

用于风电功率平抑的 混合储能系统及其控制系统设计

于芑¹, 周玮¹, 孙辉¹, 郭磊², 孙福寿², 隋永正²

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省 大连市 116024;

2. 吉林省电力公司调度通讯部, 吉林省 长春市 130021)

Hybrid Energy Storage System and Control System Design for Wind Power Balancing

YU Peng¹, ZHOU Wei¹, SUN Hui¹, GUO Lei², SUN Fushou², SUI Yongzheng²

(1. Department of Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning Province, China;

2. Dispatching and Communication Department in Jilin Electric Power Company, Changchun 130021, Jilin Province, China)

ABSTRACT: Energy storage technique is one of the most effective technique means for the regulation of wind power. Aiming at meeting the requirement of balancing the fluctuating wind power, this paper proposed a hybrid energy storage system, which was composed of battery and supercapacitor. By the reasonable design on charge-discharge controller, the precise management on the whole charge-discharge course and the extension of cycle life of the energy storage element were achieved. Meanwhile, the system could supply the constant dc output voltage. With respect to the control system design for the energy storage system, this paper developed a double-layer control model. Also, an expert information base was established. Based on the information of real-time wind power and state of charge (SOC) of the energy storage element, the corresponding control algorithm for the charge-discharge controller can be obtained by searching the expert information base in sequence under that double-layer control model. As a result, the control logic under various fluctuating conditions of wind power was simplified and the time cost for control was shortened. Through simulation analysis, it can be indicated that the configuration of the hybrid energy storage system and the control system design are feasible. This system can be widely used in wind farm, undertaking the task of balancing the fluctuating wind power.

KEY WORDS: wind power generation; fluctuating power; hybrid energy storage; supercapacitor; battery; charge-discharge control

摘要: 储能技术是进行风电功率调控的有效技术手段之一, 针对平抑风电波动功率的需求, 提出一种基于蓄电池和超级电容器的新型混合储能系统。通过充放电控制器的合理设计, 实现了储能元件充放电全过程的精确管理, 延长了使用寿命; 同时能够提供稳定的直流输出电压。针对该系统的控制系统设计, 提出一种双层控制模型, 并建立专家信息库。根据实时风电功率及储能元件的荷电状态, 在双层控制模型下依次检索预置的专家信息库, 可得到充放电控制器相应的控制算法, 简化了风电功率多种波动状态下的控制逻辑, 缩短了控制时间。仿真分析表明, 所提出的混合储能系统结构及其控制系统是切实可行的, 可广泛应用于风电场, 承担风电功率平抑的任务。

关键词: 风力发电; 波动功率; 混合储能; 超级电容器; 蓄电池; 充放电控制

0 引言

风力发电是实现我国能源和电力可持续发展战略的重要组成部分之一。由于风电输出功率具有很强的波动性、随机性, 且风速预测存在一定的误差^[1], 因此大规模的风电并网会给电力系统的安全稳定运行带来一系列技术难题^[2-4]。为提高风电场并网运行能力, 越来越多的研究人员采用储能技术对风机机组输出功率进行调控^[5-8], 使风电场效益最大化^[9-10]。对风电功率进行“削峰填谷”的平抑时, 在综合考虑系统成本、体积、重量基础上, 需储能系统兼具有高功率密度、高能量密度、高循环寿命的特点。

受储能机理影响, 蓄电池能量密度高, 功率密度、循环使用寿命低^[11-12]; 超级电容器功率密度、循环寿命高, 但能量密度低^[13-14], 对此很多专家学

基金项目: 吉林省电力有限公司科技攻关项目(2009.2-24)。

Project Supported by Key Scientific and Technological Project of Jilin Electric Power Company(2009.2-24).

者提出采用蓄电池与超级电容器混合储能的方法,以提高储能系统的整体性能,相关研究已经取得了一定成果。文献[15-16]对蓄电池和超级电容器的直接并联结构进行了详尽数学分析,但该结构运行过程中主动控制能力较弱。文献[17-18]提出蓄电池与超级电容器通过一级 DC/DC 变换器并联,该方式提高了充放电过程的可控性,但输出电压波动较大。文献[19]提出的方案中,光伏主系统输出经 2 级 DC/DC,这会给主系统带来额外损耗。

本文在对基于蓄电池和超级电容器的混合储能系统现有结构进行比较分析的基础上,针对风电波动功率的平抑需求,提出一种新型混合储能系统结构及其分层控制模型。在风电功率多种波动状态下,根据控制系统的层次划分依次检索预置的专家信息库,得到相应充放电控制器的控制算法,便可控制该混合储能系统进行快速、高效的功率吞吐,平抑风电功率波动,实现风电场按发电曲线运行,即保持输出功率平稳跟随实时调度目标值,从而减少风电场输出功率波动对并网电力系统的冲击。

1 混合储能系统结构及双层控制系统模型

1.1 混合储能系统结构设计

本文提出的混合储能系统结构如图 1 所示。

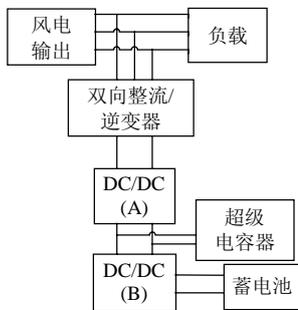


图 1 用于风电功率平抑的混合储能系统结构图
Fig. 1 Configuration diagram of hybrid energy storage system for wind power balancing

该储能系统由蓄电池、超级电容器,充放电控制器 DC/DC(A)、DC/DC(B)构成。储能系统经由双向整流/逆变器并联在风电场出口,通过其功率吞吐来平抑风电场输出功率的波动。其中,充放电控制器采用的是双向斩波器结构,蓄电池接于 DC/DC(B) 的低压侧,DC/DC(B) 的高压侧并联超级电容器后接入 DC/DC(A) 的低压侧,DC/DC(A) 的高压侧为混合储能系统直流电压出口。

DC/DC(B)负责精确控制蓄电池充放电过程,以避免蓄电池超倍率、小循环充放电。DC/DC(A)

在储能系统蓄能时担任超级电容器充电控制器的任务;释能时,DC/DC(A)用于稳定储能系统输出直流电压,以满足双向整流/逆变器稳定工作的需求。

该混合储能系统的结构优势在于:通过 2 级充放电控制器加入位置的合理设计,使储能元件的充放电全过程精确可控,有利于延长使用寿命;能够提供稳定的直流输出电压,有利于双向整流/逆变器运行,保障了储能系统与电力系统的并网运行。

1.2 控制系统双层控制模型

本文所提出控制系统自上而下分为 2 层:能量层、系统层,同时还配有专家信息库,如图 2 所示。

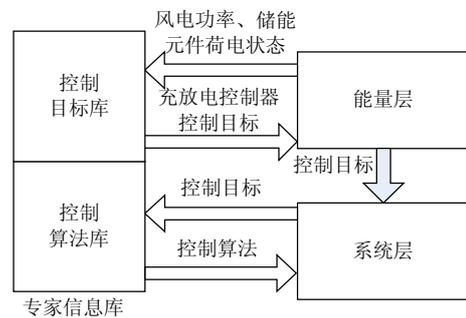


图 2 控制系统双层模型结构

Fig. 2 Double-layer model structure of control system

专家信息库包括:控制目标库、控制算法库。根据风电功率波动特点、储能元件特性制定能量管理规则,并据此制定充放电控制器在风电功率不同波动状态下的控制目标,预置到控制目标库中。根据充放电控制器的拓扑特点,针对不同的控制目标制定相应的控制算法,预置到控制算法库。

系统运行时,能量层实时检索控制目标库,得出充放电控制器的控制目标,并传递给系统层。系统层根据控制目标检索控制算法库,得到相应的控制算法,进而由实际物理平台完成控制。该控制模型大大简化了控制逻辑,可有效缩短控制响应时间,能够实现储能系统功率吞吐的快速、精确控制。

2 适应风功率多波动状态的能量层控制设计

2.1 能量管理规则设计

从充分发挥不同储能元件的各自优势,降低投资、运行成本的角度出发,制定能量管理规则为:功率密度大,循环寿命长的超级电容器遵循优先充放电的原则,同时充当“功率缓冲器”,用于平抑尖峰及往复性风电功率波动,从而减少蓄电池的配置容量,避免蓄电池进行小循环、超倍率充放电,延长蓄电池使用寿命,降低投资、运行成本;能量密度大的蓄电池,是系统中的主要能量来源,用于

平抑风电功率的长期稳态波动，并实时调节超级电容器荷电状态，以及时响应风电功率的下次波动。

通过实施上述能量管理规则，使整个储能系统兼具有高功率密度、高能量密度、高循环寿命的特性，既能避免单独采用蓄电池储能而造成的功率超额配置，又可避免单独采用超级电容器储能所引起的成本增加，有效降低了储能系统的投资成本。

2.2 充放电控制器控制目标库设计

由于超级电容器遵循优先响应的原则，因此以其端电压 U_{cap} 所反映的不同荷电状态和实时风电功率偏离目标值的差值作为控制目标库的制定及检索依据。设超级电容器上下限门槛端电压、余量系数分别为 $U_{cap_up_threshold}$ 、 $U_{cap_low_threshold}$ 、 α ，储能系统所需吞吐总功率为 P_{whole} ，蓄电池最大充放电功率为 P_{up_bat} 。根据所制定的能量管理规则，控制目标库设计逻辑如图 3、4 所示，其中实线表示蓄能、释能状态的依次转换，虚线代表蓄能、释能状态的选择性跳转。具体分析如下：

1) 风电输出功率大于实时调度目标值，储能系统蓄能。根据 U_{cap} 的变化界定不同的蓄能状态，充放电控制器的控制目标设计如图 3 所示。

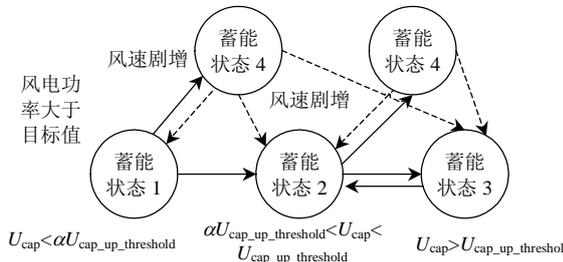


图 3 蓄能状态下充放电控制器控制目标设计逻辑图
Fig. 3 Logic diagram of control objective design for charge-discharge controller when charging

蓄能状态 1: $U_{cap} < \alpha U_{cap_up_threshold}$ ，DC/DC(B) 切除蓄电池，减少蓄电池的充电响应次数，DC/DC(A) 按所需存储功率以恒功率方式对超级电容器充电。

蓄能状态 2: $\alpha U_{cap_up_threshold} \leq U_{cap} \leq U_{cap_up_threshold}$ ，DC/DC(A) 以恒功率 P_{whole} 吸收功率；DC/DC(B) 控制蓄电池恒功率 P_{bat} 充电，避免超倍率充电，超级电容器充电功率为 $P_{cap} = P_{whole} - P_{bat}$ 。

蓄能状态 3: $U_{cap} > U_{cap_up_threshold}$ ，DC/DC(A) 以恒功率 P_{whole} 吸收功率，DC/DC(B) 控制蓄电池充电功率 $P_{bat} > P_{whole}$ ，从而超级电容器放电功率为 $P_{cap} = P_{bat} - P_{whole}$ ，直至 $U_{cap} = \alpha U_{cap_up_threshold}$ ，转入蓄能状态 2。

蓄能状态 4: 风电功率波动过大(由风速剧增引起)导致 $P_{whole} \gg P_{up_bat}$ ，由当前蓄能状态(1 或 2)直

接转入蓄能状态 4。此时，DC/DC(B) 控制蓄电池充电功率 P_{bat} 不变，超级电容器充电功率为 $P_{cap} = P_{whole} - P_{bat}$ ，由于 $P_{whole} \gg P_{up_bat}$ ，从而 $P_{whole} \approx P_{cap}$ ，保护蓄电池。蓄能状态 4 结束后，根据 U_{cap} 的实时状态选择性转入蓄能状态 1 或 2 或 3。

2) 风电功率小于调度目标值，系统释能，充放电控制器的控制目标设计如图 4 所示。

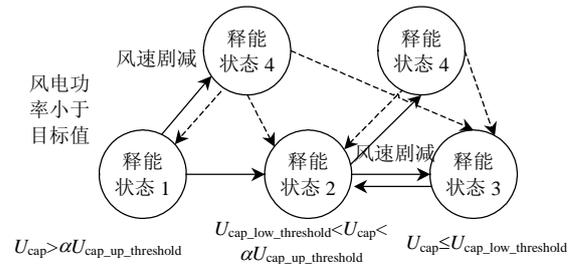


图 4 释能状态下充放电控制器控制目标设计逻辑图
Fig. 4 Logic diagram of control objective design for charge-discharge controller when discharging

释能状态 1: $U_{cap} > \alpha U_{cap_up_threshold}$ ，DC/DC(B) 切除蓄电池，减少蓄电池的放电响应次数，超级电容器输出功率为 $P_{cap} = P_{whole}$ 。

释能状态 2: $U_{cap_low_threshold} < U_{cap} < \alpha U_{cap_up_threshold}$ ，DC/DC(B) 控制蓄电池恒功率 P_{bat} 放电，避免超倍率放电，超级电容器放电补偿功率缺额 $P_{cap} = P_{whole} - P_{bat}$ 。

释能状态 3: $U_{cap} \leq U_{cap_low_threshold}$ ，DC/DC(B) 控制蓄电池放电功率 $P_{bat} > P_{whole}$ ，则超级电容器按 $P_{cap} = P_{bat} - P_{whole}$ 恒功率充电，直至 $U_{cap} = \alpha U_{cap_up_threshold}$ ，转入释能状态 2。

释能状态 4: 风电功率过小(由风速剧减引起)导致 $P_{whole} \gg P_{up_bat}$ 时，由当前释能状态(1 或 2)转入释能状态 4。DC/DC(B) 控制蓄电池放电功率 P_{bat} 不变，超级电容器放电 $P_{cap} = P_{whole} - P_{bat}$ ，由于 $P_{whole} \gg P_{up_bat}$ ，因此 $P_{whole} \approx P_{cap}$ ，避免了蓄电池超倍率放电而造成损伤。释能状态 4 结束后，根据 U_{cap} 的状态选择性转入释能状态 1 或 2 或 3。

释能时，DC/DC(A) 的任务为维持系统输出直流电压稳定，以利于双向整流/逆变器的逆变运行，为储能系统在电力系统中的并网运行创造了条件。

3) 蓄电池剩余容量不足时，在风电功率平稳时补充蓄电池能量：DC/DC(A) 以恒功率方式从电网中抽取能量；DC/DC(B) 根据蓄电池的充电特性对其充电过程进行精确控制，有效延长其使用寿命。

将上述控制目标预置到控制目标库。能量层根据当前风电功率、超级电容器荷电状态实时检索控制目标库，得到充放电控制器的控制目标并传递给

系统层。

另外,由控制目标库的设计过程可知,超级电容器的实时端电压水平决定了蓄电池是否进行充放电响应。当超级电容器出现剩余容量不足或过剩时(由其端电压体现),蓄电池进行充放电来调节超级电容器的荷电状态。因此,根据风电场的实际运行数据,遵循超级电容器平抑尖峰及频繁往复性功率波动的原则对超级电容器的容量、上下限门槛端电压和余量系数进行设定,可有效减少蓄电池的充放电响应频率,进而延长其使用寿命。

3 基于能量双向流动拓扑的系统层控制设计

3.1 充放电控制器拓扑分析

3.1.1 拓扑结构

本系统中充放电控制器采用了 Buck-Boost 型双向 DC/DC 斩波器^[20],标准模型如图 5 所示。 U_1 、 U_2 为两侧电源电压; R_{s1} 、 R_{s2} 为串联等效电阻。设高压侧、低压侧端电压分别为 U_{C2} 、 U_{C1} ;流经电感电流为 I_L ;开关管 G_1 占空比为 D , G_2 占空比为 $1-D$ 。

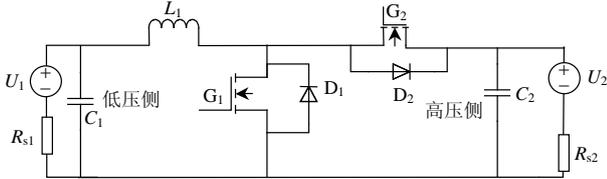


图 5 充放电控制器拓扑

Fig. 5 Topology of charge-discharge controller

3.1.2 大信号模型分析

约定能量正方向为由低压侧到高压侧方向。定义状态向量为 $\mathbf{X}=(I_L, U_{C1}, U_{C2})^T$,输入向量为 $\mathbf{U}=(U_1, U_2)^T$ 。由状态空间平均法得到大信号模型:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (1)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1/L & D-1/L \\ -1/C_1 & -1/(R_{s1}C_1) & 0 \\ 1-D/C_2 & 0 & -1/(R_{s2}C_2) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/R_{s1}C_1 & 0 \\ 0 & 1/R_{s2}C_2 \end{bmatrix}.$$

方程式(1)的稳态解为

$$\begin{bmatrix} I_{L0} \\ U_{C10} \\ U_{C20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_1 - (1-D)U_2}{R_{s1} + (1-D)^2 R_{s2}} \\ \frac{(1-D)^2 R_{s2} U_1 + (1-D)R_{s1} U_2}{R_{s1} + (1-D)^2 R_{s2}} \\ \frac{(1-D)R_{s2} U_1 + R_{s1} U_2}{R_{s1} + (1-D)^2 R_{s2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)中 I_{L0} 可知,控制 G_1 、 G_2 通断时间可实现能量双向传输控制:正向传输(升压模式) $I_{L0} > 0$, $D > 1 - U_1/U_2$;反向传输(降压模式) $I_{L0} < 0$, $D < 1 - U_1/U_2$ 。由式(2)中 U_{C10} 、 U_{C20} 可知,两侧端电压大小也可通过对开关管导通时间的控制来实现。

3.1.3 小信号模型分析

对上述大信号模型施加扰动,并将其转至 s 域进行拉氏变换,可得小信号传递函数。

1) 能量正向传输(升压模式)。输入量为 $U_s=U_1$,此时设 $U_2=0$, $R_{s1}=0$, $R_{s2}=R$,此时传递函数为

$$\left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{1(s)}=0} = \frac{sRC_2 U_{C20} + RI_{L0}(1-D) + U_{C20}}{LRC_2 s^2 + Ls + (1-D)^2 R} \quad (3)$$

$$\left. \frac{\hat{u}_{C2}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{1(s)}=0} = \frac{-RI_{L0}Ls + (1-D)RU_{C20}}{LRC_2 s^2 + Ls + (1-D)^2 R} \quad (4)$$

其中, I_{L0} 、 U_{C20} 可根据式(2)得出,为

$$\begin{bmatrix} I_{L0} \\ U_{C20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 / [(1-D)^2 R] \\ U_1 / (1-D) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(3)可知,电流传递函数开环极点、零点都位于 s 域左半平面,系统开环稳定。由式(4),高压侧电压传递函数存在 s 域右半平面的开环零点:

$$z_{u_{C2}} = (1-D)U_{C20} / (I_{L0}L) \quad (6)$$

这使稳定高压侧电压时,将出现先下降,再升高的系统传递延迟或停歇特性(最小相位特性)。

2) 能量反向传输(降压模式)。输入量为 $U_s=U_2$,此时设 $U_1=0$, $R_{s1}=R$, $R_{s2}=0$,传递函数为

$$\left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{2(s)}=0} = \frac{(1+sRC_1)U_{C10}}{LRC_1 s^2 + Ls + R} \quad (7)$$

$$\left. \frac{\hat{u}_{C1}(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{u}_{2(s)}=0} = \frac{RU_{C10}}{LRC_1 s^2 + Ls + R} \quad (8)$$

其中, I_{L0} 、 U_{C10} 可根据式(2)得出,为

$$\begin{bmatrix} I_{L0} \\ U_{C10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1-D)U_2 / R \\ (1-D)U_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(7)、(8)可知,当运行于降压模式时,电压、电流传递函数的开环零点、极点皆位于 s 域左半平面,且不受占空比影响,因此控制器设计较为简单。

3.2 充放电控制器控制算法库设计

3.2.1 电感电流的控制算法设计

根据 2.2 的分析,结合如图 5 所示的拓扑结构,可以将充放电控制器的控制目标归结为:控制电感电流、控制高压侧电压,据此制定相应的控制算法并存入控制算法库中,以备系统层实时检索。

由 3.1.3 分析可见，无论控制器运行于升压模式还是降压模式，电流传递函数的开环极点、零点都位于 s 域左边平面，开环稳定。可以采用加入 PI 控制器的闭环控制，以进一步改善控制系统的稳态性能。控制框图如图 6 所示。

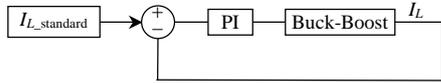


图 6 电感电流控制框图

Fig. 6 Control block for inductor current

控制器在 $I_L_standard > 0$ 时运行于升压模式， $I_L_standard < 0$ 时运行于降压模式。用经闭环控制得到的信号驱动开关管便可实现对电感电流的精确控制。

3.2.2 高压侧直流电压的控制算法设计

由 3.1.3 分析可知，控制器运行于升压模式下的恒压输出状态时电压传递函数呈现最小相位特性。为此，控制系统采用电压外环，电流内环的双闭环控制模式，如图 7 所示。

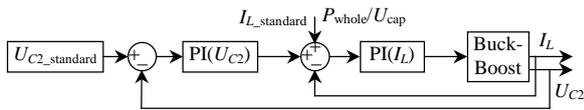


图 7 电压双环控制框图

Fig. 7 Double-loop control block for voltage

电压外环用于维持高压侧输出电压的稳定，电流内环参考值 $I_L_standard$ 经由电压外环控制得到。由于电流环截止频率高于电压环，可加快电流跟踪速度，产生合适的补偿电流，增强输出电压稳定性。

为在输出功率波动时增强输出直流电压的稳定性，将与输出功率相关的电感电流量 P_whole/U_cap 作为前馈补偿量加入到电流环中参与控制，提高电流环对输出功率的响应速度，改善高压侧直流电压动态稳定性，以利于双向整流/逆变器的逆变运行。

通过实施上述控制算法，可对蓄电池及超级电容器的充放电过程进行精确控制，延长其使用寿命，同时还可稳定储能系统输出直流电压，有力保障了控制目标库中各个控制目标的顺利实现。

4 仿真分析

4.1 参数设置

根据图 1 所示结构，在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真系统。仿真参数设置如下：蓄电池组 240V，200Ah；超级电容器组容量 10F，耐压 400V，预充电电压 388V；DC/DC(A)、DC/DC(B)中滤波电感 1mH；交流电网相电压 690V，双向整流/逆变器交流侧经

1:2 升压变接入交流电网。DC/DC(B)电感电流的 PI 参数为： $K_p=1$ ， $K_i=150$ ；DC/DC(A)高压侧直流电压的 PI 参数为：电流内环 $K_{p_in}=0.5$ ， $K_{i_in}=100$ ；电压外环 $K_{p_out}=2.5$ ， $K_{i_out}=1$ 。设超级电容器上下门限值端电压分别为 $U_{cap_up_threshold}=380V$ 、 $U_{cap_low_threshold}=244V$ ，余量系数 $\alpha=0.8$ 。

4.2 可行性仿真验证

约定储能系统蓄能功率为正，释能功率为负。风电功率为负，波动频率为 2Hz。储能系统通过能量吞吐对波动功率进行平抑，功率平抑目标值为 -35kW。仿真目标为：验证控制系统双层模型的运行可行性；验证 2 个充放电控制器在不同控制目标下联合工作的有效性。为充分体现 2 个充放电控制器在多种控制目标下的联合工作能力，约定蓄电池蓄能、释能时按恒流 50A 充放电。

图 8 中， P_wave 表示波动功率(-10~-55 kW)； P_whole 为混合储能系统的吞吐功率； $P_standard$ 代表平抑后的目标功率。 P_wave 大于目标值时，储能系统吸收多余功率； P_wave 小于目标值时，储能系统补偿功率的不足。最终风电波动功率基本稳定于 -35kW。图 9、图 10 中依次显示了储能系统运行时输出直流电压曲线 U_{dc} 、蓄电池充放电电流曲线 I_{bat} 、超级电容器端电压曲线 U_{cap} 。

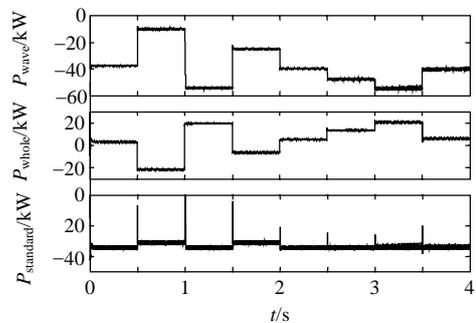


图 8 风电波动功率平抑曲线

Fig. 8 Curve of balancing fluctuating wind power

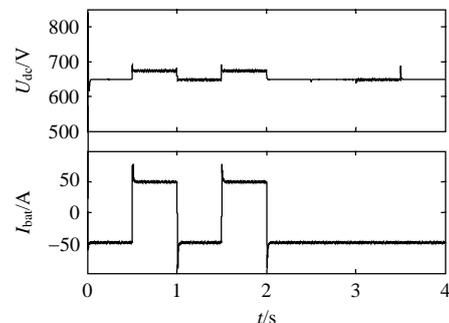


图 9 混合储能系统充放电曲线

Fig. 9 Charging and discharging curve of hybrid energy storage system

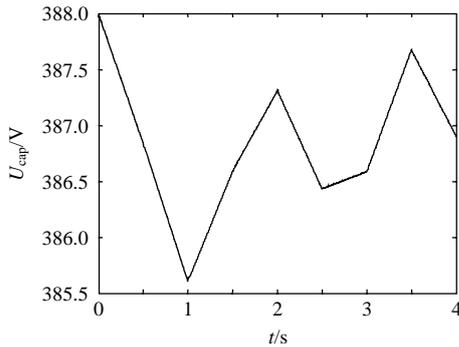


图10 超级电容器端电压曲线

Fig. 10 Curve of terminal voltage of supercapacitor

根据图2所示控制模型对控制系统在0~0.5s时的运行过程分析如下:控制系统能量层根据0s时风电功率偏离目标值的情况及超级电容器的端电压查询所预置的控制目标库,从而得到2个充放电控制器的控制目标:即分别对2个充放电控制器进行恒功率控制(相当于分别控制2个控制器的电感电流)。将此信息传递到系统层。系统层据此控制目标检索专家信息库中预置的控制算法库,通过实施由控制算法库中得到的控制算法便可实现所需控制目标:0~0.5s时,由图9中曲线 I_{bat} 可见,DC/DC(B)可独立控制蓄电池50A恒流充电;DC/DC(A)以恒功率方式从并网系统中吸取所需存储的能量,如图8中 P_{whole} 曲线所示。此时 $P_{whole} < P_{bat}$,超电容器以功率 $P_{cap} = P_{bat} - P_{whole}$ 释放多余能量对蓄电池充电, U_{cap} 下降。其他时间段内皆可进行类似分析。

结合图8,由图9中曲线 U_{dc} 可见:0.5~1s、1.5~2s时系统释能,加入前馈环节的双闭环控制算法可有效控制储能系统输出电压稳定于670V,有利于能量经双向整流/逆变器向电网回馈。其他时间段内,储能系统蓄能,双向整流/逆变器运行于整流状态,将DC/DC(A)高压侧直流电压控制在650V。

由此可见:该控制系统的双层控制模型能够将储能系统的所需吞吐功率在储能元件间进行快速、合理的分配;2个充放电控制器能够很好的协调工作,完成所设定的控制目标,对储能元件的充放电过程进行精确管理,有利于储能元件寿命的延长。

4.3 混合储能系统平抑风电波动功率仿真分析

我国吉林省某风场850kW风机日输出功率实测曲线(采样间隔12s)如图11所示。目前电力系统中日调度计划曲线通常采用96点,本仿真的功率数据取自图11所示的风电功率曲线,持续时间为15min,波动范围为118~643kW,如图12(a)所示。功率控制目标值为316kW。此时,风电功率波

动平均值约为100kW,波动峰值约为300kW,由此蓄电池组容量增大为500Ah,超级电容器组容量增大为40F,初始电压为300V。此时约定混合储能系统的吞吐功率蓄能方向为负,释能方向为正。通过采用本文提出的混合储能系统结构及其控制系统模型,储能系统的实时吞吐功率如图12(b)所示,平抑效果如图12(c)所示。当风电功率大于目标值时,混合储能系统存储多余功率;反之,储能系统放电,补偿功率的缺额,最终风电功率能够基本稳定于316kW,波动约6%,符合我国颁布的风电场接入电力系统技术规定中小于20%的要求,达到了风电输出功率实时跟踪调度计划目标值的目的,有效实现了风电场的发电功率控制。

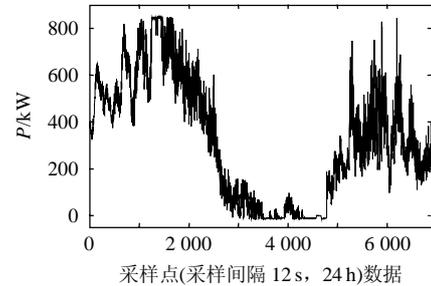


图11 某风场单台风机日输出功率曲线

Fig. 11 Daily output power curve of single wind turbine generator in certain wind farm

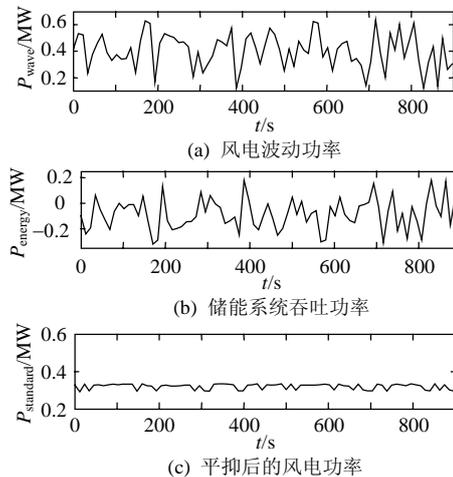


图12 波动功率平抑仿真曲线

Fig. 12 Simulation curve of fluctuating power balance

5 结论

本文所提出的新型混合储能系统,在结合蓄电池超级电容器的储能特性优点的基础上,通过2级充放电控制器的合理设计,实现了储能元件充放电全过程的精确管理,并能够提供稳定的直流输出电压。本文提出的双层控制模型简化了控制系统在风

电功率多种波动状态下的控制逻辑, 通过利用实时检索专家信息库得到的控制算法, 可有效控制储能系统进行快速、精确的功率吞吐, 实现风电波动功率平抑的目标。仿真分析表明, 本文所提出的混合储能系统结构及控制系统设计正确、有效, 能够快速响应风电波动功率平抑对储能系统功率的需求, 可用于对风电场输出功率的实时调控。

参考文献

- [1] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
Yang Xiuyuan, Xiao Yang, Chen Shuyong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5(in Chinese).
- [2] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62-66, 70.
Sun Tao, Wang Weisheng, Dai Huizhu, et al. Voltage fluctuation and flick caused by wind power generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66, 70(in Chinese).
- [3] 戴慧珠, 陈默子, 王伟胜, 等. 中国风电发展现状及有关技术服务[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 80-84.
Dai Huizhu, Chen Mozi, Wang Weisheng, et al. The status of wind power development and technical supports in China[J]. Electric Power, 2005, 38(1): 80-84(in Chinese).
- [4] Larsson A. Flicker emission of wind turbines during continuous operation[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2002, 17(1): 114-118.
- [5] Abbey C, Joos G. Supercapacitor energy storage for wind energy application[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-775.
- [6] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.
Chen Xingying, Liu Mmengjue, Shan Yuanda. Application of superconducting magnetic energy storage system--SMES wind power system of network forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66 (in Chinese).
- [7] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 111-115.
Sun Chunshun, Wang Yaonan, Li Xinran. Synthesized power and frequency control of wind power generation system assisted through flywheels[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 111-115 (in Chinese).
- [8] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-6.
Xiao Chuangying, Wang Ningbo, Ding Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan wind power base[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 1-6(in Chinese).
- [9] Hansena A D, Sørensen P, Iovb F, et al. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators[J]. Renewable Energy, 2006, 31(7): 935-951.
- [10] Sheble G B. Smart grid millionaire[J]. Power and Energy Magazine, IEEE, 2008, 6(1): 22-28.
- [11] 王菊芬, 李宜富, 杨海平, 等. 光伏发电系统中影响蓄电池寿命因素分析[J]. 蓄电池, 2002(2): 51-54.
Wang Jufen, Li Xuanfu, Yang Haiping, et al. Analysis of factors influencing the lifetime of lead-acid battery in photovoltaic system [J]. Chinese Labat Man, 2002(2): 51-54(in Chinese).
- [12] Smith T A, Mars J P, Turner G A. Using supercapacitors to improve battery performance[C]//Power Electronics Specialists Conference. Cairns, Australia: IEEE, 2002: 124-128.
- [13] Spyker R L, Nelms R M. Optimization of double-layer capacitor arrays [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2000, 36(1): 194-198.
- [14] Conway B E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications[M]. New York: Plenum, 1999: 381-409.
- [15] Dougal R A, Liu Shengyi, White R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor Hybrids[J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(1): 120-130.
- [16] 张丹丹, 罗曼, 陈晨, 等. 超级电容器-电池复合脉冲电源系统的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 36-30.
Zhang Dandan, Luo Man, Chen Chen, et al. Experimental study on composite power source of supercapacitor-battery[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 36-30 (in Chinese).
- [17] Gao Lijun, Dougal R A, Liu Shengyi. Power enhancement of an actively controlled Battery-Ultracapacitor hybrid[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(1): 236-243.
- [18] Pay S, Baghzouz Y. Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles[C]//Power Tech. Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 23-26.
- [19] 唐西胜, 齐智平. 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3): 37-41.
Tang Xisheng, Qi Zhiping. Study on an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(3): 37-41(in Chinese).
- [20] Arnet B J, Haines L P. High power DC-to-DC converter for supercapacitors[C]//IEEE International Electric Machines and Drives Conference. USA: IEEE, 2001: 985-990.



于芃

收稿日期: 2011-03-07。

作者简介:

于芃(1982), 男, 博士研究生, 研究方向为储能技术及其在可再生能源中的应用, benben2229@sina.com;

周玮(1981), 女, 博士后, 研究方向为含有风电场的电力系统能量平衡控制研究, zhouwei-ee@163.com;

孙辉(1964), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制, 新能源发电控制技术, DFACTS 技术及其在电力系统中的应用研究等, dutshui@dlut.edu.cn。

(责任编辑 王剑乔)