

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.005

# 复合储能在微网中的应用研究

石晶, 龚康, 刘洋, 王姝

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 微网是接纳分布式能源的有效方式之一, 储能技术应用于微网可以改善电能质量、控制功率平衡、提高运行稳定性以及优化能量管理等。复合储能系统将功率型和能量型储能元件有机结合, 兼具两类储能元件的优点, 可以有效发挥储能技术在微网运行控制中的作用。从复合储能在微网中的应用模式、控制策略以及优化配置三个方面研究其在微网中的应用情况。首先根据储能元件在系统中连接方式的不同, 分析集中式与分布式复合储能的应用模式和适用场合; 然后基于储能单元改善微网运行特性的控制方法, 分析复合储能系统中各储能元件的协调控制以提高系统动态响应特性和运行经济性; 最后分析复合储能在微网中的优化配置问题, 结合复合储能在微网中的运行控制提出其优化配置建议。

**关键词:** 微网; 储能; 复合储能; 协调控制; 优化配置

中图分类号: TM727

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0028-07

## Application of Hybrid Energy Storage System in Micro-grid

SHI Jing, GONG Kang, LIU Yang, WANG Shu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,  
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Micro-grid is the effective way of accommodating distributed generation. Energy storage (ES) system in micro-grid can be contributed to the improvement of power quality, power balance control, operation stability enhancement and optimal energy management. A hybrid energy storage system (HESS) combines the high power density ES unit and the high energy density ES unit efficiently, and has the advantage of both type ES unit, which can be controlled effectively to improve the operation characteristic of micro-grid. In this paper, the application of the HESS in micro-grid was studied from aspects of application mode, control strategies and optimal allocation. Firstly, according to the different connection mode between the ES unit and the system bus, the application of the centralized HESS and the distributed HESS are analyzed. Secondly, based on the control method of ES to improve the operation of micro-grid, the coordination control of ES unit in HESS is summarized. Finally, the issue of optimal allocation of HESS in micro-grid is analyzed. Integrating with the coordination control of HESS, the suggestion for optimal allocation of HESS is proposed.

**Key words:** micro-grid; energy storage system; hybrid energy storage; coordination control; optimal allocation

在能源供给紧张与环境破坏严重的双重压力下, 分布式发电这一既能提高传统能源的利用效率、又能增强对新能源接纳能力的技术得到了越来越多的关注<sup>[1]</sup>。微网通过能量管理系统将区域内的分布式电源、负荷及储能装置等资源有机的整合成

一个自治系统, 极大地提高了微网内的供电可靠性与电能质量, 并实现了对风电、光伏等分布式能源的充分利用, 减小新能源的并网对系统的冲击<sup>[2]</sup>。此外, 微网灵活、可靠的特点还为电动汽车充电站等新型负荷的接入提供了新的思路<sup>[3-4]</sup>。

能量存储技术对于满足微网的基本功能, 实现更大的技术经济效益是十分重要的。微网有并网运行和孤网运行两种模式<sup>[5]</sup>: 在并网模式下, 由大电网支撑微网内的电压和频率, 储能装置则负责平抑微网内新能源发电的波动<sup>[6-7]</sup>以及削峰填谷<sup>[8-9]</sup>;

收稿日期: 2015-4-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107051)

作者简介: 石晶(1980), 女, 河南潢川人, 副教授, 博士, 主要从事电力储能系统应用与控制技术研究(email)shijing@mail.hust.edu.cn。

当大电网发生故障时, 微网脱离大电网孤网运行。由于在并网模式下, 微网内的柴油发电机等电源一般处于停机状态, 故在切换瞬间, 微网内存在一定的功率差额<sup>[10]</sup>, 需要储能装置来补偿差额, 实现微网的平滑切换, 保证重要负荷的供电。而在孤网稳定运行时, 储能装置则作为微网内的可控电源, 对微网的频率、电压进行调控, 保证微网的稳定运行, 提高电能质量。储能装置在微网内工况复杂, 但是, 目前任何一种现有的储能技术都无法满足微网多方面的需求。为满足微网的技术需求, 可以将具有快速响应特性的储能装置和具有大容量储能特性的储能装置联合使用, 协调控制, 从而最大限度地发挥储能技术的性能, 即“多元复合储能”模式, 通过协调控制、合理分配储能装置的出力, 使复合储能系统兼顾了两种储能装置的优点, 并降低了储能装置的使用成本。

本文围绕复合储能系统在微网中应用的技术问题, 根据微网运行的特性, 从复合储能系统在微网中的应用模式, 控制策略以及优化配置等方面进行分析总结。

## 1 不同形式的储能技术基本参数

电能存储形式多样, 按能量形式可分为物理储能和化学储能, 物理储能又可以分为机械储能和电磁场储能。机械储能主要包括抽水蓄能 (pumped hydro storage: PHS), 压缩空气储能 (compressed air energy storage: CAES) 和飞轮储能 (Flywheel: FES)

等; 电磁场储能主要有超导磁储能 (Superconducting magnetic energy storage: SMES), 电容器 (Capacitor: CS) 和超级电容器 (Super-capacitor: SCES) 等; 化学储能主要包括铅酸蓄电池 (Lead-acid batteries), 镍镉电池 (Nickel cadmium batteries: NiCd), 钠硫电池 (Sodium sulphur batteries: NaS), 钠/氯化镍电池 (Sodium nickel chloride battery: ZEBRA), 锂电池 (Lithium-ion battery: Li-ion), 钒液流电池 (vanadium redox battery: VRB), 锌溴电池 (Zinc Bromine battery: ZnBr), 多硫化物溴电池 (Polysulphide bromide battery: PSB) 等电池储能系统。

抽水储能和压缩空气储能适合用于大容量、长时间的储能, 一般用于大电网的负荷调节等。应用于微网的储能装置应具有小型、高效、控制灵活的特点, 现在正在迅速发展中的有各类电池、电容器、超级电容器、超导磁储能、飞轮等, 表1列出了上述几种储能技术的主要技术参数<sup>[11-12]</sup>。

从上表中所列储能的技术特性, 可以把储能分为能量型和功率型两类。能量型储能能量密度大、容量高, 主要包括电池类储能, 但响应速度相对较慢、循环寿命小, 一般用于微网能量管理或紧急备用电源等; 功率型储能功率密度大、响应速度快, 但能量密度小, 主要包括电容类、超导磁储能和飞轮储能等。按现在的技术水平, 飞轮、超级电容器、超导磁储能的成本均较高, 要实现大容量在技术上也有一定的困难, 主要适用于微网中的动态功率补偿以平滑功率、稳定电压或作为短时间的紧急

表1 不同形式的储能技术基本参数

Table 1 General Parameters of Different Energy Storage Technologies

储能元件	额定功率/MW	放电时间	自放电率/d	放电持续时间	费用/(k\$/kW·h)	充放电次数/次	寿命/a	发展阶段		
电池类	Lead-acid	0~20	秒~小时	0.1%~0.3%	分钟~天	0.2~0.4	500~1 000	5~15	成熟	
	NiCd	0~40	秒~小时	0.2%~0.6%	分钟~天	0.8~1.5	2 000~5 000	10~20	商业化	
	Li-ion	0~0.1	分钟~小时	0.1%~0.3%	分钟~天	0.6~2.5	1 000~10 000+	5~15	商业化	
	NaS	0.05~8	秒~小时	约20%	秒~小时	0.3~0.5	2 500	10~15	商业化	
	ZEBRA	0~0.3	秒~小时	约15%	秒~小时	0.1~0.2	2 500+	10~14	商业化	
	液流电池	VRB	0.03~3	秒~10 小时	小	小时~月	0.15~1	12 000+	5~10	示范运行
	ZnBr	0.05~2	秒~10 小时	小	小时~月	0.15~1	2 000+	5~10	示范运行	
	PSB	1~15	秒~10 小时	小	小时~月	0.15~1	2 000	5~10	示范运行	
	电容	CS	0~0.05	毫秒~60 分钟	40%	秒~小时	0.5~1	50 000+	~5	商业化
SCES		0~0.3	毫秒~60 分钟	20%~40%	秒~小时	0.300~2	100 000+	20+	示范运行	
SMES		0.1~10	毫秒~8 秒	10%~15%	分钟~小时	0.1~10	100 000+	20+	示范运行	
FES	0~0.25	毫秒~15 分钟	100%	秒~分钟	1~5	20 000+	~15	商业化		

备用电源。此外，VRB、ZnBr、PSB 自放电率很低，可用于长时间(小时~月)能量存储。

## 2 复合储能能在微网中的应用模式

### 2.1 微网分层控制

为了能够与现有电力系统友好地融合，微网的正常运行需要在通信网络的支撑下通过以下3个层次控制系统间的协调合作：(1)配电网控制器；(2)微网中央控制器；(3)单元控制器，包括各个DER单元以及负荷的就地控制器。配电网控制器实现主网配网级别的调度功能。微网中央控制器是主网与微网间的接口，一方面与上层控制器交互信息，一方面与下层各单元控制器交互信息。微网的分层控制器结构如图1所示。微网中央控制器需要综合考虑运行状态，计算不同微源和负荷对储能的需求，综合考虑储能元件的配置，进行优化控制，为不同的储能元件发送功率交换指令，达到不同的控制目的。

### 2.2 复合储能的基本结构

目前，复合储能系统最基本的构成方式就是选用能量型储能和功率型储能组合，这样做能够同时满足长时大容量和瞬时大功率的需求。现有的研究成果中，多是将超级电容和蓄电池进行复合，利用它们在技术上的互补特性，提升复合储能系统的整体性能<sup>[13-15]</sup>。根据复合储能系统在微网中的接入方式，可将复合储能系统分为集中式和分布式两种。

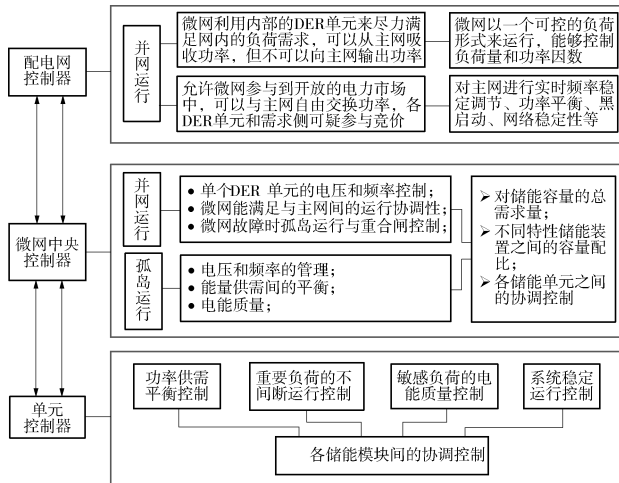


图1 储能在微网中的系统控制方案

Fig. 1 System Control Scheme of Energy Storage In Microgrid

#### 2.2.1 集中式复合储能

集中式复合储能是指将不同类型的储能元件通

过不同的变换器拓扑结构联接到同一直流母线上，并通过DC/AC变流器接于交流母线，DC/AC变流器即可作为不同储能装置向电力系统输出能量的公共通道，如图2所示。

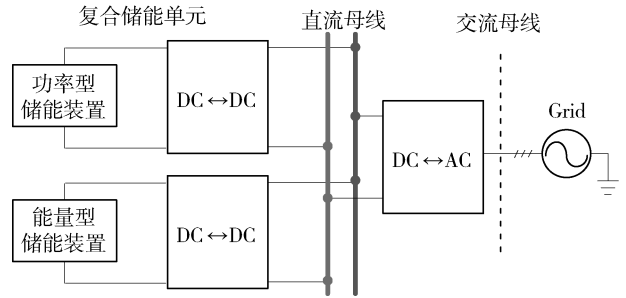


图2 集中式复合储能的拓扑结构图

Fig. 2 Topological Structure Diagram of Centralized HESS

集中式复合储能可通过共同的DC/AC接入电网，接入成本和运行管理成本更低，复合储能的协调控制也更加简单，仅通过单元层的控制就能完成，不需要修改上层的能量管理策略。关于集中式复合储能在微网中应用的研究较多，主要是蓄电池与超级电容的复合<sup>[14-18]</sup>，也有蓄电池与SMES的复合。目前，集中式复合储能系统在微网在并网运行、孤岛运行以及模式切换时的控制策略已有较成熟的研究<sup>[16-18]</sup>。

#### 2.2.2 分布式复合储能

分布式复合储能根据不同应用场合的需求，将不同性能的储能装置安放在不同的位置，可分别通过DC/AC直接接入电网，也可通过风光并网变流器的直流母线接入网，此外，还可以分别组成直流子微网，再通过复合微网中的能量管理系统来进行协调控制，一种简单的分布式复合储能拓扑如图3所示。

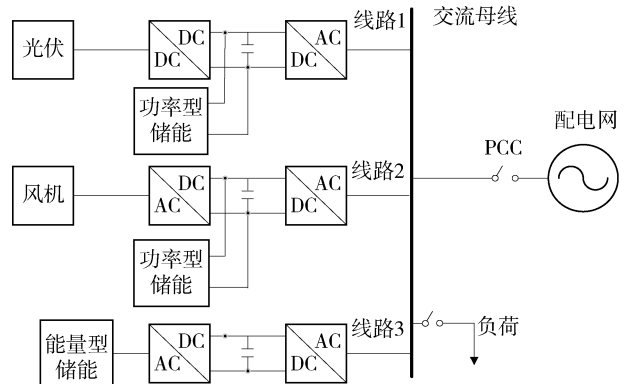


图3 分布式复合储能的拓扑结构图

Fig. 3 Topological Structure Diagram of Distributed HESS

分布式复合储能可在微网中灵活接入, 方便后期扩容, 减小了微网内的网损, 有着更好的响应特性<sup>[19-20]</sup>, 但是增加了接入和管理的成本, 控制策略也更加复杂, 需要微网控制系统中央控制的能量管理系统来进行协调。目前, 对分布式复合储能的研究较少, 文献[19-21]研究了分布式储能的控制策略、参数确定等问题, 其控制策略仍主要是以下垂控制为主的对等控制。但是, 要实现复合储能系统功率协调, 性能互补的目标, 分布式复合储能系统的控制策略需要根据储能装置的性能特点, 提出基于考虑微网内能量管理的分层控制策略<sup>[22]</sup>。

### 3 复合储能的协调控制

正确有效的协调控制不仅能够满足微电网的多重需求, 而且能够充分发挥每一种储能的自身优势, 还能够优化储能的工作区间, 延长其使用寿命。因此, 在进行复合储能协调控制策略设计时, 一般会根据复合储能系统的具体应用情形, 综合考虑储能元件的荷电状态(State of Charge, SoC)以及电池类储能装置的使用寿命, 设计相应的控制策略, 即在不同储能元件之间进行合理的能量流分配, 既满足控制目标, 又达到输出功率的要求<sup>[23-28]</sup>。

微电网中央控制根据具体的运行工况和复合储能元件各自的特点, 对复合储能系统中不同的储能元件进行功率指令分配, 同时确定可再生能源发电系统的工作模式。为了实现可再生能源的最大化利用, 当系统中储能装置的 SoC 未越限时, 让可再生能源发电系统工作在 MPPT 模式, 复合储能系统承担剩余负荷的功率缺额以及平抑可再生能源发电及负荷的功率波动<sup>[29]</sup>。

在进行平抑功率波动情形下, 一般根据功率型储能元件(如超级电容)以及能量型储能元件(如蓄电池)各自的特点, 在复合储能系统中, 按照下述原则进行相应的功率分配<sup>[30-31]</sup>: 功率型储能元件承担微电网中功率波动频率高及幅值较大的功率, 充分发挥其输出功率密度大、响应速度快以及循环使用次数多的优势; 能量型储能元件承担微电网中所需功率的平滑部分, 避免深度充放电, 减少循环充放电次数, 延长储能装置的使用寿命。文献[32-33]从理论上证明了超级电容-蓄电池复合储能系统能够有效发挥储能装置的互补特性, 充分利用储

能装置各自的优点, 提出采用变时间常数的低通滤波算法确定目标功率值, 采用模糊控制进行混合储能的功率优化分配, 仿真结果表明该方法有较好的适应性, 达到了预期的控制效果; 文献[34]提出将蓄电池与超级电容通过两级 DC/DC 变流器联接, 并根据实时风电功率和储能元件的 SoC, 结合专家信息库, 控制储能单元的充放电, 以此缩短充放电控制时间, 并能够延长储能单元的使用寿命; 文献[35]提出了一种基于实时小波的复合储能分时段协调控制算法, 采用两级小波滤波: 基础级小波滤波, 有效保证合成输出满足并网技术指标, 提高级小波滤波, 去除因风功率随机波动以及滤波窗口滚动而产生的噪声, 从而进一步平滑了合成输出; 文献[36]针对用于平抑风电功率波动的复合储能系统, 采用专家知识进行功率分配, 使超级电容和蓄电池各自的优势得到充分的发挥。

文献[37]给出了复合储能系统在微电网运行模式切换中的应用情形。针对微电网由并网运行向非计划孤岛运行切换过程中的功率不平衡问题, 微电网能量管理系统将切换过程分为切换过程中暂态和切换后稳态运行过程。切换中暂态过程中出现的功率缺额通过超级电容的快速响应来填补, 切换后孤岛稳态运行时, 将蓄电池作为主电源, 实现微电网电压/频率的稳定控制。整个过程中, 复合储能系统各储能元件的协调控制是实现平滑切换的关键。

### 4 复合储能在微网中的优化配置

复合储能系统的优化配置是实现微网经济稳定运行的关键: 储能容量或输出功率不足会影响储能功能的实现, 进而导致新能源发电或负荷的损失, 而容量过大则不仅会增加成本, 还会使储能装置长期处于浮充或缺电的状态, 影响储能装置的使用寿命<sup>[38]</sup>。

#### 4.1 配置方法

复合储能系统的优化配置一般可归纳为模型的建立和最优值的求解两部分。

建立模型最主要的是约束条件与目标函数的确定。对于约束条件的确定, 文献[39]以满足分布式能源发电和负荷需求为约束得到了经济性最优的配置方案; 文献[40]提出了基于机会规划约束的配置方法, 得到了微电源补偿后功率波动在一定区间内的置信度与储能系统容量的关系, 为复合储能系统

配置提供了参考；而文献[41]中则提出微网在孤网运行时，满足规定离网运行时间和极端情况的储能系统容量配置方法。对于目标函数的确定，目前主要考虑储能系统的经济性，已有文献分别以储能系统建设运行成本<sup>[42]</sup>、储能系统净现值<sup>[43]</sup>、用户缺电成本<sup>[44]</sup>等指标作为目标函数进行了储能系统容量配置，还有文献辅以可再生能源平滑率<sup>[38]</sup>、网损等技术指标进行了多目标配置。

复合储能系统的配置需考虑分布式发电与负荷的随机性、建设与运营的经济性以及不同储能方式之间的协调配合，这使得复合储能系统的配置成为一个多变量、多约束、多目标的复杂问题。目前主要采用迭代法<sup>[45-47]</sup>和以遗传算法<sup>[40]</sup>、粒子群算法<sup>[48]</sup>为代表的智能算法来求解最优配置方案。其中迭代法算法简单，但是容易陷入局部最优解，而智能算法全局性好、处理多目标问题更为方便，应用更为广泛<sup>[47]</sup>。

#### 4.2 存在的问题

复合储能系统在微网中承担着平抑可再生能源波动、改善电能质量、支撑微网孤岛运行等一系列功能，而不同功能对储能系统的功率需求也各不相同，例如：改善电能质量需要具有快速响应能力的功率输出，但对容量的要求小；而支撑微网孤岛运行则需要大容量的储能。因此复合储能系统的优化配置需要综合考虑各种工况下的需求，而目前的容量配置往往仅考虑单一应用场景，不够全面。

此外，复合储能的优化配置不仅要考虑微网的运行需求，还需要考虑不同储能之间功率与容量的配合，进而得到复合储能系统整体性能和经济性最优的方案。这就需要提出针对复合储能系统整体输出性能的评价指标，并作为复合储能系统配置的目标函数。

### 5 结语

复合储能技术在微电网中的应用研究已经有了一定的积累，本文从复合储能在微网中的应用模式、协调控制策略以及优化配置三个方面进行了总结。提高复合储能系统的整体性能与经济性，进而提升微网的运行效率和稳定性是需要进一步深入研究的课题，具体可以从以下几点展开：

1)从储能元件的选择、复合方式、运行效率和经济性等方面，研究新的复合储能方案，如日本高

能加速器研究所提出的 SMES 和燃料电池复合，液氢不仅作为电池燃料，同时作为 SMES 的制冷剂，降低制冷成本；

2)在多元复合储能协调的基础上，综合考虑复合储能与微电源、微电源与微电源之间的多元协调问题，研究涵盖单元控制器与中央控制器两部分的综合能量管理系统；

3)建立微网运行特性综合评价指标体系，结合复合储能运行及输出特性，提出复合储能整体输出性能评价指标，用于复合储能在微网中的优化配置。

随着分布式能源的发展，电动汽车充电站等新型负荷的接入，对用电质量要求的提高，微网的优势必将进一步的体现出来，同时对微网的技术要求也将变得更加复杂，复合储能将在微网中发挥重要的作用。

#### 参考文献：

- [1] DRIESEN J, KATIRAEI F. Design for Distributed Energy Resources [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 30-40.
- [2] 王成山. 微电网分析和仿真实理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-20.
- [3] 杨爱民, 张晨曦, 文福拴, 等. 微网环境下的电动汽车换电站运营策略 [J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2013, 40(4): 19-26.  
YANG Aimin, ZHANG Chenxi, WEN Fushuan, et al. Operation Strategy for Battery Swapping Stations of Electric Vehicles in Microgrid Environment [J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2013, 40(4): 19-26.
- [4] 苗秩群. 含电动汽车及换电站的微网优化调度研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [5] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.  
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on Microgrid Technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [6] VENU C, RIFFONNEAU Y, BACHA S, et al. Battery Storage System Sizing in Distribution Feeders with Distributed Photovoltaic Systems [C] //IEEE, PowerTech 2009, Bucharest, 2009: 1-5.
- [7] LASSETER R, AKHIL A, MARNAY C, et al. Integration of Distributed Energy Resources: The CERTS Microgrid Concept [J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002: 6-10.
- [8] TAN C W, GREEN T C, HERNANDEZ-ARAMBURO C A. A Stochastic Simulation of Battery Sizing for Demand Shifting and

- Uninterruptible Power Supply Facility [C] //Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2007: 2607-2613.
- [9] CHEN S, GOOI H B, WANG M. Sizing of Energy Storage for Microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 142-151.
- [10] 陈杰, 陈新, 冯志阳, 等. 微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3089-3097.
- CHEN Jie, CHEN Xin, FENG Zhiyang, et al. A Control Strategy of Seamless Transfer Between Grid-connect and Islanding Operation for Microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3089-3097.
- [11] AKINYELE D O, RAYUDU R K. Review of Energy Storage Technologies for Sustainable Power Networks [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014(8): 74-91.
- [12] CHEN H, THANG N C, WEI Y, et al. Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.
- [13] 施啸寒, 王少荣. 蓄电池-超导磁体储能系统平滑间歇性电源出力波动的研究 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 53-58.
- SHI Xiaohan, WANG Shaorong. Power Output Fluctuation Suppression by Hybrid Energy Storage System for Intermittent Source [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 53-58.
- [14] 王兴贵, 王点, 李晓英. 超级电容与蓄电池混合储能对微电网频率稳定性改善研究. 工业仪表与自动化装置, 2014(6): 3-6, 10.
- WANG Xingguo, WANG Dian, LI Xiaoying. Study on the Improvement of Micro Grid's Frequency Stability Based on Battery and Super Capacitor Hybrid Energy Storage [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2014(6): 3-6, 10.
- [15] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
- ZHANG Guojun, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of Hybrid Energy Storage System of Super-capacitors and Batteries in a Microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85-89.
- [16] 李相男. 混合储能技术在微电网中的应用 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [17] 田慧雯, 李咸善, 陈铁, 等. 基于混合储能的光伏微网孤岛运行的综合控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 122-128.
- TIAN Huiwen, LI Xianshan, CHEN Tie, et al. Comprehensive Control Strategy of Hybrid Energy Storage-based Photovoltaic Island Microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 122-128.
- [18] 刘志文, 夏文波, 刘明波. 基于复合储能的微电网运行模式平滑切换控制 [J]. 电网技术, 2013, 37(4): 906-913.
- LIU Zhiwen, XIA Wenbo, LIU Mingbo. Control Method and Strategy for Smooth Switching of Microgrid Operation Modes Based on Complex Energy Storage [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 906-913.
- [19] 邵泓钦. 基于储能装置不同接入方式的微电网控制策略与运行特性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [20] CHEN X, JIN J, XIN Y, et al. Integrated SMES Technology for Modern Power System and Future Smart Grid [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-5.
- [21] 张步涵, 陈奕, 代晓康, 等. 微网中分布式储能系统的控制参数优化方法 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(12): 1-5.
- ZHANG Buhuan, CHEN Yi, DAI Xiaokang, et al. Controller's Parameters Optimization Method of Distributed Energy Storage System in Microgrid [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(12): 1-5.
- [22] 陆晓楠, 孙凯, GUERRERO Josep, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.
- LU Xiaonan, SUN Kai, GUERRERO Josep, et al. DC Hierarchical Control System for Microgrid Applications [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [23] KIM Jongyul, JEON Jinhong, KIM Seulki, et al. Cooperative Control Strategy of Energy Storage System and Microsources for Stabilizing the Microgrid during Islanded Operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3037-3048.
- [24] GUERRERO Josep M, LOH Poh Chiang, LEE Tzunglin, et al. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1263-1270.
- [25] 殷桂梁, 李相男, 郭磊, 等. 混合储能系统在风光互补微电网中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 49-53, 59.
- YIN Guiliang, LI Xiangnan, GUO Lei, et al. Application of Hybrid Energy Storage System on Wind/Solar Hybrid Microgrid [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(1): 49-53, 59.
- [26] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
- ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A Survey of Energy Storage Technology for Micro Grid [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [27] 沈晓彦, 黄钟琪, 周建新, 等. 锂电池在风光发电储能系统中的应用分析 [J]. 电源技术, 2011, 35(5): 602-604.
- SHEN Xiaoyan, HUANG Zhongqi, ZHOU Jianxin, et al. Application of Li-ion Battery in Wind Power and Photovoltaic Power Generation System [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(5): 602-604.

- [28] 唐西胜, 邓卫, 齐智平. 基于储能的微网并网/离网无缝切换技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 279-284.  
Tang Xisheng, Deng Wei, Qi Zhiping. Research on Grid-connected/Islanded Seamless Transition of Microgrid Based on Energy Storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 279-284.
- [29] 燕跃豪, 鲍薇, 李光辉, 等. 基于混合储能的可调度型分布式电源控制策略[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2014, 41(2): 28-35.  
YAN Yuehao, BAO Wei, LI Guanghui, et al. Control Strategy of Dispatchable Distributed Generation Based on Hybrid Energy Storage [J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2014, 41(2): 28-35.
- [30] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8-15.  
LI Bin, BAO Hailong, GUO Li. Strategy of Energy Storage Control for islanded Microgrid with Photovoltaic and Energy Storage System [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 8-15.
- [31] 李介夫, 王光, 李卫国等. 一种利用混合储能系统平抑风光功率波动的控制策略[J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(5): 32-38.  
LI Jiefu, WANG Guang, LI Weiguo, et al. A Control Strategy to Smooth the Power of Wind and Photovoltaic Generation with Hybrid Storage Systems[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2014, 34(5): 32-38.
- [32] DOUGAL R A, LIU S, WHITE R E. Power and Life Extension of Battery-ultracapacitor Hybrids [J]. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 2002, 25(1): 120-131.
- [33] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.  
DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A Control Strategy for Hybrid Storage Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.
- [34] 于芑, 周玮, 孙辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 127-133.  
YU Peng, ZHOU Wei, SUN Hui, et al. Hybrid Energy Storage System and Control System Design for Wind Power Balancing [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 127-133.
- [35] JIANG Q, HONG H. Wavelet-based Capacity Configuration and Coordinated Control of Hybrid Energy Storage System for Smoothing Out Wind Power Fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [36] ABBEY C, STRUNZ K, JOÓŠ G. A Knowledge-based Approach for Control of Two-level Energy Storage for Wind Energy Systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 539-547.
- [37] 王子冰. 一种复合储能系统的改进控制方法. 电子科技, 2014, 27(11): 146-150, 153.  
WANG Zibing. Improved Control Method for Composite Energy Storage System [J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(11): 146-150, 153.
- [38] NAVID Eghtedarpour, EBRAHIM Farjah. Power Control and Management in a Hybrid AC/DC Microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [39] 谭兴国. 微电网复合储能柔性控制技术与容量优化配置[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [40] 钟永. 微电网储能系统容量优化与控制策略研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2014.
- [41] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.  
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A Chance Constrained Programming Based Optimal Configuration Method of Hybrid Energy Storage System [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [42] 田培根, 肖曦, 丁若星等. 自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 168-173.  
TIAN Peigen, XIAO Xi, DING Ruoxing, et al. A Capacity Method of Composite Energy Storage System in Autonomous Multi-microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 168-173.
- [43] WANG X Y, MAHINDA V D, CHOI S S. Determination of Battery Storage Capacity in Energy Buffer for Wind Farm [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2008, 23(3): 868-878.
- [44] CHACRA F A, BASTARD P, FLEURY G, et al. Impact of Energy Storage Costs on Economical Performance in a Distribution Substation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 684 - 691.
- [45] 颜志敏, 王承民, 连鸿波等. 计及缺电成本的用户侧蓄电池储能系统容量规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 50-54.  
YAN Zhimin, WANG Chengmin, LIAN Hongbo, et al. Capacity Plan of Battery Energy Storage System in User Side Considering Power Outage Cost [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 50-54.
- [46] MERCIER P, CHERKAoui R, OUDALOV A. Optimizing a Battery Energy Storage System for Frequency Control Application in an Isolated Power System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1469-1477.
- [47] 戚艳. 微网广义储能系统协调控制策略及容量优化配置方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [48] 朱向芬. 基于粒子群算法的混合储能系统容量优化配置[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.