

混合储能系统的动态比例功率分配控制策略

张芳¹, 张红娟¹, 高妍¹, 杨磊¹, 靳宝全²

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 针对混合储能系统(HESS)中负载多变性和冲击性导致的系统不稳定, 充放电效率下降, 控制难度增加等问题, 提出了一种蓄电池/超级电容器混合储能系统的动态比例功率分配控制策略。控制采用双层结构, 外层功率控制回路用于确定蓄电池与超级电容器的功率分配比; 内层电流控制回路用于确定蓄电池和超级电容器的最佳充放电状态以及实时跟踪负载需求。当外层功率控制回路中的负载不变时, 超级电容器和蓄电池的功率分配比维持不变。负载改变时, 功率分配比动态改变, 超级电容器提供最大的动态负载电流, 蓄电池则以不变的动力继续工作。通过仿真测试表明, 动态比例功率分配不仅能够减小蓄电池电量波动及其变化率, 而且能够提高系统充放电效率和稳定性。

关键词: 混合储能; 动态比例功率分配; 功率分配比; 充放电效率

中图分类号: TM343 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21526

Dynamic Proportional Power Allocation Control Strategy for Hybrid Energy Storage System

ZHANG Fang¹, ZHANG Hongjuan¹, GAO Yan¹, YANG Lei¹, JIN Baoquan²

(1. College of Electrical & Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: A dynamic proportional power allocation control strategy for hybrid battery/supercapacitor energy storage system was proposed to solve the problems of system instability, charge and discharge efficiency reduction and control difficulty increase caused by load's variability and impact in hybrid energy storage system (HESS). The control adopted a double-layer structure, and the outer power control loop was used to determine the power-split ratio between the battery and the supercapacitor, the inner current control loop was used to determine the optimal charging and discharging state of the battery and supercapacitor, and track the demand of the load in real time. When the load does not change in the outer power control loop, the power-split ratio of the supercapacitor and the battery remains the same. When the load changes, the power-split ratio changes dynamically, the supercapacitor provided the maximum dynamic load current, and the battery continued to work with constant power. Simulation tests show that dynamic proportional power allocation not only can reduce fluctuations and change rates of the battery power, but also can improve system charge-discharge efficiency and stability.

Key words: hybrid energy storage; dynamic proportional power allocation; power-split ratio; charge-discharge efficiency

由于资源匮乏和环境污染等问题, 近年来储能技术受到越来越多的关注^[1]。蓄电池能够存储低频信号的能量, 但仍有一些弱点, 如低温下工作能力弱、循环寿命短、功率密度低^[2]。超级

电容器具有功率响应快、功率密度高和循环能力强的特点, 因此被广泛地应用在大功率场合^[3-4]。但是要想实现超级电容器的突破性发展还需进一步解决能量密度低的问题。而混合储

基金项目: 国家自然科学基金(51775363); 山西省重点研发计划项目(201803D121124);

山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(RZ18100351)

作者简介: 张芳(1995—), 女, 硕士, Email: fangzhangtl@163.com

能系统把两个互补的储能元器件相结合,能够在提高储能能力的同时,提高功率密度^[5]。此外,还可以保护蓄电池免受峰值功率和负载波动的影响,延长其使用寿命,从而进一步提高系统的存储效率^[6-7]。

考虑到储能器件功率和容量有限,必须通过控制器对其进行调控^[8]。通过在储能系统中的每个储能器件和直流母线之间放置双向DC/DC变换器,能量可以被双向调控。储能系统存储能量时不仅可以回收直流母线多余能量,而且可以减小和缓冲直流母线能量聚集造成的波动。释放能量时,可以在给负载补充能量的同时,弥补直流母线电压过低造成的电机故障停机现象。但是这增加了系统架构的复杂性,需要一种可靠的功率管理控制策略进行协调或优化管理来达到最优的充放电效率^[9]。基本原理是根据超级电容器或蓄电池电流、电压以及荷电状态,按照负载变化的需求对系统中所有储能装置进行功率分配,使系统高效稳定运行^[10]。因此,本文设计了基于交错并联式双向DC/DC控制器的混合储能系统功率管理控制策略,通过动态方法调节蓄电池和超级电容器之间的功率分配比,并根据负载能量估计超级电容器和蓄电池的电流参考值。最后通过对阶跃负载的不同运行工况进行仿真,验证了控制策略的有效性和稳定性。

1 混合储能系统模型

图1为混合储能系统结构图。

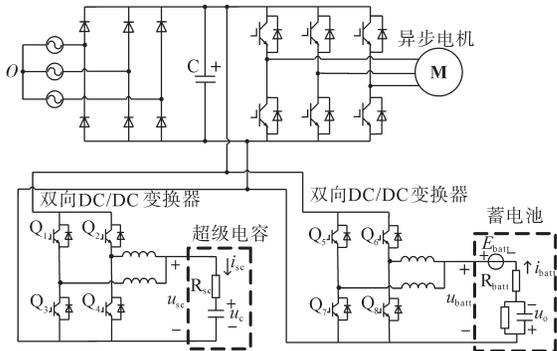


图1 混合储能系统结构图

Fig.1 Structural diagram of hybrid energy storage system

该系统主要由蓄电池、超级电容器、双向DC/DC变换器、变频器和异步电机组成。电机负载通过逆变器连接到直流母线。蓄电池和超级电容器,分别通过双向DC/DC变换器并接到直流母线上,使得功率可以双向流过储能元件。双向

DC/DC变换器采用两相交错并联结构,即开关管 Q_1, Q_3, Q_5, Q_7 与 Q_2, Q_4, Q_6, Q_8 的导通角分别相差 180° ,以减小电流纹波。两上管导通和两下管导通分别对应于变换器的Buck模式和Boost模式。

2 功率管理控制方案

为了提高功率管理控制的性能,提出了以下三个目标:1)混合储能系统应保持内部的功率平衡;2)混合储能系统应能实现不同系统之间的能源共享;3)混合储能系统应能够跟踪负载能量要求,减轻负载的功率输出和波动。

2.1 功率管理控制策略

根据以上目标建立了混合储能系统的功率管理控制策略的基本结构图,如图2所示。

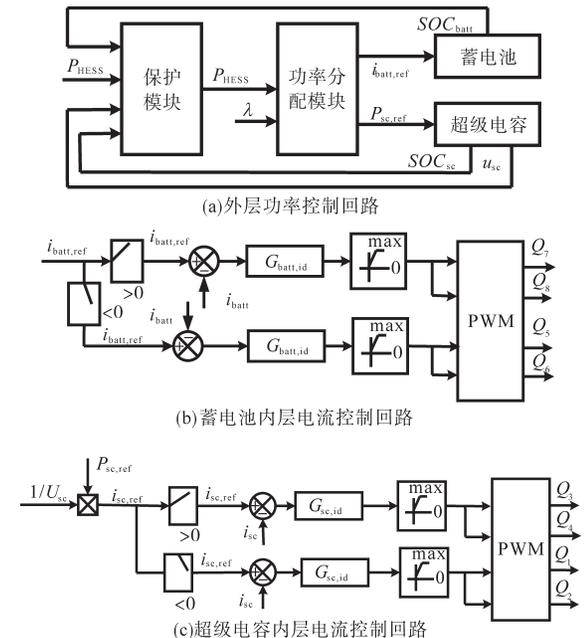


图2 混合储能系统的功率管理控制策略

Fig.2 Power management control strategy for hybrid energy storage system

图2中,开关小于0代表降压模式,开关大于0代表升压模式。该控制系统由一个外层功率控制回路和一个内层电流控制回路(蓄电池和超级电容器各1个)组成。其中外层功率控制回路负责控制超级电容器和蓄电池之间的功率流,通过保护模块和外部功率分配模块调节蓄电池和超级电容器之间的功率分配比来满足负载多变性和冲击性的要求,减小直流母线电压波动对系统性能的影响。内层电流控制回路中,超级电容器和蓄电池的输出电流均取决于负载功率,使得超级电容器的充放电电流是由蓄电池的充放电电流动态决定的。蓄电池的电流回路采用恒流控制模式;

而超级电容器的电流回路以功率跟踪模式将充放电电流控制在动态调整的参考值上,该值取决于超级电容器电压、蓄电池电流与负载功率。因此,负载能量由蓄电池和超级电容器按照一定的模式共享。交错模式下,PWM调制模块在高频开关频率下相移180°,以便在两个分支之间平均分配功率流。

蓄电池和超级电容器的功率表达式分别为

$$P_{batt} = E_{batt} i_{batt} - R_{batt} i_{batt}^2 - u_o i_{batt} = u_{batt} i_{batt} \quad (1)$$

$$P_{sc} = R_{sc} i_{sc}^2 + u_c i_{sc} = u_{sc} i_{sc} \quad (2)$$

式中: P_{batt} , E_{batt} , i_{batt} , R_{batt} , u_o , u_{batt} 分别为蓄电池的功率、平衡电势、电流、等效内部电阻、等效电容电压和端电压; P_{sc} , R_{sc} , i_{sc} , u_c , u_{sc} 分别为超级电容的功率、等效内部电阻、电流、等效电容电压和端电压。

超级电容器和蓄电池功率分配的表达式分别为

$$P_{batt,ref} = \lambda \cdot P_{HESS} = i_{batt} \cdot u_{batt} \quad (3)$$

$$P_{sc,ref} = (1 - \lambda) \cdot P_{HESS} = u_{sc} i_{sc} \quad (4)$$

式中: P_{HESS} 为混合储能系统的总功率; λ 为功率分配系数, $0 \leq \lambda \leq 1$ 。

混合储能系统的效率表达式为

$$\eta_{HESS} = 1 - \frac{i_{batt}^2 R_{batt} + i_{sc}^2 R_{sc}}{P_{HESS} + i_{batt}^2 R_{batt} + i_{sc}^2 R_{sc}} \quad (5)$$

为了允许应用更小、更经济的双向DC/DC变换器,并避免超级电容电流过高而导致传导损耗增加的问题,其荷电状态的最佳工作区间设置在0.5~1,如下式:

$$\begin{cases} SOC_{sc} = \int_0^t \frac{\eta_{sc,c} \cdot i_{sc}(t)}{U_{sc,max} \cdot C_{sc}} dt \\ SOC_{sc} = \int_0^t \frac{i_{sc}(t)}{\eta_{sc,d} \cdot U_{sc,max} \cdot C_{sc}} dt \end{cases} \quad (6)$$

为了避免蓄电池过度充电,其荷电状态的最佳工作区间设置在0.2~0.9,如下式:

$$\begin{cases} SOC_{batt} = \int_0^t \frac{\eta_{batt,c} \cdot i_{batt}(t)}{U_{batt,max} \cdot C_{batt}} dt \\ SOC_{batt} = \int_0^t \frac{i_{batt}(t)}{\eta_{batt,d} \cdot U_{batt,max} \cdot C_{batt}} dt \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U_{sc,max}$, $U_{batt,max}$ 分别为超级电容器和蓄电池的最大电压值; $\eta_{sc,c}$, $\eta_{sc,d}$ 分别为超级电容器充、放电效率值; $\eta_{batt,c}$, $\eta_{batt,d}$ 分别为蓄电池的充、放电效率值; C_{batt} , C_{sc} 分别为蓄电池和超级电容的等效电容; SOC_{sc} , SOC_{batt} 分别为蓄电池和超级电容的荷电状态。

2.2 动态比例功率分配控制策略

通过结合负载功率,超级电容器和蓄电池的荷电状态得到混合储能系统的功率管理控制框图,如图3所示。图3中, P_L 为负载功率。

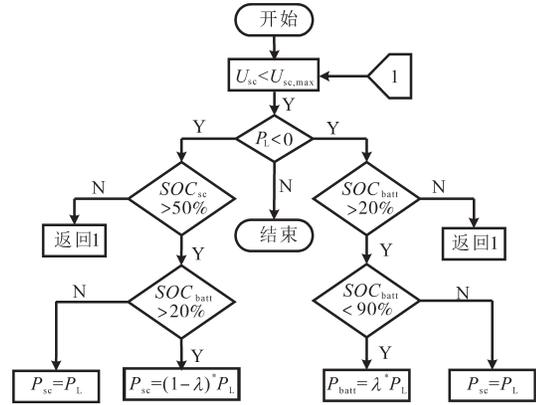


图3 混合储能系统在 Buck 模式下的功率管理控制框图

Fig.3 Block diagram of power management control for hybrid energy storage system in the Buck mode

在不同的负载功率需求下,可以动态选择不同的功率分配比。本文以 Buck 模式为例。

状态 A:当超级电容器的端电压 $U_{sc} < U_{sc,max}$, 蓄电池的荷电状态 $SOC_{batt} < SOC_{batt,up}$ 时,超级电容器和蓄电池按照功率分配比 λ 共同充电。蓄电池组采用恒流充电模式,使其达到预先定义的参考值 $i_{batt,ref}$ 。然后,蓄电池功率与混合储能系统的总功率之差由超级电容器通过 DC/DC 转换器存储,该转换器在功率跟踪控制模式(即 i_{sc} 控制模式)下进行控制。

状态 B:当负载变化(增大)时,通过动态改变功率分配比使得高再生制动能量被有效地馈送到超级电容器。当超级电容器的端电压 $U_{sc} < U_{sc,max}$, 蓄电池的荷电状态 $SOC_{batt} < SOC_{batt,up}$ 时,减小蓄电池分配的功率,即减小功率分配比 λ , 蓄电池仍以不变的动力按照恒流充电模式进行充电。将状态 A 中 i_{sc} 控制模式下的电流参考值与直流母线侧额外的再生能量所需电流值之和设置为超级电容器的电流参考值 $i_{sc,ref}$ 。当超级电容器的端电压 $U_{sc} < U_{sc,max}$ 、蓄电池的荷电状态 $SOC_{batt} = SOC_{batt,up}$ 时,超级电容器采用功率跟踪控制模式充电直到 $U_{sc} = U_{sc,max}$, 储能装置退出运行,此时, $P_{sc} = 0$ 。

由于负载突变前后蓄电池功率保持不变,得到功率分配比关系为

$$\lambda_1 P_{HESS1} = \lambda_2 P_{HESS2} \quad (8)$$

式中: λ_1 , λ_2 分别为负载突变前、后的功率分配比,

$P_{\text{HESS1}}, P_{\text{HESS2}}$ 分别为负载突变前、后混合储能系统的总能量。

系统损失的总能量为

$$W_{\text{loss}} = \int_0^{t_1} \left\{ \left(\frac{\lambda_1 P_{\text{HESS1}}}{u_{\text{batt}}} \right)^2 \cdot R_{\text{batt}} + \left[\frac{(1 - \lambda_1) P_{\text{HESS1}}}{u_{\text{sc}}} \right]^2 \cdot R_{\text{sc}} \right\} dt + \int_{t_1}^{t_2} \left\{ \left(\frac{\lambda_2 P_{\text{HESS2}}}{u_{\text{batt}}} \right)^2 \cdot R_{\text{batt}} + \left[\frac{(1 - \lambda_2) P_{\text{HESS2}}}{u_{\text{sc}}} \right]^2 \cdot R_{\text{sc}} \right\} dt \quad (9)$$

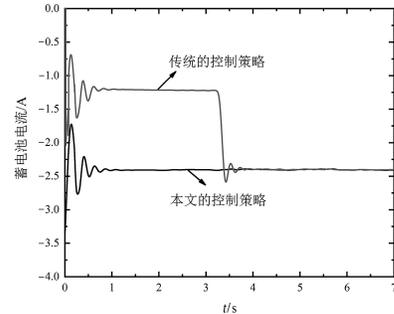
3 仿真验证

为了验证动态比例功率分配控制策略的性能,在混合电源环境下进行 Matlab 建模仿真。交流异步电机通过逆变器连接到直流母线上,蓄电池和超级电容器作为能量缓冲器,存储瞬态能量和峰值功率,这两个储能装置通过两个相应的双向 DC/DC 变换器连接到直流母线上。混合储能系统的模型参数如下:超级电容器的额定电压为 220 V,最大充放电电流为 30 A,额定电容为 1.6 F;蓄电池的额定电压为 220 V,最大输出电流为 20 A,额定容量为 24 A·h。

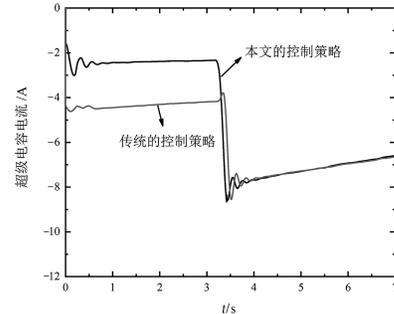
通过仿真对三相异步电机的制动(或电动)状态进行模拟,电机运行工况为:0~7 s 电机处于制动(或电动)状态,在 3 s 时,负载转矩 T_1 发生突变。考虑到在实际应用中,蓄电池的电流值应小于 10% 的容量,其电流参考值设定在 0~2.4 A。考虑到超级电容器的能量转换效率和额定电压,其电压的范围应在 100~220 V。因此,在仿真过程中,超级电容器的充电(放电)电压初始值预先设定为 100 V (200 V)。此时超级电容器的端电压 $0.5U_{\text{sc,max}} \leq U_{\text{sc}} < U_{\text{sc,max}}$, 蓄电池的荷电状态 $0.2 \leq \text{SOC}_{\text{batt}} < 0.9$, 均处于正常充放电状态。

混合储能系统加入动态比例功率分配控制时,根据式(3)计算得出负载突变前功率分配比的取值范围: $0 \leq \lambda_1 \leq 0.63$ 。由于蓄电池的充电效率与功率成正比^[1],超级电容器的充电电流与效率成反比,所以 $\lambda_1=0.63$ 时充电效率较高。

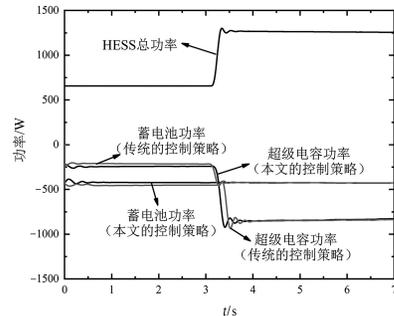
图 4 为动态比例功率分配控制策略和传统的控制策略的充电仿真对比波形图,传统的控制策略即混合储能系统在充电过程中未加入动态比例功率分配控制。由图 4 可知,采用本文的控制策略,蓄电池的充电电流始终保持在 2.4 A;而采用传统的控制策略,负载增加后,蓄电池的充电电流从 1.2 A 增加到 2.4 A,如图 4a 所示。超级电



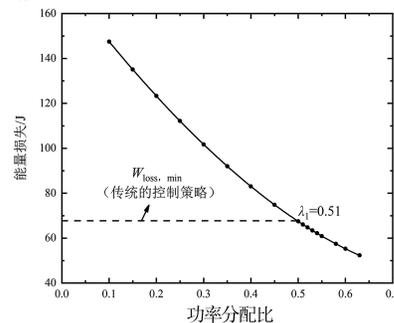
(a) 蓄电池电流波形图



(b) 超级电容器电流波形图



(c) HESS总功率、超级电容器功率和蓄电池功率波形图



(d) 功率分配比控制中系统能量损失和功率分配比的关系图

图 4 动态比例功率分配控制和传统控制的充电仿真对比波形图

Fig. 4 Comparison of charging simulation waveforms of dynamic proportional power distribution control and traditional control. The traditional control strategy uses power tracking for charging, as shown in Fig. 4b. Using the traditional control strategy, the peak current of the battery is always within a reasonable control range, but the battery does not reach its best power working state. And due to the power distribution ratio cannot be dynamically changed, in the case of load surge, the super capacitor cannot store all the regenerative braking energy, which will lead to the battery current suddenly increasing, eventually affecting its service life. The power of each part of the mixed energy storage system is shown in Fig. 4c, during the 1~3 s period,

混合储能系统总功率为 665 W, 3 s 后负载增加时, 混合储能系统的总功率增加到 1 275 W。在传统的控制中负载突变时, 蓄电池必须迅速承担部分功率波动带来的瞬时应力, 超级电容器也没有充分发挥其作用。采用本文的控制, 负载突变后功率分配比由 0.63 动态调节为 0.33, 超级电容器承担了负载全部的功率波动。较传统的控制策略, 混合储能系统的充电效率提高了 0.8%。图 4d 为动态比例功率分配控制中系统能量损失和功率分配比的关系图, $W_{loss, min}$ 为传统的控制策略下最小的能量损失, 当 $0.51 \leq \lambda_1 \leq 0.63$ 时采用本文控制策略的系统能量损失均小于传统的控制策略。

图 5 为动态比例功率分配控制和传统的控制的放电仿真对比波形图。

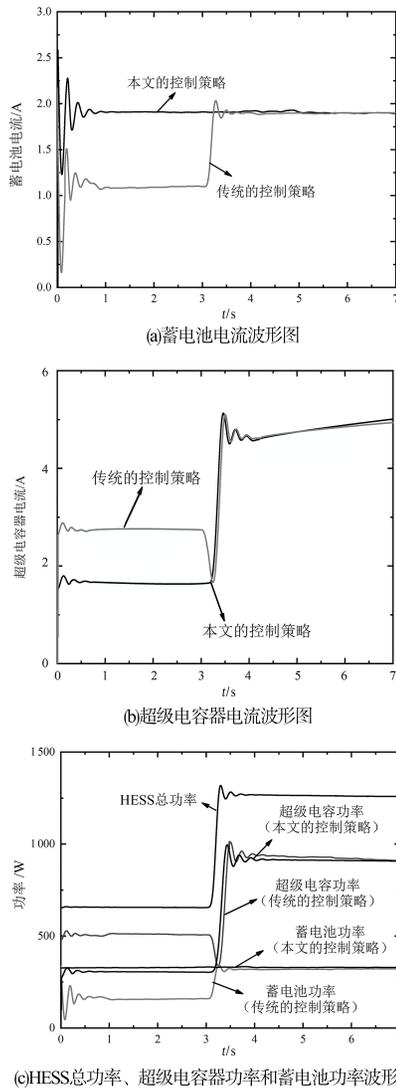


图 5 动态比例功率分配控制和传统的控制的放电仿真对比波形图
Fig.5 Comparison of discharging simulation waveforms of dynamic proportional power distribution control and traditional control

在动态比例功率分配控制中, 应当提高超级电容器的放电功率, 以便为下一次存储负载的峰值功率做准备, 同时考虑系统的能量损失与功率分配比成反比, 实验选取 λ_1 为 0.51, 此时蓄电池的放电电流保持在 1.9 A 附近。而采用传统的控制策略时, 负载增加, 蓄电池的放电电流从 1 A 突增到 1.9 A, 如图 5a 所示。超级电容器以功率跟踪方式进行充电, 如图 5b 所示。混合储能系统各部分功率如图 5c 所示, 混合储能系统的总功率由 665 W 增加到 1 275 W。采用动态比例功率分配控制, 负载突变后功率分配比由 0.51 动态调节为 0.26。较传统的控制策略, 混合储能系统的放电效率提高了 0.75%。

因此, 在负载突变情况下采用动态比例功率分配控制时, 超级电容器输出功率响应更快, 混合储能系统能量损失更少, 充放电效率更高。而且蓄电池能够保持在给定条件下工作, 超级电容器在负载出现峰值功率时可以快速调整工作状态, 及时存储剩余电力, 从而提高了系统稳定性。

4 结论

本文针对电机负载突变工况下系统性能下降的问题, 提出了一种动态比例功率分配控制策略。基于混合储能系统中储能元件运行状态, 推导出了负载能量利用关系式, 设计了动态调节蓄电池和超级电容器功率分配比的方案。在 Matlab 环境下通过阶跃负载验证了该策略的有效性。仿真结果表明, 超级电容器能够承担负载快速波动的峰值功率, 从而减少了蓄电池电流的波动, 有效延长其使用寿命。因此在大功率场合, 采用混合储能技术并动态调控功率分配比能够在保证系统稳定的同时提高充放电效率。

参考文献

- [1] 米根锁, 魏宏斌. 混合储能在电力电子变压器中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018(1): 109-114.
- [2] 李冰, 李岚, 柴伦, 等. 一种基于限值管理的混合储能系统控制策略[J]. 电气传动, 2019, 49(11): 92-96.
- [3] 蔡国营, 王亚军, 谢晶, 等. 超级电容器储能特性研究[J]. 电源世界, 2009(1): 33-38.
- [4] 朱成龙, 杨淑连, 冯磊, 等. 锂电池/超级电容器混合储能分层协调控制策略[J]. 电源技术, 2019, 43(10): 1672-1675.
- [5] Ghiassi-Farrokhfal Y, Rosenberg C, Keshav S, et al. Joint optimal design and operation of Hybrid energy storage systems[J].

(下转第 63 页)

5 结论

鉴于直流微网系统惯性低、且直流系统母线电压抗干扰能力弱的问题,本文提出了一种模拟同步发电机特性的控制策略,并结合荷电状态对下垂控制系数进行调整,得到了基于自适应AVSG控制方法,根据下垂控制特性曲线的平移操作来调整虚拟同步电机有功分配方式。通过仿真结果得出,基于自适应下垂控制特性的AVSG控制策略能有效避免下垂控制系数变化过程中可能出现的系统失稳风险,有效地分配系统有功并调整直流系统的荷电状态,从而确保风储发电单元持续支撑含可再生微网系统的稳定运行。

参考文献

- [1] 徐殿国,刘瑜超,武健.多端直流输电系统控制研究综述[J].电工技术学报,2015,30(17):1-12.
- [2] 刘进军.电能系统未来发展趋势及其对电力电子技术的挑战[J].南方电网技术,2016,10(3):78-81.
- [3] Wu Heng, Ruan Xinbo, Yang Dongsheng, *et al.* Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7):4292-4303.
- [4] Mei Shengwei, Zheng Tianwen, Chen Laijun, *et al.* A comprehensive consensus-based distributed control strategy for grid-connected PV-VSC[C]/35th Chinese Control Conference(CCC). Chengdu, China:IEEE,2016.
- [5] 张玉治,张辉,贺大为,等.具有同步发电机特性的微电网逆变器控制[J].电工技术学报,2014,29(7):261-268.
- [6] Hirase Y, Sugimoto K, Sakimoto K, *et al.* Analysis of resonance in microgrids and effects of system frequency stabilization using a virtual synchronous generator[J].IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1287-1298.

- [7] Shintai T, Miura Y, Ise T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [8] 王炜宇,李勇,曹一家,等.基于虚拟调速器的多端直流虚拟同步机控制策略[J].中国电机工程学报,2018,38(12): 3461-3470.
- [9] 赵杨阳,柴建云,孙旭东.基于虚拟同步发电机的柔性虚拟调速器模型[J].电力系统自动化,2016,40(10):8-15.
- [10] 徐海珍,张兴,刘芳,等.基于超前滞后环节虚拟惯性的VSC控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(7):1918-1926.
- [11] 李聪.基于下垂控制的微电网运行仿真及小信号稳定性分析[D].成都:西南交通大学,2013.
- [12] Dierckxsens C, Srivastava K, Reza M, *et al.* A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems[J].Electric Power Systems Research, 2012, 82(1): 54-58.
- [13] Beerten J, Cole S, Belmans R. Modeling of multi-terminal VSC HVDC systems with distributed DC voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1): 34-42.
- [14] Zhu J, Booth C D, Adam G P, *et al.* Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.
- [15] Mahmood H, Michaelson D, Jiang J A power management strategy for PV/battery hybrid systems in islanded microgrids[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 870-882.
- [16] Barklund E, Pogaku N, Prodanovic M, *et al.* Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2346-2352.
- [17] Liang J, Jing T, Gomis-Bellmunt O, *et al.* Operation and control of multi-terminal HVDC transmission for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2596-2604.

收稿日期:2020-01-03

修改稿日期:2020-02-11

(上接第56页)

- [5] IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(3):639-650.
- [6] 邓文丽,戴朝华,韩春白雪,等.计及再生制动能量回收和电能质量改善的铁路背靠背混合储能系统及其控制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(10):2914-2923.
- [7] 周美兰,冯继峰,张宇.纯电动汽车复合储能系统及其能量控制策略[J].电机与控制学报,2019,23(5):51-59.
- [8] 朱成龙,杨淑连,冯磊,等.锂电池/超级电容器混合储能分层协调控制策略[J].电源技术,2019,43(10):1672-1675.
- [9] Hussain S, Ali M U, Park G S, *et al.* A real-time bi-adaptive controller-based energy management system for battery-supercapacitor hybrid electric vehicles[J]. Energies, 2019, 12(24):

4662.

- [10] Lin T, Huang W, Ren H, *et al.* New compound energy regeneration system and control strategy for hybrid hydraulic excavators[J]. Automation in Construction, 2016, 68:11-20.
- [11] Zhao Y, Wang W, Xiang C, *et al.* Optimal allocation of a hybrid energy storage system considering its dynamic operation characteristics for wind power applications in active distribution networks[J]. IEEE Access, 2018, 42(13):4184-4196.

收稿日期:2020-02-27

修改稿日期:2020-03-12