

直流光储系统混合储能分频控制策略研究

针对直流光储系统中的混合储能部分,在传统的闭环控制和功率分频控制的基础上,提出针对参考电流的分频控制策略。直接将电压外环得到的参考电流进行滤波分频,将参考电流中的高频和低频分量分别将其作为超级电容和蓄电池的电流内环的参考值来进行控制,以此来实现在超级电容和蓄电池间的合理分配的目的。相较于传统分频控制,该控制策略无须对系统功率进行采样,且方法简单,易于实现。通过仿真软件对该方法进行验证,仿真结果表明,上述控制策略能快速、有效地调节光伏功率输出,抑制直流系统负荷突变引起的电压波动,保证系统的平稳运行。

孟康 解璞/陆军工程大学石家庄校区车辆与电气工程系 张乐/解放军63961部队 柴景云/重庆军代局驻七八九厂军代表

0 引言

近年来,分布式能源的发展促进了微电网技术的进步。直流微电网由于无须考虑频率稳定、无功调节和交流损耗等问题,便于接入光伏等可再生能源。直流光储系统可广泛应用于节能路灯、太阳能户用系统等中小型系统。然而光伏系统的电能输出受环境影响较大,间歇性的发电会对供电的电能质量造成较大影响。因此,为了实现对光伏系统的稳定控制,需要引入储能环节来平抑新能源出力波动,同时储存过剩电能。蓄电池由于能量密度较高,经常被用于光伏电源的储能设备,但由于蓄电池循环次数相对较少,光照以及负载的不稳定性造成蓄电池频繁地进行充放电控制,这使得蓄电池的使用寿命受到严重影响。同时蓄电池功率密度较小,对于较大的功率波动,需要配置较高的容量裕

度。二者造成了系统成本增加,经济性差,运行效果也不太理想^[1]。

超级电容是一种新型的储能元件,具有充放电速度快、循环寿命长、功率密度大和能量转换率高等优点。因此,结合蓄电池和超级电容各自的优势,设计兼具高功率密度和高能量密度的混合储能系统是解决新能源发电中诸多问题的必然选择^[2]。相比单一的储能介质,利用超级电容和蓄电池组成混合储能装置可以有效地提升系统功率调节能力,既满足了脉动型负载对峰值功率的要求,也保持了对正常负荷波动的有效跟踪,同时抑制了可再生能源的功率波动,有效延长了供电时长与储能元件的寿命。

目前,混合储能系统控制策略主要以功率分频控制为主,即对混合储能系统的总负载功率进行滤波分频,系统功率波动中的低频分量和高频分量则分别由蓄电池和超级电容器来进行响应和补偿。文献[3-5]均对混合储能系统的功率分频控制进行了具体介绍。

基于此,本文在传统的功率分频控制以及双闭环控制的基础上进行改进,提出一种针对参考电流进行分频处理的控制策略,并分别从抑制光伏功率波动和系统功率调节两个方面进行仿真验证。仿真结果表明,该方法有效可行,且设计简单,易于实现。

1 直流光储系统结构组成

直流微电网的具体结构如图1所示,主要由光伏发电模块、蓄电池和超级电容组成的混合储能模块及负载等组成。



孟康/硕士研究生

关键词/Keywords

混合储能·
光伏发电·
蓄电池·
超级电容·
直流系统·

河北省科技设计计划项目(15210701D)。

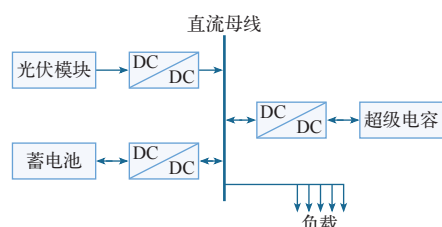


图1 直流光储系统结构组成

根据文献[6]中的光伏电池 $I-V$ 关系公式，在Matlab/Simulink中搭建光伏电池仿真模型。光伏模块经DC/DC电路并入直流母线，采用电导增量法MPPT控制光伏模块工作在最大功率点，实现光能的高效利用。也可根据运行需要切换为恒压。混合储能模块由蓄电池和超级电容组成，二者分别通过DC/DC电路并联于直流母线上。利用超级电容和蓄电池的共同作用维持系统的功率平衡。光伏混合储能系统各部分参数如表1所示。

表1 光伏混合储能系统各项参数

光伏电池开路电压 U_{oc}/V	430
光伏电池短路电流 I_{sc}/A	17
光伏电池最大功率点电压 U_{mp}/V	320
光伏电池最大功率点电流 I_{mp}/A	15
蓄电池标称电压 V_{bat}/V	300
蓄电池容量 $A \cdot h$	50 000
超级电容标称电压 V_{sc}/V	400
超级电容容量 F	15
超级电容内阻 Ω	0.1
直流母线电压 V_{bus}/V	800

2 混合储能系统控制策略

2.1 光伏-混合储能电路拓扑

在直流光储系统中，由于光伏发电很难通过调节出力来跟踪负荷变化，需要合理利用混和储能的充放电来调节负荷变化，实时地补偿光伏电池输出功率与负载功率的差值，超级电容对高频功率进行有效补偿，蓄电池对低频功率变化进行实时跟踪。负载功率小于光伏输出时，混合储能将会充电来吸收剩余功率，防止能量过剩。在保证能量合理分配的同时，要确保直流母线电压的稳定。

综上所述，光储混合储能的电路拓扑结构设

计要满足能量分配和电压稳定的设计要求，同时要充分考虑储能元件特性。超级电容和蓄电池的标称电压均低于直流母线电压，为了保证储能元件灵活的充放电控制，二者均通过boost-buck升降压电路与直流母线相连^[7]。光伏电池由于只需要单向输出，故由boost升压电路与母线相连。电路拓扑结构如图2所示。

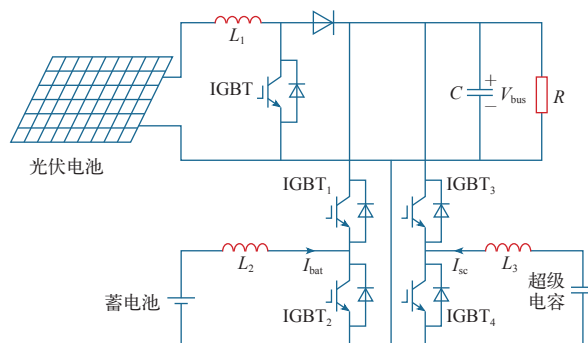


图2 光伏-混合储能电路拓扑

2.2 基于参考电流分频的混合储能控制策略

针对蓄电池和超级电容的设计均采用双闭环控制，其基本设计思路为：首先设计电流环中的电流调节器，然后将电流环简化成电压环中的一个环节，和其他环节一起构成外环电压调节器的控制对象，电压环的输出作为电流环的给定，用电压控制电流^[8]。传统的分频控制则是对混合储能系统的总负载功率进行滤波，将其分解为低频分量和高频分量，并分别由蓄电池和超级电容进行功率跟踪^[9]。

由于电压外环的作用，直流母线电压无较大变化，且功率为电流和电压的乘积，功率的突增、突减会造成电流的剧烈变化，因此本文直接将电压环输出的参考电流进行分频处理，将高频和低频电流分量分别作为超级电容和蓄电池电流内环的参考值来进行控制，从而实现超级电容和蓄电池对高频功率和低频功率的补偿和响应，达到合理分配功率的目的。相较于传统功率分频，无须对直流母线的功率变化进行采样，而是直接对参考电流进行滤波处理，方法简单，易于实现。具体控制模块框图如图3所示， V_{ref} 、 I_{ref} 和 I_{sc_ref}

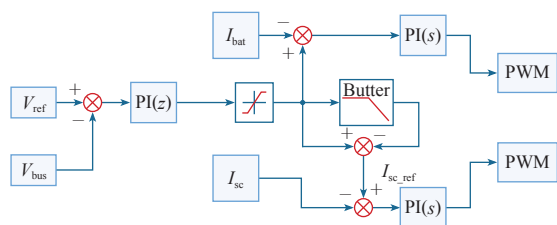


图3 混合储能控制模块

分别为直流母线电压参考值、蓄电池电流参考值和超级电容电流参考值； V_{bus} 、 I_{bat} 和 I_{sc} 分别为直流母线电压、蓄电池电流和超级电容电流。

在该控制方案中，超级电容和蓄电池共用同一电压外环，利用蓄电池和超级电容的共同作用来维持母线电压稳定。直流母线电压作为电压外环的采样信号，其与电压参考值偏差经过PI调节，得到的参考电流值 I_{ref} ，经巴特沃兹低通滤波器滤波，得到低频电流分量，其与 I_{ref} 的差值 I_{sc_ref} ，即高频分量，作为超级电容的参考值，构成超级电容的电流内环。 I_{ref} 则直接作为蓄电池电流内环的参考值。 I_{ref} 、 I_{sc_ref} 与蓄电池和超级电容实际电流值 I_{bat} 、 I_{sc} 的偏差经过PI调节，作为调制PWM信号的输入，进而控制各自升降压电路中变换器IGBT的通断，最终实现功率在储能元件间的合理分配。由于蓄电池响应速度较慢， I_{ref} 中的高频分量已由超级电容快速补偿，剩余低频分量则由蓄电池进行响应。

为了防止蓄电池放电电流过大对蓄电池造成损坏，以及超级电容过大的放电电流对直流母线电压的稳定造成影响，因此对参考电流作了限幅处理。

3 仿真结果与分析

为了验证混合光伏—储能系统控制策略的可行性及有效性，在Matlab/Simulink 软件中搭建了仿真模型（见图2）。针对系统在运行过程中存在的光伏功率波动以及负载突增、突减这两种运行状态，对比分析了蓄电池单独储能与采用混合储能时光储系统的运行效果。将温度保持为25℃，初始光强保持为1 000 W/m²，系统外接6.4 kW负载。在1.5 s时，光照强度下降至500 W/m²；在3 s时，

光照强度上升至1 000 W/m²；在4.5 s时，功率突增至8 kW；在6 s时，系统功率突降至4 kW；仿真时间为7 s。直流母线电压为800 V。

3.1 蓄电池单独储能仿真分析

当光储系统采用蓄电池单独储能时，系统各部分功率、直流母线电压以及超级电容和蓄电池电流波形如图4所示。图4中， P_{load} 、 P_{pv} 和 P_{bat} 分别为负载功率、光伏输出功率和蓄电池功率。

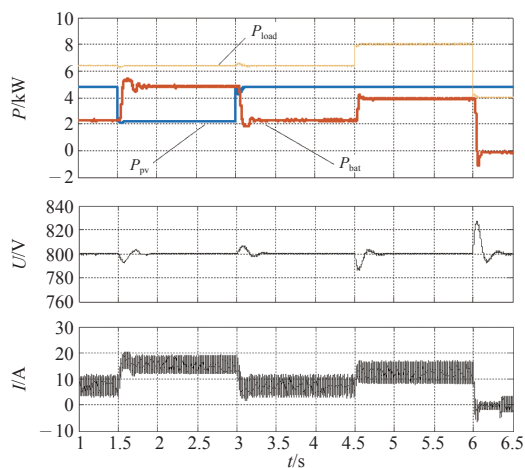


图4 蓄电池单独储能情况下系统各部分参数变化曲线图

从图4中可以看出，系统约在0.5 s之前达到稳定，电压保持为800 V，说明蓄电池单独储能时能够起到维持母线功率平衡和母线电压稳定的作用。标准测试条件下，光伏输出功率约为4.8 kW，光伏电池在给负载供电的同时，也在为蓄电池充电。在1.5 s和4.5 s时由于光照强度突降和负载功率突增，光伏输出无法确保系统负荷要求，蓄电池电流增大以确保系统对负载的平滑功率输出，在此过程中，直流母线电压分别跌落至792 V和786 V，跌落幅度为8 V和14 V。在3 s和6 s时，由于光照强度突增和负载功率降低，负载功率小于光伏输出，蓄电池电流减小，或进入充电状态以吸收系统多余功率。在此过程中，母线电压分别升高至807 V和827 V，幅度为7 V和27 V。

蓄电池单独储能情况下，在系统功率出现较大不平衡时，均会出现大幅的电压暂升和暂降，但在闭环系统控制下，会在约0.3 s后恢复至正常水平。从图4中可以看出，由于蓄电池充放电速度较

慢, 蓄电池约需要0.3 s左右的时间, 才能保证系统的功率平衡。

3.2 混合储能仿真分析

系统各部分功率和直流母线电压变化曲线以及超级电容和蓄电池电流波形如图5所示。图5中, P_{load} 、 P_{pv} 、 P_{bat} 和 P_{sc} 分别为负载功率、光伏输出功率、蓄电池功率和超级电容功率; I_{bat} 、 I_{sc} 为蓄电池和超级电容电流。

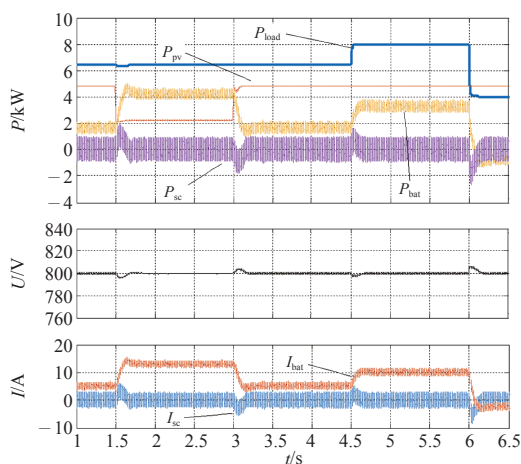


图5 混合储能情况下系统各部分参数变化曲线图

从图5中可以看出, 系统约在0.5 s之前达到稳定, 电压保持为800 V。标准测试条件下, 光伏输出功率约为4.8 kW。当负载功率大于光伏输出时, 蓄电池和光伏共同为负载供电; 当负载功率小于光伏电池输出时, 蓄电池充电来吸收多余能量; 当光伏输出波动或负载突变时, 蓄电池和超级电容同时放电以保证系统对负载的平滑功率输出。但从图5中可以明显看出, 超级电容会先于蓄电池, 对高功率变化快速作出反应。

在1.5 s和4.5 s时, 由于光照强度突降和负载功率突增, 光储系统的输出功率无法保证负荷要求, 超级电容迅速作用以满足功率的快速变化, 蓄电池电流增大以保证系统对负载的持续平滑功率输出; 在此过程中, 直流母线电压分别跌落至796 V和797 V, 跌落幅度为4 V和3 V, 小于蓄电池单独储能时的8 V和14 V。在3 s和6 s时, 由于光照强度突增和负载功率降低, 超级电容迅速作用以吸收多余的功率, 蓄电池电流减小或进入充电

状态; 在此过程中, 母线电压分别升高至804 V和807 V, 幅度为4 V和7 V, 远小于蓄电池单独储能时的7 V和27 V。由图5可以看出, 系统中的功率不平衡会造成直流母线电压小幅的电压暂升或暂降, 但在分频控制的作用下, 均能迅速恢复至正常水平, 母线电压几乎不受影响。

从图5中可以明显看出, 在光伏波动或负载变化时, 蓄电池的电流曲线的斜率比超级电容电流曲线要小。对于高频功率变化, 超级电容器优先放电和充电, 在高频功率接近于零时, 超级电容停止充放电; 蓄电池电流则在此过程中缓慢平稳的上升或下降, 避免了蓄电池受到瞬时大电流冲击。由此可知, 在电流分频作用下, 高功率密度的超级电容器在面对高频的功率变化时, 可以迅速作出反应; 蓄电池则对功率变化响应较慢, 但其较高的能量密度可以保证对稳态功率的持续供应。

4 结束语

针对直流光储系统中的混合储能技术进行了研究。基于传统的功率分频控制和双闭环控制, 提出了一种针对参考电流进行分频的混合储能控制策略。对参考电流进行滤波, 将参考电流中的高频分量和低频分量分别作为超级电容和蓄电池电流内环的参考电流来进行控制, 从而充分利用超级电容的功率密度高和蓄电池能量密度大的特点, 达到有效协调波动功率在蓄电池和超级电容之间的合理分配的目的。相较于传统的功率分频控制, 该控制策略更为简单, 易于实现。运用Matlab/Simulink软件对该控制策略进行仿真验证。仿真结果表明, 当光伏输出或负载功率发生突变时, 混合储能系统相较于蓄电池单独储能, 能够迅速作出响应, 并可以有效抑制直流母线电压波动, 确保对直流负载可靠、有效地供电。

参考文献

- [1] 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.

(下转第23页)

1) 基于开关路径函数集的网络拓扑方法得到子区域微电网的全连通矩阵。

2) 通过广义布尔向量清晰地阐释子微电网及全景电网的单三相关系。

3) 只进行一次有效遍历就能完成网络拓扑。

本文的方法适用于各种网络结线方式, 尤其适用于单三相混联多微电网, 为多微电网发挥其灵活供电性和运行可靠性提供了理论分析基础, 为多微电网实际运行管理、检测奠定一定基础。

参考文献

- [1] 李鹏, 张玲, 王伟, 等. 微网技术应用与分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (20): 109-115.
- [2] 王伟, 施儒显, 石军, 等. 智能电网中微电网功率下垂控制研究 [C]. 中国电机工程学会电力系统专业委员会年会, 上海, 2010.
- [3] 周永智, 吴浩, 李怡宁, 等. 基于MCS-PSO算法的邻近海岛多微网动态调度 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (9): 109-115.
- [4] 肖鹏, 陈国呈, 等. 一种新型光伏独立发电系统研究 [J]. 电气传动, 2008, 38 (8): 32-43.
- [5] 王增平, 张晋芳, 张亚刚, 等. 基于开关路径函数集的新型厂站内网络拓扑方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (1): 137-145.
- [6] 徐政, 林崇, 何少强. 单相光伏并网发电系统功率解耦的优化设计 [J]. 电气传动, 2012, 42 (10):

44-49.

- [7] 郝广涛, 韩学山, 梁军, 等. 多代理系统和黑板模型结合的全景电网拓扑分析 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (12): 200-210.
- [8] 周念成, 金明, 王强钢, 等. 串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (12): 13-18.
- [9] 冯仁剑, 赵帅, 卢晓东. 独立光伏系统中浮充控制的模型分析与应用 [J]. 电气传动, 2014, 44 (4): 34-37.
- [10] 马静, 张侯好, 马伟, 等. 基于关联矩阵标记法与回路矩阵的电网拓扑分析 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (12): 74-80.
- [11] 丁明, 马凯, 毕锐. 基于多代理系统的多微网能量协调控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (24): 1-8.
- [12] 江润洲, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网只能配电系统经济运行 [J]. 电网技术, 2013, 37 (12): 3596-3602.
- [13] 董张卓, 秦红霞, 孙启宏, 等. 采用面向对象技术和方法的电力系统网络拓扑的快速跟踪 (一) [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (3): 178-181.
- [14] 杨东峰, 周苏荃, 刘隽, 等. 基于关联矩阵化简的电网拓扑辨识新方法 [J]. 华东电力, 2014, 42 (11): 2254-2259.

(收稿日期: 2017-11-03) **EA**

(上接第17页)

- [2] Sathishkumar R, Kollimalla S K, Mishra M K. Dynamic energy management of micro grids using battery super capacitor combined storage [C]. India Conference, IEEE, 2013: 1078-1083.
- [3] 毕晓辉, 孙韬, 毛瑞, 等. 光储微电网混合储能系统的控制策略及开关优化 [J]. 重庆大学学报, 2016, 39 (6): 11-18.
- [4] 李武华, 徐驰, 禹红斌, 等. 直流微网系统中混合储能分频协调控制策略 [J]. 电工技术学报, 2016, 31 (14): 84-92.
- [5] 孙芊, 曾正, 郭宝甫, 等. 光储联合发电系统

中混合储能的功率协调控制 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (6): 68-73.

- [6] 曹龙汉, 余佳玲, 李景南, 等. 基于Matlab/Simulink的光伏电池仿真建模研究 [J]. 半导体光电, 2015, 36 (5): 718-721.
- [7] 李春华, 朱新坚. 基于混合储能的光伏微网动态建模与仿真 [J]. 电网技术, 2013, 37 (1): 39-46.
- [8] Marty Brown. 开关电源设计指南 [M]. 徐德鸿, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] 王超, 吴铁洲, 李培芳, 等. 独立光伏系统混合储能控制策略研究 [J]. 电源技术, 2017, 41 (2): 240-242, 300. (收稿日期: 2018-01-02) **EA**