

FENGDIAN BINGWANG YUNXING KONGZHI
JI GUANJIAN JISHU

风电并网运行控制 及关键技术

薛迎成 程孟增 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

本书由盐城工学院专著基金资助出版

FENGDIAN BINGWANG YUNXING KONGZHI
JI GUANJIAN JISHU

风电并网运行控制 及关键技术

薛迎成 程孟增 著

 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从变速风电机组 (VSWT) 输出功率平滑、频率控制、低电压穿越三方面进行研究, 主要包括风力发电机并网情况分析、常规机组和风力发电频率特性比较、基于功率滤波的风电场功率平滑控制、采用超级电容器储能的永磁直驱风电机组输出功率平滑控制、双馈风力发电机参与系统频率调节、变速风力发电机提供调频备用容量、基于分层架构的风电场频率调节、基于状态反馈线性化的 DFIG 低电压穿越控制、基于 Crowbar 电路的 DFIG 低电压穿越的研究等。

本书可以作为研究生、风电技术和其他可再生能源发电技术研究人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

风电并网运行控制及关键技术/薛迎成, 程孟增著. —北京:
中国电力出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5123-8396-8

I. ①风… II. ①薛…②程… III. ①风力发电-研究
IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 238468 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 227 千字

定价 30.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

随着风电场规模的扩大，风电装机在电网中所占比例越来越高，其对电网的影响范围也从局部逐渐扩大，大规模风电并网对电网安全运行影响日益显现。风电的随机性及间歇性等特性，对系统的运行造成了较大冲击，其对电网的影响已从简单的电压波动和谐波污染等局部电能质量问题扩展至整个系统的潮流分布、线路传输功率与整个系统的惯量、暂态稳定性及频率稳定性、调频调峰及经济调度等诸多方面。

大规模风电接入电网给电网的运行控制带来越来越大的影响。以及由此带来的系统调频、调峰、风电功率预测、低电压穿越等运行控制问题。政策法规在扶持风电发展的同时，应加强风电对电网影响的相关技术研究；本书试图从变速风电机组（VSWT）输出功率平滑、频率控制、电网故障穿越技术三方面来研究这个问题。

本书第1~8章由薛迎成编写，第9、10章由程孟增编写，第1章为绪论；第2章介绍了风力发电机并网情况分析；第3章介绍了常规机组和风力发电频率特性比较；第4章介绍了基于功率滤波的风力场功率平滑控制；第5章介绍了采用超级电容器储能的永磁直驱风电机组输出功率平滑控制；第6章介绍了双馈风力发电机参与系统频率调节；第7

章介绍了变速风力发电机提供调频备用容量；第 8 章介绍了基于分层架构的风电场频率调节；第 9 章介绍了基于状态反馈线性化的 DFIG 低电压穿越控制；第 10 章介绍了基于 Crowbar 电路的 DFIG 低电压穿越的研究。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及其意义	1
1.2 风电发展现状	2
1.2.1 全球风电发展现状	2
1.2.2 中国风电发展情况	3
1.3 风电发展面临的问题	3
1.4 风力发电系统有功功率平滑控制技术研究现状	5
1.5 变速风电机组参与调频的研究现状	8
1.6 双馈发电系统电网故障穿越技术的研究现状	11
1.6.1 常见电网故障类型	11
1.6.2 电网电压故障对双馈电机的影响	12
1.6.3 国内外电网对风力发电系统低电压穿越 (LVRT) 相关规定	12
1.6.4 DFIG 低电压穿越硬件保护电路	15
1.6.5 故障状态下控制技术的研究	18
1.6.6 网侧变换器的控制策略	20
1.7 本书的主要研究内容	21
第 2 章 风力发电机并网情况分析	24
2.1 引言	24
2.2 风力发电技术	24
2.2.1 恒速恒频风力发电技术	25

2.2.2	变速恒频风力发电技术	25
2.3	风力发电机的运行机理	28
2.4	风力机与传动模型	30
2.4.1	风速模型	30
2.4.2	风力机模型	31
2.4.3	传动机构模型	33
2.5	恒速恒频风力发电机数学模型	33
2.6	变速恒频双馈风力发电机数学模型	35
2.6.1	双馈电机的组成	35
2.6.2	双馈电机的数学模型	36
2.7	风力发电机并网分析	38
2.7.1	并网风力发电机的模型	38
2.7.2	风力发电机并网分析	39
2.8	小结	43
第3章	常规机组和风力发电频率特性比较	44
3.1	不同风电机组的频率响应特性分析	44
3.1.1	普通异步发电机的频率响应特性	44
3.1.2	DFIG 机组的频率响应特性	46
3.2	常规机组和风力发电频率特性比较	49
3.2.1	双馈发电机可能释放的动能远远超过常规同步发电机	49
3.2.2	常规机组和风力发电频率响应特性比较	49
3.2.3	讨论	50
3.3	变速风力发电短期有功功率支持能力	51
3.4	小结	53
第4章	基于功率滤波的风力场功率平滑控制	54
4.1	风电功率波动特性分析	54
4.1.1	风速波动特性分析	54
4.1.2	风电功率波动特性	55
4.1.3	风能波动的频率范围	56
4.1.4	风电功率波动的时空分布特性	57
4.2	风力发电机扩展桨距控制原理	58
4.3	基于功率滤波的风电场功率平滑控制	61

4.3.1	基于分频风电场功率平滑控制	62
4.3.2	仿真结果及分析	65
4.4	小结	68
第5章	采用超级电容器储能的永磁直驱风电机组输出功率平滑控制	69
5.1	直驱风电系统的结构	69
5.2	电机侧变换器的控制策略	70
5.3	储能单元控制策略	71
5.3.1	超级电容模型	71
5.3.2	储能单元结构原理	72
5.3.3	储能单元数学模型	73
5.3.4	储能单元储能容量的配置	74
5.4	网侧逆变单元控制策略	75
5.4.1	电网侧变流器数学模型	75
5.4.2	网侧逆变器控制策略	76
5.5	永磁同步发电机的数学模型	76
5.6	输出功率平滑控制策略	77
5.7	输出功率平滑的仿真研究	78
5.7.1	仿真模型	78
5.7.2	输出功率稳定仿真	80
5.8	小结	82
第6章	双馈风力发电机参与系统频率调节	83
6.1	频率响应机理分析	83
6.1.1	惯性控制分析	83
6.1.2	控制器参数对系统惯性的影响分析	84
6.2	系统仿真	85
6.2.1	仿真系统模型	85
6.2.2	双馈发电机的频率响应	86
6.2.3	初始转速对惯性控制的影响	87
6.2.4	控制器参数对惯性控制的影响	88
6.2.5	最大功率跟踪MPT特性的影响	89
6.2.6	滤波器参数的影响	90
6.2.7	频率上升情况分析	90

6.3	新的调频控制策略	91
6.4	小结	93
第7章	变速风力发电机提供调频备用容量	94
7.1	变速风电发电机调频和储备控制机理	94
7.2	新型风电调频和储备控制策略	96
7.2.1	基本思想	96
7.2.2	风力发电机卸载运行	97
7.2.3	根据频率变化改变运行点	99
7.3	仿真实例	100
7.3.1	卸载运行和备用容量	100
7.3.2	风速低情况下双馈发电机作为旋转备用电机	101
7.3.3	在风速高时满负荷运行	104
7.3.4	在中风速时部分负荷运行	104
7.3.5	紧急调控模式	105
7.4	本章小结	106
第8章	基于分层架构的风电场频率调节	107
8.1	风电场频率控制方案	108
8.1.1	风电场控制层	109
8.1.2	风力发电机组控制层	111
8.1.3	运营管理层	111
8.1.4	发电机输出功率协调	111
8.2	小结	113
第9章	基于状态反馈线性化的DFIG低电压穿越控制	114
9.1	引言	114
9.2	状态反馈线性化基本理论	115
9.2.1	仿射非线性系统及其相对阶	115
9.2.2	MIMO精确线性化的条件	116
9.2.3	线性化标准型	117
9.2.4	线性最优控制设计方法	119
9.3	转子侧变换器低电压穿越的控制	120
9.3.1	转子侧控制策略	120

9.3.2	转子侧非线性控制器设计	121
9.3.3	仿真结果和分析	127
9.4	网侧变换器的状态反馈线性化的控制	131
9.4.1	网侧非线性策略和控制器设计	131
9.4.2	仿真结果和分析	135
9.5	本章小结	137
第10章	基于 Crowbar 电路的 DFIG 低电压穿越的研究	139
10.1	引言	139
10.2	LVRT 的硬件保护方法	139
10.2.1	Crowbar 电路的工作模式和控制方法	140
10.2.2	基于抑制浪涌电流为目标的 Crowbar 的设计	141
10.2.3	仿真验证	144
10.3	LVRT 对电机轴系的影响	146
10.3.1	两质块轴系模型	146
10.3.2	DFIG 的稳态电磁转矩	146
10.3.3	Crowbar 电路的 DFIG 瞬态电磁转矩研究	147
10.3.4	仿真验证	149
10.4	LVRT 时 DFIG 无功功率分析	152
10.4.1	带有 Crowbar 电路的 DFIG 无功功率消耗分析	152
10.4.2	仿真验证	153
10.5	本章小结	155
附录	156
参考文献	159

1.1 研究背景及其意义

自20世纪70年代出现石油危机以来,世界各发达国家纷纷制定能源供应多样性战略。而20世纪90年代联合国气候大会通过《京都议定书》以后,随着人类对生态环境的要求和能源的需要,各国政府和各种国际组织对可再生能源的开发利用的支持力度也越来越大,从而促进了水能、核能、氢能、太阳能、风能、海洋能、地热能等新能源和可再生清洁能源的发展。其中,风力发电是目前可再生能源开发利用中技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的发电方式之一;风电与火电、水电及核电相比,其建设周期短、见效快;因此风电越来越受到世界各国的重视并得到了广泛地开发和利用。

近几年,随着我国对可再生能源产业的重视,大规模风电场逐步并入电网,对于改善电源结构起到了积极作用。风电场作为可再生电源,虽然在节能减排,优化电源结构方面具有一定价值,但自然界的风具有不稳定性、脉动性,风速时大时小,有时还会出现强风和暴风,具有很强的随机性和不可控性。而风力发电机的转子线圈、风轮和其他电子元件的超载能力是有一定限度的,不能够随着风速随意增加。另外,风机桨叶强非线性的空气动力学特性、系统参数的不确定性给此类系统的控制带来了困难。因此,必然对电网原有的运行方式带来不利影响。这些影响包括风电接入点局部地区电能质量、有功潮流、无功潮流、电压稳定、全网旋转备用容量安排、系统调频和经济运行等方面。

目前,风电机组均按照自治发电的方式在风电场内运行,为了抑制风电场有功功率输出的波动,电网在运行过程中必须预留出足够的旋转备用容量,以保证电网内的有功平衡。因风电功率难以准确预测,使得系统往往需要安排更多旋转备用容量来应对风电功率变化,从而增加系统运行成本。随着风电装机容量的不断增大,电网的备用容量亦需要相应增大,这不仅增加了电网的运行成本,同时也降低了系统的发电效率。

由于条件限制,风电场所在位置往往散布于电网末端,而且风电机组运行通常需要较强的无功支撑,所以风电场输出功率的波动还将造成风电场接入点电压的明显变化,



对电能质量产生较大的影响，如电压偏差、电压波动和闪变、谐波等。特别是随着上网风电容量的激增和风电单机容量的不断增大，这一问题显得越来越突出。因此，为了提高风电机组并网运行的稳定性和电能质量，要求风电机组能够在尽可能实现最大风能捕获的同时输出较为平滑的有功功率。如何使风电机组输出较为平滑的有功功率也逐渐成为研究的热点问题。

当电力系统中风电接入容量较大时，风电功率的波动将造成参与调频机组的运行成本的增加，由于停风或者过风切机后导致风力发电机组失去出力，可能会导致系统有功出力和负荷之间的动态不平衡，改变电网频率，进而会影响到系统的频率稳定性和一些负荷的正常工作。当功率波动超过系统调峰能力范围时，还将进一步导致电力系统频率越限，威胁电网的安全运行。

在传统电力系统中，系统频率动态特性与系统惯性有关，而系统惯性又与接入系统的同步发电机组有关。但是由于现代并网风力发电机越来越多地采用双馈发电机（Doubly Fed Induction Generator, DFIG）或同步发电机加电力电子变换器接口的变速运行技术，使机械功率与系统电磁功率解耦，转速和电网频率的解耦，阻断了风力发电机组对系统频率变化的响应，因此，传统的变速恒频风电机组转子的惯性动能对系统转动惯量的贡献非常少。当越来越多的常规同步发电机组被取代后，整个系统惯量就相对减少了，系统频率的变化速率将会增大，失去发电机组所导致的频率偏移也会增大，降低了系统的频率稳定性，不利于整个电力系统的安全稳定运行。

虽然目前许多地区电网已实现互联，但由于互联传输功率极限的约束及动态频率的局限性，风电出力波动可能会产生严重的地区有功功率平衡问题；传统电力系统调频任务主要是针对负荷的随机变化及联络线功率控制的需求设置的，随着风电的引入，风电的随机性及负荷波动性的双重性作用将给系统频率控制带来前所未有的困难。这一困难随着风电比例的升高将会变得更加严重，因此大量风电引入电网的系统频率控制问题亟待解决。

1.2 风电发展现状

1.2.1 全球风电发展现状

近年来，全球风电产业持续快速增长，2010年全球风电新增风电装机容量35.8GW，累计装机容量达到194.4GW，同比增长22.5%，增长率较往年出现比较明显的下滑。从增长分布来看，诸如中国、印度、巴西等新兴风电市场新增装机容量逐渐占据主导地位，其中中国新增风电装机容量达到16GW，将近全球新增容量的1/2；传

统欧美风电市场新增装机容量均较 2009 年有所下降, 欧洲新增风电装机 9.9GW, 较 2009 年新增水平下降 7.5%, 美国则大幅下滑至 5GW, 新增装机容量较 2009 年减少 50%。2001~2010 年全球风力发电总装机量和增长量如图 1-1 所示。

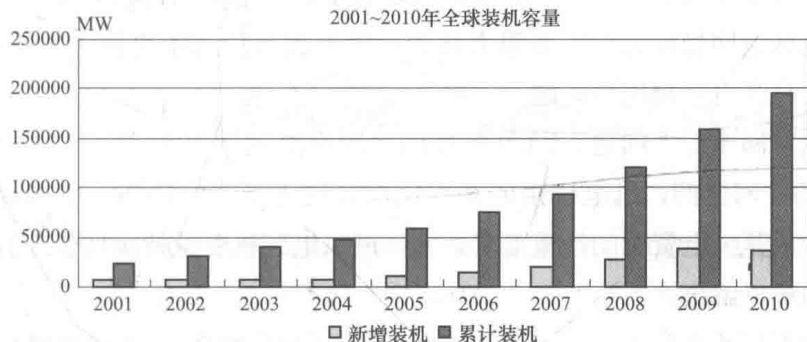


图 1-1 2001—2010 年全球风力发电总装机量

1.2.2 中国风电发展情况

我国风能资源丰富, 可开发的风能潜力巨大。2007 年中国气象局实施了中国风能资源详查与评价工程, 并于 2010 年首次公布了中国风能资源研究的重要成果: 中国海、陆距地 50m 以上的高度, 风速达 3 级以上风力资源的潜在可开发量约为 25 亿 kW, 在风电五大国中, 中国风电资源与美国接近, 远远高于印度、德国和西班牙。我国风能资源比较集中, “三北”地区 (华北、东北和西北) 以及东南沿海地区、沿海岛屿潜在风能资源开发量约占全国的 80%。风能资源与煤炭资源的地理分布具有较高的重合度, 与电力负荷则呈逆向分布。

中国风电产业发展势头强劲, 我国风电产业持续快速发展, “十一五”期间风电装机容量连续五年翻番, 成为全球风电装机规模第一大国。2009 年中国风电新增装机容量 1380 万 kW, 居全球第 1; 中国风电累计装机容量 2580 万 kW, 仅次于美国的 3506 万 kW; 风电机组装备与制造能力居全球第 1。2010 年, 全球每新安装 3 台机组, 就有 1 台在中国; 仅隔 1 年, 2010 年新增和累计风电装机容量均居全球第 1 位。

1.3 风电发展面临的问题

随着风电场规模的扩大, 风电装机在电网中所占比例越来越高, 其对电网的影响范围也从局部逐渐扩大, 大规模风电并网对电网安全运行影响日益显现。风电的随机性及间歇性等特性, 对系统的运行造成了较大冲击, 其对电网的影响已从简单的电压波动和

谐波污染等局部电能质量问题扩展至整个系统的潮流分布、线路传输功率与整个系统的惯量、暂态稳定性及频率稳定性、调频调峰及经济调度等诸多方面。

(1) 稳定性问题。规划在河北、内蒙古、江苏、甘肃、新疆等地建设的千万千瓦级风电基地大都处于电网末端，电网网架结构不够坚强、电源结构较为单一，风电大规模接入对这些地区电网稳定运行带来很大压力；风电大容量远距离输送系统输送距离长，输送功率大，存在电压稳定性问题。

(2) 风电并网率低下问题。2010年中国并网风电比例仅为74%，明显低于欧美国家90%以上的并网比例；风电机组的并网比例呈逐年下降的趋势。中国风电装机容量快速增长的背后是风电资源的严重浪费，未并网风电装机容量持续增长，弃风现象严重并在短时间内难以解决。

造成风电并网率低的原因一方面缺乏风电消纳方案，与风电并网相关的发电项目输送线路、网架结构电网建设相对滞后，繁琐的并网工作以及并网后电网效益的不确定性也使电网公司对于接纳风电投资的积极性低下；另一方面，过度集中的风电分布使得电网难以消纳。为提高风电外送能力，改善风电并网电能质量，必须积极采用先进技术，如动态无功补偿设备（SVC、STATCOM等）、串补/可控串补、可控高抗、自动电压控制（AVC）等。动态无功补偿设备用于提高风电场无功补偿及电压调节能力，改善电能质量；串补/可控串补用于缩短输电系统电气距离，提高安全稳定水平；可控高抗用于稳态调节系统电压，使风电外送通道在有功功率波动时保持电压水平。

(3) 调峰问题。调峰问题也是制约我国风电大规模并网的主要矛盾之一。电源结构不合理是导致调峰困难的根本原因。我国火电占总装机容量的75.9%，水电只占21.6%。火电比重大，供热机组较多，快速调节机组少且运行制约因素多。

(4) 发电计划与调度问题。传统的发电调度计划是基于电源的可靠性以及负荷的可预测性为基础的，但是，由于此系统内含有风电场并且风电场出力的预测水平不能达到工程实用性要求，制定发电计划变得尤为困难。风力发电并网以后，如果电力系统的运行方式不相应地做出调整和优化，系统的动态响应能力将不足以跟踪风电功率的大幅度、高频率的波动，系统的电能质量和动态稳定性将受到显著影响，这些因素反过来会限制系统准入的风电功率水平。

(5) 其他问题。风电建设规划缺少统筹、风电装备技术水平和产品质量有待提高、风电并网技术标准和检测工作滞后以及风电场设计、建设、运行和调度管理薄弱等问题，已经成为制约风电安全发展的关键因素。

另外，中国风电装机质量、风电发电效率、海上风电装机容量、自主研发能力以及风电装机出口等指标仍与国际先进水平有一定的差距，中国风电的发展仍需谋求质的突破。



总之,大规模风电接入电网给电网的运行控制带来越来越大的影响,以及由此带来的系统调频、调峰、风电功率预测、低电压穿越等运行控制问题。政策法规在扶持风电发展的同时,应加强风电对电网影响的相关技术研究;本书从变速风电机组(VSWT)输出功率平滑、频率控制、电网故障穿越技术三方面来说明这个问题。

1.4 风力发电系统有功功率平滑控制技术研究现状

目前,国内外针对风电系统功率平滑控制的研究较少,风力发电机组功率控制的研究和应用主要集中在最大风能捕获策略上,其目的是为了尽可能充分地利用风能。但最大风能捕获控制策略虽然能够最高效地利用风能,但却有可能给电网带来不利影响。因为风速是随机波动的,采用最大风能捕获控制也就使得风力发电机系统输出的有功功率跟随风速的变化而波动。将这种随机波动的风电输出功率接入电网,一是将会增加电网调压、调频、运行调度等运行控制的难度,进而增加电网的运行成本;二是在风能占较大比重的电网中,风力发电机组的突然切出会导致电网的不稳定,还可能引起电力系统强迫功率振荡,影响电网稳定性;三是随着电力系统中风电装机容量的逐年增大以及单个风电场装机容量的增大,当风电输出功率波动超出了电力系统的调峰能力时,还将会更进一步导致电力系统的频率越限,从而严重威胁电力系统的安全;四是风电机组容易因电网扰动而退出运行,当电网发生短路故障时,极有可能因为风电场退出运行而增加电网的有功缺额,进而恶化电网的稳定性。特别是随着上网风电容量的激增和风电单机容量的不断增大,这一问题显得越来越突出。因此,如何采取适当的控制策略以降低风速波动对风电输出有功功率的影响,进而保证并网风电不影响电网的安全稳定运行,已成为一个亟待解决的问题。

当前,风力发电机组也采用了许多用于稳定发电功率的措施,通过自动控制使风力机组的功率输出尽量保持在希望的范围以内,例如,超过风力机组的额定风速时,定桨距风力发电机组的桨叶失速调节技术;变桨距风力发电机组的叶片进行节距角调整;新型变桨距风力发电机组的发电机转子电流控制技术 RCC (Rotor Current Control);变速风力发电机组控制技术等。然而,风能是一种间歇性能源,风电场不能提供持续稳定的功率,发电稳定性较差。风电场并网运行后会影响到当地电网的电能质量,出现如电压偏差、电压波动和闪变、谐波等问题。电压波动和闪变是风电场并网发电对电网电能质量的主要负面影响之一。

目前,国内外对风电系统功率平滑控制的研究多集中在高风速区,通过桨距角调节实现风电系统的恒功率输出,超过风力机组的额定风速时,定桨距风力发电机组的桨叶失速调节技术;变桨距风力发电机组的叶片进行节距角调整。桨距角控制是调节风机输



输出功率的有效手段，它通过对空气动力载荷的直接控制调节风机的输出功率。由于风机模型的强非线性，控制难度较大。为了抑制风电输出功率波动的问题，国内外学者提出了一些其他解决方案，主要有四类方法：扩展变桨距法、转速调节法、辅助储能法、空间平滑法。

1. 扩展变桨距法

利用桨距角的控制捕获相对平滑的风能，将传统的桨距角的控制扩展到全风速范围。但由于变桨距机构惯性很大，在风速变化较快时，仅通过这种控制来调节发电机输出的有功功率，很难获得良好的功率波动抑制效果。

在控制方法上，比较易于实现的是采用非线性桨距角鲁棒控制器，通过控制变桨装置的频繁动作，维持输出有功功率的平滑，可以在风速波动时有效控制风电系统的输出功率水平，对参数化扰动具有较强的鲁棒性。该控制器的缺点是会加剧桨距角调节装置的机械疲劳，当风速快速变化时，由于风力机与桨距角调节装置具有较大的惯性，整个系统会出现响应延迟，无法达到理想的控制效果；在大风速条件下，机械转矩及输出功率在其额定值附近具有较大的波动，影响风机的可靠运行。

在控制方法上，控制效果较好的是同时采用模糊变桨距控制和发电机转矩动态滑模控制，采用模糊变桨距控制，控制发电机的转速范围；采用发电机转矩动态滑模控制，实现发电机输出有功功率平滑。但当风速快速变化时，该控制策略中两种有功功率参考的快速切换会引起功率的波动。该控制方法的缺点是需要测量风速的大小，而实际中要得到准确风速测量值比较困难；另外，该控制策略虽在输出功率平滑上效果较好，但是其风能利用率较低。

2. 转速调节法

转速调节法通过对发电机转速的控制，使风力发电机输出有功功率能较好地跟踪给定的功率曲线。这类控制调节法与扩展变桨距法都是在不增设储能元件前提下使用的，也就无需增设能量转换装置。通过风电机组自身控制策略的改进，利用自身转动惯量储能或舍弃部分波动风能，达到平滑风能输出的目的。风力发电机采用有别于最大风能捕获的控制目标，利用发电机转子或风力机转动惯量，当风速高的时候控制转子加速，将多余的风能以转子动能的形式储存起来；风速低的时候控制转子减速，释放部分动能，保证了功率的平稳输出。

转速调节法一般也需要风力机的变桨控制和风力发电机转矩动态控制协同配合，放弃部分波动风能，使风电输出功率平滑。缺点是该方法限制了风力发电机的转速变化的范围，使风力机不能运行在最优转速，不利于风能的最大利用，这种方法对风电功率波动的调节能力有限，且发电机转速波动较大，容易使转子转速超过额定值，有时甚至会导致运行不稳定。



3. 辅助储能法

采用蓄电池、超级电容、飞轮或超导等储能技术，利用电力电子技术和储能元件抑制风力发电机（WTG）输出功率的波动，这类控制方法需增加新的硬件装置，提高了系统成本和控制难度。

风电场加入储能装置后，风电场的总输出功率是风机总输出功率和储能装置输出功率之和。储能装置的输出功率要起到平抑风电输出的作用，即当风电出力骤降时，储能装置输出功率，反之则吸收功率。储能装置输出功率可负可正，当储能装置输出功率为负时，储能装置在充电；当储能装置输出功率为正时，储能装置在放电。

储能技术按不同的原理可以分为机械能储能、化学能储能和电磁能储能3类，在风力发电系统中均有不同程度的应用。

在风电场应用中，机械能储能包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能。抽水蓄能是当前唯一大规模采用的能量存储技术，但是其应用受地理条件、转化效率等方面的制约，而且抽水蓄能响应时间是分钟级，在瞬时平滑风电场出力方面有一定的限制。压缩空气储能技术可以把风能变为可控的能源，考虑风机和压缩空气储能混合系统生产的电力成本，这个生产成本对于现代工业社会是完全可以接受的，压缩空气储能将会在很长时期内具有竞争力。飞轮储能通过控制公共直流母线上电流的大小，控制飞轮储能的充放电规律，能有效地抑制了风电场功率波动。

在风电场应用中，电磁能储能包括超导储能、超级电容储能。超导磁储能系统可以迅速地控制有功和无功，其控制系统由上层下层两部分组成。上层控制用于提供内环控制器所需要的有功功率和无功功率控制的参考值，由不同目标的多个控制器及其协调环节组成，通过采集超导线圈的电压和电流，计算风电场的有功功率和频率并将其作为控制信号。底层控制根据上层控制所提供的功率参考值，控制 SMES 与系统之间电流的大小和相位，完成对 AC/DC 变换器的触发，实现了四象限运行。超级电容储能装置通过利用电力电子技术和电容器储能元件来抑制风电机组输出功率的波动，以风力发电机输出总功率和风电功率的差值作为控制目标，控制连接超级电容与风力发电机直流母线的 DC/DC 变换器，平抑风电波动，利用电容储能的缺点是电容器的储能能力有限且易受外界温度等因素的影响。

4. 空间平滑法

空间平滑法是利用风电场风力发电机的空间分布和风力条件对总输出功率波动进行平滑，空间平滑有可能显著减少风功率波动中高频不相关分量。如果单台发电机的输出波动彼此是独立的，该风电场的总谐波失真（ $\text{THD} = \sqrt{\text{方差}/\text{平均数}}$ ）是单台风力发电机组的 $1/\sqrt{n}$ ，其中 n 是风力发电机组数，在风力发电场的规模（几公里）较大时，风力发电机组分布的平滑的效果比预期更大。