

DOI: 10.7667/PSPC160291

基于双向 DC/AC 变换器的混合储能系统动态控制策略

王振浩¹, 刘宇男¹, 张明江², 陈继开¹, 张钰¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网黑龙江省电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 针对风电和光伏并网发电系统的功率波动问题, 研究了一种基于双向 DC/AC 变换器的混合储能系统的动态控制策略。对含有超级电容器与蓄电池组的混合储能系统, 通过双闭环控制器对变换器内部的电压电流进行控制, 把波动变化较快的电流分量分配给超级电容器, 由蓄电池来响应波动变化较慢的电流分量。同时, 控制系统将超级电容器的电压稳定在预设范围内。基于扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)对蓄电池的荷电状态(State of Charge, SOC)进行控制, 使其 SOC 值稳定在安全范围内并延长了蓄电池的使用寿命。通过仿真实验, 验证了控制方法的有效性。

关键词: 双向 DC/AC 变换器; 混合储能系统; 动态控制策略; 超级电容; 蓄电池; 扩展卡尔曼滤波

Dynamic control strategy for hybrid energy storage system based on bi-directional DC/AC converters

WANG Zhenhao¹, LIU Yunan¹, ZHANG Mingjiang², CHEN Jikai¹, ZHANG Yu¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: According to the problem of power fluctuation of wind power and photovoltaic connected power generation system, a new dynamic energy control strategy of hybrid energy storage system (HESS) based on bi-directional DC/AC converters is presented. In the HESS composed of batteries and super-capacitor, the two double-loop controllers are used to control the internal voltage and current of the converter, allocating the fast current variations to the super-capacitor while the slow current variations to the batteries. At the same time, the control system maintains the super-capacitor's voltage within a preset range. The Extended Kalman Filter (EKF) is used to control the state of charge (SoC) of battery, making the battery's SOC maintain within the safety limits to prolong its lifetime. The simulation experiment is provided to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by 2015 Science and Technology Project of State Grid Heilongjiang Electric Power Limited Company and Distinguished Youth Talents Cultivation Plan of Jilin Science and Technology Bureau (No. 20156407).

Key words: bi-directional DC/AC converter; hybrid energy storage system; dynamic control strategy; super-capacitor; battery; extended Kalman filter

0 引言

随着可再生能源发电规模的迅速扩大, 并网型风光发电系统将成为一个极具应用前景的课题。然而, 风光发电功率的间歇性和随机性会对电网的运行和电能质量造成不利的影响。储能系统(Energy Storage System, ESS)为分布式可再生能源发电提供

了很多服务和支持, 例如平抑可再生能源间歇性功率波动, 改善电能质量等^[1-3]。除了可再生能源之外, 储能系统对电网也起了很大的帮助, 例如削峰填谷, 提高电力系统稳定性, 保证电力系统安全等^[4-5]。储能系统已经成为了现代电网非常重要的组成部分之一。

与其他储能形式相比, 蓄电池储能技术相对成熟、环境适应性强且便于安装, 一般现有储能系统都基于电池储能搭建。但鉴于电池的功率密度较低, 对平抑功率波动的反应时间较慢, 本文搭建了基于

基金项目: 2015 年国网黑龙江省电力有限公司科技项目; 吉林市科技局杰出青年人才培养计划(20156407)

电池和超级电容的混合储能系统(Hybrid Energy Storage System, HESS), 结合每种储能装置的优点进行合理互补, 并大大提高蓄电池的使用寿命^[6-7]。

对于基于蓄电池-超级电容器相结合的 HESS 应用于可再生能源并网发电, 国内外已经取得了很多研究成果^[8-10]。文献[8]对蓄电池-超级电容器的复合储能系统结构和数学模型进行了试验和分析, 其重点是对该复合储能系统的可行性进行验证, 而对上层控制策略考虑不足。文献[9]研究将蓄电池-超级电容器复合储能系统用于风电机组的功率调控, 其针对构建的复合储能-风电机组系统提出了相应的控制策略, 但上层控制的功率给定值采用一阶滤波方法, 缺少优化且适应性较差。文献[10]提出基于模糊控制的蓄电池-超级电容器复合储能系统控制策略, 其具有较好的适应性, 但其主要偏重于系统层面的功率调控研究, 对于储能系统的结构和底层控制没有讨论。

以上研究在优化 HESS 控制策略方面做了大量的探索, 但在 HESS 的工程应用中, 还需关注控制策略对储能系统运行寿命的影响。本文针对并网型风光储联合发电系统, 在上述研究的基础上, 提出了一种基于 HESS 的风光储联合发电系统动态控制策略。该方案包括 HESS 功率变换器控制和基于扩展卡尔曼滤波对蓄电池荷电状态控制两部分构成。首先对风光储联合发电系统做了简要介绍; 然后对所提出的控制策略中各个部分进行了详细分析; 最后在 Matlab/Simulink 软件上搭建了系统的动态仿真模型, 通过仿真分析, 验证了所提出方案的有效性。

1 风光储发电系统配置

本文所研究的系统中包含了风力发电系统、光伏发电系统、蓄电池模组、超级电容模组、双向 DC/AC 变换器和交流负载, 如图 1 所示。

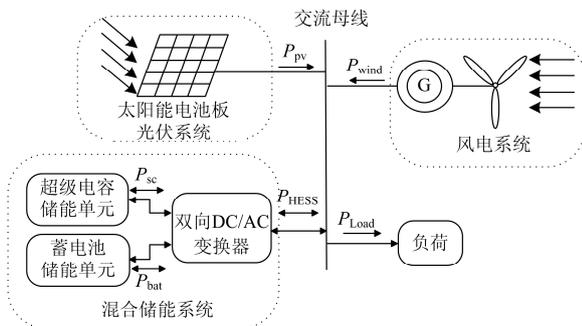


图 1 风光储联合发电系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of wind/PV/HESS system

图 1 中, P_{Wind} 为风力发电输出功率; P_{Pv} 为光

伏发电输出功率; P_{SC} 为超级电容器输出功率; P_{Bat} 为蓄电池输出功率; P_{Load} 为负荷的消耗功率。图中交流母线功率平衡方程为

$$P_{SC} + P_{Bat} = P_{HESS} = P_{Load} - P_{Wind} - P_{PV} \quad (1)$$

即风光发电单元与负荷之间的功率差额由 HESS 来平衡。

2 混合储能系统结构

图 2 所示为 HESS 内部结构图, 图中的蓄电池-超级电容器组成的 HESS 通过双向升压变换器与交流母线相连。

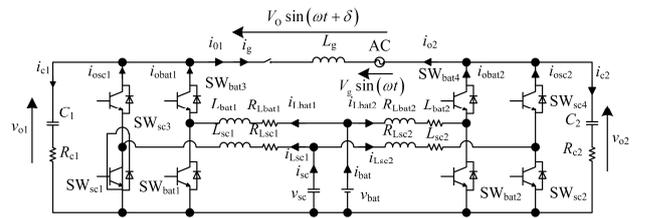


图 2 HESS 内部结构图

Fig. 2 Internal structure of HESS

变换器左侧部分的模型公式为

$$v_{bat} - v_{Lbat1} = (1 - d_{bat1}) v_{o1} \quad (2)$$

$$v_{sc} - v_{Lsc1} = (1 - d_{sc1}) v_{o1} \quad (3)$$

$$i_{c1} + i_{o1} = (1 - d_{bat1}) i_{Lbat1} + (1 - d_{sc1}) i_{Lsc1} \quad (4)$$

式中: v_{o1} 和 i_{c1} 分别为电容 C_1 输出的电压和电流; v_{Lbat1} 和 i_{Lbat1} 分别是电感 L_{bat1} 输出的电压和电流; 电感 L_{sc1} 的电流和电压分别为 i_{Lsc1} 和 v_{Lsc1} ; 蓄电池和超级电容的电压分别为 v_{sc} 和 v_{bat} ; d_{bat1} 和 d_{sc1} 分别是开关 SW_{bat1} 和 SW_{sc1} 的占空比值。下标 1 表示升压变换器的左侧部分, i_{o1} 表示升压变换器左侧部分的输出电流; 下标 2 表示升压变换器的右侧部分, i_{o2} 表示升压变换器右侧部分的输出电流。

电容和电感的微分方程为

$$v_{Lbat1} = R_{Lbat1} i_{Lbat1} + L_{bat1} \frac{di_{Lbat1}}{dt} \quad (5)$$

$$v_{Lsc1} = R_{Lsc1} i_{Lsc1} + L_{sc1} \frac{di_{Lsc1}}{dt} \quad (6)$$

$$i_{c1} + R_{c1} C_1 \frac{di_{c1}}{dt} = C_1 \frac{dv_{o1}}{dt} \quad (7)$$

式中: R_{Lbat1} , R_{Lsc1} 和 R_{c1} 分别为电感 L_{bat1} , L_{sc1} 和电容 C_1 的内阻; HESS 与交流母线相连加了一个电感 L_g ; 在母线和逆变器之间的公共耦合点的电压和电流为 V_g 和 i_g 。

3 控制系统的结构及控制策略

图 3 中所示为 HESS 控制器的总体框图, 其中

下标带有 ref 的都是参考值；下标有 refmod 的是参考设定值。框图中逆变器的作用是提供一个正弦电压 v_o ，它应符合式(8)的参考电压方程式。

$$v_{oref} = V_o \sin(2\pi ft + \delta) \quad (8)$$

式中， V_o 、 f 和 δ 分别为逆变器输出电压的幅值、频率和相角。

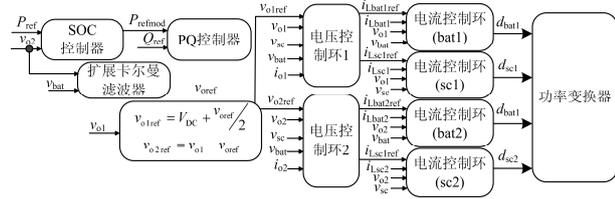


图 3 HESS 控制器总体框图

Fig. 3 Overall block diagram of the controller of HESS

为了得到所需要的差动输出电压，变换器左右两侧需要叠加符合通过电容 C_1 和 C_2 输出的参考电压 v_{o1ref} 和 v_{o2ref} 。

$$v_{o1ref} = V_{DC} + v_{oref} / 2 \quad (9)$$

$$v_{o2ref} = V_{DC} - v_{oref} / 2 \quad (10)$$

$$v_{o2ref} = v_{o1} - v_{oref} \quad (11)$$

图中所示的控制器有两个闭环调节^[11]，每个环路分别包括一个内环电流控制和一个外环电压控制。升压变换器左侧部分的外环电压控制框图如图 4 所示。功率变换器中的测量值，通过 $(1/T_F)$ rad/s 截止频率的低通滤波器来滤波。电压控制环的目的是为了生成用于电流控制环的电流参考信号：1) 保持电容器 C_1 输出的参考电压；2) 把高频的电流变化分量分配给超级电容器；3) 保持超级电容器的电压在一个预设的参考电压值；4) 给蓄电池提供超级电容器的初始充电电流。

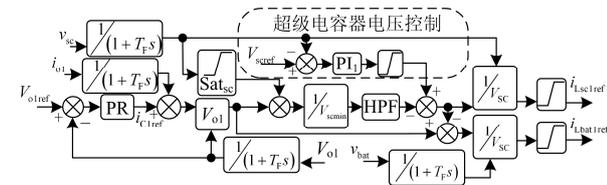


图 4 电压外环控制图

Fig. 4 Diagram of outer voltage loop

电压控制环通过带有传递函数 $H_{PR}(S)$ 的比例谐振控制器(Proportional Resonant, PR)实现，相比于比例积分控制器(Proportional Integral, PI)，它有更好的追踪正弦波的能力。

$$H_{PR}(S) = K_{pPR} + \frac{2sK_{iPR}}{s^2 + \omega^2} \quad (12)$$

式中： K_{pPR} 和 K_{iPR} 是定值； ω 是输出电压的频率。

在 HESS 运行期间，如果超级电容器的电压没有保持在一个参考值，那么超级电容器基本趋于满充或者满放状态，因此，需要加一个 PI 控制器来使超级电容器的电压保持在预设值 v_{scref} 附近。为了超级电容器的能量使用率能达到整个能量的 75%，一般超级电容器的工作电压范围会设定在其额定电压 v_{scmax} 的 50%~100%之间。则超级电容器的参考电压为

$$v_{scref} = \frac{v_{scmax}}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

图 4 中 Sat_{sc} 是一个基于脉动电流控制器的恒定饱和模块，当超级电容器的电压低于预设值 v_{scmin} 时它会给蓄电池提供一个脉动电流。

设计基于 PI 控制器的电流内环控制是为了使 HESS 两侧都可以采用升压变换器的平均持续时间模型。HESS 中的左侧与蓄电池相连的升压变换器部分的内环电流控制框图如图 5 所示。

在图 2 中 HESS 通过一个连接电感与交流母线相连，和蓄电池 SOC 控制器连在一起的、基于 PI 控制器的 PQ 控制策略如图 6 所示。

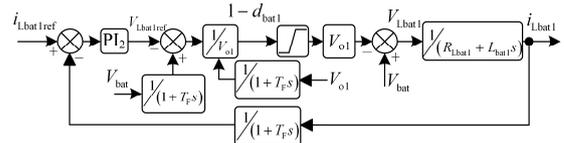


图 5 电流内环控制图

Fig. 5 Diagram of inner current loop

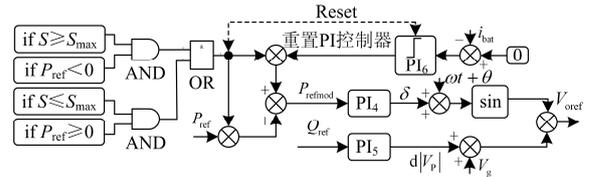


图 6 有功和无功控制器及 SOC 控制器

Fig. 6 Active and reactive controller (PQ controller), and battery SOC controller

4 蓄电池 SOC 的估算与控制

4.1 蓄电池模型

如图 7 所示是一个二阶的 RC 电池模型，其中， E_o 是电池内部开路电压 (Open-Circuit Voltage, OCV)。蓄电池 SOC 的非线性函数可表示为

$$E_o = \mathcal{F}(S) \quad (14)$$

RC 电池模型的离散状态空间模型可以表示为

$$\chi_k = \mathbf{A}\chi_{k-1} + \mathbf{B}i_{batk-1} \quad (15)$$

式中：

$$\chi = [v_{1bat} \ v_{2bat}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-\Delta t}{R_{1bat} C_{1bat}} + 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-\Delta t}{R_{2bat} C_{2bat}} + 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_{1bat}} \\ \frac{\Delta t}{C_{2bat}} \\ -\eta \Delta t \end{bmatrix}$$

其中: R_{0bat} , R_{1bat} , R_{2bat} , C_{1bat} 和 C_{2bat} 是蓄电池的内部参数; $\eta = \frac{1}{3600C_{bat}}$, C_{bat} 是总蓄电池的容量; Δt 是采样时间。

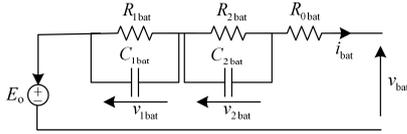


图 7 二阶 RC 电池模型

Fig. 7 Second-order RC battery model

4.2 电池模型参数估计

蓄电池的开路电压与 SOC 之间的关系可以近似成一条单调递增的曲线^[12], 在充电和放电过程中蓄电池的 OCV 曲线是不同的。近似曲线可以表示成一个七阶多项式方程。

$$E_o = \mathcal{F}(S) = \alpha_1 S^7 + \alpha_2 S^6 + \alpha_3 S^5 + \alpha_4 S^4 + \alpha_5 S^3 + \alpha_6 S^2 + \alpha_7 S^1 + \alpha_8 \quad (16)$$

式中: 取 $\alpha_1 = -41.263$; $\alpha_2 = 203.702$; $\alpha_3 = -393.99$; $\alpha_4 = 384.57$; $\alpha_5 = -200.36$; $\alpha_6 = 52.823$; $\alpha_7 = -5.063$; $\alpha_8 = 12.99$ 。

文献[13-14]中通过最小二乘估算法得到 RC 电池模型参数如表 1 所示。

表 1 RC 电池模型估算参数

Table 1 Estimated battery RC model parameters

参数	估算值
R_{0bat}	0.1026 Ω
R_{1bat}	0.063 Ω
R_{2bat}	0.007 Ω
C_{1bat}	1769 F
C_{2bat}	52.4 F

4.3 基于卡尔曼滤波的蓄电池 SOC 估算

卡尔曼滤波是一种高效率的递归滤波器(自回

归滤波器), 它能够以一系列不完全包含噪声的测量, 估计动态系统的状态。但是常规的卡尔曼滤波只适用于线性系统, 而在实际中广泛存在的是非线性状态空间模型, 使得常规卡尔曼滤波的应用存在困难。扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filtering, EKF)是将非线性系统线性化, 与线性卡尔曼滤波公式类似^[15]。EKF 对非线性函数的 Taylor 展开式进行一阶线性化截断, 忽略其余高阶项, 从而将非线性问题转化为线性, 可以将卡尔曼线性滤波算法应用于非线性系统中。这样一来, 解决了非线性问题。

蓄电池的 SOC 表示整个电池容量中可用容量的一个比例, 可定义为

$$S = S_o - \frac{\int_0^t i_{bat}(\tau) d\tau}{3600C_{bat}} \quad (17)$$

式中, S_o 是电池 SOC 的初始值。SOC 值在储能系统运行过程中是十分重要的, 它可以避免电池的过充或过放而导致的危险情况和电池退化问题。

然而, 对电池电流的积分可能会使测量误差累计, 因此不能直接通过式(16)计算电池的 SOC。另外, SOC 计算公式中的初始值可能不是有效值, 因此, 确保 HESS 的稳定运行和控制必须要有可靠的电池 SOC 估算算法。

本文应用了卡尔曼滤波算法来估算电池的 SOC 值, 把 v_{batk} 作为输出量, 电池的状态空间模型可以表示为

$$\mathcal{X}_k = A\mathcal{X}_{k-1} + B i_{batk-1} \quad (18)$$

$$y_k = v_{batk} = E_{ok} - v_{2batk} - i_{batk} R_{0bat} \quad (19)$$

式中: 电池电流 i_{bat} 作为输出量; 电池的测量电压 v_{bat} 作为卡尔曼滤波设计器的测量输出值。

通过式(17)和式(19)可以得到卡尔曼滤波器的测量矩阵 C_k 。

$$C_k = \begin{bmatrix} -1 & -1 & \left. \frac{\partial \mathcal{F}(S)}{\partial S} \right|_{S=S_k} \end{bmatrix} \quad (20)$$

4.4 蓄电池 SOC 控制器

为了消除在系统运行时可能对蓄电池产生的不好影响, 电池 SOC 值应该保持在一个安全的运行范围内。如图 6 所示, HESS 通过电池 SOC 控制器来使其稳定在一个安全运行范围, 其控制策略如表 2。

1) 当蓄电池的 SOC 值小于或者等于最小允许 SOC 值 S_{min} 时, 且当功率参考信号为正或者 0 时蓄电池还处于持续放电的状态, 实际的功率参考信号 P_{ref} 是被忽略的。然后应用 PI 控制器得到一个有功功率的参考信号 P_{refmod} , 来保持整个蓄电池电流为 0。

2) 当 SOC 值大于或者等于最大允许 SOC 值

S_{\max} 时, 并且当功率参考信号为负时, 蓄电池还处于持续充电的过程, SOC 控制器忽略了功率参考信号并且保持电池电流为 0。

表 2 蓄电池 SOC 控制规则

Table 2 Control role of SOC of battery

SOC 实际值 S_0	功率参考信号 P_{ref}	控制模式
$S_0 \leq S_{\min}$	$P_{\text{ref}} \geq 0$	蓄电池停止放电
$S_{\min} < S_0 < S_{\max}$	$P_{\text{ref}} \geq 0$	蓄电池继续放电
$S_{\min} < S_0 < S_{\max}$	$P_{\text{ref}} < 0$	蓄电池继续充电
$S_0 \geq S_{\max}$	$P_{\text{ref}} < 0$	蓄电池停止充电

5 算例仿真分析

为了验证上述控制策略的有效性, 本文在 Matlab/Simulink 软件平台上搭建了如图 2 所示结构的仿真系统, 通过模拟以阶跃变化的功率参考信号和以风电、光伏实测数据为例来观察混合储能装置的电压电流变化情况和 SOC 值的控制情况, 选取风光储发电系统一日典型运行功率数据, 其曲线如图 8 所示。

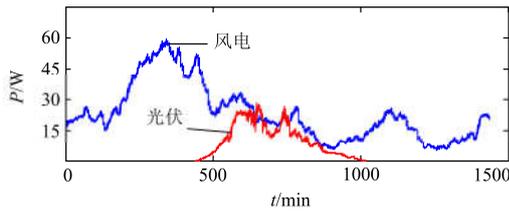


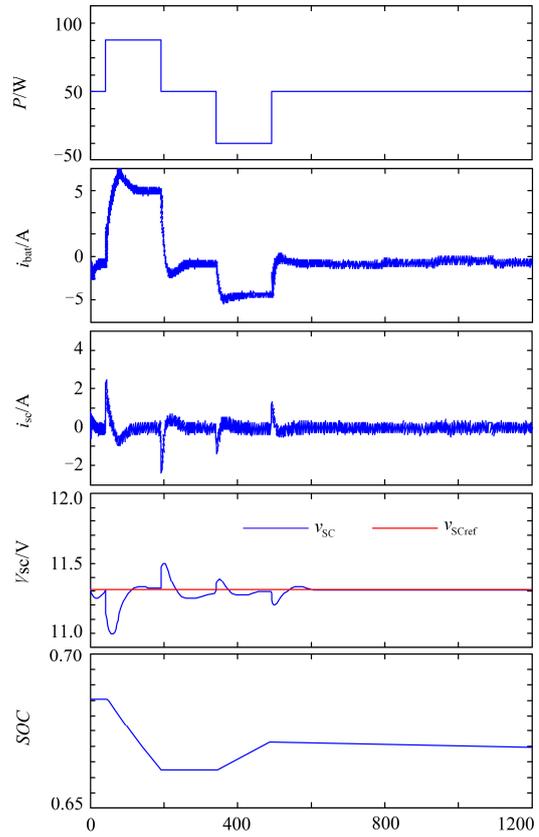
图 8 典型日风电、光伏曲线

Fig. 8 Typical daily curves of wind power and photovoltaic

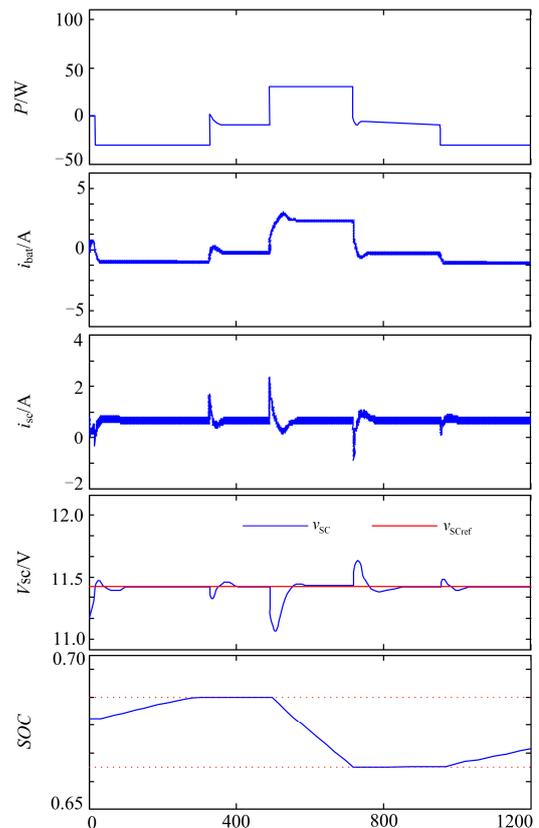
仿真参数: 风电最大出力为 60 W, 光伏最大出力为 30 W, 蓄电池容量为 6.4 Ah, 额定电压为 12.8 V, 超级电容容量为 58 F, 额定电压为 16 V, 电感参数 $L_{\text{bat}1}=L_{\text{bat}2}=1 \text{ mH}$, $L_{\text{sc}1}=L_{\text{sc}2}=210 \mu\text{H}$, 电容参数 $C_1=C_2=60 \mu\text{F}$, 频率 $f=50 \text{ Hz}$, $V_g=40 \text{ V}$, $L_g=20 \text{ mH}$ 。

图 9(a)显示了 HESS 在以阶跃变化的功率参考信号下的运行情况。图中可以发现当功率发生变化时, 超级电容器承担了突变波动的电流, 蓄电池电流逐渐升高分别来提供平均电流分量和超级电容充电电流分量, 提高完所需电流分量之后再使超级电容的电压恢复到参考值, 最后蓄电池电流逐渐降低进而稳定于提供所需的平均输出功率。该仿真实验验证了该控制策略可以让超级电容器快速响应突变波动的电流, 并且保持了超级电容的电压。

图 9(b) 中的功率数据取自图 8 中的风电功率曲线, 持续时间为 20 min, 波动范围为 0~50 W, 蓄电池 SOC 值设定在 0.65~0.7 的情况。图中所示



(a) 超级电容器响应突变波动的电流



(b) 当设定SOC限值时

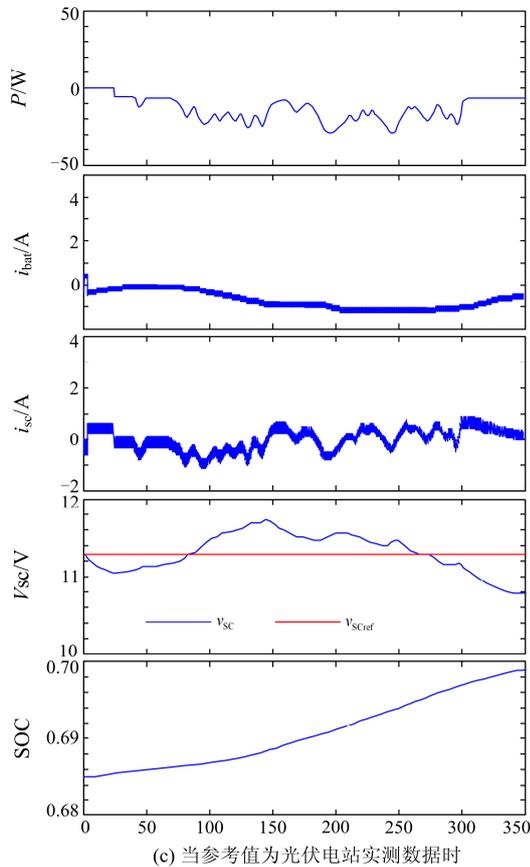


图 9 HESS 的仿真波形

Fig. 9 Experimental simulation waveforms of the HESS

一旦 SOC 值达到最大限值时,通过控制器来重新设定功率参考信号,为了不让 SOC 值超过最大限值,把蓄电池电流保持为 0。然后再让蓄电池放电给交流母线提供有功功率,当 SOC 值趋于最小限值时,功率参考信号被重新设定并把蓄电池电流保持为 0,防止 SOC 值过低。该仿真实验表明了上文中控制策略可以有效提高混合储能新系统的整体动态响应能力,并且有效地控制蓄电池的 SOC 在安全范围内,延长了蓄电池的寿命。

图 9(c)中的功率数据取自图 8 中的光伏功率曲线,持续时间为 20 min,波动范围为 0~30 W。图中所示,超级电容来承担光伏间歇性所引起的电流波动分量,此时蓄电池依靠光伏的平均功率分量来充电。仿真实验表明该控制策略可以有效提供混合储能系统的整体动态响应能力,并且可以有效控制蓄电池的 SOC 在安全范围内,延长蓄电池的使用寿命。

图 10 为储能系统输出功率曲线。由图 10(a)可知,当新能源发电不稳定时,导致母线电压波动,储能系统需要通过充放电来弥补功率波动从而维持系统稳定;然而,储能由于蓄电池本身的限制,输

出功率有限,不能满足稳定运行时的功率需求,导致母线电压与频率的大幅波动;而当采用混合储能时,由于超级电容器的高功率密度特性,大幅度提高了混合储能单元的功率输出能力,有效实现了瞬时功率平衡,提高了运行的稳定性。同时如图 10(b)中所示,单一蓄电池储能设备成本高,充放电速度慢;当超级电容器组参与后,蓄电池组的输出功率变化更加平稳,不仅降低了蓄电池的容量配置,而且明显地减少了蓄电池的充放电次数,有效地优化了蓄电池组的工作状态并且延长了其使用寿命,最终提高了储能系统的经济性。

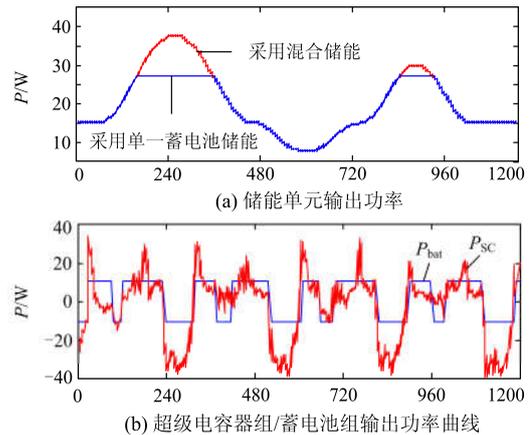


图 10 储能系统输出功率

Fig. 10 Output power of energy storage system

6 结论

本文研究了基于 HESS 的可再生能源发电并网的动态控制策略,方案主要通过对 HESS 与交流母线相连的双向 DC/AC 变换器的动态控制,利用蓄电池与超级电容器的互补特性,让超级电容器优先平抑高频的功率波动分量,给蓄电池留有反应时间。同时为了更好地延长蓄电池的使用寿命,对蓄电池 SOC 进行了控制,以防止蓄电池过充过放情况的发生。通过对 Matlab/Simulink 仿真实验结果的分析,HESS 的有效控制提高了其平抑功率波动的能力,而且验证了混合储能由于单一储能的功率平抑表现,同时还对储能系统进行了有效保护,对大规模可再生能源发电并网有重要的实际意义和工程应用价值。

参考文献

- [1] 汪海蛟, 江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 126-135.

WANG Haijiao, JIANG Quanyuan. An overview of

- control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 126-135.
- [2] 王振浩, 刘金龙, 李国庆, 等. 基于超级电容器储能的并网风电场功率与电压调节技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 113-116.
WANG Zhenhao, LIU Jinlong, LI Guoqing, et al. Power and voltage regulation of wind farm based on EDLC energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 113-116.
- [3] 栗然, 党磊, 周鸿鹤, 等. 基于费用效率法的风电场混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 55-62.
LI Ran, DANG Lei, ZHOU Honghu, et al. Capacity optimization disposition of hybrid energy storage in wind field based on cost efficiency model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 55-62.
- [4] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [5] 刘振宇, 马民, 马辉栋, 等. 阶梯式快速混合储能系统设计及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 69-75.
LIU Zhenyu, MA Min, MA Huidong, et al. Storage system and control strategy research of stepwise and fast storage energy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 69-75.
- [6] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [7] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.
SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 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] 张坤, 黎春渥, 毛承雄, 等. 基于超级电容器-蓄电池复合储能的直驱风力发电系统的功率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 99-108.
ZHANG Kun, LI Chunsheng, MAO Chengxiong, et al. Power control of directly-driven wind generation systems with battery/ultra-capacitor hybrid energy storage[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(25): 99-108.
- [10] 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 energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.
- [11] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 335-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 335-340.
- [12] ABEYWARDANA D B W, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Single phase grid-connected lifepo4 battery-supercapacitor hybrid energy storage system with interleaved boost inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5591-5604.
- [13] TANG Xidong, MAO Xiaofeng, LIN Jian, et al. Li-ion battery parameter estimation for state of charge[C] // American Control Conference, San Francisco, American, 2011: 941-946.
- [14] PLETT G L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: part 1 background[J]. Power Sources, 2004, 134(2): 252-261.
- [15] 于静文, 薛蕙, 温渤婴. 基于卡尔曼滤波的电能质量分析方法综述[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 97-103.
YU Jingwen, XUE Hui, WEN Boying. A survey on Kalman filtering based methods for power quality analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 97-103.

收稿日期: 2016-03-08; 修回日期: 2016-09-06

作者简介:

王振浩(1964-), 男, 教授, 长期从事电力系统自动化科技研发及教学工作; E-mail: zhenhaowang@126.com

刘宇男(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合储能在新能源发电的应用。E-mail: 13644474237@163.com

(编辑 周金梅)