

DOI: 10.7667/PSPC171685

基于虚拟同步电机技术的混合储能平抑微网 频率波动策略研究

禹红¹, 夏向阳², 彭梦妮², 赵昕昕², 李付亮¹

(1. 湖南水利水电职业技术学院, 湖南 长沙 410131; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 由锂电池和超级电容器组成的混合储能系统(HESS)具有响应快速、短时吞吐功率能力强的优点, 可以很好地作为电网的分布式储能设备补偿电网频率波动。提出在储能单元体系优化匹配下, 基于荷电状态(SOC)反馈的自学习平滑储能控制策略, 自主归纳更新混合储能的控制规则, 利用虚拟同步电机(VSG)技术来解决可再生能源功率波动引起的电网频率偏移问题。最后, 在 Matlab/Simulink 中建立了光储微网模型。通过仿真验证了配置混合储能单元的 VSG 能有效模拟出同步电机的转动惯量与一次调频特性, 提高了并网系统的稳定性。

关键词: 混合储能系统; 自学习; 平滑控制; 虚拟同步电机; 频率偏移

Research on strategy of micro-grid frequency control in hybrid energy storage system based on virtual synchronous generator technology

YU Hong¹, XIA Xiangyang², PENG Mengni², ZHAO Xinxin², LI Fuliang¹

(1. Hunan Polytechnic of Water Resources and Electric Power, Changsha 410131, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The Hybrid Energy Storage System (HESS) consisting of battery and super capacitor has the advantages of fast response and high power capacity, which can well act as distributed energy storage equipment to compensate power grid frequency fluctuation. This paper puts forward a self-learning smooth energy storage control strategy based on State-of-Charge (SOC) feedback under energy storage unit system optimal matching, which automatically concludes and updates the control rule of hybrid energy storage and makes use of Virtual Synchronous Generator (VSG) to solve the problem of grid frequency offset caused by power fluctuation of renewable energy. Finally, a photovoltaic-storage-microgrid model is established in Matlab/Simulink. Simulation results show that the proposed HESS based VSG can effectively simulate the rotational inertia and the primary frequency modulation characteristics of SG, which improves the stability of the connected grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307009).

Key words: hybrid energy storage system (HESS); self-learning; smooth control; virtual synchronous generator; frequency offset

0 引言

随着风电、光伏等新能源的不断发展, 传统同步发电机的比例逐步减少, 电力系统中旋转备用容量和转动惯量相对降低, 小型发电机与配电网的联系也越来越紧密^[1]。目前, 电力系统短期动态稳定

性主要是依靠同步发电机内在转子惯性驱动。当转子惯性较低时, 在发电或带负荷运行下电力系统的频率会急剧变化。这种情况下, 必须能提供额外的频率响应辅助服务以确保频率振荡不超过限值。在分布式能源系统中加入储能系统和变流器, 利用与储能系统之间能量可双向流动, 采用 VSG 技术构造虚拟惯量^[2-4], 使其像发电机组一样参与频率和电压的调节过程, 就可以降低只依靠分布式发电系统对电网造成的不利影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51307009); 湖南省水利科研项目资助(湘水科计[2015]245-10)

在荷兰的虚拟同步机项目中, 研究人员提出了 VSG 的概念, 通过适当的控制策略, 使并网逆变器可以模拟同步发电机(SG)的摇摆方程, 以此使电网频率稳定^[5]。文献[6]针对离网自治运行情况下的分布式逆变器采用下垂控制, 根据采样得到的电网电压幅值和频率发出动作或指令。但在并网运行模式下下垂控制会对电网产生短时电流冲击, 危害电网的稳定运行。究其原因是下垂控制中本质上缺乏 SG 惯性和阻尼这两个非常重要的固有属性。所以把虚拟转动惯量和阻尼特性引入到并网发电系统是一种加强电力系统稳定性的有效解决方案。

然而使并网逆变器能够成功模拟同步发电机大惯性的关键在于是否配置可持续调控能力的储能单元, 但是现有文献大多是介绍并网逆变器的 VSG 控制策略, 很少单独研究 VSG 技术中储能系统在应对电网频率波动方面的作用。文献[7]研究了基于低通滤波原理的储能系统平抑风电功率波动的控制策略及储能容量的优化配置, 但低通滤波分解存在频谱混叠, 难以精确提取其特征。文献[8]将风电功率分解后的余量作为并网功率, 仅对容量进行配置, 并未给出功率配置方法。文献[9]虽然研究了储能单元容量优化配置的方法, 但是用直流电源代替了储能单元和变换器, 弱化了储能系统输出功率的可调性, 没有对 VSG 储能单元充放电优化控制进行分析。

本文针对虚拟同步发电机数学模型、混合储能系统体系匹配和充放电优化控制进行了详细研究。首先, 建立 VSG 的二阶暂态数学模型, 在其下垂特性基础上提出完整的虚拟同步发电机有功频率调节控制器。据此, 为了构建大功率混合储能系统结构, 给出了电池组模块成组设计和超级电容器匹配设计方案。为了避免储能单元过充过放, 将荷电状态值稳定在合适的范围内, 提出一种基于 SOC 反馈的自主学习平滑储能充放电控制策略。最后通过仿真验证了配置混合储能单元的 VSG 能有效提高频率的稳定性。

1 VSG 的基本原理

1.1 VSG 的拓扑结构

虚拟同步发电机的有机组成包括可再生能源、储能单元以及并网逆变器三大部分。储能环节模拟同步发电机惯性, 而由电力电子器件构成的并网逆变器能够模拟惯性和阻尼, 增强应对电网频率波动的能力。VSG 模型中, 可再生能源对应原动机, 储能系统及其变换器对应原动机和转动惯性部分, 逆变器对应机电能量转换过程。储能系统依据 HESS 控制策略和 VSG 控制技术与电网之间进行能量交换。

图 1 为虚拟同步发电机的主电路结构, 其中 r 为线路电阻, L 和 C 分别为滤波电感和电容, L_g 是 VSG 与电网之间的等效电抗。检测电压和检测电流值反馈到励磁调节器和 PF 控制器中, 输出 U_f 和 P_m 指令, 经过 VSG 算法后得到脉宽调制信号驱动开关通断, 最终实现整个系统电压和频率的稳定。

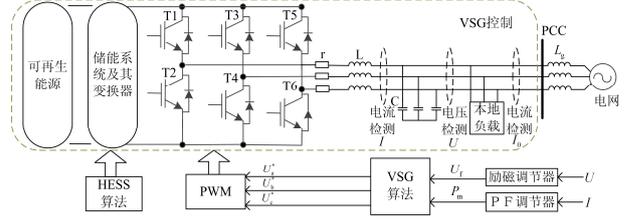


图 1 虚拟同步发电机的拓扑结构

Fig. 1 Control structure of virtual synchronous generator

1.2 VSG 的数学模型

不同的需求和应用场合, SG 模型简化结构有所不同。本文期望模拟同步发电机的惯性和阻尼特性, 采用通用的二阶模型即可, 其虚拟同步发电机的数学模型为

$$P_m - P_e - D(\omega - 1) = 2H \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

$$\dot{U} = \dot{E} - (r_a + jX_d) \dot{I} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_{ref} \omega \quad (3)$$

式(1)为 VSG 机械运动方程。式中: P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; ω 为转子角速度; D 为阻尼系数; H 为惯性常数; θ 为励磁电动势相角; ω_{ref} 为额定角频率; \dot{U} 和 \dot{I} 分别为定子端电压和端电流; \dot{E} 为励磁电动势; r_a 为电枢电阻; X_d 为同步电抗。

转速的变化快慢取决于转子质量的惯性, 利用 VSG 系统吸收的能量可以调节转速, 减少同步转速的速度偏差^[10]。为了保证频率稳定在工频值, 需要引入 VSG 控制算法提供额外功率, 结合储能系统产生的能量, 得到 VSG 机械功率表达式如式(4), VSG 系统依据式(5)与电网交换能量。

$$P_m = K_p(\omega - \omega_{ref}) + P_{HESS} \quad (4)$$

$$P_{VSG} = K_p(\omega - \omega_{ref}) + P_{HESS} + 2H \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

式中: K_p 是下垂系数, 反映频率偏离参考值时系统中吸收或注入的能量; P_{HESS} 是混合储能系统吸收或释放的功率; P_{VSG} 是 VSG 的等效功率。

1.3 VSG 的频率控制

当输入 VSG 系统的机械功率和输出的电磁功率无法平衡时, 将引发系统频率偏移。PF 调节器主

要模拟实际电网频率的响应特性, 通过检测功率差 ΔP 来控制虚拟机械转矩输出而调节频率。电网频率特性主要由系统的惯性特性及调速特性决定, 所以从这两方面考虑 PF 调节器的设计, 联立式(1)和式(4)得到逆变电源的“调速器”模型^[11-13], 即有功频率控制器的传递函数如式(6), ω 也可由锁相环变化角确定, 实现原理框图如图 2。

$$\omega = \frac{1}{2Hs} [K_p (\omega - \omega_{ref}) + P_{HESS} - P_c - D(\omega - \omega_{ref})] \quad (6)$$

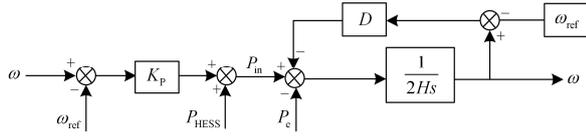


图 2 功率-频率控制框图

Fig. 2 Power-frequency control block diagram

2 储能单元的体系匹配

电力系统中储能的形式分为能量型储能和功率型储能两种: 铅酸蓄电池、锂电池和钠硫电池属于能量型储能; 超级电容、飞轮储能和超导磁储能属于功率型储能。各种储能形式的特性对比如表 1 所示。单一储能形式不能兼具所有优点, 充分利用容量型储能和功率型储能的技术互补性, 构建混合储能系统可以满足多层次的需求。综合考虑, 以锂电池和超级电容器组成的混合储能单元为例分析储能系统的体系匹配。

表 1 不同储能形式特性对比

Table 1 Comparison of different energy storage forms

储能形式	能量密度	功率密度	循环寿命	响应时间	成本
铅酸蓄电池	高	低	短	中	低
锂电池	高	低	短	中	低
NaS 电池	中	低	短	慢	中
飞轮	低	高	长	快	高
超级电容	低	高	长	快	中
超导磁	中	高	长	快	高

2.1 混合储能系统结构

为了增强电网调频调压的能力, 获得持续性的惯性模拟能力, 需要在 VSG 中配置一定容量的储能单元。考虑锂电池频繁充放电且电流随之波动大, 更适合采用 PNGV 模型; 超级电容主要利用其充放电的瞬时性, 采用串联 RC 模型建模即可满足要求。结合锂电池高能量密度和超级电容高功率密度优势的混合储能系统等效电路如图 3, 通过控制双向 DC/DC 变流器实现对储能单元充放电过程的优化控制。

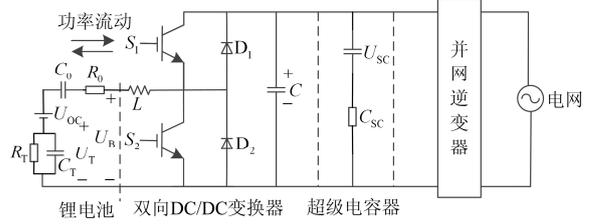


图 3 混合储能系统等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of hybrid energy storage system

2.2 电池组模块设计

要想实现大功率电池储能系统的构建, 设计灵活的电池模块是基础, 如何实现模块成组技术是关键。参照传统电池模块结构, 改进后的电池模块包括串并联电池阵列、实现模块内动态平衡的均衡电路和电池管理系统(BMS)智能模块三部分^[14-15], 如图 4 所示。

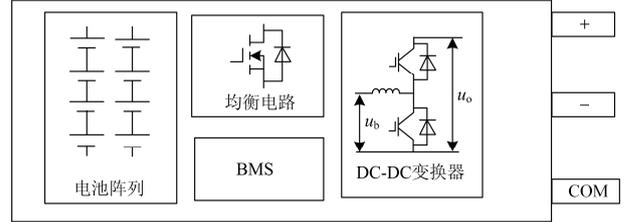


图 4 电池组模块

Fig. 4 Battery pack module

电池组模块中电池是根据 PNGV 模型建立的, 可以描述开路电压 U_{oc} 随负载电流的累积效应, 在锂电池频繁充放电时模拟电池性能。通过连续充放电实验得到 U_{oc} 和 SOC 的曲线, 基于最小二乘法拟合两者关系; 模型中其他参数: 欧姆内阻 R_0 、极化电容 C_T 、极化电阻 R_T 、主电容 C_0 通过试验手册获取。

$$\begin{cases} U = U_{oc} - U_T - \frac{1}{C_0} \int I_L dt - R_0 I_L \\ I_L = \frac{U_T}{R_T} - C_T \frac{dU_T}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 超级电容器模块设计

超级电容器瞬态响应模型如图 5, 图中等效内阻 R_s 与理想电容器 C_{sc} 组成超级电容。这种结构不仅能够减小超级电容器容量的分散度, 还能降低超级电容对均衡电压能力的要求, 提高储能可靠性。

$$\begin{cases} U_c = I_c R_s + \frac{1}{C_{sc}} \int I_c dt \\ W = 0.5 C_{sc} (U_{max}^2 - U_{min}^2) \end{cases} \quad (8)$$

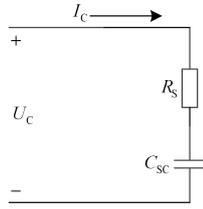


图5 超级电容器瞬态电路模型

Fig. 5 Transient circuit model of super capacitor

式中： U_{\max} 、 U_{\min} 分别为 SC 工作电压的最大和最小值； U_c 为 SC 端电压； I_c 为充放电电流； W 为 SC 储存的能量。

为了构建大功率超级电容器，通过概率的方法^[16]找出了一种可靠的储能阵列连接方式，即先将 m 只超级电容并联后再使 n 组串联实现 SC 模块成组设计。

3 基于 SOC 反馈的自学习平滑储能控制

为了增大 VSG 惯性能力，平抑分布式发电(DG)输出功率波动，提出一种基于自学习平滑控制的储能充放电方法：依据频率波动大小选择储能方式，引入自学习人工智能方法提高 SOC 计算精度，最后利用电池的 SOC 反馈值调节平滑控制参数，实时调节 HESS 的输出功率来应对频率变化。采用一阶巴特沃兹低通滤波器，将 VSG 中变化的分布式发电有功功率信号 P_{DG} 经过低通滤波时间常数 τ_{SC} 后得到超级电容输出功率目标值，与 P_{DG} 相减后得到超级电容输出功率参考值 P_{SC_ref} ， P_{DG} 与 P_{SC_ref} 之和经过低通滤波时间常数 τ_{Bat} 后得到锂电池输出功率目标值，再与滤波之前的值做减法得到锂电池输出功率参考值 P_{Bat_ref} ，各变量关系如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_{SC_ref}(s) = -P_{DG}(s) \frac{\tau_{SC}s}{1 + \tau_{SC}s} \\ P_{Bat_ref}(s) = -P_{DG}(s) \frac{1}{1 + \tau_{SC}s} \cdot \frac{\tau_{Bat}s}{1 + \tau_{Bat}s} \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行差分 and 离散处理后可知：时间常数越大，混合储能所能补偿的频率范围越大，下一时刻混合储能输出功率也就越大。所以根据锂电池与超级电容器的控制时间常数不同可以达到分频平抑功率波动。锂电池的储能容量和充放电速度决定了其适合平抑小功率波动，超级电容由于高功率密度和响应速度能更好地应对大功率波动。

在采用低通滤波器控制算法对锂电池进行充放电控制时，应减少对锂电池过充过放。在传统平滑

控制的基础上，需要引入电池实时 SOC 值调节 τ 的大小，增减锂电池出力。但是应用传统安时积分法计算电池 SOC 值存在明显缺陷，尤其是没有考虑电池使用次数增加之后电池老化、转换效率和自放电问题。在平滑控制中引入自学习人工智能法，可以使 BMS 收集电池信息，并不断自主归纳更新电池信息，提高 BMS 的控制精度。改进后的基于 SOC 反馈的自学习平滑储能控制框图^[16-17]如图 6 所示。

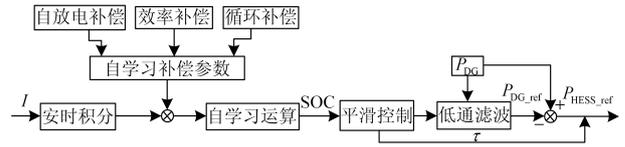


图6 基于 SOC 反馈的自学习平滑储能框图

Fig. 6 Block diagram of adjustable smooth control time constant

自主学习人工智能机制是一种迭代学习的机器学习方法。电池在充放电过程中，电量会受到温度、充放电电流大小的影响，当充放电次数增多时，电池老化也会减小存储的电量，自学习运算就是将电池电量计算的影响因子转化为补偿参数。

假设 U_k 为系统参数第 k 次学习值， S_k 为第 k 次学习时与 U_k 关联的状态量，那么经过一次迭代后第 $k+1$ 次系统参数如公式(10)。充放电效率就是上述的 U_k 参量，温度和充放电电流是上述的 S_k 状态量。

引入正确的自学习机制的关键是建立准确的电池充放电效率和电池容量之间的关系。通过实验的方法分别测出温度和充放电电流大小与充放电效率的关系。测试过程包括两个项目：

1) 测试电池的实际容量，即选取电池样品，测量其在不同温度及不同充放电倍率下的实际容量。

2) 在不同温度、不同的放电倍率前提下，测试电池的充放电效率。

测试之后得到电池在不同温度、不同倍率下的充放电容量及充放电效率数据如表 2 所示。锂电池在不同温度下的实际充电电动势曲线和放电电动势曲线分别如图 7 和图 8 所示。

用二次函数拟合两个影响因子与效率的曲线关系，从而不断地对比前一次学习时刻的影响因素归纳调整下一时刻的充放电效率值，完善电池体系的控制规则，提高电池管理系统的控制精度。同时电池静置一段时间会发生自放电现象造成电量的损失，在计算式中也需要考虑这一部分电能。综上，充放电情况下自学习安时积分 SOC 运算表达式如式(11)所示。

表 2 不同温度和不同放电倍率下的电池能量及充放电效率

Table 2 Battery energy and charge discharge efficiency under different temperature and different discharge rate

		充放电倍率(C)								
		0.2			0.5			1		
		W_d/J	W_c/J	$\eta / \%$	W_d/J	W_c/J	$\eta / \%$	W_d/J	W_c/J	$\eta / \%$
温度/ °C	0	1 945 303	2 088 804	93.13	1 862 423	2 156 830	86.35	1 896 696	2 280 231	83.18
	20	2 145 998	2 267 538	94.64	2 113 203	2 307 992	91.56	2 065 937	2 330 442	88.65
	40	2 180 916	2 274 156	95.90	2 125 905	2 303 006	92.31	2 083 471	2 318 316	89.87

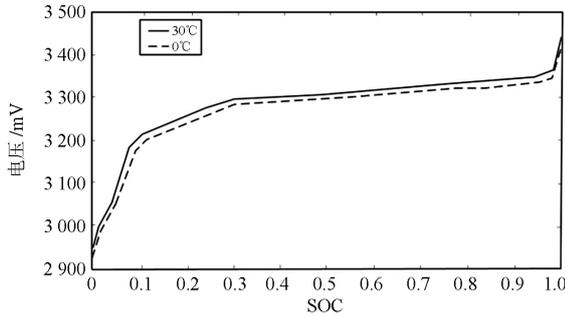


图 7 锂电池在不同温度下的充电电动势曲线

Fig. 7 Charging electromotive force curves of lithium batteries at different temperatures

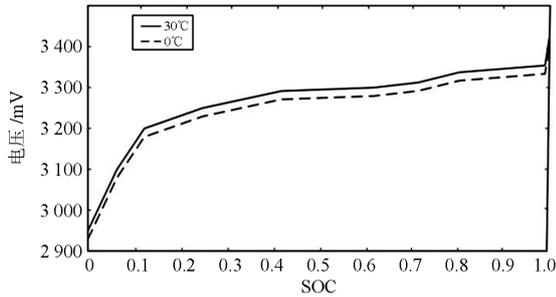


图 8 锂电池在不同温度下的放电电动势曲线

Fig. 8 Discharge electromotive force curves of lithium batteries at different temperatures

$$U_{k+1} = F(U_k, S_k) \quad (10)$$

$$Q = Q_0 \pm \eta \int_0^t I dt - \lambda \cdot h \quad (11)$$

式中: Q 是充/放电电量终值; Q_0 是电量起始值; η 是充/放电总效率; I 是电流; t 是充放电时间; λ 是静置单位时间自放电量; +、- 分别对应充电和放电过程。

锂电池始终工作在合理的充放电功率范围内, 大功率充放电场合优先使用超级电容器。为了确定混合储能系统的调度策略^[18-21], 有如下前提。

1) 储能系统由锂电池和超级电容器共同组成, $P_{ESS}(t) = P_B(t) + P_{SC}(t)$, $P_{HESS}(t)$ 为 t 时刻储能系统总充放电功率, $P_{HESS}(t)$ 大于 0 表示放电, $P_{HESS}(t)$ 小于

0 表示充电; $P_B(t)$ 、 $P_{SC}(t)$ 分别为 t 时刻锂电池和超级电容充放电功率大小。

2) 为了保证锂电池和超级电容的正常工作, 需要限制 SOC 的上下值, 锂电池: $0.2 \leq SOC_B \leq 0.8$, 超级电容: $0.1 \leq SOC_{SC} \leq 0.9$ 。

引入实时 SOC 值反馈调节的混合储能平滑控制, 并综合超级电容和蓄电池两者在平抑高低频功率波动方面的不同, 采用如下控制策略。

① $0 < |\Delta f| < 0.01 \text{ Hz}$, 充放电功率小, 只有锂电池工作, 超级电容不工作。

$$\begin{cases} P_B(t) = P_{HESS}(t) \\ P_{SC}(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

② $0.01 \text{ Hz} \leq |\Delta f| < 0.2 \text{ Hz}$, 需要根据超级电容 SOC 值分两种情况:

a. 当频率下降且 $SOC_{SC} \geq 0.7$, 频率上升且 $SOC_{SC} \leq 0.3$ 时, 优先使用超级电容分别进行放电和充电, 锂电池不工作。

$$\begin{cases} P_{SC}(t) = P_{HESS}(t) \\ P_B(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

b. 当频率下降且 $SOC_{SC} < 0.7$, 频率上升且 $SOC_{SC} > 0.3$ 时, 使用锂电池最大允许功率分别进行放电和充电, 剩余部分由超级电容辅助放电和充电, $P_{Bmax} > 0$ 放电, $P_{Bmax} < 0$ 充电。

$$\begin{cases} P_B(t) = P_{Bmax} \\ P_{SC}(t) = P_{HESS}(t) - P_B(t) \end{cases} \quad (14)$$

③ $|\Delta f| \geq 0.2 \text{ Hz}$, 充放电功率很大。当频率上升时, 超级电容以最大充电功率充电, 剩余电量由锂电池吸收; 当频率下降时, 超级电容以最大放电功率放电, 剩余电量由锂电池补充。

$$\begin{cases} P_{SC}(t) = P_{SCmax} \\ P_B(t) = P_{HESS}(t) - P_{SCmax} \end{cases} \quad (15)$$

式中, P_{Bmax} 和 P_{SCmax} 分别表示锂电池和超级电容器允许的最大充放电功率。

4 仿真分析

4.1 含 VSG 控制单元的微网系统

为了验证本文设计的混合储能单元的可行性，在 Matlab/Simulink 环境中搭建如图 9 所示的含 VSG 控制的光储微网仿真平台。仿真系统中，光伏电池阵列以最大功率跟踪模式工作，锂电池和超级电容器构成混合储能系统平抑光伏波动，通过 DC-DC 升压斩波器连接到直流母线上。同步发电机 G_1 容量大小为 $15\text{kV}\cdot\text{A}$ ，具备二次调频能力，且作为系统的平衡节点支撑微网系统的频率和电压。结合调频控制环节实现虚拟同步发电机仿真模型，额定频率为 50Hz ，额定输出线电压为 380V ，滤波电容为 $100\ \mu\text{F}$ ，滤波电感为 $0.2\ \text{mH}$ ，基于 VSG 控制的 HESS 额定容量为 $100\text{kV}\cdot\text{A}$ ，系统负载为 50kW 可调阻性负载。负载有功功率变化如图 10(a)，图 10(b) 描述了 VSG 中有无混合储能系统两种情况下的有功功率响应，图 10(c) 描述了有无混合储能系统的系统频率变化。

4.2 含 VSG 控制的两区域互联系统

图 11 为两区域电网互联系统，中间联络线通过高压直流输电线传输。在 0.13s 后突然增加 30MW 负载，从图 12 中可看出，无混合储能系统参与情况下频率可迅速上升到额定值附近，而在加入混合储能系统后，频率在大约 0.17s 时缓慢上升到额定值，这是因为将同步发电机的转子运动方程应用在分布式逆变电源的有功控制环，加入混合储能系统后，增加了系统的惯性，其有功功率缓慢上升到设定值，使得分布式逆变电源具备了一定的惯性。在受到负荷扰动时，加入 VSG 单元后能够向系统提供更多的动态功率补偿，减小了光伏输出功率缺额，提高了系统频率的稳定性。

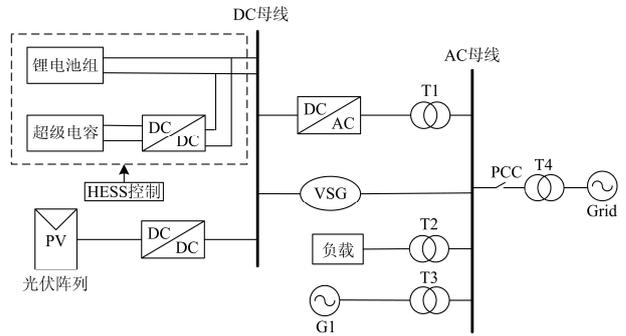
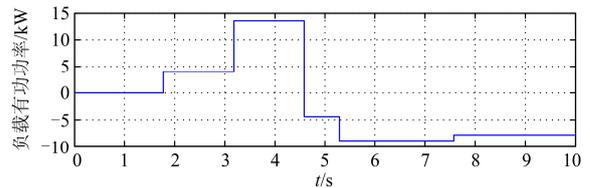
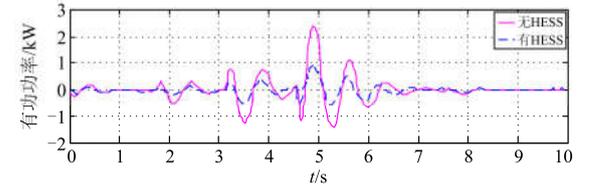


图 9 含 VSG 单元的微网系统

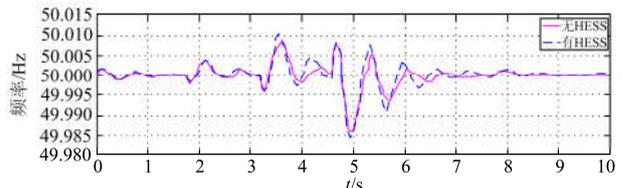
Fig. 9 Microgrid system containing VSG unit



(a) 负载有功功率变化



(b) 有功功率响应



(c) 频率响应

图 10 频率和有功功率随负载变化曲线

Fig. 10 Frequency and active power with load variation curve

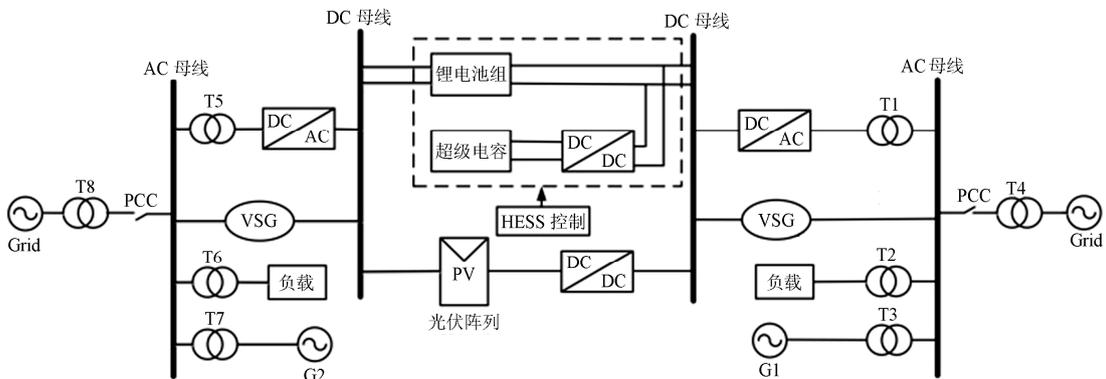


图 11 含 VSG 单元的两区域互联系统

Fig. 11 Interconnected system with VSG units

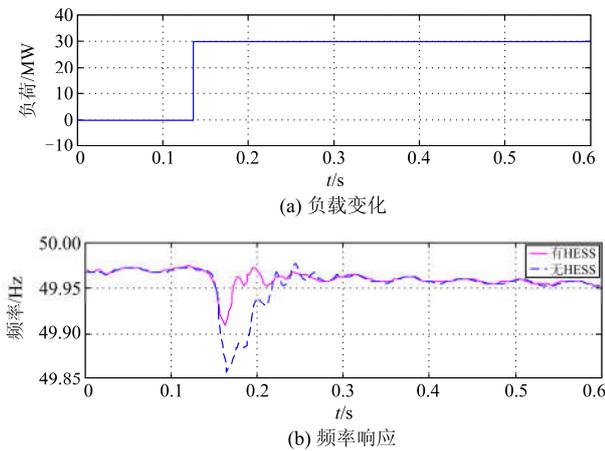


图 12 互联电网中有无 HESS 参与调频对比

Fig. 12 Comparison of interconnected grid with or without HESS participating frequency regulation

5 结论

本文针对基于混合储能的虚拟同步电机参与微网调频进行了研究, 是在频率控制基础上模拟同步发电机的转子惯量与系统调频特性, 在功率波动时提出基于混合储能系统的 SOC 反馈的自学习平滑储能充放电控制策略, 并在两种场景下对比是否加入混合储能系统观察有功和频率响应。结果验证了基于 VSG 控制的光储系统能较好地模拟出 SG 的转动惯量, 增加了独立微网的转动惯量, 提高了系统的频率稳定性。

参考文献

- [1] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 85-90.
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 85-90.
- [3] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(3): 783-790.
SHI Qiaoming, WANG Gang, FU Lijun, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(3): 783-790.
- [4] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [5] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(19): 82-89.
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(19): 82-89.
- [6] 程启明, 张宇, 谭冯忍, 等. 基于 Washout 滤波器的虚拟同步发电机新型控制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(16): 51-57.
CHENG Qiming, ZHANG Yu, TAN Fengren, et al. Research on new control method of virtual synchronous generator based on Washout filter[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(16): 51-57.
- [7] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(21): 157-169.
ZHAO Jiaxing, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(21): 157-169.
- [8] 孙承晨, 袁越, CHOI S S, 等. 基于经验模式分解和神经网络的微网混合储能容量优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 19-26.
SUN Chengchen, YUAN Yue, CHOI S S, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in microgrid using empirical mode decomposition and neural network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 19-26.
- [9] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(13): 22-31.
ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. Mathematical model and strategic energy storage selection of virtual synchronous generator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(13): 22-31.
- [10] VASSILAKIS A, KARAPANOS V. A battery energy storage based virtual synchronous generator[J]. *Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control-IX (IREP)*, 2013, 25(30): 1-6.
- [11] 孟建辉. 分布式电源的虚拟同步发电机控制技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
MENG Jianhui. Control strategy of virtual synchronous generator for distributed generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [12] 邓威, 谢煜东, 黄际元, 等. 多类型储能一次调频特性研究[J]. *湖南电力*, 2015, 35(1): 1-4, 10.
DENG Wei, XIE Yudong, HUANG Jiyuan, et al. Research

- on primary frequency regulation characteristics of multi-type energy storage system[J]. Hunan Electric Power, 2015, 35(1): 1-4, 10.
- [13] 黄际元, 李欣然, 黄继军, 等. 不同类型储能电源参与电网调频的效果比较研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(3): 49-53, 71.
HUANG Jiyuan, LI Xinran, HUANG Jijun, et al. Comparison of application of different energy storages in power system frequency regulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(3): 49-53, 71.
- [14] 盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541-3550.
SHENG Wanxing, LIU Haitao, ZENG Zheng, et al. An energy hub based on virtual-machine control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550.
- [15] 丁明, 陈忠, 苏建徽, 等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25, 102.
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25, 102.
- [16] 刘耘丰. 动力电池电压与电流自学习管理控制系统[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
LIU Yunfeng. Power battery voltage and current self-learning management control system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2012.
- [17] 王辉. 锂电池与超极电容混合储能技术及其在风电中的应用研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2013.
WANG Hui. Study on the lithium battery-supercapacitor hybrid energy storage system and its application in wind power generation[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2013.
- [18] 吕志鹏, 梁英, 曾正, 等. 应用虚拟同步电机技术的电动汽车快充控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4287-4294.
LÜ Zhipeng, LIANG Ying, ZENG Zheng, et al. Virtual synchronous motor based control scheme of fast charger for electric vehicle application[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4287-4294.
- [19] 石荣亮, 张兴, 刘芳, 等. 不平衡与非线性混合负载下的虚拟同步发电机控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6086-6095.
SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. A control strategy for unbalanced and nonlinear mixed loads of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6086-6095.
- [20] 付柳. 基于虚拟同步发电机的微电网逆变器控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
FU Liu. Research of control strategies for microgrid inverter based on virtual synchronous generator[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [21] TAN X, LI Q, WANG H. Advances and trends of energy storage technology in microgrid[J]. International Journal of Electric Power Energy Systems, 2013, 44(1): 179-191.

收稿日期: 2017-11-16; 修回日期: 2017-12-29

作者简介:

禹红(1973—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为水电站保护与微网控制; E-mail: 2046382344@qq.com

夏向阳(1968—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: xia_xy@126.com

(编辑 魏小丽)