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

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 高峰期电力需求和最大风力发电出力 …… 88
6.3.4 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根据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［NGET（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，NGET 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。

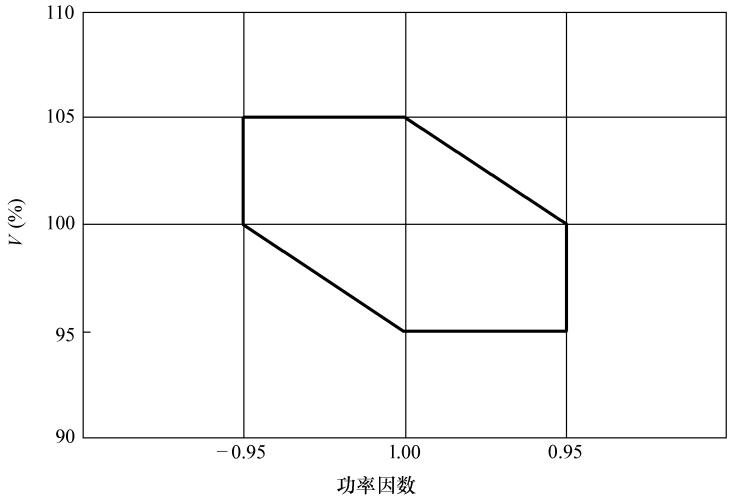


图 1.1　风力发电机组电压与功率因数的标准要求

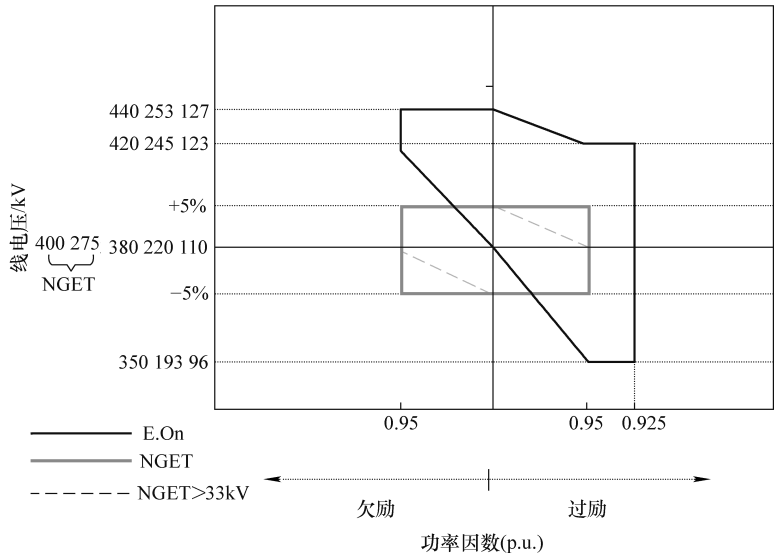


图 1.2　德国和英国的功率因数并网要求

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 ±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。

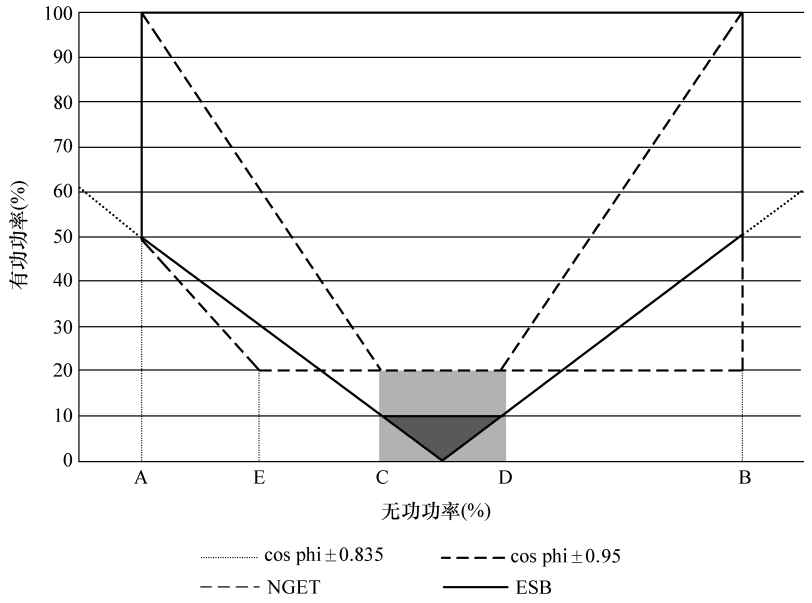


图 1.3　英国和爱尔兰的无功功率要求

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

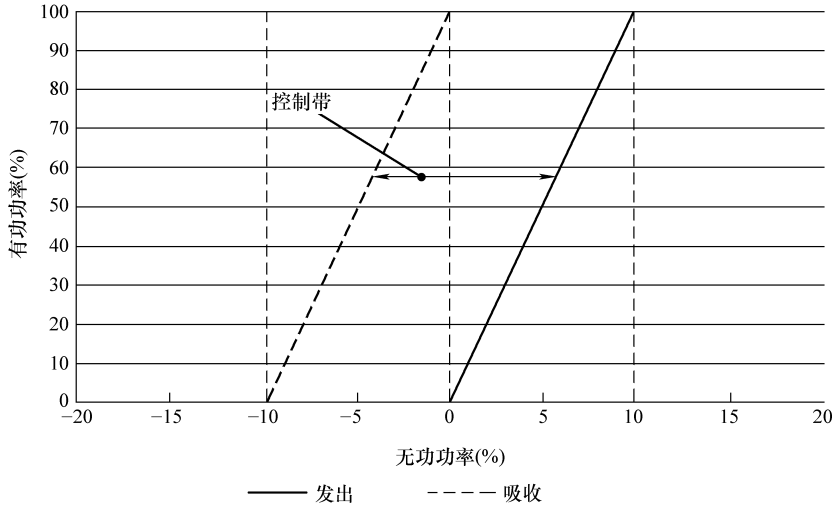


图 1.4　ELTRA 公司风电场在并网连接点处的无功功率要求

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

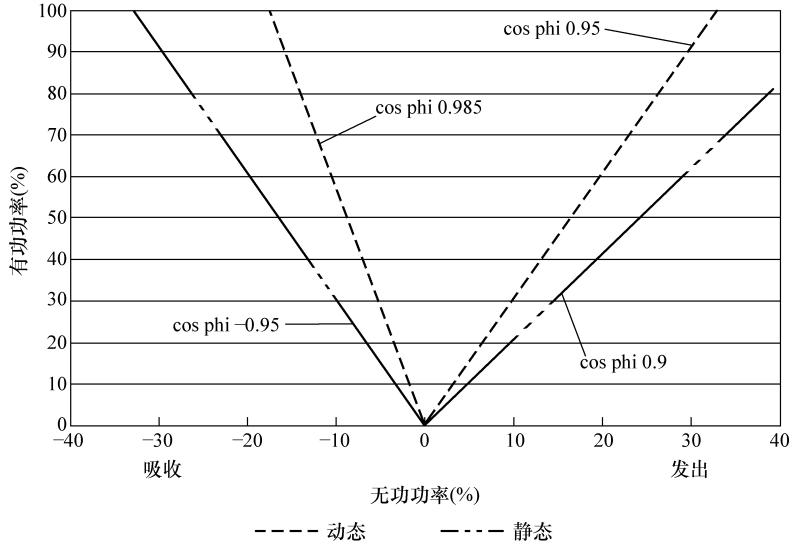


图 1.5　加拿大的 AESO（阿尔伯塔省电力系统运营商）电网规范要求

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 ±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 ~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。

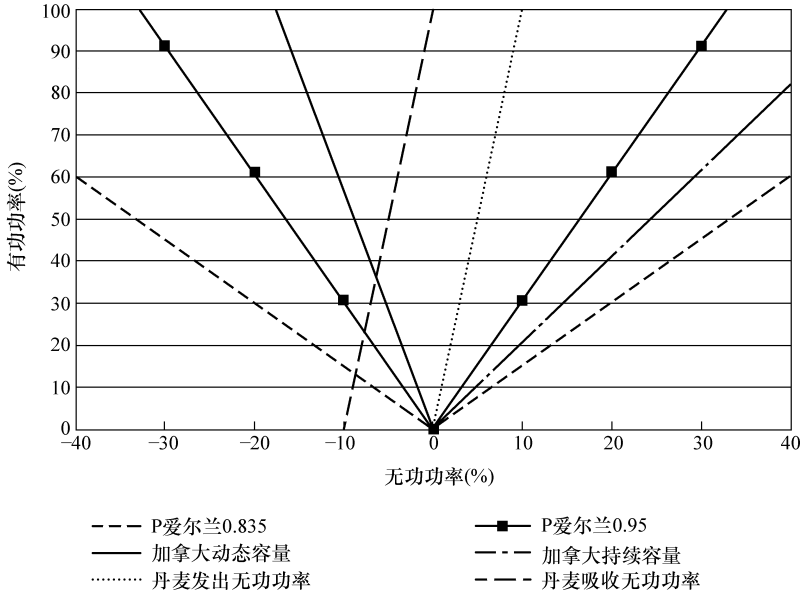


图 1.6　不同电网规范要求总结

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