



“十二五”国家重点图书出版规划项目

智能电网中的 风光储关键技术

李建林 李蓓 惠东 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书从不同的角度对风电场出力特性、光伏电站运行特性、电网接纳风电机理、储能容量配置、风储系统、光储系统等诸多方面进行了介绍,并遵循由浅入深、循序渐进、便于读者阅读的原则,附以实例,以期为广大读者提供一些借鉴。本书可作为广大科研工作者的参考手册,亦可作为高等院校相关专业广大师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网中的风光储关键技术/李建林,李蓓,惠东著. —北京:机械工业出版社,2013.1

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-40950-2

I. ①智… II. ①李…②李…③惠… III. ①风力发电②太阳能发电 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第312069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:付承桂 责任编辑:任鑫

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·15印张·273千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40950-2

定价:38.00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

前 言

曾几何时，智能电网这一新生事物已在潜移默化中完成了从时髦概念到家喻户晓的华丽转身。从媒体普及报道，到科技文献专业透析；从国家层面的五年规划，到各大科研机构的项目部署；从普通百姓的津津乐道，到业界精英孜孜以求，无不显现了智能电网的新鲜活力，其间涉及的热点问题备受国内外学者的普遍关注，尤以风光储关键技术为最。本书拟梳理风电、光伏、储能与电网之间的脉络关系，附以拙见，以飨读者，若能起到抛砖引玉之功效，则不胜欣慰。

在能源供给与环境问题的双重约束下，在 2012 年伊始，国家能源局、发展改革委等部门便相继推出了一系列强劲有力的保障措施，以法律、法规的形式来为风电、光伏发展修桥铺路，从《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》到《关于居民生活用电实行阶梯电价的指导意见》，从《关于印发风电场功率预测预报管理暂行办法的通知》到《关于做好 2012 年金太阳示范工作的通知》无不体现了国家对于风电、光伏的宠爱有加。于是乎，全国各地风起云涌、捷报连连，甘肃、新疆、河北、吉林、内蒙古、江苏等多个省区打造十个千万千瓦级风电基地的同时，青海、上海、安徽、江西、宁夏等省区也不甘示弱，GW 级、几十 GW 级大型并网光伏太阳能发电示范基地犹如雨后春笋、星火燎原，“风光互济”呈一片并驾齐驱之势。在风电、光伏等可再生能源超常规发展的同时，其出力的不确定性及反调峰特性对电力系统的负面影响也日益凸显，业已成为制约其发展的瓶颈之一。仅 2011 年上半年，我国甘肃、张家口等地便接连发生的四五起大规模风电脱网事故，难怪乎，有专家戏称“中国风电 5 年干了国外 20 年的事。”为起到对症下药、有的放矢之功效，业界多管齐下，尝试了网架改造、风电预测技术、备用容量和大规模储能等多种手段。事实胜于雄辩，大规模储能技术以“犹抱琵琶半遮面”的姿态初见端

倪，颇有拨云见日之感。

大规模储能系统以其具有动态响应特性好、寿命长、可靠性高等特点，在提高电网接纳风光伏能力、改善电能质量、应急电源等诸多领域为世人所关注。不管是传统的抽水蓄能、压缩空气、铅酸蓄电池，还是钠硫、液流、锂电、超级电容器等储能方式可谓不拘一格、百花齐放，取得了日新月异的新进展，相应的技术路线也日渐清晰。美国、日本、德国、丹麦等国纷纷开展了系列工程示范，方式不一，钠硫、液流、锂电等均有，抑或兼而有之；其目的也不唯一，有改善电能质量的，有削峰填谷的，也有事故备用、调频调压的。无独有偶，我国的各类储能示范工程不胜枚举，有张北的风光储示范工程、辽宁的风储工程、南方电网宝清储能电站、国电辽宁塘坊储能型风场等，无一不是开国内该领域之先河，涉及单位不乏国家电网、南方电网、中国国电、华电等大型央企。有理由相信，风光储关键技术必将成为一朵学术奇葩，一展其动人风采。

本书从不同的角度对风电场出力特性、光伏电站运行特性、电网接纳风电机理、储能容量配置、风储系统、光储系统等诸多方面进行了介绍，并遵循由浅入深、循序渐进、便于读者阅读的原则，附以实例，以期为广大读者提供一些借鉴。本书可作为广大科研工作者的参考手册，亦可作为高等院校相关专业广大师生的参考用书。

本书得到了科技部 863 项目（2011AA05A113）、863 项目（2012AA050203）、国家电网项目（储能系统提高大规模风力发电接入能力的深化研究及应用）以及中国电力科学研究院图书资助基金的大力资助，在此深表谢意。在本书的编写过程中，中国电力科学研究院的谢志佳、马会萌、修晓青、靳文涛等同志付出了辛勤的劳动，参与了部分文字校对、版式画图等工作，在此一并表示感谢。本书行将面世，著书之初衷是否果如所求，有待通过实践验证。限于编委会成员的水平，书中疏漏与谬误之处在所难免，尚祈读者不吝赐教。

作者于北京

2012 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 间歇性电源对电网的影响	1
1.1 概述	1
1.2 间歇性电源并网带来的问题	3
1.2.1 电力平衡问题	3
1.2.2 反向调峰问题	4
1.2.3 电压稳定问题	4
1.2.4 频率稳定问题	5
1.2.5 供需逆向分布问题	5
1.3 现有风场存在问题	6
1.4 储能技术作用	7
1.5 政策法规、标准规范	10
1.5.1 与风光储相关的政策法规	10
1.5.2 与风光储相关的技术标准	13
1.5.3 政策法规、技术标准对储能的促进作用	14
1.6 大规模储能技术的发展趋势	16
第 2 章 风力发电系统运行特性	17
2.1 概述	17
2.2 风电数据预处理方法	17
2.2.1 数据预处理原则	18
2.2.2 补齐缺失数据	19
2.3 风电出力特性	21
2.3.1 风电场出力水平	21
2.3.2 风电的出力波动特性	24
2.3.3 风电的广域平滑特性	28
2.4 风电系统数学建模	34
2.4.1 转子侧变流器数学建模	35
2.4.2 网侧变流器数学建模	36
2.4.3 DFIG 数学建模	37
2.4.4 风力发电机数学建模	38

2.4.5 失速型与直驱型风电系统数学建模	39
2.5 电力系统对风电系统的接纳能力	41
2.5.1 分散式并网应用	41
2.5.2 集中式并网应用	43
2.5.3 提高电网接纳风电能力的有效途径	44
第3章 光伏发电系统运行特性	46
3.1 概述	46
3.2 光伏系统出力特性	47
3.2.1 光伏系统输出特性	47
3.2.2 光伏输出特性影响因素	54
3.3 光伏系统数学建模	57
3.3.1 光伏阵列建模	58
3.3.2 Buck 直流变流器	61
3.3.3 逆变器模型	63
3.3.4 单级型并网光伏发电系统	68
3.3.5 双级型并网光伏发电系统	70
3.4 电力系统对光伏系统的接纳能力	73
第4章 储能系统运行特性	78
4.1 概述	78
4.2 典型储能系统及组成方式	81
4.2.1 电池储能系统的结构	81
4.2.2 储能系统的关键技术	82
4.3 液流电池储能系统	85
4.4 钠硫电池储能系统	89
4.5 锂离子电池储能系统	93
4.6 电池储能系统用 PCS 技术	99
4.6.1 拓扑结构	99
4.6.2 控制方法	106
4.6.3 实例仿真	110
4.6.4 电池储能系统用 PCS 发展前景	115
4.7 电池储能用 BMS 技术	121
4.7.1 电池储能系统 BMS 发展概况	121
4.7.2 电池储能系统 BMS 的技术要点	122
4.7.3 电池储能系统 BMS 的发展前景	131
第5章 风光储系统运行特性	132
5.1 风光储分布式应用	132

5.1.1 分布式发电与微网	132
5.1.2 微网的作用	134
5.1.3 微网研究现状	136
5.1.4 动力电池参与分布式储能	141
5.1.5 储能系统在微网的应用领域	144
5.2 风光储并网应用	147
5.2.1 风储系统运行特性	147
5.2.2 光储系统运行特性	168
5.2.3 电池储能电站	174
5.3 储能容量配置技术	178
5.3.1 国内外典型配置案例	178
5.3.2 风/光并网技术规定	180
5.3.3 储能容量配置方法	181
5.4 储能系统经济性评估	187
5.4.1 经济评估的必要性	187
5.4.2 电池储能经济性影响因素	188
5.4.3 电池储能系统经济分析	188
5.4.4 算例分析	191
第6章 风光储系统工程案例	193
6.1 示范工程现状	193
6.1.1 国外储能技术规模化应用项目	193
6.1.2 国内储能技术规模化应用项目	195
6.1.3 典型风光储案例简介	196
6.2 风力发电系统	198
6.2.1 风场概况	198
6.2.2 风电场风速特性分析	199
6.2.3 风电场出力特性分析	200
6.3 光伏发电系统	212
6.3.1 光伏电站概况	212
6.3.2 光伏电站特性分析	215
6.3.3 风光合成出力特性分析	215
6.4 电池储能系统	216
6.4.1 电池储能系统组成	216
6.4.2 储能系统接入技术	217
6.4.3 储能系统监控技术	218
6.4.4 储能系统区域防雷技术	220

6.5 风光储联合系统	220
6.5.1 运行模式	220
6.5.2 运行模式切换	221
6.5.3 运行控制策略	222
6.6 工程经验和推广价值	229
参考文献	230

第 1 章 间歇性电源对电网的影响

风电、光伏等间歇性电源固有的波动性、随机性和不可控性等特点，导致其规模化并网应用会对大电网互联运行的安全稳定造成隐患，对电网调频和备用容量规划带来极大挑战，对电网潮流分布、动态特性和电能质量等电气特性产生影响。为顺应政策需求，确保电网稳定、安全运行，电网需要足够的旋转备用来完成系统对间歇能源功率波动的调节。然而，我国电网结构中，占据份额最大的火力发电机组备用容量有限且调节速率较慢；水利发电机组虽然调节速率快，但其所占比例较小且分布受地理条件所限。储能技术的引入，为提高间歇式能源发电并网应用，提供了便捷有效的途径。储能系统装置的功率双向能力，可以平滑间歇电源功率输出波动，可以跟踪调度计划出力、缩减间歇电源预测功率误差，可以借“削峰填谷”方式降低间歇式能源丢弃率。基于目前研究来看，间歇性电源对电网带来的影响主要受三方面因素制约，即电源输出功率的特性、地区电网的实际情况以及储能系统装置的运行特性。

1.1 概述

我国“十二五”规划明确指出，将“依托信息、控制和储能等先进技术，推进智能电网建设”。智能电网的发展已经成为我国能源战略的重要组成部分，风能、光伏等清洁能源作为一种清洁、高效、易获取、无需耗能的可再生能源，当仁不让地成为了智能电网的重要组成部分，其规模化飞速发展已呈气势如虹、一发不可收的态势。风电作为技术最成熟的新能源利用方式之一，已经实现连续四年翻番的快速增长。截至 2012 上半年，全国并网新能源发电装机容量达到 6500 万 kW，约占总装机容量的 5%。其中，并网风电 4500 万 kW，约占并网新能源发电装机的 88%，规划 2015 年和 2020 年风电装机分别为 1 亿 kW 和 1.8 亿 kW。光伏系统同样发展迅速，2011 年我国装机容量超过 3GW，其中，并网装机容量约 220 万 kW，约占 4%，2012 年预计达 5~7GW。

然而，风电、光伏固有的随机性、间歇性特点，导致其规模化并网给电网发电调度、调频调峰、备用容量规划带来很大挑战，造成目前现有风电场或光伏电站资源浪费现象严重，严重影响经济效益，同时还会对电网的安全稳定运行以及

电能质量等带来不利影响。以风力发电为例,2011年我国发生四起典型风力发电机组大规模脱网事故,造成了我国局部电网频率的较大跌落。甘肃酒泉、河北张家口等地区相继发生频率漂移事故,频率最低降至49.815Hz,几乎接近电力系统安全稳定运行极限,对电网的可靠稳定运行构成了重大威胁。鉴于此,国家出台了《风电场接入电力系统技术规定》、《风电场功率预测预报管理暂行办法》等标准规范,明确了风电场并网的相关技术规定,要求风电场具备可调度、参与系统调峰调频等能力。其中,《风电场接入电力系统技术规定》提出了风电场并网的相关技术要求,并给出了正常运行情况下风电场有功功率变化最大值;《风电场功率预测预报管理暂行办法》要求所有并网运行的风电场均应具备风电功率预测预报的能力,按要求开展风电功率预测预报和发电计划申报工作,并按照电网调度机构下达的发电计划曲线运行,明确提出日预测曲线最大误差不超过25%、实时预测误差不超过15%、全天预测结果的方均根误差小于20%等考核指标,规定长期预测准确度差的风电场企业应按有关要求整改。

另外,以风电为代表的间歇性能源具有反调峰特性,尤其在东北、华北地区,风电的反调峰特性尤为明显。在夜间负荷低谷时段,风电出力往往较大,当风电场达到一定规模时,难免出现限电“弃风”现象。2011年全国风电弃风限电总量超过100亿kW·h,平均利用小时数大幅减少,个别省(区)的利用小时数已经下降到1600h左右。而各主要风电基地平均限电量占风电总发电量的比重均超过10%,风能资源丰富的黑龙江省弃风量则超过年发电量的20%,年平均利用小时数约2008h,严重影响了风电场运行的经济性。风电并网运行和消纳问题已成为制约我国风电持续健康发展的重要因素。对此,国家能源局提出了风电弃风超过20%的地区,原则上不得安排新风电项目建设的规定,同时要求各地采取有效措施促进风电消纳,解决风电运行中的限电问题。

针对上述问题,国内外陆续开始尝试采用网架改造、风电预测技术、备用容量和大规模储能等手段来解决瓶颈问题。其中大规模储能系统以其具有动态响应特性好、寿命长、可靠性高等特点,在提高间歇性能源并网应用能力方面为国内外所关注。同时,近年来大容量电池储能技术得到了快速发展和应用,相应的技术路线逐渐清晰,某些典型储能电池技术已经初步具备应用于平抑间歇式电源功率波动、提高电网接纳间歇式电源能力、电力系统调频、削峰填谷等诸多方面,风储联合运行的研究与示范逐步展开。2012年4月,国家能源局发布的《关于加强风电并网和消纳工作有关要求的通知》中将储能技术作为加强风电并网和消纳的主要手段之一,积极鼓励风能资源丰富地区开展各类储能技术等促进风电就地消纳的试点和示范工作,并提出将各省(区、市)风电并网运行情况作为

新安排风电开发规模和项目布局的重要参考指标,风电利用小时数明显偏低的地区不得进一步扩大建设规模的规定。因此,现阶段弃风严重的风能资源丰富地区亟须开展风储联合运行工程示范,研究储能提高风电消纳能力的关键技术,以提高风电场运行的经济性。

1.2 间歇性电源并网带来的问题

风电、光伏等可再生能源的原动力均不可控,其是否处于发电状态以及出力的大小都取决于自然资源状况,风速或光照的不稳定性和间歇性决定了风电或光伏出力也具有波动性和不可控特点。间歇性电源出力的随机性和波动性与现代电网对电源的“可控、可调”要求是矛盾的,也是制约电网接纳风电、光伏等清洁能源的重要约束。现有技术水平下,风电或光伏仍无法准确预报,因此其功率输出不便调度。从电网角度看,并网运行的间歇性电源相当于一个具有随机性的扰动源,将对电网的可靠运行造成一定影响。目前,我国电网互联规模日益增大,对于并网应用的风电场或光伏电站,其容量在电网总装机容量中占的比例很小,因此其功率的注入对电网频率影响甚微。然而,随着可再生能源并网应用规模的扩大,风电、光伏等间歇性电源对电网安全稳定运行带来了越来越大的挑战。可再生资源丰富的地区往往人口稀少,负荷量小,处于电网末端,电网结构相对薄弱,其大规模功率注入将改变电网潮流分布,对局部电网的节点电压或频率产生较大影响。同时,电网中不同位置处的间歇性电源出力及其变化,对电网潮流分布、动态特性和电能质量等电气特性将产生不利影响,甚至在某些关键节点或者输电断面形成累积效应或耦合效应,导致极端情况下节点电压越限或者失稳,输电断面形成阻塞等,从而对电网消纳间歇性电源的能力造成不稳定。

风电波动对电网带来的影响主要受三方因素制约,即风电场输出功率的特性、地区电网的实际情况以及储能补偿设备的特性。我国风电、光伏等间歇性电源发电并网应用技术主要存在五方面问题,包括电力平衡、反向调峰、电压稳定、频率稳定以及供需逆向分布问题。

1.2.1 电力平衡问题

由于间歇性电源的不确定性和不可控性,导致电力供电无法满足稳定性、连续性和可调性等要求,输出功率的不断变化容易对电网造成冲击。由于间歇电源的不可预知性,调度运行人员无法做出有效的发电计划,进而导致系统备用电源、调峰容量和系统运行成本增加,并威胁系统安全稳定运行等一系列后果。



1.2.2 反向调峰问题

电力系统中必须有足够的调峰能力来维持系统的功率平衡。在我国的电源结构中,调峰性能好的燃气、燃油电站非常少,抽水蓄能电站比例低,水电运行中存在很多制约因素,因此调峰能力不足一直是各同步系统普遍存在的问题。以东北电网为例,风电大发期、枯水期和冬季取暖期三期重叠,调峰难度随着风电接入容量比例的增加越来越突出。2010年东北同步电网的总发电装机容量将达到8442.37万kW,预计风电装机容量为1402万kW,届时东北电网内风电装机将占总发电装机容量的16.6%。在不考虑电网条件约束、风电不参与调峰的情况下,即使对火力发电机组采取最大深度的调峰措施,2010年东北电网最大可消纳风电规模仅为400万kW,因此不得不在个别时段要求风电参与调峰。

为保证电网的安全稳定运行,在电网最低负荷时,仍需保证一定的机组运行。以风电并网运行为例,一般燃煤机组的最低出力约为额定出力的40%,电网现有的控制模式要求在不调停大机组、电网在最低负荷、风力发电机组出力最大的极端情况下,电网内燃煤机组的最低出力加上外来电的总和应小于最低负荷。风电的反调峰特性,冬季夜间低负荷、大风时段,风电出力快速增加。尤其在北方,冬季70%以上的火力发电机组承担供热任务,调峰能力降低,调峰容量不足。同时,风电出力变化速度较快,火力发电机组常规调峰无法跟上风电出力的快速变化,这将导致联络线交换功率超过允许的偏差,越过联络线上的功率限制。

在北方,冬季供热期是电网调峰最困难的时期,也是风电出力较高的季节。为了保证地方供热,网内所有供热机组不得不全部运行,加上供热机组的最低出力已降低至火电机组出力的最低点。风电的间歇、波动特性要求电网必须有足够的调峰容量来平衡风电所产生的出力波动,但由于冬季负荷峰谷差最大,并且电力系统预留的调节裕度随着供热负荷的增加而逐步下降,这就导致整个电力系统没有足够的调峰容量来平衡大风时的风电出力,从而致使电网接纳风电的能力大大降低。解决间歇性电源并网带来的调峰困难问题,要求加大对直调电厂低谷调峰的考核力度,进一步完善直调电厂低谷深度调峰辅助服务的补偿措施,如配置储能装置等。

1.2.3 电压稳定问题

间歇性电源发电的不确定性和不可控性使得大规模风力发电机组或光伏阵列的并网给系统带来母线电压越限、电网电压波动和闪变等一系列电压稳定问题。

间歇电源的随机性使得节点电压的波动增大,节点电压的越限概率也随之变大,且影响程度与其间距离有关,即离间歇电源接入点越近,影响越明显。

解决间歇性电源并网带来的电压问题,目前采用在接入点较集中的地区安装静止无功补偿器(SVC)等柔性交流输电系统(FACTS)设备,从而减少间歇电源发电功率波对电网电压的影响。通过合理地选择间歇电源接入点及并网容量,并配套储能系统,也有助于改善电压稳定问题。

1.2.4 频率稳定问题

在风电或光伏装机容量较大的地区,其发电功率的波动对电网的频率将产生一定影响,极端情况下往往导致频率严重下降,从而加大调频难度,给系统安全性带来影响。以风力发电为例,各国风电接入系统导则都要求风力发电机组能够在一定的频率范围内正常运行;频率超过一定范围后限制出力运行或延迟一定时间后退出运行,以维持系统的频率稳定;若在风电集中的地区加入储能装置,则可在频率超过一定范围后对风电的出力运行进行适当调整,并保证风电出力在延迟一定的时间后退出运行,给系统的频率调整留有充裕的时间,保证系统的安全性和稳定性。

解决间歇性电源并网带来的频率稳定问题,通常凭靠水利、火力发电机组等充当一次、二次调频发电厂,当间歇电源规模过大时,仅靠现有常规技术将不满足应用需求。而储能系统具有零惯性时间常数的特点,例如电池储能系统(BESS)会完成对成组电池的控制,变流系统(PCS)负责控制电池系统向电网注入和抽出的有功、无功功率,从而实现储能系统在瞬间以额定功率向系统注入或者抽出一定的能量。相比水力发电系统10%额定容量/min和火力发电系统0.5%额定容量/min的调节能力,电池储能系统的瞬间功率调节能力要明显优于传统发电设备。因此用储能系统平滑风力发电这种快速变化的大容量发电系统与常规调峰调频设备相比有很大的优势。储能技术的发展与完善,将辅助网侧调频提供一种新的途径。

1.2.5 供需逆向分布问题

我国陆上风能、太阳能的大规模开发将主要集中在西部、北部等偏远地区,新能源资源与电力需求呈现逆向分布,现有电网的资源配置能力尚难以满足千万千瓦级风电基地大规模、远距离的外送需求。如甘肃酒泉风电基地2010年有550万kW风电并网运行,而2010年甘肃全省统调范围内最大负荷仅为950万kW。随着2015年酒泉千万千瓦风电投产,不仅甘肃电网,即使整个西北电网也

难以消纳这么多间歇性电力,需要高电压、远距离输送到中东部地区。由于风电发展速度非常快,由此带来了大电网投资建设以及相关技术研发尚未跟上风电的发展速度。

由于新能源发电基地的基础信息建设尚不完备,自动化水平不高,而且新能源发电功率预测技术及电网辅助调度支撑技术等研究领域刚刚起步,因此建立能够全面支撑新能源发电调度决策系统的基础条件还不具备。屋顶光伏发电等分布式新能源发展已得到了国家政策的大力支持。目前,尽管国家有太阳能光伏并网相关的技术标准和指导性技术文件,但在保障电网安全稳定运行和电能质量的基础上,如何实现太阳能光伏发电合理有序地接入城市公用电网,开展该方面的研究已迫在眉睫。

1.3 现有风场存在问题

以我国风电规模化发展较为典型的内蒙古地区为例,截至2012年,内蒙古全网投产容量将接近1100万kW,运行容量基本达到了全网容量的20%,已成为电网的主力电源。研究表明,各个风电场出力10min变化在装机容量的20%之内的概率大于95%,而在其装机容量的30%之内的概率超过99%。风电出力10min变化最大330MW。风电场反调峰概率为43.79%,正调峰概率为56.21%。当风电出力达到80%额定值水平时,在进行了约为风电容量30%的额外容性无功补偿的情况下,系统电压水平仍然很低,还需进行大量的容性补偿方能满足运行要求,而风电场无法做到动态调节。为此,内蒙古通常采用夜间拉闸限电的措施来解决风电的反调峰特性。在大量风电场并网后,在电网发生故障的情况下,会出现暂态电压持续跌落最后发生电压崩溃的现象。这种现象在风电场升压站和风电并网点最为严重,如果同时伴随大范围的潮流转移则会引起与风电场电气距离较近的火力发电机组功角失去稳定。这些情况表明,加入大规模储能系统很有必要。

吉林省也是我国风电规模化发展较为典型的一个省份,截至目前风电装机容量已达到140万kW,占吉林省调直调装机容量的12%,吉林省最大负荷的20%,最小负荷的34%。吉林电网运行的现状是:负荷峰谷差大,最大峰谷差约为2000MW。在冬季供热期,由于电网中供热机组装机容量比例大(占总装机容量的54%),备用容量不足,造成负荷高峰时段出力调不上去,低谷时段出力减不下来,负荷高峰时段电网仅有100MW左右旋转备用容量,负荷低谷时段电网基本没有调峰能力。如果风力发电机组大量接入电网,在供热期,特别在低谷

时段, 电网将没有足够的调峰容量来平衡风力发电所引起的大幅度功率波动。白城地区电网位于吉林电网的西北部, 电网结构薄弱, 一方面, 外送电力因 220kV 联络线“卡脖子”已经受到了限制。另一方面, 该地区电网与吉林主网联系薄弱, 随着风电规模的增加, 系统电压水平下降, 送出线路过载问题更加突出, 已经严重影响到系统的安全稳定运行和可靠供电。由于长山热电厂送出断面潮流的增加, 使白城地区电网的系统暂态稳定水平降低。另外, 白城地区内部的白洮电网仅通过两回 220kV 线路与长山热电厂相连, 如果网内的风电场满发, 还存在任一线路发生 $N-1$ 故障跳闸引起剩余线路严重过载的问题。随着风力发电机组大量接入, 电网安全稳定运行面临巨大压力, 迫切需要借助大规模储能系统来缓解这一矛盾。

风电固有的能量密度低、随机性、间歇性特点, 导致其规模化并网危及电网运行的安全稳定, 对电网调频和备用容量规划带来很大挑战, 从而造成目前各大风电场弃风现象严重, 严重影响经济效益。2011 年我国发生了四起典型风力发电机组大规模脱网事故, 造成了我国局部电网频率的较大跌落。甘肃酒泉、河北张家口等地区相继发生频率漂移事故, 频率最低降至 49.815Hz, 几乎接近电力系统安全稳定运行极限, 对电网的可靠稳定运行构成了重大威胁。东北风电具有明显的反调峰特性, 对风电场实施限电, 仅 2010 年东北电网限电量约 900GW·h。2011 年全国风电限电约 15 亿 kW·h。全国各主要风电基地平均限电量占风电总发电量的比重均超过 10% 以上, 黑龙江、吉林等地则超过 20%。

1.4 储能技术作用

储能技术是实现灵活用电, 互动用电的重要基础, 是实现智能化使用能源, 解决能源危机的重要技术发展方向, 也是发展智能电网的重要基础工作。“储”作为电力系统运行的补充环节, 可从时间上有效隔离电能的生产和使用, 彻底颠覆电力系统供需瞬时平衡的执行原则, 将电网的规划、设计、布局、运行管理以及使用等从以功率传输为主转化为以能量传输为主, 给电力系统运行带来革命性的变化, 也将对传统电力起到改善和改良的作用。储能技术目前在电力系统中的应用主要包括电力调峰、提高系统运行稳定性和提高供电质量等。能量存储技术可以提供一种简单的解决电能供需不平衡问题的办法。这种方法在早期的电力系统中已经有所应用, 例如在 19 世纪后期纽约市的直流供电系统中, 为了在夜间将发电机停下来, 采用了铅酸蓄电池为路灯提供照明用电。随着电力技术的发展, 抽水储能电站被用来进行电网的调峰。抽水蓄能电站在夜晚或者周末等电网

负荷较小的时间段,将下游水库的水抽到上游水库,在电网负荷峰值时段,利用上游水库中的水发电,补充峰荷的需求。液流电池可以用于电站调峰和 UPS 等。

储能装置在电网中所发挥的作用主要体现在以下几个方面:

(1) 削峰填谷

储能发挥削峰填谷的作用,改善了电力系统的日负荷率,使发电设备的利用率大大提高,从而提高电网整体的运行效率。电力生产过程的连续性,要求发、输、变、配电和用电在同一瞬间完成,因此发电、供电、用电之间必须随时保持平衡,而且电力系统必须有一定的发电备用容量。电力的需求在白天和黑夜、不同季节间存在巨大的峰谷差,从建设成本资源保护的角度出发,通过新增发输配电设备来满足高峰负荷的需求变得越来越困难,用户对供电的可靠性和调峰的要求也越来越高。如今,丰富的可再生能源和分布式资源却得到越来越多的应用,这些特点使得分散的储能系统的重要性日益增加。如果能够建立起既经济反应又快速的调峰电站和大规模储能系统,那么可以将低谷电能转化为高峰电能,这是实现发电和用电间解耦及负荷调节的有效途径,也是电力工业市场化的前提。同时,还可以减少电网对发电设备的投资,提高电力设备的使用率,减小线路损耗,提高供电可靠性,创造巨大的经济效益和社会效益。

(2) 提供应急电源,提高可靠性,改善电能质量

在发生突发事故和电网崩溃时,为防止医院、消防、通信、银行等重要负荷区电力中断,储能设备将充当不间断电源/应急电源,可为电网恢复争取时间,避免损失扩大。同时,可以借助于电力电子变流技术,实现高效的有功功率调节和无功控制,快速平衡系统中由于各种原因产生的不平衡功率,减小扰动对电网的冲击,改善用户电能质量。对于供电紧张的电力系统来说,分布式储能系统可以有三种方式来实现可靠供电:①电能存储系统可作为电网应急备用电源迅速投入运行,从而提高供电可靠性;②将对供电负荷需求从峰值时刻转移到负荷低谷时刻;③在强制停电或供电中断的情况下向用户提供电能。另外,储能系统还可以通过快速的无功调节来稳定供电端的电压质量。

(3) 改善电网特性

将储能设备与先进的电能转换和控制技术相结合,可以实现对电网的快速控制,改善电网的静态和动态特性。受自然条件限制,可再生能源发电具有很大的随机性,直接并入电网会对系统造成一定的冲击,增加系统不稳定的因素。将风能等可再生能源作为储能装置的充电电源,可以为可再生能源的使用提出一个新的思路。储能装置具有转换效率高且动作快速的特点,能够与系统独立进行有功、无功的交换。因此,储能装置可以根据系统负荷变化快速调整出力来稳定系

统频率及减少不必要的联络线功率流动。研究表明,储能装置的投入可以有效改善系统频率,解决旋转备用不足的问题。

(4) 满足可再生能源系统的需要

预计到2020年,我国以风电、光伏发电为代表的可再生能源装机容量在电源占比中将提升至15%。电力系统对发电装置的安全、可靠要求极为严格,而间歇电源自身的随机波动特性,使之很难胜任这一要求,随着电网中间歇式能源占比的逐年上升,电网将面临考验。通过研发高效储能装置及其配套设备,与风电/光伏发电机组容量相匹配,支持充放电状态的迅速切换,确保并网系统的安全稳定已成为可再生能源充分利用的关键。储能技术将在平抑、稳定风能发电或光伏发电的输出功率和提升新能源的利用价值方面具有重要作用。储能技术在间歇性电源领域的应用,涉及装置集成与系统控制、特性归纳与建模仿真、大电网侧布点选择与储容配置,以及应用优化与经济评估等多项关键技术问题。

风力、光伏等可再生能源发电设备的输出功率会随环境因素变化,储能装置可以及时地进行能量的存储和释放,保证供电的持续性和可靠性。应用储能装置是改善发电机输出电压和频率质量的有效途径,同时也增加了分布式发电机组与电网并网运行时的可靠性。

分布式发电系统可以与电网连接,实现向电网的馈电,并可以提供削峰、紧急功率支持等服务。而一些可再生能源分布式发电系统,受环境因素的影响较大,因此无法制订特定的发电规划。如果配置储能装置,就可以在特定的时间提供所需电能,而不必考虑此时发电单元的输出功率,只需按照预先制定的发电规划进行发电。

随着可再生能源应用规模日益增大,利用高效、安全的大规模储能装置改善风电、光伏等间歇性电源的运行特性,提高其并网应用能力已成为业内共识,并已经取得大量成果。目前,国外已有若干大规模储能系统应用的典型范例。

多年来日本一直致力于具有广泛应用价值的大规模储能系统,日本NGK公司是目前世界上能够生产和应用钠硫电池的大规模储能系统厂商代表,它生产的商业电池使用寿命15年,循环寿命2500次(100%深度充放电)、4500次(90%放电条件,是铅酸蓄电池的近10倍),能源转换效率高于83%。根据应用对功率和储能要求的不同,钠硫电池模块可以组合构成大的储能系统。目前在全世界已经开展200多项钠硫电池储能系统示范应用。早在2000年8月到2002年2月,日本NGK公司在日本NEDO(日本新能源与工业技术发展组织)的支持下,将400kW/800kW·h钠硫电池系统与500kW风力发电机组集成,在丈八岛风电场开展并网示范。实验表明,大规模储能系统可以有效持续地控制系统的功