

混合储能在风光互补微网中的控制策略

张蕴昕, 孙运全

(中国能源建设集团南京线路器材有限公司电力金具设计研究院, 江苏 南京 210037)

摘要: 在风光互补发电系统组成的微网中, 储能技术的应用占有重要地位, 它可以进一步完善风光互补发电技术, 使系统中各个部分的控制更加合理、有效, 使系统更加稳定、安全, 并且提高了整体使用寿命与经济性。构建了一种应用于风光互补微网中的超级电容器蓄电池混合储能系统, 提出了基于功率外环加电流内环控制的 VSC 控制策略以及基于滑动平均滤波器的 DC/DC 控制策略。利用 Matlab 构建模拟微网并进行仿真, 其验证结果表明基于上述策略的混合储能系统在微网中的应用是合理有效的, 同时超级电容的高功率密度及蓄电池的高能量密度的特点的结合提高了混合储能系统的灵活性与实用性。

关键词: 风光互补; 混合储能; DC/DC 变换器; 滤波技术; 控制技术

Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid

ZHANG Yunxin, SUN Yunquan

(Research Institute of Electric Power Fittings, China Energy Engineering Group Co., Ltd., Nanjing 210037, China)

Abstract: The application of energy storage technology occupies an important position in micro-grid consisted of wind and solar power generation system, and ensures the stability and security of the system and the improvement of the efficiency and life span. A network of hybrid energy storage system is built, and a control strategy of VSC based on current inner loop and power control outer loop and a control strategy of DC / DC based on slip average filter are proposed. An analogy micro-grid by Matlab is built and verified, the result shows that the application is reasonable and effective. At the same time, the combination of the advantage of storage battery in high energy density with that of super capacitor in high power density can improve the flexibility and widen the application fields of the whole system.

Key words: wind-solar hybrid; hybrid energy storage; DC/DC converter; sliding filter; control technologies

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)21-0093-06

0 引言

随着传统能源的日益匮乏和环境污染的日趋严重, 绿色新能源受到了越来越多的关注。而风能与太阳能, 作为两种使用较普遍的绿色新能源, 具有能源充足, 分布广泛, 环保清洁等特点。为了弥补两种能源在季节与气候方面的缺陷, 利用风光互补系统, 针对两者天然的互补性和时空上的匹配性, 将两者相结合, 提高了系统的稳定性与实用性, 提高了对于新能源的利用性^[1]。微网作为风能、太阳能等分布式能源的高级结构形式, 可以将分布式能源、负荷、储能进行有效的结合。它能够与大电网并网运行, 又支持离网孤岛运行, 可以将分布式能源的价值充分挖掘, 带给社会足够效益。

储能系统作为风光互补微网必要的能量缓冲

环节, 不仅可以解决微网惯性小、抗干扰能力弱等弊端, 还可以削弱风能、太阳能等分布式能源的间歇性对系统的影响, 从而提高微网的稳定性与可控性^[2]。就常用的储能装置来看, 蓄电池能量密度大, 功率密度小是典型的能量型储能介质; 超级电容器具有功率密度大、循环寿命长、能量密度小、响应速度快等特点, 是典型的功率型储能介质^[3-5]。可见, 单一的储能装置无法同时满足功率与能量两方面的要求, 故此, 文献[6]根据两种储能介质特性上的互补性, 提出了混合储能技术, 并且在理论上对这种互补性进行了验证, 证明了这种方式能够使蓄电池寿命得以延长、系统功率输出得以提高等观点。为加强对储能系统的控制, 充分发挥混合储能系统的作用, 文献[7]中提出了蓄电池组通过双向 DC/DC 变换器与直流母线相连; 超级电容器直接与

直流母线相连的混合储能结构，通过与微网之间的功率交换实现系统的功率平衡及稳定控制。

通过相关研究，本文提出了一种应用于风光互补微网系统的超级电容器蓄电池混合储能结构，并对于该储能单元的控制问题进行研究，提出了基于功率外环加电流内环控制的 VSC 控制策略以及基于滑动平均滤波器的 DC/DC 控制策略。并且在 Matlab 软件与实验平台上，构建了一个包含了该混合储能系统的模拟的风光互补微网系统，并对该混合储能系统在模拟微网中的合理性与有效性进行了验证。

1 基本结构

图 1 为典型的风光互补微网结构。主要组成部分为：异步风力发电单元(主要由风轮机、传动装置、异步发电机和桨距控制系统组成)、光伏单元(主要由光伏阵列、BOOST 电路、LC 滤波器及其控制系统组成)、储能单元(由超级电容器与蓄电池构成混合储能系统)及负荷。同时，微网在公共连接点处通过静态开关连接于配电网。光伏单元与风能单元涉及最大功率点控制问题，在本文中不予赘述，着重研究储能单元在微网系统中的控制策略。混合储能系统单元的存在增大了微网系统的惯性；当微网系统并网运行时，该单元负责吸收系统内多余的能量进行储存；在其独立运行时，该单元可以提高系统的动态响应速度与运行稳定性。

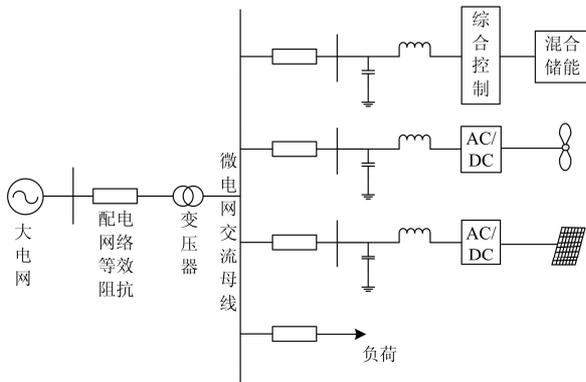


图 1 微网系统结构图

Fig. 1 Structure of micro-grid

本文中混合储能系统^[8-9]所采用的是双极式变流器结构，如图 2 所示。此双极式变流器电路由前级 DC/DC 变换器与后级 DC/AC 变换器组成。其中 DC/DC 变换器允许能量的双向流动，通过 PWM 进行控制，充电时工作于降压模式，放电时工作于升压模式；DC/AC 变换器为三相电源型双向变流器 VSC，并经过 LCL 滤波器连接负载。

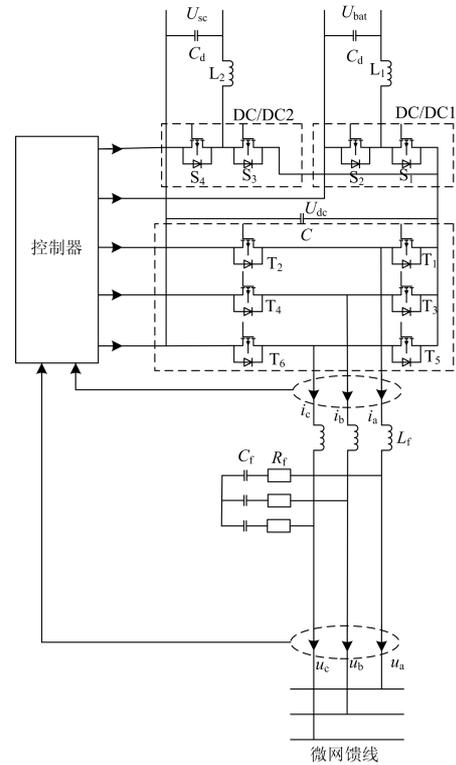


图 2 储能单元结构图

Fig. 2 Structure of energy storage unit

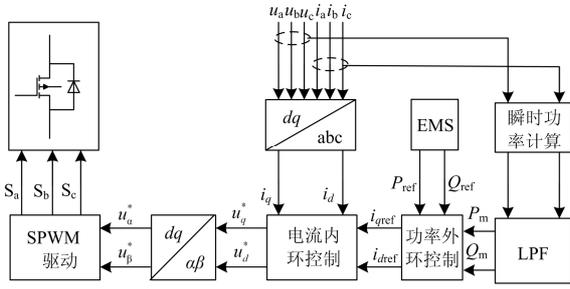
图中， L_f 为滤波电感， C_f 为滤波电容， R_f 为滤波电阻， U_{dc} 为直流母线电压， U_{sc} 为超级电容器电压， U_{bat} 为蓄电池电压， u_a 、 u_b 、 u_c 为滤波电容三相电压， i_a 、 i_b 、 i_c 为滤波电感三相电流。

2 储能单元 VSC 控制

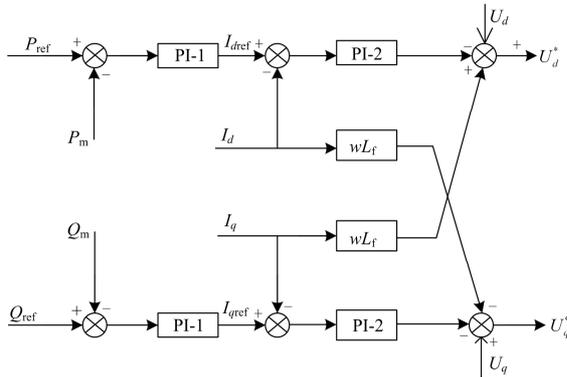
为了促使储能单元可以对吸收和释放电能迅速作出反应，VSC 部分采用功率外环加电流内环控制，提高了调节过程的效率与稳定性，同时实现无差控制，其中结构如图 3 所示。

图 3(a)中，使用瞬时功率计算模块通过测得的滤波电容三相电压 u_a 、 u_b 、 u_c 与滤波电感三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 计算出储能单元的瞬时功率，并且通过低通滤波器 LPF 计算出有功功率 P_m 、 Q_m 。

由微网 EMS(Energy Management System，即电能管理系统)对各单元进行运行控制与调度，发出指令功率 P_{ref} 、 Q_{ref} ，与输入到功率外环控制器的 P_m 、 Q_m 进行比较。由 PI 控制器得到 dq 坐标系下的参考电流 i_{dref} 、 i_{qref} 与测量得到的电流值 i_d 、 i_q 进行比较，并且通过对应的 PI 控制器实现无静差控制。从电流内环输出的信号通过 $dq/\alpha\beta$ 变换后，再通过 SPWM 得到逆变器的控制信号 S_a 、 S_b 、 S_c 。其中电流内环功率外环控制结构具体如图 3(b)所示。



(a) 储能单元综合控制结构图



(b) VSC 控制结构图

图 3 储能单元 VSC 控制结构图

Fig. 3 Control structure of VSC in energy storage unit

3 储能单元 DC/DC 控制

3.1 基于滑动滤波器的能量分配

系统中由 EMS 系统^[10]发出的参考有功功率 P_{ref} 可分为低频与高频两部分，结合超级电容器于蓄电池两种储能装置的特性，可以充分利用超级电容器功率密度大、响应速度快等优势，同时回避其储能容量不足的劣势，控制超级电容器承担 P_{ref} 中波动频繁的部分，相应地由蓄电池承担 P_{ref} 中较为平滑的部分^[11]。这个决策可以减少由频繁充放电引起的小循环充放电现象，从而改善蓄电池的充放电过程，以达到延长蓄电池使用寿命，减少系统的运行成本等目的。

对于滑动滤波器来说，滑动时窗 T 的大小影响滑动滤波的通带宽窄，通过调节 T 的大小可以控制滑动滤波器的滤波效果。

因此，基于滑动平均的低通滤波器进行滤波的方式在此处应用具有一定的优势，当对其滑动时窗 T 进行调节时，对 P_{ref} 中波动频繁部分与平滑部分的区分可以更加灵活，对超级电容器与蓄电池进行的能量分配可以更加合理。

如图 4 所示，利用滑动平均滤波器分配高低频功率，设储能单元所承担功率为 P_{ref} ，在滤波后提供给蓄电池的功率给定值 $P_{bat(ref)}$ ，同时可以得出超

级电容器的给定功率为 $P_{sc(ref)}=P_{ref}-P_{bat(ref)}$ 。通过 Matlab 模拟储能单元承担的总功率 P_{ref} ，如图 5(a)。

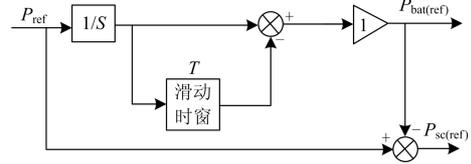
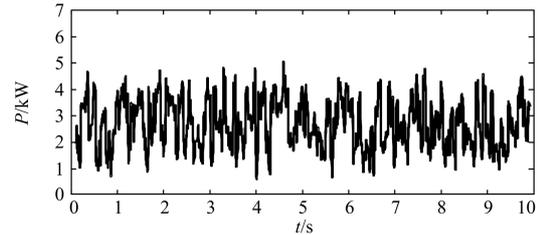


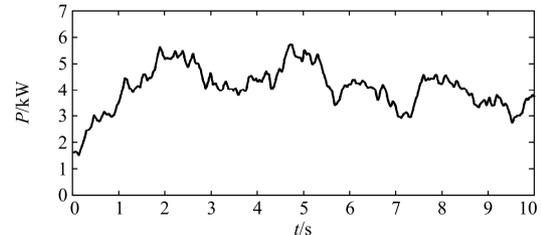
图 4 滑动平均滤波器

Fig. 4 Moving average filter

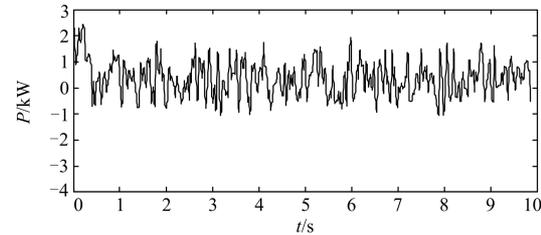
$T=2.0$ 与 $T=3.0$ 时，蓄电池及超级电容所分配的功率如图 5(b)——图 5(e)所示。由此可见， T 越小，滑动滤波器的通带越窄，则 P_{ref} 经过滑动滤波器后所得到的 $P_{sc(ref)}$ 越大、 $P_{bat(ref)}$ 越小，超级电容器所分配的能量越多，蓄电池所分配的能量越少。 T 越大，滑动滤波器的通带越宽，则 P_{ref} 经过滑动滤波器后所得到的 $P_{sc(ref)}$ 越小、 $P_{bat(ref)}$ 越大，超级电容器所分配的能量越少，蓄电池所分配的能量越多。



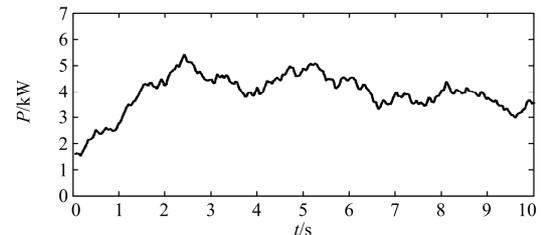
(a) 给定储能单元承担波形



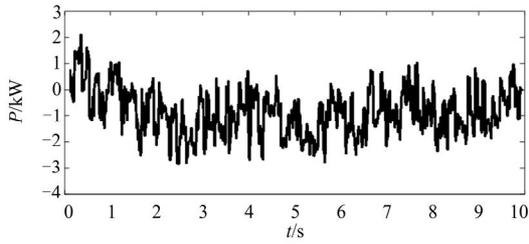
(b) $T=2.0$ 时，蓄电池所分配功率



(c) $T=2.0$ 时，超级电容器所分配功率



(d) $T=3.0$ 时，蓄电池所分配功率



(e) $T=3.0$ 时, 超级电容器所分配功率

图 5 滑动平均滤波仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of moving average filter

蓄电池放电时, 当蓄电池存储能量过多, 此时, 通过增大 T 以达到增大蓄电池释放功率的目的, 同时减小了超级电容器释放功率, 从而使得蓄电池存储能量减少; 当超级电容器与蓄电池之间存储能量均衡时, 即无需调整功率大小, 保持 T 不变; 当蓄电池存储量过小时, 则可以减小 T 从而减小蓄电池释放功率, 利用超级电容器的优势来分担负荷压力。

蓄电池充电时, 当蓄电池存储能量过多, 可以减小 T 从而减小蓄电池的充电功率, 同时增大超级电容器充电功率, 以达到减少蓄电池存储能量的目的; 当超级电容器与蓄电池之间存储能量较为均衡时, 无需调整功率大小, 保持 T 不变; 当蓄电池存储量过小时, 通过增大 T , 达到增大蓄电池充电功率的目的, 同时可以减少超级电容器承担的能量。

3.2 蓄电池储能单元控制策略

为了避免高深度发电给蓄电池带来的损伤, 延长蓄电池的寿命, 在混合储能系统中, 蓄电池主要用于承担发电系统与负载不匹配的低频能量, 其与直流母线的连接结构如图 2 所示, 蓄电池通过 DC/DC 变换器与直流母线相连。文献[12]中, 根据 DC/DC 变换器工作原理提出一种以电流参考值为 $I_{bat(ref)}$ 为控制量的控制策略, 该策略具有算法实现简单, 易于控制等优点。根据上述研究, 本文提出以电感电流为控制变量的变换器控制策略, 如图 6 所示。

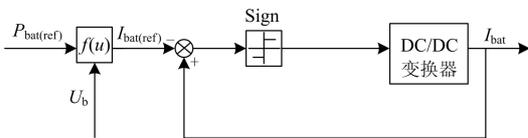


图 6 蓄电池储能单元变换器控制

Fig. 6 Converter control of battery

其中, 通过计算参考功率 $P_{bat(ref)}$ 与实际测量电压 U_{bat} 所得计算电流, 即电感电流参考值 $I_{bat(ref)}$ 。该电流可以通过滑模变结构控制器对变换器的开关信号进行控制, 从而达到控制变化器的目的。由于

滑模变结构控制器本身即为一种开关型控制方法, 所以对于控制变换器的开关信号来说是较为理想。根据滑模变结构的工作原理, 在此储能单元控制中, 可以选取实际电感电流 I_{bat} 为被控量, 建立下切换函数 $S=S_{bat}-I_{bat(ref)}$ (取 $u=sign(S)$ 为约束条件)。

其意义为, 实际电感电流与电感电流参考值的差值经由 $sign$ 函数判断得到控制量 u , 从而控制变换器开关管的通断。

3.3 超级电容器储能单元控制策略

为了弥补单一蓄电池储能的不足, 延长蓄电池寿命, 提高系统的稳定性, 充分利用超级电容器在混合储能系统中发挥的作用, 根据其自身特性, 使其承担发电系统与耗能系统之间的不匹配的高频能量, 由图 2 可知超级电容器与蓄电池一样通过 DC/DC 变换器与直流母线相连, 其变换器控制策略如图 7 所示。

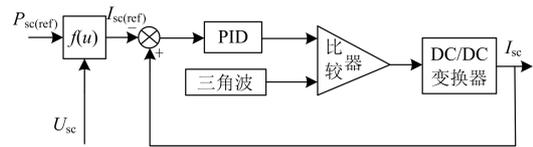


图 7 超级电容器储能单元变换器控制

Fig. 7 Converter control of the super capacitor

通过参考功率 $P_{sc(ref)}$ 与实际电压 U_{sc} 得到计算电流, 即电流参考值 $I_{sc(ref)}$, 并且将其与实际电流 I_{sc} 的差值经 PID 控制器后, 与特定值的重复序列(图为三角波)进行比较运算, 从而得到开关量, 对开关管进行驱动, 达到控制变换器通断的目的。

4 仿真与分析

利用 Matlab/simulink 建立相关控制策略模型, 对本文提出的混合储能系统进行仿真验证。如图 8(a)所示的波形是通过仿真平台模拟的风光互补发电波形, 而负载则是为了实验简化而模拟的一个阶跃负载波形。

(1) 在无波动的阶跃负载下, 蓄电池承担的功率分析。图 8(a)的风光发电系统的输出波形是由仿真软件所模拟的, 由于实验条件限制, 并没有采用实际数据, 只是为了实验效果而模拟的, 代表风光发电系统输出功率。

图 8(b)为仿真平台模拟的阶跃负载功率波形, 此时它较为平稳, 没有波动。图 8(c)表示, 在阶跃负载无波动的情况下, 只有蓄电池参与时, 蓄电池承担的功率波形。

(2) 在有波动的阶跃负载下, 蓄电池承担的功率分析。图 9(a)表示的是, 含有较为剧烈的波动的阶

跃负载功率波形。当阶跃负载发生频繁波动时, 在没有超级电容器加入的情况下, 蓄电池所需承担的功率波形如图 9(b), 可见波形波动频繁, 这对于蓄电池的维护是一种较为不利的情况, 而且由于蓄电

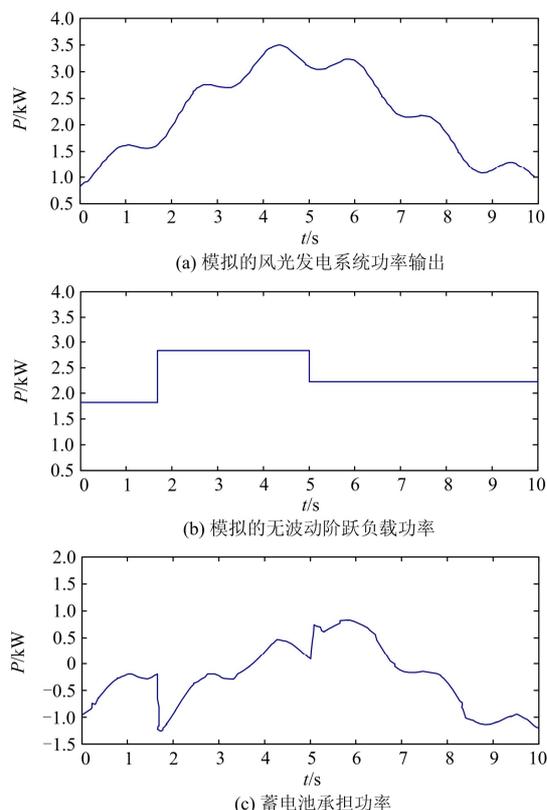


图 8 在无波动的阶跃负载下的功率分析

Fig. 8 Power under the step load without fluctuations

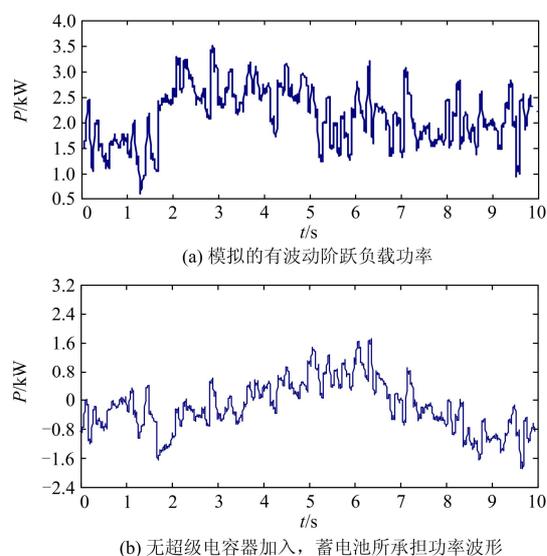


图 9 在有波动的阶跃负载下的功率分析

Fig. 9 Power under the step load with fluctuations

池等效内阻较大, 端电压无法如此频繁起落, 难以实现如此快速的输出功率改变。

(3) 下面展示的则是有波动的阶跃负载下, 超级电容器加入时, 两者承担波形的变化。图 10(a)、图 10(b)是在滑动时窗常数 $T=1.0$ 的情况下, 蓄电池与超级电容器的各自波形, 对比图 9(b)可知超级电容器加入后, 承担了阶跃负载波动频繁的部分, 使得蓄电池分配的功率较为平滑。

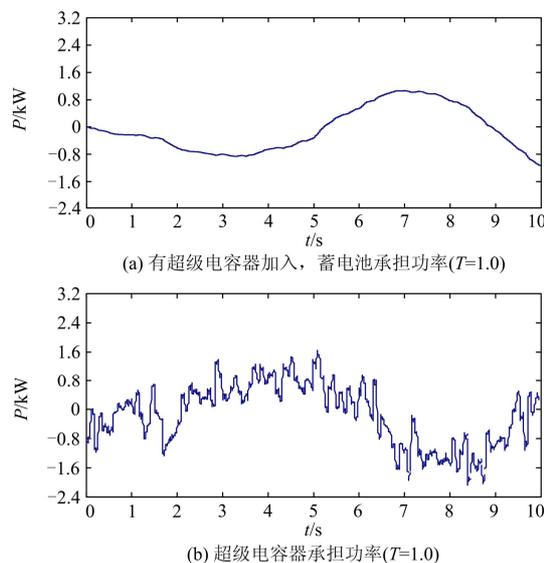


图 10 超级电容器加入后的功率分析

Fig. 10 Power after super capacitor joining in

通过 Matlab 模拟可以得到, 阶跃负载波动频繁时, 混合储能结构的优势与合理性得以体现, 它可以较好地调和系统产生的能量与负荷消耗的能量不匹配所产生的的矛盾, 弥补了系统中供电与耗电部分时间上的差异, 即可以节约电能, 又可以提高系统的稳定性。

因此在超级电容器加入后, 蓄电池的曲线波动变小, 较为平滑, 而超级电容器的曲线则波动较大, 说明超级电容器的高功率密度的特性使其能够对所承担功率的波动较大部分迅速做出反应, 因此有效减少了蓄电池的充放电次数, 延长了蓄电池的使用寿命。由此可见, 采用以滑动平均滤波器为基础构建的混合储能系统各单元的控制结构是有效可行的。

5 结论

本文分析了微网的基本结构及储能系统于其中的作用和两种储能装置的优缺点, 由此构建了由模拟的配电网系统、储能系统、风光互补发电系统及负荷构成的模拟微网系统, 并提出了一种由超级

电容器与蓄电池构成的混合储能系统在其中的应用。通过 Matlab 软件仿真并验证了模拟微网系统中的混合储能结构控制策略的合理性。最终, 经过研究与仿真证明, 结合了蓄电池及超级电容器两种储能技术的优势的混合储能单元于微网中的应用, 可以很好地提高微网的可靠性, 缓解了电量供需的不平衡情况, 提高了电能质量与系统的稳定性和灵活性。同时由于超级电容器的加入分担了波动频繁部分的电量, 减少了蓄电池充放电循环次数, 延长了蓄电池的寿命, 从而提高了系统的经济性。

参考文献

- [1] 计长安, 张秀彬, 赵兴勇, 等. 基于模糊控制的风光互补能源系统[J]. 电工技术学报, 2008, 22(10): 178-184.
JI Changan, ZHANG Xiubin, ZHAO Xingyong, et al. Complementary wind-solar power system based on fuzzy control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 22(10): 178-184.
- [2] 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.
- [3] GAO L, DOUGAL R A, LIU S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultra capacitor hybrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 236-243.
- [4] DOUGAL R A, LIU S, WHITE R E. Power and life extension of battery-ultra capacitor hybrids[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120-131.
- [5] CHAN C C. The state of the art of electric and hybrid vehicles[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(2): 247-275.
- [6] 唐西胜, 武鑫, 齐智平. 超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(2): 178-183.
TANG Xisheng, WU Xin, QI Zhiping. Study on a stand-alone PV system with battery-ultra capacitor hybrid energy storage system[J]. Acta Energetica Sinica, 2007, 28(2): 178-183.
- [7] 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 Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85-89.
- [8] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
ZHANG Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Design of a hybrid energy storage system on leveling off fluctuating power outputs of intermittent sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 24-28.
- [9] 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.
- [10] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.
- [11] 杨琨, 张建成, 周阳, 等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.
YANG Jun, ZHANG Jiancheng, ZHOU Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 38-44.
- [12] 杨海晶, 李朝晖, 石光, 等. 微网孤岛运行下储能控制策略的分析与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(3): 67-71.
YANG Haijing, LI Zhaohui, SHI Guang, et al. Analysis and simulation of energy storage system micro-island operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(3): 67-71.

收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-08-05

作者简介:

张蕴昕(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事分布式发电及储能方面的研究; E-mail: loveandhope@yeah.net

孙运全(1969-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力电子及电力系统方面的研究。

(编辑 周金梅)