到最高（100% P_n ）的风力发电量都考虑在内也很关键。分析结果见表 6.7。

表 6.7 负荷功率需求（风力发电机组发电情况下）

方案	负荷功率需求	风力发电出力
S. 1	低（谷）	最大
S. 2		最小
S. 3	高（峰）	最大
S. 4		最小

各个条件下，多目标 G. 4c 方法都可借助以下条件找出各风电场和 SVC 单元（见表 6.8）最优的位置和无功功率注入容量：

- ① 电压稳定度最大化；
- ② 减少有功损耗；
- ③ 并联无功功率源的成本最小化；
- ④ 任何条件下保持电压曲线变化在 $\pm 5\% U_N$ 。

6.3.1 低谷期电力需求和最大风力发电量

如果输电系统运营商（TSO）要考虑下列几种方案来设计电网，如方案 1（低负荷功率需求和最大风力发电量），多目标方法 G. 4c 会将变速风电场（VSWF₁）配置于 9#母线上，VSWF₂ 置于 30#母线处，定速风电场（及其相关的 SVC）配置在 22#母线，两个额外的容量各为 1Mvar 的 SVC 则连接在 15#母线和 21#母线上。这种情况下，电网配置在方案 1 下是最优的，既做到了低负荷功率需求，又能兼顾高风电出力。

此时关键问题也因此产生：方案 1 中的最优配置是否能支持其他情况下的负荷功率方案？若要找到此问题的答案，需要将表 6.8 中各种情况，即不同负荷功率需求和风电出力进行逐一模拟仿真。

表 6.8 不同负荷需求-风电出力情况下，GA 算法得到的结果

	P_{C1}	Q_1/Mvar	P_{C2}	Q_2/Mvar	P_{C3}	Q_3/Mvar	P_{C4}	Q_4/Mvar	P_{C5}	Q_5/Mvar
S. 1	9	-0.82	30	3	22	1	15	1	21	1
S. 2	9	0	25	0	21	1	58	2	10	1
S. 3	9	2	32	3	22	4	58	1	30	1
S. 4	9	0	32	0	22	5	34	3	28	5

图 6.6 为电网的电压分布，此时电网已按照方案 1 的情况，即在不同的负荷需求和风电出力下，对风电场和 SVC 进行了最优配置。不难看出电网配置在方案 1

中是最优的，即最低的负荷功率和最高的风电出力。

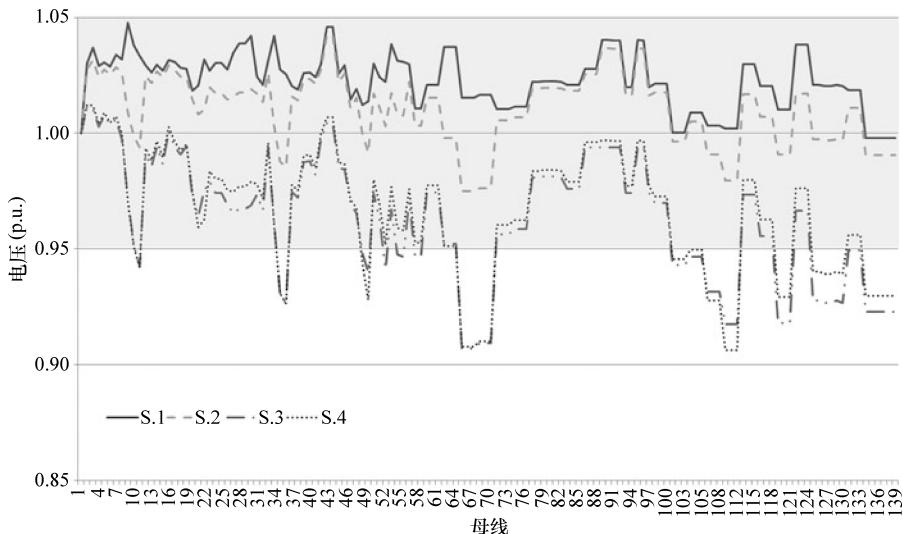


图 6.6 考虑方案 1（负荷需求和风电出力变化）最优配置下的电压分布曲线

但是，在风电出力最大（方案 3）且负荷需求最高峰时，电压曲线不能保持在 $\pm 5\% U_N$ 。在负荷功率需求较大而风电出力最小（方案 4）时结果同样如此。

6.3.2 低谷期电力需求和最小风力发电出力

如果只考虑第 2 种情况（低负荷功率需求和最小风电出力）设计出一个最优的电网配置，此时，多目标方法 G4.c 会在 9# 母线上配置一个变速风电场 ($VSWF_1$)， $VSWF_2$ 在 25# 母线处，定速风电场（及其相关的 SVC）配置在 21# 母线上，两个额外的 SVC 分别位于 10# 母线（容量为 1Mvar）和 58# 母线（容量为 2Mvar）上，详见表 6.8。

图 6.7 为不同的负荷功率需求和风电出力情况下电网的电压分布。不难看出，这种配置无论是在功率需求最大高峰期同时风电出力最大时（方案 3），还是在功率需求最大高峰期同时风电出力最小时（方案 4），都不能使电压等级保持在 $\pm 5\% U_N$ 。

6.3.3 高高峰期电力需求和最大风力发电出力

如果只考虑第 3 种情况（高峰期负荷功率需求和最大风电产出）设计出一个最优的电网配置，多目标方法 G4.c 会在 9# 母线上配置一个变速风电场 ($VSWF_1$)， $VSWF_2$ 在 32# 母线上，定速风电场（及其相关的 SVC）配置在 22# 母线上，两个额外的 SVC 分别位于 30# 母线（容量为 1Mvar）和 58# 母线（容量为 1Mvar）上，详见表 6.8。

图 6.8 为不同负荷功率需求和风电出力情况下电网的电压分布曲线。不难看出在功率需求高峰期和最小风电出力（方案 4）的情况下，这种配置不能使电压等级

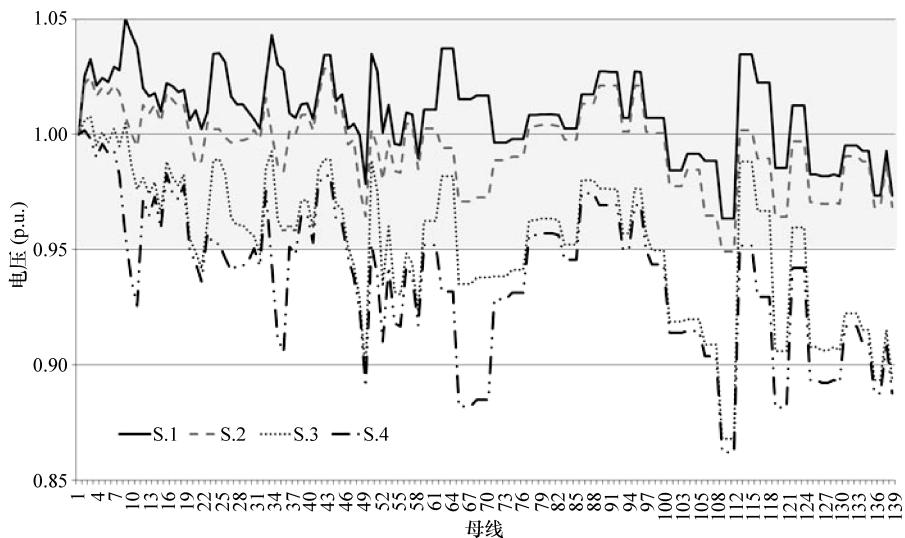


图 6.7 考虑方案 2 (负荷需求和风电出力变化) 最优配置下的电压分布曲线
保持在 $\pm 5\% U_N$ 。

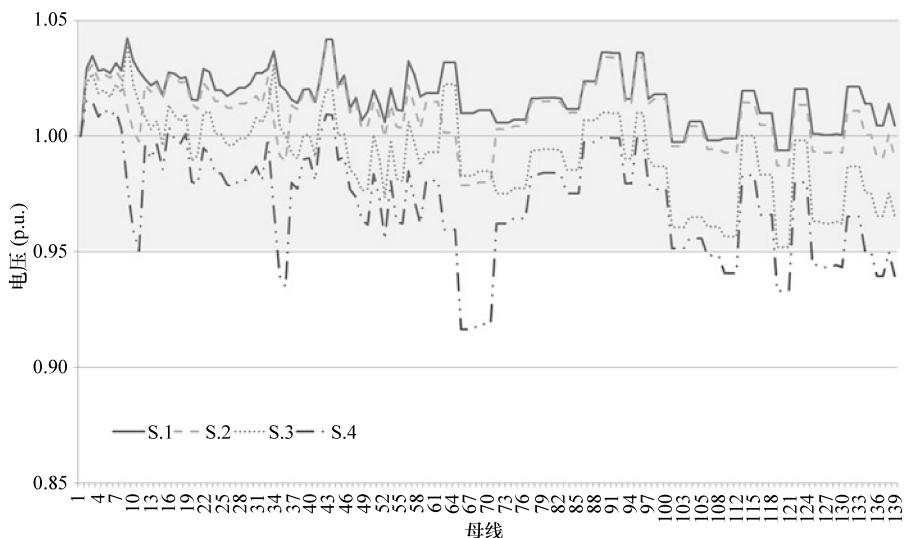


图 6.8 在情况 3 最优配置下的电压分布曲线

6.3.4 高高峰期电力需求和最小风力发电出力

如果只考虑第 4 种情况 (高峰期负荷功率需求和最小风电出力) 设计出一个最

优的电网配置，多目标方式 G4.c 会在 9#母线上配置一个变速风电场（VSWF₁），VSWF₂ 在 32#母线上，定速风电场（及其相关的 SVC）配置在 22#母线上，两个额外的 SVC 分别位于 34#母线（容量为 5Mvar）和 28#母线（容量为 5Mvar）上，详见表 6.8。

图 6.9 为不同负荷功率需求和风电出力情况下电网的电压分布曲线。这是所有方案中唯一一种能使电压保持在 $\pm 5\% U_N$ 的结构配置。根据标准电压准则，其他配置都不能保证电压分布满足要求。

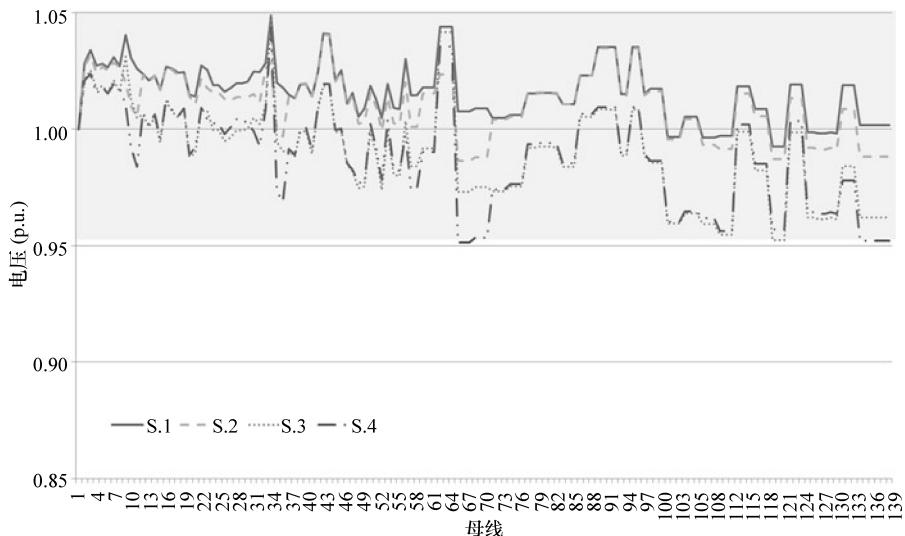


图 6.9 情况 4 最优配置下的电压分布曲线

6.4 无功功率调度

根据表 6.9 所示的负荷高峰和最小风力发电出力情况，初始点依赖于此时对应的电网配置结构。就所有的负荷情况而言（见 3.4 节），方案 4 中负荷-发电量值符合最优的电网结构。此时，配置两个功率因数为 $\pm 0.95\text{p.u.}$ 的 10MW 变速风电场连接到节点 9#、32#，同时，一个 10MW 的定速风电场和 5Mvar 的 SVC 连接到节点 22#。此外，系统有两个 3Mvar 和 5Mvar 的 SVC 分别与节点 34# 和 28# 相连。

表 6.9 情况 4 时负荷-发电量

	P_{C1}	P_{C2}	P_{C3}	Q_3/Mvar	P_{C4}	Q_4/Mvar	P_{C5}	Q_5/Mvar
S. 4	9	32	22	5	34	3	28	5

对于本书的案例研究，TSO 提供的系统调度对未来 24h 的电力负荷需求预报如

图 6.10 所示。

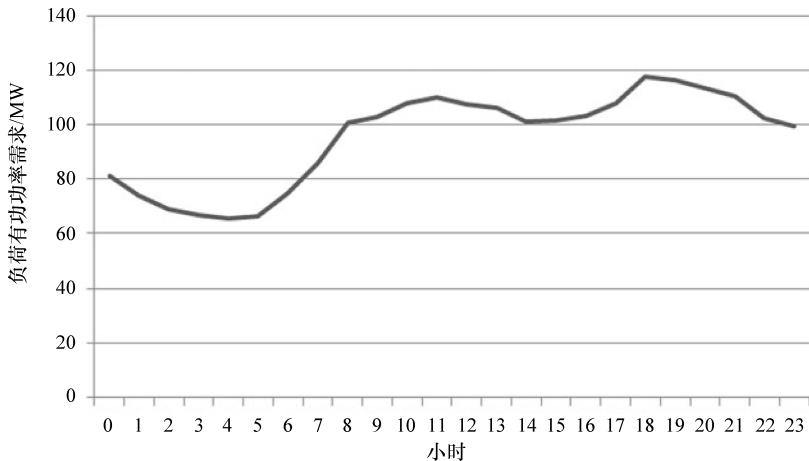


图 6.10 未来 24h 的负荷预测曲线

需要注意的是，GA 优化函数的目标既不能决定风电场和 SVC 的最优位置，又不能设置其最大容量。在此，优化方法将会用于计算未来 24h 中已有的风电场和 SVC 的无功功率设定点。表 6.10 为无功功率管理的结果。第 1 列表示以小时为单位的时间点，第 2 列表示负荷需求的百分比，第 3~7 列表示无功功率的注入容量，其中，来自变速风电场（第 3 和 4 列）、定速风电场的 SVC（第 5 列）和独立 SVC（第 6 和 7 列）。

表 6.10 日负荷曲线上无功功率的设置点

小时	负荷 (%)	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
0	69	-1.73	-1.43	3.18	1.04	3.95
1	63	-0.72	2.61	1.90	0.25	0.39
2	59	-2.62	1.88	2.36	0.93	2.48
3	57	-1.43	-0.17	2.73	0.63	1.26
4	56	-0.86	0.38	2.26	0.31	1.40
5	56	-0.86	0.38	2.26	0.31	1.40
6	64	-1.54	1.73	2.95	0.61	1.34
7	73	-0.85	2.23	3.64	0.77	1.60
8	86	1.50	3.00	4.05	0.01	2.30
9	87	1.20	1.97	3.74	0.36	2.04
10	92	0.83	2.80	4.37	0.48	2.28

(续)

小时	负荷 (%)	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
11	94	1.20	3.12	4.67	0.17	2.75
12	91	1.31	1.37	4.27	0.17	2.57
13	90	0.53	3.19	4.88	0.79	2.60
14	86	1.50	3.00	4.05	0.01	2.30
15	86	1.50	3.00	4.05	0.01	2.30
16	88	1.24	2.50	4.03	0.34	3.04
17	92	0.83	2.80	4.37	0.48	2.28
18	100	0.80	2.00	4.62	0.67	3.77
19	99	0.47	2.77	4.72	1.21	3.10
20	96	0.92	2.41	4.81	0.64	2.65
21	94	0.91	2.11	4.44	0.80	3.07
22	87	1.20	1.97	3.74	0.36	2.04
23	85	-1.29	1.82	4.42	1.37	1.83

表 6.10 所示内容简单概括如下：

- 1) 最低负荷需求时, 变速风电场吸收无功功率。连接在 9#母线上的 VSWF₁ 在 0~6 时要吸收无功功率, 而位于 32#母线上的 VSWF₂ 则在 0~3 时段吸收无功功率。
- 2) 风电场 SVC 装置 24h 所提供的无功功率最大值都低于其最大容量, 因此可以根据 24h 无功功率需求的变化动态地规划这些装置的无功功率注入量。
- 3) 与此同时, 可以推断出在表 6.9 中, 风电场和 SVC 的最优配置可以提供无功功率容量备用以便平衡变化的电压, 并应对异常情况时的负荷需求。
- 4) 从表中可以看出不同的无功功率源注入的无功功率峰值的时间亦不相同。例如, VSWF₁ 注入最大的无功功率值是在第 8、14 和 15 个小时 (对应于 1.5Mvar), 而 VSWF₂ 和定速风电场 SVC 则是在第 13 个小时 (分别是 3.19Mvar 和 4.88Mvar)。最后, SVC₁ 和 SVC₂ 单元注入最大无功功率量分别在第 23 点和 0 点时刻。
- 5) 最大的负荷功率需求出现在 18 点。这种情况下应当注意的是, 所有风电场和 SVC 单元都未能注入其最大的无功功率。因此, 即使在负荷最不理想的情况下, 优化策略都可以规划不同的无功源的无功功率注入容量。

参 考 文 献

1. Raoufi H, Kalantar M (2009) Reactive power rescheduling with generator ranking for voltage stability improvement. *Energ Convers Manage* 50(4):1129–1135
2. Hugang X, Haozhong C, Haiyu L (2008) Optimal reactive power flow incorporating staticvoltage stability based on multi-objective adaptive immune algorithm. *Energ Convers Manage* 49(5):1175–1181
3. Miller TJE (1982) Reactive power control in electric systems. John Wiley & Sons, New York
4. Zhang W, Li F, Tolbert LM (2007) Review of reactive power planning: objectives, constraints, and algorithms. *IEEE Trans Power Syst* 22:2177–2186
5. Gitizadeh M, Kalantar M (2009) A novel approach for optimum allocation of facts devices usingmulti-objective function. *Energ Convers Manage* 50(3):682–690
6. Lahacani NA, Aouzelag D, Mendil B (2010) Contribution to the improvement of voltageprofile in electrical network with wind generator using svc device. *Renew Energ* 35(1):243–248
7. Wilch M, Pappala VS, Singh SN, Erlich I (2007) Reactive power generation by dfig basedwind farms with ac grid connection. In: *Power Tech 2007* I.E. Lausanne, Switzerland, pp 626–632
8. Moghaddas-Tafreshi SM, Mashhour E (2009) Distributed generation modeling for powerflow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation. *Electric Power Syst Res* 79(4):680–686
9. Braun M (2008) Reactive power supply by distributed generators. In: *Proceedings of the IEEE power energy society general meeting*, Calgary, pp 1–8
10. Sangsarawut P, Oonsivilai A, Kulworawanichpong T (2010) Optimal reactive power planning of doubly fed induction generators using genetic algorithms. In: *Proceedings of the 5thIASME/WSEAS international conference on energy*, Cambridge, UK, pp 278–282
11. Zhao M, Chen Z, Blaabjerg F (2009) Load flow analysis for variable speed offshore wind farms. *IET Renew Power Gener* 3(2):120–132
12. Hedayati H, Nabaviniaki SA, Akbarimajd A (2008) A method for placement of DG units in distribution networks. *IEEE Trans Power Deliv* 23(3):1620–1628
13. Lee KY, Bai X, Park Y-M (1995) Optimization method for reactive powerplanning by using a modified simple genetic algorithm. *IEEE Trans Power Syst* 10(4):1843–1850
14. Ajjarapu V (2006) Computational tecnhiques for voltage stability assessment and control. Springer, United States of America
15. Dai C, Chen W, Zhu Y, Zhang X (2009) Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch. *Power Syst IEEE Trans* 24(3):1218–1231
16. Pudjianto D, Ahmed S, Strbac G (2002) Allocation of var support using lp and nlp based optimal power flows. *IEE Proc Gener Trans Distrib* 149(4):377–383

附录

本附录包含了第 6 章所用的 140 母线电力网的电气数据。

附录 A 母线负荷数据

母线	P_d (p. u.)	Q_d (p. u.)
1	0	0
2	0	0
3	24	-16
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	2.7	0.3
21	6.3	3.052
22	3.106	1.323
23	4.5	0.5
24	0	0

(续)

母线	P_d (p. u.)	Q_d (p. u.)
25	0	0
26	0	0
27	0	0
28	0	0
29	0	0
30	0	0
31	0	0
32	9	1
33	5.068	1.5237
34	0.2667	0.1997
35	0.3945	0.2147
36	0.5518	0.1472
37	0.627	0.1675
38	0.3793	0.1128
39	0.2521	0.0653
40	0.2521	0.0653
41	0.698	0.1776
42	0.2382	0.0658
43	0.428	0.1
44	0.428	0.108
45	0.428	0.108
46	1.0177	0.5493
47	0.8785	0.322
48	1.573	0.5169
49	0.626	0.2477
50	0.3723	0.191
51	0.0027	0
52	0.7479	0.1973
53	0.8183	0.373
54	0.0037	0.0023
55	0.3447	0.167
56	0.3447	0.167

(续)

母线	P_d (p. u.)	Q_d (p. u.)
57	3.0113	0.6113
58	1.4473	0.4757
59	1.4473	0.4757
60	3.3789	1.0158
61	3.3789	1.0158
62	3.3789	1.0158
63	0.1778	0.1332
64	0.1778	0.1332
65	0.1778	0.1332
66	0.2631	0.1351
67	0.2631	0.1351
68	0.2631	0.1351
69	0.3678	0.1981
70	0.3678	0.1981
71	0.3678	0.1981
72	0.4175	0.226
73	0.4175	0.226
74	0.4175	0.226
75	0.2528	0.1962
76	0.2528	0.1962
77	0.2528	0.1962
78	0.168	0.0812
80	0.168	0.0812
81	0.168	0.0812
82	0.168	0.0812
83	0.168	0.0812
84	0.4651	0.1941
85	0.4651	0.1941
86	0.4651	0.1941
87	0.1588	0.0981
88	0.1588	0.0981
89	0.1588	0.0981

(续)

母线	P_d (p. u.)	Q_d (p. u.)
90	0.2854	0.1124
91	0.2854	0.1124
92	0.2854	0.1124
93	0.2854	0.1124
94	0.2854	0.1124
95	0.2854	0.1124
96	0.2854	0.1124
97	0.2854	0.1124
98	0.2854	0.1124
99	0.6784	0.3662
100	0.6784	0.3662
101	0.6784	0.3662
102	0.5916	0.322
103	0.5916	0.322
104	0.5916	0.322
105	1.0407	0.3447
106	1.0407	0.3447
107	1.0407	0.3447
108	0.4178	0.1651
109	0.4178	0.1651
110	0.4178	0.1651
111	0.2483	0.1273
112	0.2483	0.1273
113	0.2483	0.1273
114	0.0018	0.0014
115	0.0018	0.0014
116	0.0018	0.0014
117	0.4985	0.2551
118	0.4985	0.2551
120	0.5456	0.2487
121	0.5456	0.2487
122	0.5456	0.2487

(续)

母线	P_d (p. u.)	Q_d (p. u.)
123	0.0024	0.0016
124	0.0024	0.0016
125	0.0024	0.0016
126	0.2298	0.1114
127	0.2298	0.1114
128	0.2298	0.1114
129	0.2298	0.1114
130	0.2298	0.1114
131	0.2298	0.1114
132	2.0076	0.4076
133	2.0076	0.4076
134	2.0076	0.4076
135	0.9649	0.3171
136	0.9649	0.3171
137	0.9649	0.3171
138	0.9649	0.3171
139	0.9649	0.3171
140	0.9649	0.3171

附录 B 线路数据

来自母线	到达母线	R (p. u.)	X (p. u.)	B (p. u.)
3	7	0.0359	0.08015	0.01548
7	2	0.0274	0.0927	0.0197
2	4	0.01165	0.0394	0.00837
2	5	0.0329	0.11129	0.0236
2	6	0.0219	0.0742	0.0157
8	9	0.3468	0.578	0.00166
9	10	0.37	0.5916	0.00186
10	11	0.287	0.458	0.00144
8	12	0.1487	0.3887	0.0013

(续)

来自母线	到达母线	R (p. u.)	X (p. u.)	B (p. u.)
12	13	0.2574	0.331	0.00099
12	14	0.3634	0.4668	0.00141
14	15	0.375	0.3619	0.001
14	16	0.122	0.2506	0.00077
16	17	0.122	0.2506	0.00077
17	12	0.1487	0.3887	0.0013
17	18	0.1416	0.3702	0.00123
18	19	0.122	0.237	0.00082
19	20	0.2533	0.5205	0.0016
19	20	0.909	0.6035	0.0017
19	21	0.23	0.778	0.00223
21	22	0.2332	0.2623	0.000856
22	23	0.2439	0.4888	0.00158
8	24	0.3831	0.4309	0.0014
24	25	0.003	0.00399	0.0000115
24	26	0.1363	0.1764	0.000525
24	27	0.3331	0.3747	0.0012
27	28	0.1261	0.1182	0.00035
28	29	0.00187	0.00385	0.0000118
28	30	0.10506	0.0985	0.00029
30	23	0.1998	0.225	0.00073
23	32	0.1514	0.1945	0.00059
32	31	0.042	0.0394	0.00116
23	31	0.0375	0.0794	0.00023
1	2	0.00145	0.07345	0
4	23	0.00683	0.20483	0
5	16	0.01467	0.4163	0
47	19	0.106	1.4762	0
7	8	0.01467	0.34	0
7	8	0.01467	0.34	0
6	19	0.0073	0.1748	0

(续)

来自母线	到达母线	R (p. u.)	X (p. u.)	B (p. u.)
47	19	0.106	1.4762	0
7	8	0.01467	0.34	0
7	8	0.01467	0.34	0
7	33	0.01467	0.3263	0
34	9	0.106	1.476	0
10	35	0.232	2.388	0
36	11	0.106	1.596	0
12	37	0.106	1.496	0
38	13	0.106	1.596	0
14	39	0.106	1.756	0
14	40	0.106	1.596	0
15	41	0.0267	0.5327	0
16	42	0.044	0.798	0
17	43	0.106	1.596	0
17	44	0.106	1.596	0
17	45	0.106	1.596	0
46	18	0.044	0.798	0
20	48	0.044	0.758	0
49	21	0.106	1.596	0
50	22	0.232	4.712	0
25	51	0.536	5.896	0
26	52	0.0267	0.5327	0
53	27	0.106	1.596	0
29	54	0.536	4.768	0
55	30	0.232	3.1508	0
56	30	0.232	3.312	0
32	58	0.06	0.9573	0
32	59	0.06	0.9573	0
31	57	0.0267	0.5193	0
33	60	0.3472	0.6014	0
33	61	0.3472	0.6014	0
33	62	0.3472	0.6014	0

(续)

来自母线	到达母线	R (p. u.)	X (p. u.)	B (p. u.)
34	63	2.0833	3.6083	0
34	64	2.0833	3.6083	0
34	65	2.0833	3.6083	0
35	66	4.167	7.2167	0
35	67	4.167	7.2167	0
35	68	4.167	7.2167	0
36	69	2.0833	3.6083	0
36	71	2.0833	3.6083	0
37	72	2.0833	3.6083	0
37	73	2.0833	3.6083	0
37	74	2.0833	3.6083	0
38	75	2.0833	3.6083	0
38	76	2.0833	3.6083	0
38	77	2.0833	3.6083	0
39	78	2.0833	3.6083	0
39	79	2.0833	3.6083	0
39	83	2.0833	3.6083	0
40	80	2.0833	3.6083	0
40	81	2.0833	3.6083	0
40	82	2.0833	3.6083	0
41	84	0.6944	1.2028	0
41	85	0.6944	1.2028	0
41	86	0.6944	1.2028	0
42	87	1.04167	1.8042	0
42	88	1.04167	1.8042	0
42	89	1.04167	1.8042	0
43	90	2.0833	3.6083	0
43	91	2.0833	3.6083	0
44	92	2.0833	3.6083	0
44	93	2.0833	3.6083	0
45	94	2.0833	3.6083	0
45	95	2.0833	3.6083	0

(续)

来自母线	到达母线	R (p. u.)	X (p. u.)	B (p. u.)
43	96	2.0833	3.6083	0
44	97	2.0833	3.6083	0
45	98	2.0833	3.6083	0
46	99	1.04167	1.8042	0
46	100	1.04167	1.8042	0
46	101	1.04167	1.8042	0
47	102	2.0833	3.6083	0
47	103	2.0833	3.6083	0
47	104	2.0833	3.6083	0
48	105	1.04167	1.8042	0
48	106	1.04167	1.8042	0
48	107	1.04167	1.8042	0
49	108	2.0833	3.6083	0
49	109	2.0833	3.6083	0
49	110	2.0833	3.6083	0
50	111	4.167	7.2167	0
50	112	4.167	7.2167	0
50	113	4.167	7.2167	0
51	114	8.33	14.43	0
51	115	8.33	14.43	0
51	116	8.33	14.43	0
52	117	0.6944	1.2028	0
52	118	0.6944	1.2028	0
52	119	0.6944	1.2028	0
53	120	2.0833	3.6083	0
53	121	2.0833	3.6083	0
53	122	2.0833	3.6083	0
54	123	8.33	14.43	0
54	124	8.33	14.43	0
54	125	8.33	14.43	0
55	126	4.167	7.2167	0
55	127	4.167	7.2167	0

(续)

来自母线	到达母线	R (p. u.)	X (p. u.)	B (p. u.)
56	128	4.167	7.2167	0
56	129	4.167	7.2167	0
55	130	4.167	7.2167	0
56	131	4.167	7.2167	0
57	132	0.6944	1.2028	0
57	133	0.6944	1.2028	0
57	134	0.6944	1.2028	0
58	135	1.389	2.405	0
58	136	1.389	2.405	0
59	137	1.389	2.405	0
59	138	1.389	2.405	0
58	139	1.389	2.405	0
59	140	1.389	2.405	0

随着能源结构的转变以及新能源技术被广泛关注，风力发电的优化成为了一个实际问题。本书重点分析了与电力系统电压稳定性研究、特征和评估有关的先进优化技术的发展和应用。最近关于无功管理的进展主要集中在了风力发电系统和柔性交流输电系统(FACTS)装置的分析和控制。

本书的前言及后续各章内容覆盖了FACTS装置、电压稳定性、风力发电机、无功功率优化和管理等5个方面。这些内容都来源于包括西班牙电力系统实际数据在内的应用和实例。

除了电力系统工程师外，电力系统运营商和规划者也会受益于本书丰富深刻的内容。本书对于电气工程以及电力系统工程专业的本科生和研究生也有重要的参考价值。

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203

网络服务
教材网：<http://www.cmpedu.com>
机工官网：<http://www.cmpbook.com>
机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>
封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎刘星宁

国际视野 科技前沿

国际电气工程先进技术译丛 传播国际最新技术成果 搭建电气工程技术平台

- 《风力发电并网运行的无功管理》
- 《超大规模集成电路物理设计：从图分割到时序收敛》
- 《海上风电成本建模：安装与拆除》
- 《智能电网——设计与分析基础》
- 《功率理论与电能质量治理》
- 《混合动力电动汽车原理及应用前景》
- 《智能电网中的传导电磁干扰》
- 《风能转换技术进展》
- 《电机传动系统控制》
- 《储氢材料：储存性能表征》
- 《风力机技术》
- 《小型风力机：分析、设计与应用》
- 《通信系统高电压保护》
- 《磁性测量手册》
- 《ESD设计与综合》
- 《太阳能利用技术及工程应用》
- 《超级电容器的应用》
- 《小型风力机：分析、设计与应用》
- 《太阳电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》
- 《风力发电系统——技术与趋势》
- 《可持续电力系统的建模与控制：面向更为智能和绿色的电网》
- 《电力系统高级预测技术和发电优化调度》
- 《大规模储能技术》
- 《风电系统电能质量和稳定性对策》
- 《环境能源发电：太阳能、风能和海洋能》
- 《传热学：电力电子器件热管理》
- 《现代电力电子学与交流传动》
- 《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》
- 《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》
- 《储能技术》
- 《光伏系统工程》（原书第3版）
- 《光伏与风力发电系统并网变换器》
- 《车辆能量管理：建模、控制与优化》
- 《纯电动及混合动力汽车设计基础》（原书第2版）
- 《电动汽车技术、政策与市场》
- 《永磁无刷电机及其驱动技术》
- 《先进电气驱动的分析、建模与控制》
- 《智能电网可再生能源系统设计》
- 《风力发电工程指南》
- 《用于制造固体氧化物燃料电池的钙钛矿型氧化物》
- 《太阳能物理》
- 《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》
- 《风电并网：联网与系统运行》
- 《可再生能源的转换、传输和储存》
- 《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》
- 《光伏技术与工程手册》
- 《风力发电的模拟与控制》

上架指导 工业技术 / 电气工程 / 新能源

ISBN 978-7-111-46091-6

ISBN 978-7-111-46091-6



定价：48.00元