

储能联合可再生能源分布式并网发电关键技术

分布式可再生能源发电是当前储能在电力系统应用的重点领域。对国内外相关示范工程进行介绍,总结了储能在当前分布式发电领域的主要应用功能,包括提高电网对分布式发电的接纳能力,提高配电网供电能力以及融合用户侧多种能源利用需求。提出了储能与分布式可再生能源发电设备一体化、功能多元化和发挥汇聚效应等发展应用趋势,指出以储能作为核心承载的多能互补技术和互动技术将是未来储能在能源互联网中应用的重要体现。

李建林¹ 田立亭¹ 李春来² / 1. 中国电力科学研究院 2. 国网青海电科院



李建林/教授级高工

关键词/Keywords

储能·
分布式发电·
微电网·
示范工程·

随着全球能源短缺和环境污染等问题日益突出,风电、光伏发电等可再生能源发电技术因其清洁、安全、便利和高效等特点,已成为世界各国普遍关注和重点发展的新兴产业。我国可再生能源发电呈现大规模集中开发、远距离送出的局面。“十二五”期间,我国光伏发电和风电发展势头良好。截止2014年底,我国光伏发电累计并网装机容量达到2 805万kW,同比增长60%,其中,光伏电站2 338万kW,分布式光伏发电467万kW,年发电量约为250亿kW·h,同比增长超过200%;在新增容量方面,2014年,我国新增并网光伏发电容量1 060万kW,约占全球新增容量的1/4,其中,新增光伏电站855万kW,分布式光伏发电205万kW。当前,我国是全球风电装机规模第一大国,截止2014年9月,我国风电累计并网容量达到8 497万kW,

同比增长22%,新增并网容量858万kW,全国风电上网电量1 060亿kW·h,同比增长7.6%。

欧洲等发达国家大力发展风电等可再生能源的主要目的是应对气候变暖和减少碳排放,单个风电场大多装机规模较小,除近期集中开发的大规模海上风电场采用高电压远距离输送外,主要是分散接入配电网就地消纳。如德国陆地风电场装机规模较小,基本连接到6~36 kV或110 kV电压等级的配电网,风电场装机容量多小于50 MW,接入110 kV以下配电网规模约占总量的70%;丹麦几乎所有的小型发电机都并入配电网,例如接入20 kV或更低电压等级配电网的风电装机容量约占86.7%;陆上风机一般接入30~60 kV的电网,约占3.1%;大型近海风电场直接并入输电网(132~150 kV),仅占全国风电装机总量的10.3%。

当前,大容量储能技术在可再生能源发电领域中的重要补充作用已基本得到业内认可。利用储能系统的双向功率能力和灵活调节特性可以提高系统对新能源发电的接纳能力。

目前,国内外针对储能在规模化集中式可再生能源发电并网应用中已开展大量研究,而对于分布式接入方式的研究则相对薄弱,两种应用方式实际上在技术需求和实现等方面都具有较大差异。鉴于此,开展储能联合可再生能源分布式并网的能量转换实现机理研究,可以为可再生能源分布式并网提供

国家863高技术基金项目(2014AA052004),国家电网公司项目(储能系统提高电网接纳大规模集中式光伏发电能力的关键技术研究及验证)。

理论依据和技术支撑,有着重要意义。

储能在分布式可再生能源发电中的作用

分布式可再生能源发电是第三次工业革命的重要特征之一,储能作为第三次工业革命的五大支柱技术之一,将在分布式电源的接入、多种能源互联中起到关键作用。大量分布式可再生能源发电接入,可能使配电网的潮流和电压分布发生改变,可再生能源发电的特性对系统的电压稳定、可靠性和电能质量将产生影响^[1-2]。在现有配电网结构和控制水平下,配电网对分布式发电的接纳能力是有限的,主要受到电压分布、故障水平以及设备容量的限制^[3-4]。另外,分布式可再生能源发电的接入,改变了用户侧单一负荷消耗的属性,用户需要与电网进行深入互动,促进本地新能源发电的接入和有效利用。在用户侧,可再生能源发电与用户其他形式用能需求的灵活转换也是实现清洁能源应用的重要课题。应对大量分布式可再生能源发电接入带来的配电网运行管理问题、用户互动需求以及多能源的互补高效利用,需要灵活高效的设备增强配电网的管理能力,使电力供应变得灵活,并满足用户对电能的个性化和互动化需求。储能可为分布式电源接入提供如下重要的支持。

- 1) 增强配电网潮流、电压控制能力,促进配电网对分布式发电的接纳。
- 2) 抑制分布式可再生能源发电的功率波动,减少其对用户电能质量的影响。
- 3) 提供功率和能量调节能力,提高配电设施利用效率,优化资源配置,延缓配电网升级改造。
- 4) 参与微电网能量优化管理,充分利用本地可再生能源发电,实现微电网经济高效运行。
- 5) 在多能源互补和综合利用中,为各类型能源的灵活转换提供媒介。

国内外研究现状

目前,国内外储能在可再生能源发电领域中的研究主要集中于大型风电场、光伏电站以及微电网中,对于储能在提高配电网对分布式发电接

纳能力方面的研究相对较少,主要可以概括为以下三个方面。

1. 储能用于削峰填谷

利用储能调整用电负荷,推迟配电网设备容量升级,提高设备利用率,并利用峰谷电价差获得经济效益。文献[5]研究了基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化,提出了一种基于动态规划的实时修正优化控制策略,可在优化模型中引入充放电次数限制和放电深度限制等非连续约束条件,并通过将电池电量离散化等方法解决含有非连续约束的优化问题;文献[6]研究了用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估,在考虑储能系统充放电平衡约束、循环寿命等因素的基础上,研究了储能技术用于电网负荷削峰填谷的控制策略,并建立了评价储能系统投资经济性的数学模型。

2. 储能用于跟踪分布式可再生能源发电预测出力

分布式可再生能源发电的随机性,增加了配电网潮流和电压控制的难度。储能具有快速充电的特点,因此可以利用储能快速跟踪分布式可再生能源发电预测出力。文献[7]通过分析光伏出力短期预测误差和负荷短期预测误差的概率统计规律和随机过程,利用区间估计方法得出储能设备容量配置函数;文献[8]针对不同天气状况,基于光伏发电的日前预测,利用储能实现光伏发电的经济运行。

3. 储能用于改善电网电能质量

文献[9]探讨了蓄电池/超级电容器混合储能系统的建模与控制问题。将储能系统接入配电网中,通过控制策略双向调节其有功功率和无功功率,达到稳定配电网公共连接点处的电压,并抑制其负载波动的目的,从而改善配电网电能质量;文献[10]提出了以超级电容器作为调节器的储能元件的并联型主电路拓扑结构。采用非隔离型Buck-Boost双向DC/DC变换实现直流电压的转换,应用电压源型变换器实现DC/AC变换。该电能质量调节器可以消除电源电压的暂降、不对称和闪变对负载的影响,在不对称负载时抑制负载

的负序电流对电源的影响。

国内外示范工程

对于储能系统联合分布式可再生能源发电的示范，国外已开展多项示范工程。近年来，国外

储能联合分布式可再生能源发电的主要示范项目如表1所示。

国内在储能结合分布式可再生能源发电，特别是基于电化学储能方面的示范应用进行了大量实践工作，典型示范工程如表2所示。

表1 储能结合分布式可再生能源发电的典型示范工程（国外）

序号	项目	可再生能源发电	储能方式	功率/容量
1	The Zurich（瑞士）	光伏：0.1 MW	锂离子电池	1 MW/30 min
2	Detroit Edison Advanced Implementation of Energy Storage Technologies（美国）	光伏：0.5 MW	锂离子电池	1 MW/2 h
3	Japan – US Collaborative Smart Grid Project（美国）	光伏：1 MW	钠硫电池	1 MW/6 h
4	Shell Point Retirement Village（美国）	光伏	冰蓄冷	4.8 MW/6 h
5	Los Angeles Community College District（美国）	光伏：1 MW	冰蓄冷	4.62 MW/6 h
6	Jeju Island Smart Grid Project（韩国）	风电	钒液流电池	0.1 MW/2 h
		光伏		
		柴油发电机		
7	Kasai Green Energy Park（日本）	光伏：1 MW	锂离子电池	1.5 MW/1 h
8	Battelle Memorial Institute Pacific Northwest Division（美国）	光伏	锂离子电池	5 MW/15 min
9	Nice Grid（法国）	光伏：2.5 MW	锂离子电池	1 MW/30 min
10	Japan Confidential Industrial Customer2 Durathon Battery Project（日本）	光伏	钠氯化镍电池	2 MW/4 h
11	Japan U.S. Island Grid Project（JUMP Smart Maui）（美国）	风电：72 MW	铅酸电池	1 MW/6 h
		光伏		
		生物质能		
12	爱知县（日本）	光伏：330 kW	钠硫储能电池	500 kW
		燃料电池：1 200 kW		
		燃气轮机：130 kW		
13	CESI RICERCA（意大利）	光伏：24 kW	蓄电池	100 kW/160 kW·h
		风电：10 kW	液流电池	42 kW
		生物质能：10 kW	热电池	64 kW
		燃气轮机：150 kW	飞轮	100 kW/30 s
		柴油发电机：7 kW	储能	

表2 储能结合分布式可再生能源发电的典型示范工程（国内）

序号	项目	可再生能源发电	储能方式	功率/容量
1	国电东福山岛风/光/储/柴及海水综合新能源微电网项目	风电：210 kW	铅酸电池	960 kW·h
		光伏：100 kWp		
		柴发：200 kW		
		负荷：240 kW		
		海水淡化：24 kW		
2	中新天津生态城储能示范项目	风电：5 kW	锂离子电池	35 kW × 2 h
		光伏：30 kWp		
		负荷：35 kW		
3	河南分布式光伏发电及微电网运行控制试点工程	光伏：350 kW	锂离子电池	100 kW × 2 h
		负荷：45 kW		

(续)

序号	项目	可再生能源发电	储能方式	功率/容量
4	舟山海岛储能项目	风电: 1 000 kW		
		光伏: 350 kW		
		海流能: 250 kW	超级电容器	200 kW, 120 F
		柴油发电机: 300 kW	锂离子电池	1 MW/500 kW·h
		最大负荷: 2 300~2 365 kW 最小负荷: 1 150~1 375 kW		
5	杭州电子科技大学微电网系统	光伏: 120 kW	超级电容器	100 kW × 2 s
		柴油发电机: 120 kW	铅酸电池	50 kW × 1 h
		负荷: 200 kW		
6	青海玉树杂多线独立光/储微电网项目	光伏: 3 MW	铅酸电池	20 MW·h
7	上海虹桥智能电网项目	光伏: 6.6 MW	钠硫电池	1 MW × 8 h
13	深圳宝清储能电站	—	锂离子电池	规划规模: 10 MW/40 MW·h 已投运: 4 MW/16 MW·h
14	移动式电池储能装置开发及其在季节性负荷侧的应用示范	—	锂离子电池	2套125 kW/250 kW·h 1套125 kW/500 kW·h
15	浙江摘箬山海洋科技示范岛新能源示范项目	风电: 3.4 MW		
		光伏: 500 kW		
		潮汐能: 300 kW	锂离子电池	1 MW/500 kW·h
		柴油发电机: 200 kW		
16	浙江南麂岛风/光/柴/储“分布式发电”综合系统	风电: 1 MW	超级电容器	1 MW
		光伏: 545 kW	锂离子电池	1.5 MW × 3 h
		海流能: 30 kW		
		柴油发电机: 1 600 kW		
17	山东长岛分布式发电及微电网接入控制项目	风电: 62 MW	电池储能系统	1 MW·h
		光伏: 200 kW		
18	未来科技城国电研发楼风/光/储/建筑一体化示范	风电: 1.5 MW	锂离子电池	500 kW × 2 h
		光伏: 2.58 MWp		
19	上海世博园智能电网综合示范工程		钠硫电池	100 kW/800 kW·h
		风电: 139.4 MW	锂离子电池	100 kW
		光伏: 7 MW	镍氢电池	100 kW
			全钒液流	10 kW

从国内外应用示范所展示或验证的应用功能来看, 储能的应用主要体现在以下几个方面。

1. 储能提高分布式可再生能源发电接入能力

如日美合作的智能电网项目中利用储能协调优化控制配电网功率潮流, 提升高渗透分布式发电的配电网运行稳定性; 意大利Puglia变电站储能项目, 由于变电站接纳了大量的波动和间歇性新能源发电而导致变压器的反向潮流, 1 MW × 30 min 的锂离子电池用于减少可再生能源发电引起的潮流变化, 使该变电站与上级电网进行可控的能量交换; 韩国济州岛风/光/储/柴联合应用项目, 借助

储能系统双向功率调节能力实现了多能有效互补应用, 提出了相应的协调控制策略; 山东长岛利用储能平滑风电场或光伏出力波动, 抑制可再生能源爬坡率, 提升高渗透分布式发电的配电网端运行稳定性; 浙江东福山岛利用储能平抑风光波动, 提高新能源利用率, 辅助柴油发电机维持微电网稳定, 提升微电网中功率控制和能量管理能力; 位于舟山海岛的风/光/储/海/柴项目配置了多类型储能系统, 包括200 kW/120 F的超级电容器储能与1 MW/500 kW·h的锂离子电池储能, 通过研究多类型储能系统的协调控制策略实现平抑风光功

率波动及负荷调平功能,提升了风电场或光伏电站跟踪日前调度计划能力。

2. 储能提高配电网供电能力的应用

美国夏威夷大学智能电网和能量存储示范项目将1 MW/1 MW·h锂离子电池系统安装于变电站中,用以减少变压器的高峰负荷,并实施分布式电源/储能装置/微电网/不同特性用户(含电动汽车等移动电力用户)接入和统一监控,用以展示配电网自愈控制、储能系统在配电网的协同调度,基于储能相关的关键技术提高用户新型用电能力;深圳宝清电站参与用电侧的峰谷调节,目前已投运4 MW/16 MW·h锂离子电池,可实现配电网侧削峰填谷、调频、调压和孤岛运行等多种应用功能,参与配电侧的峰谷调节,尝试峰谷套利;福建移动式储能参与负荷用电管理,通过参与快速的有功和无功调节,提升用电侧的动态稳定性;中新天津生态城利用储能系统参与用电侧电能管理,将负荷分为不可控负荷、可控负荷和可切负荷,并配以不同功率等级的储能系统,将源-荷有机的整合在一起,使之变为电网中的一个可控单元,满足不同用户的特定需求。通过储能系统使负荷变为友好型用电负荷,提升了用电灵活互动能力,降低了大量分布式电源接入对配电网运行的复杂程度,提升了供电可靠性和供电质量。

3. 储能融合多种用能需求的应用

一些项目中通过热储能或相变储能为用户提供供冷、供热综合服务,如美国亚利桑那州立大学3 MW×6 h的冰蓄冷空调系统;基于车网融合技术(V2G)的理念,日本东京电力公司提出的“BESS SCADA”,对分布在配电网和用户侧的储能单元进行集中的管理和控制,通过对大量储能单元的统一管理和控制,形成大规模的储能能力;我国薛家岛电动汽车工程示范中也基于V2G理念对动力电池的储能能力进行利用,配套建设的集中充电站可同时为360辆乘用车电池充电,在储放功能上,可实现低谷时存储电能,在用电高峰和紧急情况下向电网释放电量,峰谷调节负荷为7 020 kW,最大可达10 520 kW。

储能在分布式可再生能源发电中的发展应用趋势

在国家有关政策的引导下,我国新增新能源发电项目的布局变化较大,风电、光伏发电等的开发方式也不断创新。以风电为例,继华能新能源陕西定边狼尔沟分布式接入风电项目获得成功之后,国家能源局正式批复了中广核哈密分布式接入风电示范项目,贵州、云南等省也陆续上报了分布式接入风电开发规划,预计近期将获得国家能源局的批复。然而,国内关于可再生能源分布式并网应用的科研力度远小于集中接入方式或微电网技术的研究与示范。

对于集中式应用,国家电网公司在2009年底完成了风/光/储示范工程立项,在河北张家口的张北、尚义两个县风电场开始建设国内首个风/光/储示范项目,项目一期工程包括100 MW的风电、40 MW的光伏发电以及20 MW的储能,于2012年3月正式投运。从运行情况看,储能技术能满足光伏发电并网的功能性要求,但储能电池的寿命、安全性以及经济性方面还存在问题。

对于分布式应用,国内高校和研究所也进行了较深入的研究。北京交通大学将蓄电池储能放置于光伏发电系统的直流侧,根据光伏发出的功率和电网反馈的信息,控制储能的能量流,达到功率波动平抑的目标,以此建成了10 kW的光伏储能并网系统;浙江省电力试验研究院从容量渗透率的角度提出利用负荷转移和储能来增强电网对光伏的接纳能力;中国科学院、中国电力科学研究院、浙江电力试验研究院、天津大学、合肥工大和杭州电子科技大学等科研院所均陆续展开了微电网技术研究,取得了系列进展;合肥工业大学光伏系统教育部工程研究中心较早地开展了风/光/柴/蓄复合发电及智能控制系统的研究;位于杭州电子科技大学的国家发展和改革委员会和日本NEDO的国际合作项目“先进稳定的并网光伏发电微电网系统实证研究项目”,是首次在国内建立的以光伏发电为基础的微电网技术综合试验研究平台。

储能的大规模化、长寿命化、高安全化、高

效率化和低成本化是储能技术始终追求的目标,同时,储能技术的发展也将与储能在电网中的应用模式相辅相成,互为促进。随着分布式可再生能源发电的发展以及智能电网的建设,储能技术体现出以下几方面的应用趋势。

1. 储能特性与可再生能源发电自身调节控制特性相结合

利用储能系统的双向功率能力和灵活调节特性,使风电、光伏等新能源发电具有类似于传统电源的频率调节和电压控制能力,提高分布式可再生能源规模化接入与可靠运行能力。

2. 储能系统功能由单一走向多元

储能作用时间可从秒级到小时级,由单一时间尺度功能向多种时间尺度功能过渡,以最大程度发挥储能功效,提高储能应用的经济性。

3. 分布式储能系统促进终端用户用电方式多样化

随着用电需求多样化,不同电压等级以及交直流用户共存,通过储能实现终端用户供用电方式转换以及智能交互。

4. 分散式储能系统汇聚效应进一步发挥

储能系统汇聚效应在电动汽车V2G运行模式已得到初步显现,随着分散式储能系统的推广普及,在新能源接入、用户互动等方面的聚合作用将逐步凸显。

5. 储能支撑多能源高效融合效应日益显现

在多能源互补和综合利用中,储能为各类型能源的灵活转换提供了可能,将在提高用户侧综合能效和减少污染物排放中起到关键作用。

结束语

伴随分布式可再生能源发电的广泛接入,储能系统的作用将由促进可再生能源发电友好接入向以能源互联为导向过渡,并倾向于高效协同管理、统一规划、开展全面研究和技术示范。以分布式可再生能源发电为基础,以储能作为核心承载技术的多能互补、双向互动将展现第三次工业革命的发展愿景。开展储能联合可再生能源分布

式并网的能量转换实现机理研究,对可再生能源分布式并网具有重大的研究价值与实际意义。

参考文献

- [1] 朱星阳,张建华,刘文霞,等.考虑负荷电压静特性的含分布式电源的配电网潮流计算[J].电网技术,2012,36(2):217-223.
- [2] 付学谦,陈皓勇,刘国特,等.分布式电源电能质量综合评估方法[J].中国电机工程学报,2014,34(25):4270-4276.
- [3] Enrico C. Branch current decomposition method for loss allocation in radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3):1170-1179.
- [4] Mao Yiming, Miu K N. Switch placement to improve system reliability for radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(10):1346-1352.
- [5] 鲍冠南,陆超,袁志昌,等.基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J].电力系统自动化,2012,36(12):11-16.
- [6] 修晓青,李建林,惠东.用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J].电力建设,2013,34(2):1-5.
- [7] 林少伯,韩民晓,赵国鹏,等.基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法[J].中国电机工程学报,2013,33(4):25-33.
- [8] Rahman Md H, Yamashiro S. Novel distributed power generating system of PV-ESS using solar energy estimation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(2):358-367.
- [9] 陈奕,张步涵,毛承雄,等.利用混合储能系统改善配电网电能质量的研究[J].湖北工业大学学报,2012,27(1):1-5.
- [10] 王云玲.基于超级电容器储能的电能质量调节器研究[D].武汉:华中科技大学,2007.

(收稿日期:2015-02-10) EA