基于混合储能的微电网分层能量管理策略

由于微电网中分布式电源输出功率具有间歇性、不确定性和负载实时变化的特点，满足功率平衡的需求就需要用到混合储能装置。提出了一种使用若干个蓄电池和超级电容组成的混合储能系统，能同时满足功率和能量两方面的需求。并在不同的混合储能子系统中，以不同子系统的SOC参数结合下垂控制方法提出了一种基于SOC的功率分配方法。通过实验验证上述策略能合理分配蓄电池和超级电容出力值，有效地减少蓄电池的充放电次数，延长其使用寿命。

叶凡超　吴铁洲　吴麟章　何淑婷/湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心

叶凡超/硕士研究生

关键词/Keywords
微电网·
混合储能·
SOC·

0　引言

随着化石能源危机和环境污染的日趋严重，清洁的可再生能源成为能源结构调整的必然选择[1]。但太阳能、风能等形成的分布式能源输出功率的不稳定给电力系统规划运行造成了一定影响。由蓄电池和超级电容组成的混合储能系统可以一定程度上解决上述问题[2-5]。文献[6]提出一种根据蓄电池的输出电流计算超级电容补偿电流的混合储能控制思路。文献[7-9]提取直流母线功率波动的高频和低频分量，分别用超级电容和蓄电池来平抑。以上文献能很好地平抑直流母线的功率波动，但并没有减少蓄电池的充放电次数。

本文为了满足微电网中大规模分布式发电单元与负载的需求，将多个混合储能子系统并联接入微网中[10-12]，对于如何在多个混合储能子系统间进行功率分配、混合储能子系统内不同类型储能元件如何协调控制以及功率分配等问题，本文以孤岛运行的直流微网为研究对象，在分析并联型混合储能系统工作原理的基础上，结合传统的下垂控制与各混合储能子系统的SOC信息，在不同混合储能子系统间提出了一种基于SOC的功率分配方法[13]。控制系统以直流母线电压、超级电容电压及蓄电池荷电状态为判断条件[14]，自动切换工作模式。利用超级电容电压不能突变的特点，实现对蓄电池电流的平滑控制，减少蓄电池充放电次数，延长蓄电池的使用寿命[15]。通过实验验证了所提出的混合储能策略的有效性。

国家自然科学基金（面上项目）“电动汽车Li-ion电池与SC混合储能系统能量管理策略研究”，51677058。国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项 “河道型水库富营养化机理与综合调控技术研究（子课题：风光混合动力自主巡航清漂及垂向扰动控藻技术与装置）”。

1　微电网的基本结构及工作原理

1.1　系统结构

典型的风光互补直流微电网简化结构如图1所示。主要由直流母线、风力发电单元、光伏发电单元、混合储能系统和负载组成。该系统中，所有的单元都直接或通过变换器连接到直流母线上。光伏阵列和风力发电机均通过变换器连接到直流母线上，为了更好地利用风能和太阳能，一般控制其运行在最大功率点。混合储能系统由多个子系统并联而成。本文将蓄电池经双向DC－DC2变换器与超级电容相连构成混合储能系统，

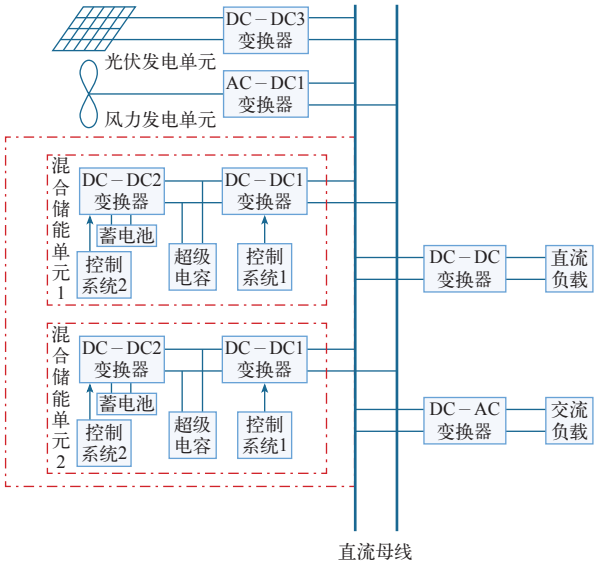

图1　简化的直流微电网系统结构

再经过双向DC－DC1变换器与直流母线相连。

1.2　工作原理

在孤岛模式下，由混合储能系统来保证微电网的稳定运行。当微电网发电部分提供的功率大于负载需求时，通过混合储能系统来吸收多余的功率；反之，则通过混合储能系统释放功率供给负载。由于超级电容是功率型储能元件，能够在瞬间提供较大功率，所以将超级电容经双向DC－DC1变换器与直流母线相连，通过超级电容的充放电平衡直流母线功率波动的高频部分。但由于超级电容储能容量不足，对低频功率波动的响应会导致超级电容容量枯竭，以至于无法补偿母线功率波动。所以加入蓄电池储能，通过超级电容的电压信息对蓄电池进行充放电控制，使超级电容的电压维持在正常工作范围内，间接地补偿直流母线功率波动的低频部分。同时，在分布式发电单元无法提供功率（如短时间内的无风或者无光）时，可由混合储能系统单独向负载提供功率，以维持微电网的稳定。

2　混合储能系统控制策略

2.1　混合储能子系统控制策略

混合储能子系统的控制框图如图2所示。图中，U_{ref}为限值电压，通常将母线电压参考值设为限值电压；U_{dc}为实时母线电压；U_b、U_{sc}分别为蓄电池与超级电容的端电压；U_{iref}为混合储能单元变换器的输出电压参考值；k_i为下垂系数（下标i代表第i个混合储能子系统）。

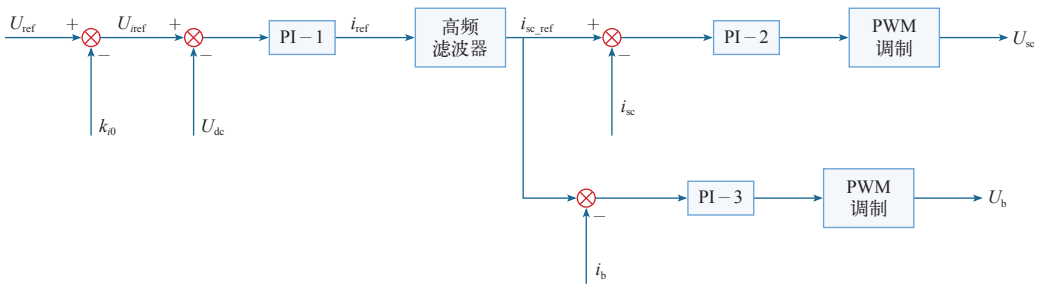

图2　混合储能子系统控制策略

在直流微电网中，由于没有无功功率的流动，电压成为反映系统功率平衡的唯一指标。微电网系统净功率发生改变时，为维持微电网的功率平衡，直流母线上的电压会下落或者上升，当检测到微电网系统直流母线电压波动时，储能系统就会投入运行，通过其吸收释放功率使得母线电压趋于稳定。因此，可以通过采集直流母线上电压的变化来反映系统净功率的变化，从而控制各个储能单元的充放电。系统中的功率平衡是通过保持恒定的直流母线电压来实现的。该控制策略的总体思想是：在保证直流母线电压质量的前提下，分别利用超级电容与蓄电池来平抑母线电压变化的高频分量与低频分量。

当系统净功率突变时，通过电压下垂控制得到混合储能单元的参考电压U_{iref}，U_{iref}与实时母线电压U_{dc}作差并经过电压外环PI－1控制器得到混合储能单元电流的参考值i_{ref}，i_{ref}经过高频滤波器得到超级电容的电流参考值i_{sc_ref}，i_{sc_ref}与超级电容反

馈电流i_{sc}的差值通过超级电容电流内环PI－2控制器，再由脉宽调制电路得到超级电容双向DC－DC变换器的开关占空比D_{sc}；由于蓄电池响应速度较慢，i_b并不能及时跟踪到其参考电流i_{b_ref}，这将会加重母线电压的波动。考虑到超级电容器快速响应的特点，在本文提出的控制策略中，超级电容不仅用来响应i_{ref}的高频分量，并且也将间接响应蓄电池的动态未响应功率，即超级电容的电流参考值i_{sc_ref}与蓄电池的反馈电流i_b作比较，其偏离值通过蓄电池电流内环PI－3控制器，经脉宽调制电路得到蓄电池双向DC－DC变换器的占空比D_b。

在混合储能单元中有相应的控制系统来控制双向DC－DC变换器工作。对双向DC－DC1变换器，由控制系统1通过直流母线电压信息自动切换DC－DC1的工作模式。控制系统1控制流程如图3所示，其中ΔU_{dc}为直流母线电压允许的波动值。为了避免蓄电池的过充和过放，一般维持其SOC在20%～80%之间。

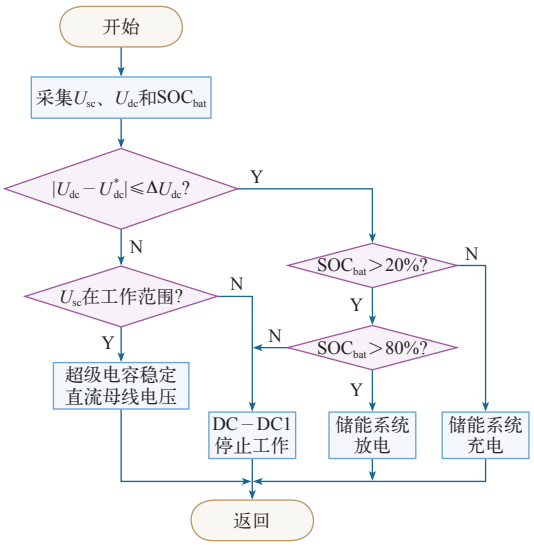

图3　控制系统1控制流程

采集实时直流母线电压U_{dc}，当母线电压波动值在允许范围内时，如果蓄电池的荷电状态$SOC_{bat}>80\%$，表示储能系统能量过剩，所以控制双向DC－DC1变换器对储能系统放电；如果蓄电池的荷电状态在20%～80%之间，双向DC－DC1变换器停止工作，避免蓄电池频繁充放电。当直流母线电压波动值超出允许范围时，由超级电容来稳定直流母线电压。

对DC－DC2变换器，由控制系统2通过控制蓄电池的充放电使得超级电容的电压维持在正常工作范围内，系统的控制流程如图4所示。如果超级电容电压维持在正常工作范围内，而蓄电池的SOC不在正常工作范围内，那么蓄电池停止工作；如果超级电容电压不在正常工作范围内，蓄电池的SOC工作在正常范围内，那么由蓄电池维持超级电容电压。

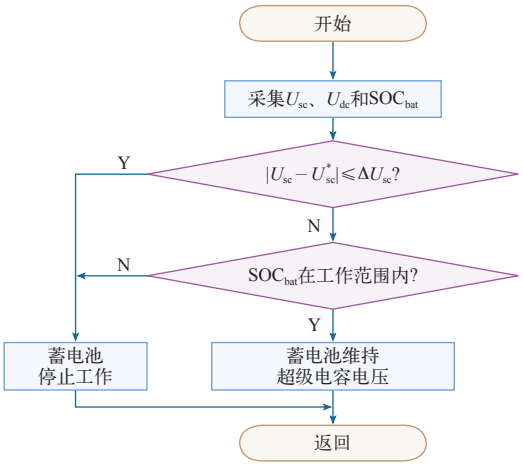

图4　控制系统2控制流程

2.2　混合储能子系统间的功率分配

在并联混合储能系统中，不同子系统的输出能力不同。为了实现负载功率在各个混合储能单元子系统间的合理分配，需要根据其输出能力来决定其出力大小。在整个混合储能系统出现功率不足（过剩）的情况下，剩余容量大（小）的混合储能单元应当出力（吸收）多，而剩余容量小（大）的应该出力（吸收）少。本文通过储能变换器输出电流的大小来反映其承担功率的大小。

直流微电网中的下垂表达式为

$$U_{dc}=U_{ref}-k_iI_{oi} \tag{1}$$

式中，k_i为第i个混合储能子系统变换器的下垂系数，k_i由储能变换器的最大出力电流I_{oi_max}与最大允许电压波动值ΔU_{max}确定，即

$$k_i=\frac{\Delta U_{max}}{I_{oi_max}} \tag{2}$$

下面推导本文提出的基于混合储能子系统SOC

的功率分配方法。由式（1）可知，当母线电压发生波动时，第i个混合储能子系统的出力变化为

$$\Delta I_{oi}=\frac{\Delta U}{k_i} \tag{3}$$

整个混合储能系统的出力变化为

$$\Delta I_{o}=\sum_{i=1}^{n}\Delta I_{oi}=\Delta U\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{k_i} \tag{4}$$

式中，n为系统中混合储能子系统的个数。

混合储能系统的等效下垂系数k_{eq}为

$$k_{eq}=\frac{\Delta U}{\Delta I_{o}}=\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{k_i}} \tag{5}$$

因此，混合储能系统的等效下垂控制表达式为

$$U_{dc}=U_{ref}-k_{eq}I_{o} \tag{6}$$

式中，I_o为混合储能系统的出力值。

系统电压波动时，第i个混合储能子系统的出力为

$$I_{oi}=\frac{\Delta U}{k_i}=\frac{k_{eq}}{k_i}I_{o}=\frac{I_{oi_max}}{I_{o_max}}I_{o} \tag{7}$$

式中，I_{o_max}为微电网混合储能系统的最大出力电流。

由式（7）可以看出，当系统母线电压发生波动时，不同混合储能子系统的出力与其最大出力电流成正比。因此，本文提出根据不同混合储能子系统的SOC信息来设定其最大出力电流，进而确定其下垂系数。

因此，在需要混合储能系统释放功率的情况下，SOC较大（小）的子系统会提供较多（少）的功率；在需要混合储能系统吸收功率的情况下，SOC较小（大）的子系统会吸收较多（少）的功率。

3 实验验证及结果分析

为了验证本文所提控制策略的有效性，搭建直流微电网实验平台。设定微电网电压等级为400 V，电压最大波动范围为±10 V，分布式电源的定出力为1.6 kW。混合储能系统由两个子系统并联组成，设定两个子系统的SOC分别为0.75与0.25。1 s时，系统负载由额定负载1.6 kW增加至2.4 kW；2 s时，负载减少至0.8 kW。

系统母线电压变化如图5所示，混合储能系统的输出曲线如图6所示。混合储能子系统内不同类型储能元件的输出曲线如图7所示。

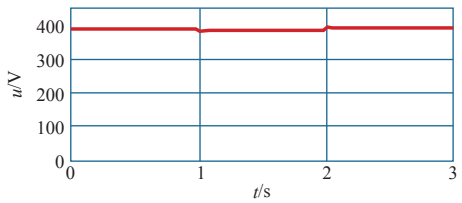

图5 母线电压变化

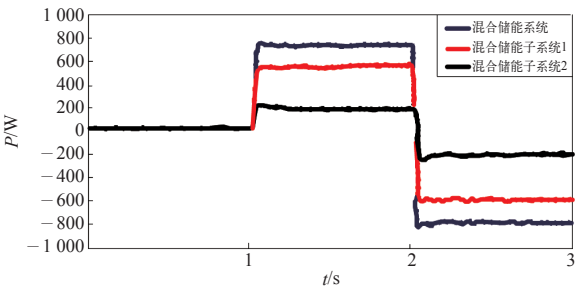

图6 混合储能系统出力

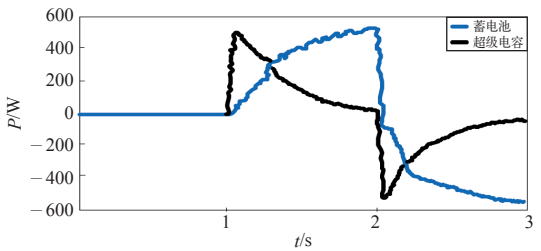

图7 蓄电池与超级电容出力

由图5可以看出，在1 s和2 s时母线电压有小幅度的波动，但分别在1.1 s和2.1 s达到稳态，稳态电压分别为396 V和405 V，在此过程中系统的最大电压波动为+7 V。由此可以看出，不管负载增加或是减小，系统母线电压均在最大电压波动范围内。并且，由于预先设定的两个混合储能子系统的SOC分别为0.75与0.25，由式（7）可知，在放电与充放状态下两者出力比应该为3∶1与1∶3。由图6可以看出，1～2 s期间，两个子系统的出力分别为570 W与190 W；2～3 s期间，两个子系统的出力分别为−215 W与−645 W，与理论相符。

在1 s系统负载突然增加时，系统净功率低频分量很小，故母线电压变化量的低频分量也很小，由图7可以看出，在负载加载瞬间，超级电容快速出力，维持母线电压的稳定，随着电压的稳定，净功率的低频分量开始上升，蓄电池出力逐

渐增加，而超级电容的出力则逐渐减少。同理，在2 s系统负载突然减少时，超级电容快速吸收系统的剩余能量，而蓄电池的出力逐渐增加直到稳态。

4 结束语

储能系统对维持微电网的安全稳定运行具有十分重要的作用，本文针对微电网电能质量问题，提出了基于超级电容和蓄电池构成的混合储能系统及其控制策略。通过实验验证本文提出的控制策略具有如下优点：①在混合储能子系统间进行功率分配，满足了大规模分布式发电单元与负载的需求；②利用超级电容响应母线电压波动的高频分量，并用蓄电池来弥补超级电容容量不足的缺点，实现对蓄电池充放电电流的优化，并有效地减少蓄电池的充放电次数，延长其使用寿命；③利用各混合储能子系统的SOC信息来设定其下垂系数，可实现系统净功率在各子系统间的合理分配；④利用直流母线及超级电容器的电压信息自动进行能量分配，提高了系统的可靠性。

参考文献

[1] 卢芸，徐骏．基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法 [J]．电力系统保护与控制，2016，44 (11)：149-154．

[2] 李凯，秦文萍，张海涛，等．含混合储能的微电网能量管理系统控制策略 [J]．电力系统及其自动化学报，2016，28 (10)：85-91．

[3] 张晴，李欣然，杨明，等．净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法 [J]．电工技术学报，2016，31 (14)：40-48．

[4] 马中静，姜文材．一种应用于直流微电网的改进型下垂控制策略 [J]．电力电子技术，2015，49 (9)：16-18．

[5] 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)：335-340．

[6] 孙建龙，窦晓波，张子仲，等．直流对等式微电网混合储能系统协调控制策略 [J]．电工技术学报，2016，31 (4)：194-202．

[7] Song Z，Hofmann H，Li J，et al．Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system [J]．Applied Energy，2014，134 (C)：321-331．

[8] Mendis N，Muttaqi K M，Perera S．Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems [J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2014，5 (2)：944-953．

[9] Xiao J，Wang P，Setyawan L．Hierarchical control of hybrid energy storage system in DC microgrids [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2015，62 (8)：1-1．

[10] 文波，秦文萍，韩肖清，等．基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略 [J]．电网技术，2015 (4)：892-898．

[11] 吴雨，潘文霞，冯蒙霜，等．基于混合储能的微电网功率控制策略 [J]．电力系统及其自动化学报，2013，25 (2)：109-114．

[12] 支娜，张辉，肖曦．提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究 [J]．电工技术学报，2016，31 (3)：31-39．

[13] Tummuru N R，Mishra M K，Srinivas S．Dynamic energy management of hybrid energy storage system with high-gain PV converter [J]．IEEE Transactions on Energy Conversion，2015，30 (1)：150-160．

[14] Wang S，Tang Y，Shi J，et al．Design and advanced control strategies of a hybrid energy storage system for the grid integration of wind power generations [J]．IET Renewable Power Generation，2015，9 (2)：89-98．

[15] Xie J D，Qiu X Y，Ren L，et al．Capacity configuration model of hybrid energy storage system considering DC distribution benefit [J]．Electric Power Construction，2016 (5)：28-33．

（收稿日期：2017－03－20）EA