

# 蓄电池和超级电容混合储能系统控制策略研究

针对蓄电池与超级电容不同的储能特点,采用适合混合储能交流应用模式系统结构及控制方式,利用高通滤波器将负载功率高频波动分量作为超级电容储能的有功指令,剩余功率作为蓄电池储能的有功功率,保证了超级电容与蓄电池之间的协同控制,并利用Matlab仿真算例验证了控制策略的有效性。

张 茜/国网山西省电力公司

## 0 引言

随着“十二五”期间我国智能电网进入全面建设阶段,储能技术作为可提高电网可靠性、安全性和灵活性的技术,将应用于智能电网建设的各个环节<sup>[1]</sup>。我国目前发展的储能示范项目主要应用于分布式发电及微电网、可再生能源并网、智能电网直流系统、电动汽车和农村电网升级改造等<sup>[2]</sup>。

电力储能具有多种形式,通常可分为能量型储能和功率型储能两类<sup>[3]</sup>。以铅酸蓄电池、锂电池和钠硫电池等为代表的能量型储能,具有能量密度大、储能时间长的优点,但存在功率密度小、循环寿命短等不足。以超级电容、飞轮储能和超导磁储能等为代表的功率型储能,具有功率密度大、响应速度快和循环周期寿命长的优点,但能量密度小、自放电率高<sup>[4]</sup>。

为提高新能源发电并网性能,储能系统既要有快速响应部分,也要有一定的储能容量以满足负荷调节的需要。由于一种储能元件很难同时满足这些要求,因此采用混合储能是必要的<sup>[5]</sup>。混合储能可以将具有快速响应特性的储能

系统和具有大容量储能特性的储能系统联合使用、协调控制,从而最大限度地发挥储能技术的性能。混合储能技术是将具有快速响应特性、循环周期寿命长的功率型储能和具有大容量储能特性的能量型储能联合使用、协调控制,最大限度地发挥各种储能技术的长处,提高储能系统的技术经济优势<sup>[6]</sup>。混合储能系统控制策略,即内部各储能系统如何联合使用,但目前控制策略研究主要集中在功率分配、过充过放与功率限值保护等基本方面<sup>[7-9]</sup>,而在各储能单元协同配合方面较少涉及,这也是本文研究的主要内容。

## 1 混合储能系统结构与控制方式

超级电容和锂电池构成的混合储能系统的典型结构形式如图1所示,储能阵列(如锂电池组和超级电容器组)由储能单体串并联组成,并通过储能变流器与交流电网相连;储能变流器由电力电子设备组成,主要通过控制IGBT开通和关断来实现储能系统充放电功率等功能,并利用滤波等辅助部分使储能系统输出满足电能质量要求和减少外部电网对储能的影响。

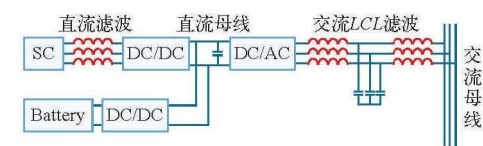


图1 混合储能系统结构

### 1.1 超级电容储能系统控制

超级电容储能系统为功率型储能,



张 茜/工程师

关键词/Keywords

混合储能·  
高通滤波器·  
有功指令·  
协同控制·

主要用于响应高频功率波动,具有响应速度快、循环寿命长等优点,通常采用 $PQ$ 控制方式实现对频繁变化的功率波动的吸收。考虑到超级电容能量密度小、电压范围宽等特点,其储能变流器宜采用由三重化双向DC/DC变换电路和双向DC/AC变流器组成的两级式控制结构。双向DC/DC变换器控制方式和并网双向DC/AC变流器控制电路原理图分别如图2、图3所示。图2、图3中, $P_{ref\_sc}$ 、 $Q_{ref\_sc}$ 和 $u_{dref\_sc}$ 分别为超级电容器储能的有功功率指令、无功功率指令和直流母线电压指令; $P_{sc}$ 、 $Q_{sc}$ 、 $u_{sc}$ 、 $u_{dc\_sc}$ 、 $u_{d\_sc}$ 、 $u_{q\_sc}$ 、 $i_{sc}$ 、 $i_{d\_sc}$ 和 $i_{q\_sc}$ 分别为超级电容器的有功功率、无功功率、输出电压、直流母线电压、直轴电压、交轴电压、输出电流、直轴电流和交轴电流; $\omega$ 为角频率; $L_{sc}$ 为LCL滤波总电感。

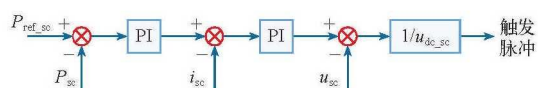


图2 双向DC/DC变换器控制方式

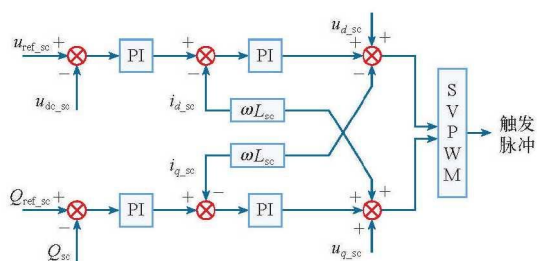


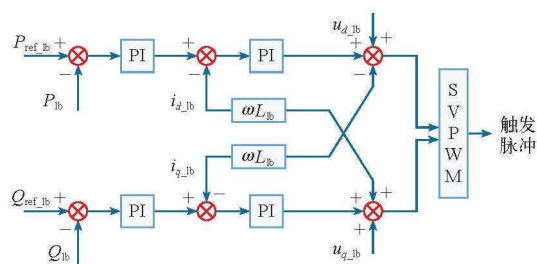
图3 并网双向DC/AC变流器控制方式

运行过程中 $PQ$ 控制分两步完成,双向DC/DC变换器采用跟踪有功功率指令的控制方式,并网双向变流器采用 $U_{dc}-Q$ 控制方式以稳定直流母线电压和跟踪无功功率指令。开关管时序在逻辑上互差 $120^\circ$ ,起到减小电流纹波、改善动态性能和互为备用的作用,以适应大幅度频繁功率波动响应的功能需求。

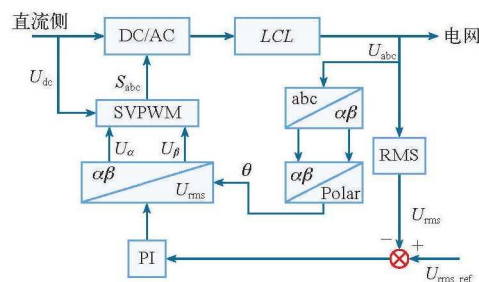
## 1.2 蓄电池储能系统控制

蓄电池属于典型的能量型储能,可以指定功率进行充放电或者作为系统平衡节点满足系统功率平衡和维持频率稳定,主要采用 $PQ$ 控制或 $V/f$ 控

制两种运行方式。当蓄电池储能系统参与系统功率调节时双向并网变流器采用 $PQ$ 控制,其控制框图如图4所示。图4中, $P_{ref\_lb}$ 、 $Q_{ref\_lb}$ 分别为超级电容器储能的有功功率指令和无功功率指令; $P_{lb}$ 、 $Q_{lb}$ 、 $u_{d\_lb}$ 、 $u_{q\_lb}$ 、 $i_{d\_lb}$ 和 $i_{q\_lb}$ 分别为超级电容器的有功功率、无功功率、直轴电压、交轴电压、直轴电流和交轴电流; $\omega$ 为角频率; $L_{lb}$ 为LCL滤波总电感。


 图4 蓄电池储能系统 $PQ$ 控制方式框图

而当蓄电池储能系统作为主电源时,双向并网并流器采用 $V/f$ 控制,使输出的电压频率恒定,为系统提供稳定的交流电压,其控制框图如图5所示。图5中, $U_{abc}$ 为通过电压传感器检测到电网侧三相电压; $U_{rms}$ 为电网侧三相电压检测值求得有效值; $U_{rms\_ref}$ 为双向DC/AC变流器的电压有效值控制目标; $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ 为网侧三相电压通过三相静止坐标系到两相静止坐标系变换得到 $\alpha\beta$ 坐标系的电压; $U_{dc}$ 为通过电压传感器检测到直流侧电压。


 图5 蓄电池储能系统 $V/f$ 控制方式框图

## 1.3 混合储能系统协同控制策略

针对超级电容和蓄电池混合储能系统的特点,本文采用高通滤波器对混合储能系统功率指令 $P$ 进行滤波,进而得到其高频波动分量并作为超级电容储能的有功指令 $P_{ref\_sc}$ ,再将剩余功率作为

蓄电池储能的有功功率 $P_{\text{ref\_lb}}$ ，并规定 $P_{\text{ref\_lb}}$ 大于零表示蓄电池放电、小于零表示蓄电池充电，则混合储能系统功率分配中关系为

$$P_{\text{ref\_lb}} = P - P_{\text{ref\_sc}} \quad (1)$$

设高通滤波器的滤波时间常数为 $T_f$ ， $s$ 为微分算子，则 $P_{\text{ref\_sc}}$ 、 $P_{\text{ref\_lb}}$ 与 $P$ 的关系可表示为

$$P_{\text{ref\_sc}}(s) = \frac{sT_f}{1+sT_f} P(s) \quad (2)$$

$$P_{\text{ref\_lb}}(s) = \frac{1}{1+sT_f} P(s) \quad (3)$$

设微分计算步长为 $\Delta T$ ，对式(2)、式(3)进行差分，可以得到

$$P_{\text{ref\_sc}}(t) = \frac{T_f}{\Delta T + T_f} [P_{\text{ref\_sc}}(t-1) + P(t) - P(t-1)] \quad (4)$$

$$P_{\text{ref\_lb}}(t) = \frac{T_f}{\Delta T + T_f} P_{\text{ref\_lb}}(t-1) + \frac{\Delta T}{\Delta T + T_f} P(t) \quad (5)$$

由式(4)可知超级电容有功功率指令 $P_{\text{ref\_sc}}$ 随 $P$ 变化呈现快速波动，而蓄电池有功功率指令缓慢跟随 $P$ 变化，符合两种储能元件的特性。

## 2 仿真算例分析

### 2.1 仿真条件设定

在Matlab中搭建混合储能系统仿真模型，蓄电池模型采用通用等效模型，额定电压为96 V，容量为100 A·h；超级电容采用一阶线性RC等效模型，电容器组参数为3.3 F，初始电压为110 V；系统负载功率最小为100 W，最大为2 000 W；设定0.2 s时系统由最小负载变为最大负载，0.4 s由最大负载变成最小负载，仿真过程中设定高通滤波时间常数初始值 $T_{f0}=30$ ，调整步长 $\Delta T_f=1$ ，调整宽度 $T_{fw}=10$ 。

### 2.2 蓄电池单独工作仿真结果

蓄电池单独工作时仿真得到电流波形和直流母线电压波形如图6、图7所示。从图6、图7中可以看出，在负载变化一段时间后直流母线电压能够稳定在220 V。系统负载功率增大时，蓄电池释放功率，电流由负变正，补充母线的功率不足，在此过程中直流母线电压跌落至197 V；而当负载

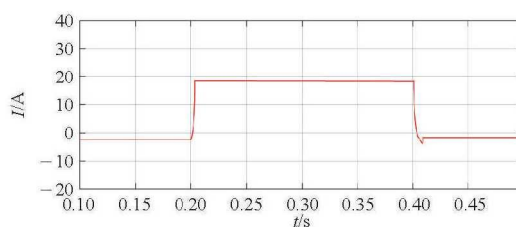


图6 负载突变时蓄电池电流

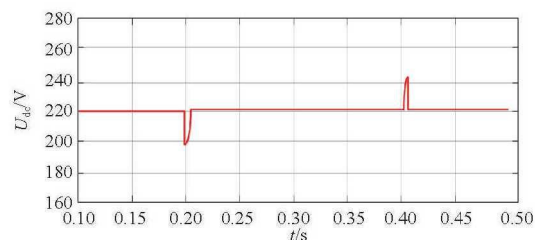


图7 负载突变时蓄电池单独工作直流母线电压

功率减小时，蓄电池吸收功率，电流由正变负，吸收母线上过多的功率，母线电压升高至243 V。

### 2.3 混合储能系统仿真结果

加入超级电容后构成混合储能系统，超级电容通过高频滤波得到功率的高频分量进行充放电，并为蓄电池提供缓冲，仿真结果如图8~图10所示。

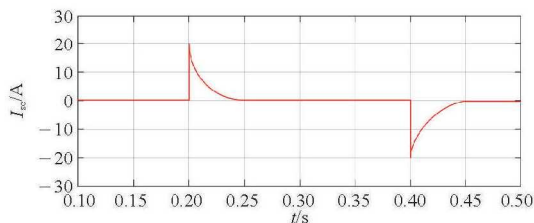


图8 负载突变时混合储能系统超级电容电流

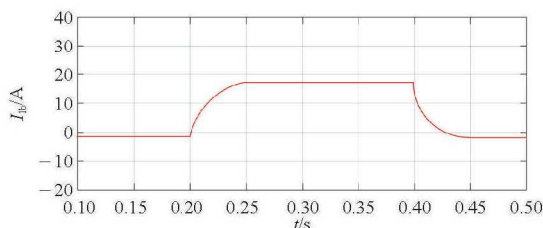


图9 负载突变时混合储能系统蓄电池电流

系统负载功率增加时，超级电容依据高频滤波得到高频功率给定，输出电流迅速由零增加至20 A，为负载提供突变功率并缓冲蓄电池输出电流突变，此时直流母线电压跌落6 V，幅度远小于蓄

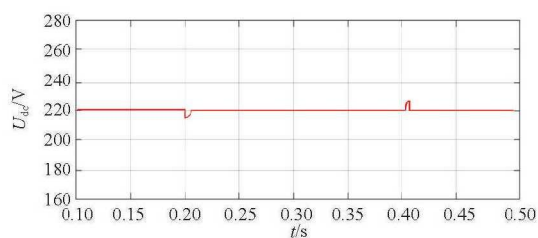


图10 负载突变时混合储能系统直流母线电压

电池单独作用时的23 V。0.25 s时负载高频分量接近于零，超级电容完成放电，开始补充工作时释放的能量，期间母线电压不受影响。系统负载功率减少时，超级电容电流突变为-20 A，吸收负载突减造成的过剩功率，在此过程中直流母线电压增加5 V。

图11、图12为交流母线输出电压和电流波形，从图11、图12中可知，负载功率突变过程中，混合储能系统协同调控能够确保交联母线输出电压和电流稳定，减小电压波动。

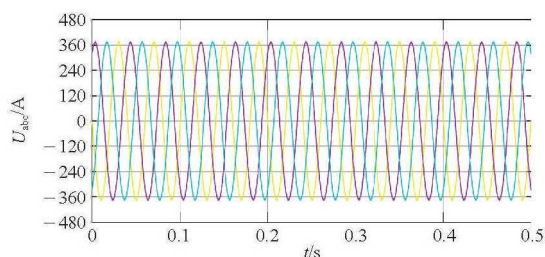


图11 交流侧输出电压波形

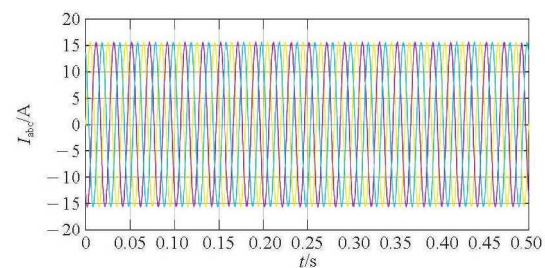


图12 交流侧输出电流波形

### 3 结束语

该混合储能系统利用超级电容提供负载功率突变高频功率分量的运行方式，缓冲蓄电池输出电流突变量并减小了直流母线电压突变，稳定了

系统交流母线输出电压和电流波形，充分利用超级电容和蓄电池储能的优点，保障了整个储能系统具有高能量密度和高功率密度。

### 参考文献

- [1] 雷金勇, 谢俊, 甘德强. 分布式发电供电系统能量优化及节能减排效益分析 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (23): 29-36.
- [2] 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): 334-340.
- [3] Akiyama K, Nozaki Y, Kudo M, et al. Ni-MH batteries and EDLCs hybrid stand-alone photovoltaic power system for digital access equipment [C]. Proceedings of the 22<sup>nd</sup> international telecommunications energy conference, 2000: 387-393.
- [4] 严俊, 赵立飞. 储能技术在分布式发电中的应用 [J]. 华北电力技术, 2006 (10): 16-19.
- [5] 李逢兵, 谢开贵, 张雪松, 等. 基于锂电池充放电状态的混合储能系统控制策略研究 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (1): 70-76.
- [6] 侯世英, 房勇, 孙韬, 等. 混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用 [J]. 电网技术, 2011, 35 (5): 183-187.
- [7] Tremblay O, Dessaiut L A, Dekkiche A C. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles [C]. Proceedings of 2007 IEEE vehicle power and propulsion conference, 2007: 284-289.
- [8] 赵艳雷, 李海东, 张磊, 等. 基于快速储能的风能潮流优化控制系统 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (13): 21-28.
- [9] 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.

(收稿日期: 2017-08-25) **EA**