

共直流母线光伏-混合储能发电系统及其双重滤波优化控制

高尚¹, 祁新春², 谢涛³, 徐震¹

(1. 国网北京顺义供电公司, 北京 101300; 2. 北京建筑大学, 北京 100044; 3. 北京工商大学, 北京 100048)

摘要: 为降低大容量分布式并网光伏的影响, 对共直流母线的光伏-混合储能发电系统及其优化控制方案进行了研究。首先, 分析了共直流母线并网光伏电站结构。然后, 综合考虑公共连接点处电能质量和储能元件特性, 设计了基于双重滤波的协调控制策略。第一重滤波根据蓄电池荷电状态自适应调节滤波器参数, 调节混合储能输出功率, 平抑并网光伏输出功率波动。第二重滤波根据超级电容荷电状态自适应调节滤波参数, 对两种储能介质进行功率分配, 优先采用超级电容补偿功率偏差, 减少蓄电池充放电次数, 提升混合储能技术经济性。最后, 搭建了基于 ABB Symphony™ Plus 和 Opa1-RTLAB 的硬件在环实验平台。实验证实了上述方法的有效性。

关键词: 优化控制; 双重滤波; 光伏电站; 混合储能系统; 荷电状态

Common DC bus based PV-hybrid energy storage power system and optimal control using double filters

GAO Shang¹, QI Xin-chun², XIE Tao³, XU Zhen¹

(1. State Grid Beijing Shunyi Electric Power Supply Company, Beijing 101300, China; 2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: This paper proposes an optimal control method based on double filters for PV-HES (Hybrid Energy Storage) power system with common DC bus. Firstly, the diagram of common DC bus based PV-HES power system is analyzed. And then, an optimal control method based on double filters is designed considering the power quality of PCC and characteristics of energy storage. The first filter can be adjusted adaptively according to the state of charge (SOC) of battery to level off the fluctuating power outputs of intermittent sources; the second filter, which is used to manage the distribution of load power between battery and supercapacitor, can be adjusted adaptively according to the SOC of supercapacitor. Finally, the real-time platform based on ABB Symphony™ Plus and Opa1-RTLAB is built and the experimental results show the effectiveness of proposed optimal control method.

Key words: optimal control; double filters; PV; hybrid energy storage; state of charge

中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0092-06

0 引言

具有“分散开发、低电压就地接入”的分布式并网光伏与“大规模集中开发、中高压接入”的集中式并网光伏是当前大容量并网光伏的发展方向。其中, 分布式并网光伏处于用户附近, 就近解决用户用电, 减少用户对电网供电的依赖, 降低电网线路损耗, 并且在适当条件下, 如配合储能、微型燃气轮机等其他分布式能源, 结合协调控制策略, 可以脱离电网形成孤网独立运行^[1]。

目前, 大容量并网光伏一般由多个集群组成, 每个集群包括一个或者多个逆变器及其附属光伏阵列。同一集群内, 多个逆变器及其光伏阵列可以共直流母线以提高整个并网光伏的能效和降低发电成

本。但多台逆变器并联后的非理性特性会造成光照不足时系统效率降低、逆变器并网处电能质量恶化等问题^[2]。而从电网的安全稳定运行出发, 要求大容量并网光伏需具备相应的电源特性^[3], 这与并网光伏目前广泛采用的最大功率点跟踪(MPPT)工作模式并不匹配。将储能应用于大容量并网光伏, 可以有效降低并网光伏发电输出功率波动对电网造成的负面影响, 保障光伏发电可靠地并入常规电网, 强化对电网可能提供的附加服务和支撑。

不同储能技术有不同的特点, 尤其在能量密度和功率密度这两个最重要的关键技术指标上, 兼具较高能量密度和较高功率密度的新型储能技术是发展的一个重要方向。将功率型储能器件和能量型储能器件通过功率电路进行组合, 配合协调控制策略,

形成混合储能, 可以使功率型储能器件和能量型储能器件实现优势互补, 提升储能系统的性能, 在解决可再生能源波动等场合具有较高应用价值^[4]。

文献[5]以超级电容器和锂电池组成的混合储能系统为基础, 制定了考虑电网需求和储能元件能量存储与功率吞吐特性的有功功率两级控制策略。文献[6]综合考虑混合储能装置的容量配置、气候条件、负荷状况等因素, 对并网功率削峰填谷, 平抑功率波动。文献[7]采用时间常数随储能系统荷电状态变化的低通滤波算法, 结合模糊控制理论, 抑制了储能介质出现荷电状态越限。文献[8]根据统计特性对风电波动功率进行分解, 依据储能元件各自的储能特性平抑不同类型的波动功率。文献[9]针对平抑间歇式电源发电功率波动的应用需求, 结合多类型储能装置, 设计了基于波动特征参数的协调控制策略, 具有自适应的特征。

本文对共直流母线的光伏-混合储能发电系统及其双重滤波优化控制进行了研究。首先, 对共直流母线并网光伏电站结构进行了分析。然后, 根据电能质量要求设计了第一重滤波算法用于平滑光伏电站并网处输出功率, 使电站具备一定的电源特性。然后, 结合储能元件的荷电状态等因素, 以“超级电容器优先承担功率”为原则, 设计了第二重滤波算法。最后, 在 ABB SymphonyTM Plus 上实现了双重滤波优化算法, 结合 Opal-RTLAB 搭建了硬件在环的实验平台, 验证了共直流母线的光伏-混合储能发电系统及其双重滤波优化算法的有效性。

1 共直流母线的光伏-混合储能发电系统

共直流母线的光伏-混合储能发电系统结构如图 1 所示。系统由光伏阵列及其 DC/DC 变换器组、超级电容器组、蓄电池组以及并网逆变器和变压器组成。其中超级电容器组、蓄电池组分别通过 DC/DC 变换器与共直流母线相连, P_{pv} 、 P_{sc} 、 P_{bat} 为其输出功率, 方向如图 1 所示, P_{out} 为系统并网功率。

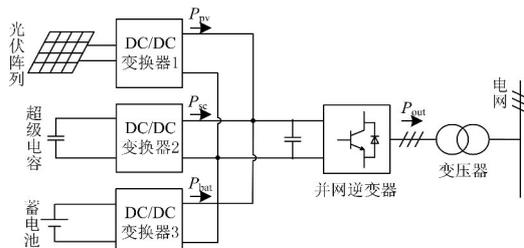


图 1 光伏电站结构

Fig. 1 Structure of photovoltaic station

系统控制结构框图如图 2 所示。内层控制依据所采集的数据, 结合相关运行标准和系统的运行状态, 根据双重滤波优化控制做出发电系统的运行决策, 以控制指令的形式支配外层系统运行。由于内层控制对时效性要求不高, 可以采用分布式控制系统进行实现。

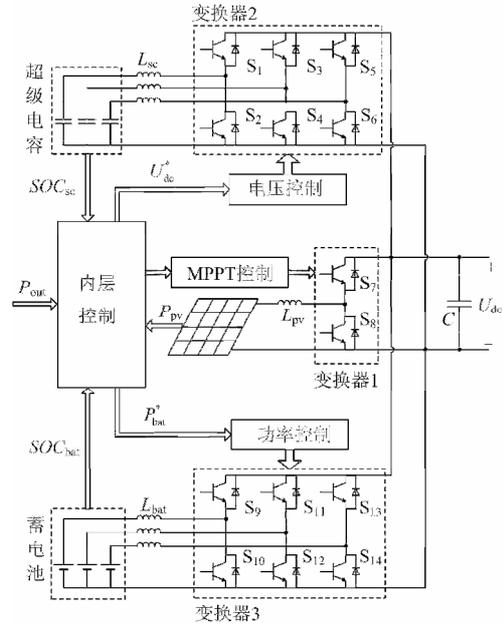


图 2 系统控制结构框图

Fig. 2 Control diagram of the power system

外层控制为各 DC/DC 变换器的控制单元, 根据设定的控制目标对变换器进行调节, 通常采用 DSP 等实现。变换器 1 为 Boost 型拓扑结构, 采用 MPPT 控制, 使光伏阵列以最大功率输出; 变换器 2 和变换器 3 采用三重双向 Buck-Boost 型拓扑结构^[10], 用以减少超级电容及蓄电池并联使用时产生的电流不平衡并提高系统功率传输能力; 其中变换器 3 采用功率控制, 根据内层控制给出的参考值 P_{bat}^* , 补偿功率波动中的低频部分; 变换器 2 采用电压控制^[11], 充分利用超级电容器响应速度快、功率密度高的特点, 在维持母线电压稳定的同时自动补偿功率波动中的高频部分。

2 光伏-混合储能双重滤波控制策略

基于双重滤波的光伏-混合储能发电系统优化控制策略, 一方面需要对并网功率进行控制, 使得光伏-混合储能发电系统具备一定的电源特性; 另一方面需要对储能元件进行功率的优化控制, 根据相应储能元件的荷电状态以及功率流动方向分别调节滤波参数, 在充分利用储能元件特性的基础上, 防止过充过放现象发生。

2.1 并网功率平滑控制

第一重滤波用以改善系统并网功率特性，可以采用一阶低通滤波器，表达式为

$$P_1(k) = P_{pv}(k) \cdot T_1 + P_1(k-1) \cdot (1-T_1) \quad (1)$$

其中： $P_1(k)$ 为第一重滤波输出值； T_1 为该重滤波器参数； $P_1(k-1)$ 为该滤波器上一周期输出值。

将 P_1 作为光伏-混合储能发电系统并网功率，即令 $P_{out}=P_1$ ，因此并网功率是光伏阵列输出功率经过低通滤波后的值，其波动特性将得到改善。调节 T_1 可对功率波动特性进行调节， T_1 减小，滤波器截止频率降低，并网功率趋于平滑； T_1 增大，滤波器截止频率增高，并网功率波动变大。考虑到电网对于光伏电站并网功率波动的相关要求，可以确定 T_1 的最大值 T_{1max} 和最小值 T_{1min} 。

2.2 功率分配

第二重滤波用于实现储能功率在储能元件之间的合理分配，同样对光伏阵列输出功率进行一阶低通滤波，其表达式为

$$P_2(k) = P_{pv}(k) \cdot T_2 + P_2(k-1) \cdot (1-T_2) \quad (2)$$

其中： $P_2(k)$ 为第二重滤波输出值； T_2 为该重滤波器参数； $P_2(k-1)$ 为该滤波器上一周期输出值。

考虑到第二重滤波是在第一重滤波的基础上进行储能元件的功率分配，因此有 $T_2 \geq T_1$ ，即第二重滤波的截止频率高于第一重，其输出中包含更多的高频分量，由于将第一重滤波的输出结果作为系统并网功率，因此两重滤波之间的差值即为所需补偿功率中的低频部分，将此值作为蓄电池补偿功率的给定值：

$$P_{bat}^* = P_1 - P_2 \quad (3)$$

由式(3)可以计算出由超级电容器发出的补偿功率为

$$P_{sc} = P_{out} - P_{pv} - P_{bat} = P_2 - P_{pv} \quad (4)$$

由上述可知，超级电容器承担的功率大小可以通过 T_2 进行调节，蓄电池承担的功率大小可以通过 T_1 进行调节。据此，基于双重滤波的功率分配原理如图 3 所示，其中 LPF1 表示第一重滤波，LPF2 表示第二重滤波。

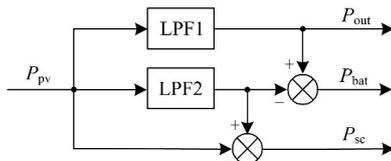


图 3 基于双重滤波的功率分配

Fig. 3 Power distribution based on double filters

2.3 滤波参数调节方法

第二重滤波决定超级电容器的补偿功率，根据超级电容器荷电状态对其滤波参数进行调节；第一重滤波控制储能元件总体补偿功率，其滤波参数依据蓄电池荷电状态进行调节。双重滤波之间相互独立，可分别实现对蓄电池和超级电容器的功率控制。

2.3.1 第二重滤波参数调节

利用超级电容器优先承担储能元件的功率分配，首先根据其荷电状态及功率流动方向对 T_2 进行调节。当 $T_2 = T_1$ 时，两重滤波一致，超级电容器承担所有功率；当 $T_2 = 1$ 时，滤波器失效，超级电容器不承担功率，因此 T_2 的调节范围是 $[T_1, 1]$ 。已知储能元件的总体补偿功率 $P_{hes} = P_{out} - P_{pv}$ ，将储能元件的荷电状态分为五个区域，如图 4。

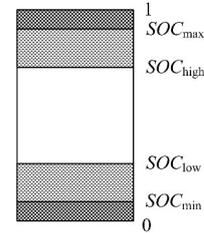


图 4 储能元件荷电状态分区

Fig. 4 Classification of SOC in energy storage

制定滤波参数的调节方法如下：

1) 当 $P_{hes} = 0$ 时，超级电容器既不充电也不放电，系统按光伏阵列输出功率向电网传送功率。

2) 当 $P_{hes} > 0$ 时，超级电容器应处于放电状态， T_2 的调节根据其荷电状态分为以下几种情况：

①若 $0 < SOC_{sc} < SOC_{min}$ ，为防止超级电容器过放现象发生，此时超级电容器只充电不放电，因此 $T_2 = 1$ ；

②若 $SOC_{min} \leq SOC_{sc} < SOC_{low}$ ，此时超级电容器处在放电能力不足，充电能力有余的状态， T_2 的调节与荷电状态成下列关系：

$$T_2 = 1 - \frac{(SOC_{sc} - SOC_{min})(1 - T_1)}{SOC_{low} - SOC_{min}} \quad (5)$$

③若 $SOC_{low} \leq SOC_{sc} < 1$ ，在这三块区域，超级电容器均具有较强的放电能力，此时超级电容器承担储能元件的所有功率，即 $T_2 = T_1$ 。

3) 同理，当 $P_{hes} < 0$ 时，超级电容器处于充电状态，此时 T_2 的调节根据荷电状态也分为以下几种情况：

①若 $0 < SOC_{sc} < SOC_{high}$ ，在这三块区域超级电容器均具有较强的充电能力，因此 $T_2 = T_1$ ；

②若 $SOC_{high} \leq SOC_{sc} < SOC_{max}$ ，在此区域超级

电容器充电能力不足, 放电能力有余, T_2 根据荷电状态按下列规律变化:

$$T_2 = T_1 + \frac{(SOC_{sc} - SOC_{high})(1 - T_1)}{SOC_{max} - SOC_{high}} \quad (6)$$

③若 $SOC_{max} \leq SOC_{sc} < 1$, 为防止超级电容器过充现象发生, 此时应禁止向超级电容器充电, 因此 $T_2 = 1$ 。图 5 为依据上述方法建立的第二重滤波参数调节过程的流程图。

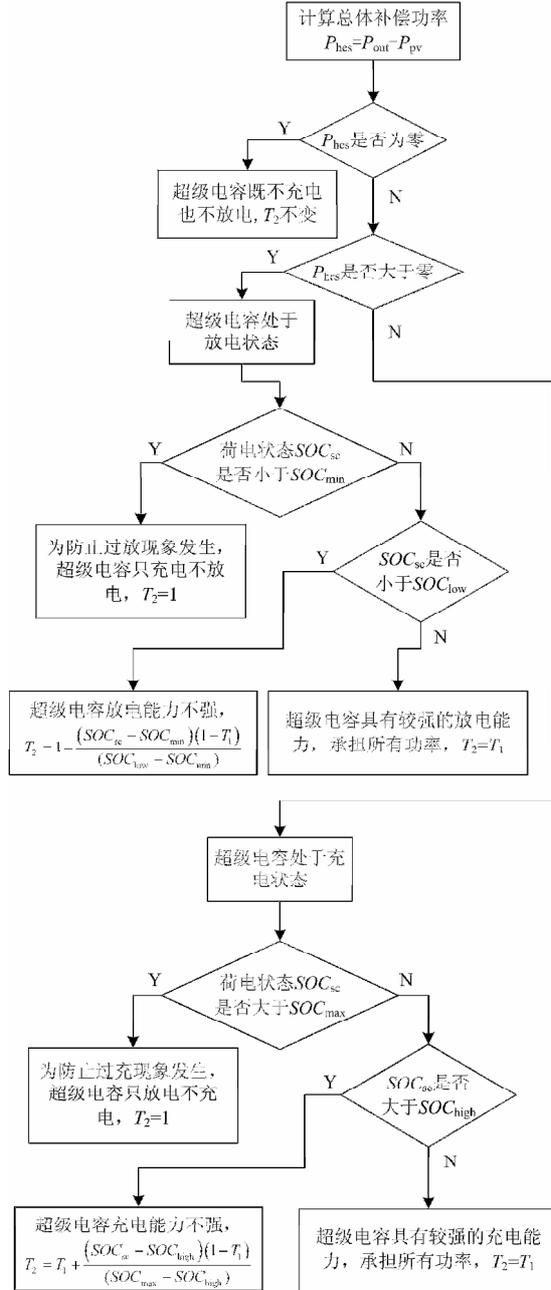


图 5 第二重滤波参数调节过程流程图

Fig. 5 Adjusting flow chart of second filter's parameter

2.3.2 第一重滤波参数调节

第一重滤波用于调节系统并网功率, 也可以用于调节储能元件的总体补偿功率 P_{hes} 。当超级电容器的荷电状态位于区间 $[SOC_{low}, SOC_{high}]$ 之外时, 超级电容器面临充电或放电能力不足的问题, 此时需利用蓄电池补充部分功率。而如果蓄电池持续放电或充电, 其荷电状态也会趋于 0 或 1, 此时需根据蓄电池的荷电状态 SOC_{bat} 调节第一重滤波参数 T_1 , 防止蓄电池发生过充或过放现象。 T_1 的调节过程与 T_2 类似:

1) 当 $P_{hes} = 0$ 时, T_1 不变。

2) 当 $P_{hes} > 0$ 时, 蓄电池处于放电状态, 此时 T_1 的调节根据荷电状态分为以下几种情况:

①若 $0 < SOC_{bat} < SOC_{min}$, 为防止蓄电池过放现象发生, 令 $T_1 = T_{1max}$;

②若 $SOC_{min} \leq SOC_{bat} < SOC_{low}$, 此时蓄电池放电能力不足, T_1 根据其荷电状态按如下规律变化:

$$T_1 = T_{1max} - \frac{(SOC_{bat} - SOC_{min})(T_{1max} - T_{1min})}{(SOC_{low} - SOC_{min})} \quad (7)$$

③若 $SOC_{low} \leq SOC_{bat} < 1$, 在这三个区域, 蓄电池均具有较强的放电能力, 因此 $T_1 = T_{1min}$ 。

3) 同上, 当 $P_{hes} < 0$ 时, 蓄电池处于充电状态, 此时对 T_1 的调节分为以下几种情况:

①若 $0 < SOC_{bat} < SOC_{high}$, 在这三个区域蓄电池均具有较强的充电能力, 因此 $T_1 = T_{1min}$;

②若 $SOC_{high} \leq SOC_{bat} < SOC_{max}$, 在此区域蓄电池充电能力不足, T_1 与荷电状态成下列关系:

$$T_1 = T_{1min} + \frac{(SOC_{bat} - SOC_{high})(T_{1max} - T_{1min})}{(SOC_{max} - SOC_{high})} \quad (8)$$

③若 $SOC_{max} \leq SOC_{bat} < 1$, 为避免蓄电池过充现象发生, 此时 $T_1 = T_{1max}$ 。

3 实验与分析

3.1 硬件在环实验平台

为了验证该协调控制策略, 本文搭建了由 ABB SymphonyTM Plus 和 Opal-RTLAB 构成的实时仿真平台。SymphonyTM Plus 是 ABB 推出的分布式控制系统家族中的最新产品, 具有可无缝集成、可扩展等特点, 能够集成工厂范围内的控制系统、智能设备和现场总线^[12]。Opal-RTLAB 可实现模型的硬件在回路实时仿真。本文中, SymphonyTM Plus 用于实现双重滤波的优化控制, RTLAB 用于实现光伏-混合储能发电系统及其外层控制。SymphonyTM Plus 和 RTLAB 之间通过 I/O 信号进行状态变量和控制命令的传递, 实时仿真平台如图 6 所示。

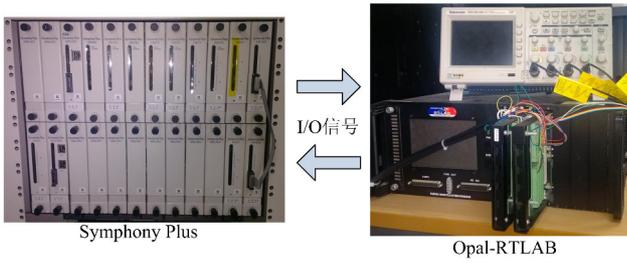


图 6 实时仿真平台

Fig. 6 Real-time simulation platform

表 1 储能元件荷电状态分区

Table 1 Classification of SOC in energy storage

储能类型	初始荷电状态/%	$SOC_{min}/\%$	$SOC_{low}/\%$	$SOC_{high}/\%$	$SOC_{max}/\%$
超级电容	55	20	35	75	90
锂电池	43	25	40	80	95

实验结果如图 7、图 8 和图 9 所示。图 7 为光伏阵列、超级电容器组和锂电池组出力情况波形，从图 7 中可以看出，经过混合储能元件的补偿后，光伏系统的并网功率已经变得较为平滑。其中超级电容器组由于承担功率波动中的高频部分，其输出功率波动较大；锂电池组由于在超级电容器剩余容量充足时不发挥作用，因此其输出功率在部分时段为零。

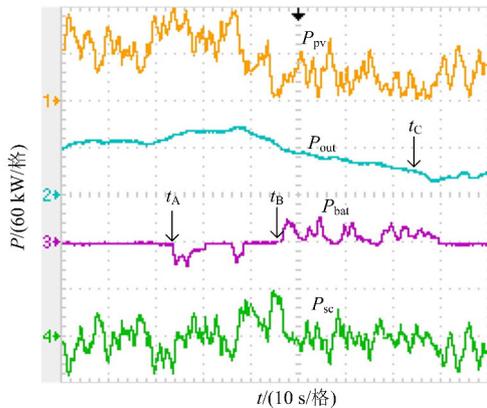


图 7 光伏电站各部分输出功率

Fig. 7 Output power of the photovoltaic station

图 8 和图 9 分别为荷电状态变化波形和滤波参数变化波形，从中可以看出，在 t_A 时刻，超级电容器荷电状态超过 75%，此时为防止超级电容器发生过充现象，调整滤波参数 T_2 ，锂电池开始承担部分充电功率，超级电容器荷电状态上升明显变缓；同样，在 t_B 时刻，由于放电超级电容器荷电状态下降到 35% 以下，此时调整参数 T_2 使锂电池承担部分放电功率；由于储能元件连续放电，在 t_C 时刻，锂电池荷电状态下降到 40% 以下，为防止锂电池发生过

3.2 实验结果与分析

基于上述平台，本文对 120 kW 小型光伏-混合储能发电系统进行了研究，直流母线电压设定为 600 V，DC/DC 变换器开关频率 10 kHz。超级电容器容量为 7.5 F，端电压 400 V；蓄电池组采用锂电池器，容量为 7.5 Ah。实验中取 $T_{1max}=0.001$ ， $T_{1min}=0.00001$ ，内层控制周期 100 ms。超级电容及锂电池的荷电状态分区如表 1 所示。

放现象，此时滤波参数 T_1 开始调整，锂电池放电功率下降，与此同时光伏系统并网功率向下的波动变大。

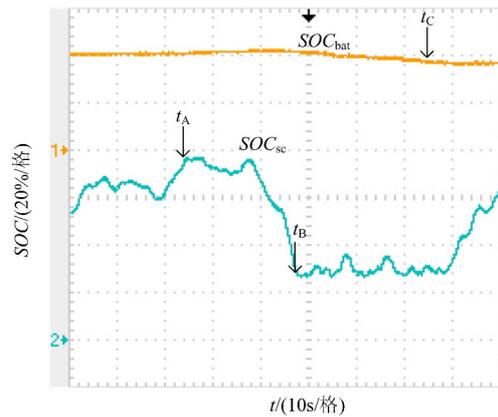


图 8 荷电状态变化波形

Fig. 8 Variation curves of SOC

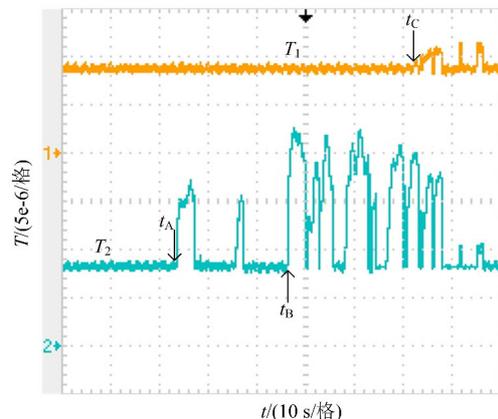


图 9 滤波参数变化波形

Fig. 9 Variation curves of filter factors

4 结论

本文对共直流母线的光伏-混合储能发电系统进行分析并采用双重滤波对其输出功率进行平滑控制, 优先以超级电容器对功率波动进行补偿, 充分发挥其响应速度快的特点, 并延长蓄电池的使用寿命。为防止过充过放现象发生, 本优化控制方案中的相关参数会根据蓄电池和超级电容器的荷电状态进行自适应调整, 并进行两种储能介质之间的功率分配。基于 Symphony™ Plus 和 RTLAB 的实时仿真实验表明, 当超级电容器剩余容量充足时, 蓄电池输出功率为零; 当超级电容器的荷电状态过高或过低时, 蓄电池加入补偿部分功率; 当蓄电池的荷电状态过高或过低时, 调整滤波参数减小储能元件的总体补偿功率。本文所提优化算法易于实现, 具有一定的实用价值, 仿真结果验证了共直流母线光伏-混合储能发电系统及其优化算法的有效性。

参考文献

- [1] 彭思敏, 窦真兰, 凌志斌, 等. 并联型储能系统孤网运行协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 128-134.
PENG Si-min, DOU Zhen-lan, LING Zhi-bin, et al. Cooperative control for parallel-connected battery energy storage system of islanded power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 128-134.
- [2] 李冬辉, 王鹤雄, 朱晓丹, 等. 光伏并网发电系统几个关键问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 208-214.
LI Dong-hui, WANG He-xiong, ZHU Xiao-dan, et al. Research on several critical problems of photovoltaic grid-connected generation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 208-214.
- [3] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定[S]. 2011.
- [4] 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.
- [5] 鲍雪娜, 张建成, 徐明, 等. 基于混合储能的并网光伏电站有功分级控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 115-121.
BAO Xue-na, ZHANG Jian-cheng, XU Ming, et al. Active power hierarchical control strategy of interconnected photovoltaic station based on hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 115-121.
- [6] 张冰冰, 邱晓燕, 刘念, 等. 基于混合储能的光伏波动功率平滑方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 103-109.
ZHANG Bing-bing, QIU Xiao-yan, LIU Nian, et al. Research on the method for balancing fluctuant PV power based on hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 103-109.
- [7] 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 Gen-de, CHEN Zi-nian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.
- [8] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.
YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [9] 张国驹, 陈瑶, 唐西胜, 等. 基于波动特征参数的多类型储能协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 271-276.
ZHANG Guo-ju, CHEN Yao, TANG Xi-sheng, et al. Research on coordinated control strategy of multi-type energy storage based on fluctuation characteristic parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 271-276.
- [10] 王冕, 田野, 李铁民, 等. 应用于储能系统的双向 DC-DC 变换器研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 66-71.
WANG Mian, TIAN Ye, LI Tie-min, et al. Study of bidirectional DC-DC converters applied to energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 66-71.
- [11] 张国驹, 唐西胜, 周龙, 等. 基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
ZHANG Guo-ju, TANG Xi-sheng, ZHOU Long, et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in supercapacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21.
- [12] ABB symphony plus[EB/OL]. [2013-07-09]. <http://www.abb.com/product/us/9aac172067.aspx>.

收稿日期: 2014-01-08; 修回日期: 2014-05-08

作者简介:

高尚 (1985-), 男, 硕士, 主要从事电网调控运行、新能源电力系统方面的工作; E-mail: kakags@163.com

祁新春 (1976-), 男, 博士, 主要从事电力电子变换技术及电力储能系统方向的研究工作;

谢涛 (1978-), 男, 博士, 讲师, 主要从事分布式发电与储能、微电网方向的研究工作。