独立风光储微电网中混合储能的管理控制策略

针对独立风光储微电网中混合储能功率分配和电压频率稳定两大问题，提出了混合储能管理和控制策略。该策略将混合储能中的锂电池采取功率控制方式，靠发电预测和负荷预测结果制定充放电计划以平复系统波动。为了延长锂电池寿命，策略根据系统能量平衡原则和荷电状态，通过新能源发电控制和负荷管理来防止锂电池过充过放。而超级电容器作为压频电源补偿系统的实时功率缺额，并且超级电容器的端电压控制保证了其工作在正常电压范围，以至能够始终完成微电网调频调压任务。通过孤网运行、能量分析和端电压控制三次Matlab仿真，证明所提策略的正确性。

张海燕[1,2] 秦亚斌[3] 肖 春[4] 韩肖清[1]/1.太原理工大学电气与应用学院 2.中北大学计算机与控制学院 3.国网山西省电力公司检修公司 4.国网山西省电力公司客户服务中心

张海燕/讲师

关键词/Keywords
新能源·
微电网·
混合储能·
能量平衡·
发电预测·

0 引言

如今雾霾已成为一种影响人类生存发展的重要环境问题。风能、太阳能等清洁能源的大规模应用能有效地减少雾霾等环境问题的产生。由于风能、太阳能具有互补性优势[1-2]，将光伏、风机和储能设备构成风光储微电网，不仅为风能、太阳能的高效利用提供了方便，而且一定程度上增加了供电可靠性[3-4]。

微电网孤网运行时，风能、太阳能的随机性、间歇性是制约微电网稳定运行的主要因素[5-6]，因此负责微电网功率平衡、稳定系统运行的储能设备必不可少[7-8]。文献[9]提出的协调控制策略中锂电池当作压频电源稳定微电网运行，并通过调节其他可控微电源的输出功率间接保护锂电池。但风光储微电网中光伏、风机都属不可控微电源，若以锂电池作单一储能，其必然以控制电压和频率为首要任务，不能实现功率调度，不利于锂电池能量管理和寿命延长。

能量密度、功率密度和循环寿命方面具有互补特性的锂电池和超级电容器组合构成混合储能，可消除单一储能的弊端[10]。混合储能管理和控制策略的研究就成为风光储微电网能量管理研究的核心。

国内外对混合储能的能量管理和控制策略已有多方面的研究[10-17]，但把孤网运行的微电网中混合储能功率分配和电压频率控制结合起来研究的较少。本文以独立运行的风光储微电网中混合储能为研究对象，提出了一种新的管理和控制策略，该策略利用新能源发电预测和负荷预测结果，结合锂电池、超级电容器的不同特性进行混合储能间的功率分配。策略中锂电池采用功率控制方式，有利于其寿命的管理和优化；而加入端电压控制的超级电容器则作为压频电源增加了微电网的供电可靠性。

1 微电网拓扑结构

风光储微电网采用交流母线结构，如图1所示。其中分布式电源有4.5 kW的光伏微电源和22 kW的双馈风力发电机组。由于光伏微电源的输出电压较低而且不稳定，因此先经过Boost电路升压后再经过逆变器接到交流母线上。双馈风力发电机通过交－直－交变流器（Back－Back）与交流母线相连。

混合储能包括锂电池组和超级电容

国家自然科学基金资助项目（51277127），山西省高等学校中青年拔尖创新人才支持计划资助。

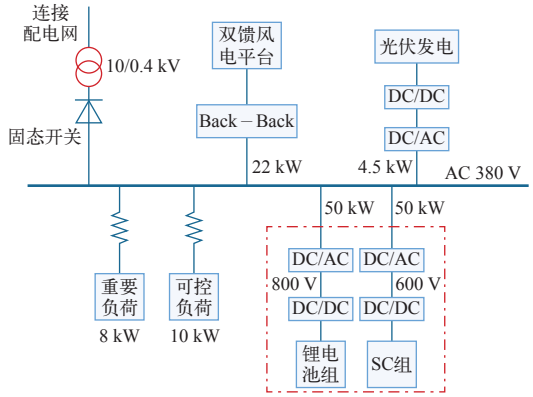


图1　微电网拓扑结构图

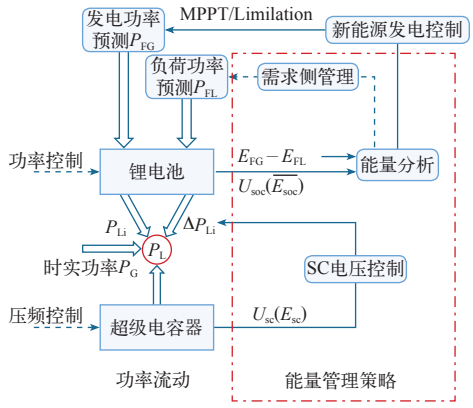


图2　混合储能管理结构图

器组，两者的相关电气参数如表1所示。混合储能有多种联结形式，本文锂电池组和超级电容器组通过相互独立的控制电路并联在母线上。控制电路中直流变换环节采用Buck/Boost双向变换器，锂电池组和超级电容器组经升压后的直流电压分别为800 V和600 V。微电网系统中有交流负荷18 kW，其中重要负荷为8 kW，要求不间断供电，可控负荷为10 kW，可经过需求侧管理进行投切操作。

表1　锂电池组与超级电容器组的相关参数

锂电池组		超级电容器组	
标称容量/A·h	50	单体电容/F	16.5
额定电压/V	3.2	额定电压/V	48
数量	150	数量	10
额定功率/kW	50	额定功率/kW	50
总储能/kW·h	25	总储能/W·h	500
初始SOC	0.5	初始电压/V	400
SOC范围	0.3～0.9	电压范围/V	240～480

2　混合储能管理结构

混合储能管理结构如图2所示。锂电池和超级电容器分别采用功率控制和压频控制。锂电池起到平复系统波动的作用，输出功率P_{Li}由新能源发电功率预测值P_{FG}和负荷功率预测值P_{FL}决定，其功率参考值$P_{Li\cdot ref}=P_{FL}-P_{FG}$。当$P_{FG}>P_{FL}$时，锂电池充电；当$P_{FL}>P_{FG}$时，锂电池放电。压频控制下的超级电容器满足系统对实时功率平衡的要求。式（1）为系统功率平衡式，即

$$P_{sc}=P_L-P_G-P_{Li}-\Delta P_{Li}=(P_L-P_G)-(P_{FL}-P_{FG})-\Delta P_{Li}=P_\varepsilon-\Delta P_{Li} \quad (1)$$

式中，P_L为负荷实际消耗功率；P_G为风力、光伏发电的总功率；P_{Li}为锂电池输出功率；ΔP_{Li}为锂电池的调节功率；P_{FG}为新能源发电功率预测值；P_{FL}为负荷功率预测值；P_ε为功率的预测误差。

超级电容器具有能量密度小的缺点，为防止其在充放电过程中电压越限影响系统稳定，本文制定了超级电容器端电压控制规则（见3.2节），确定锂电池的调节功率ΔP_{Li}，保证超级电容器端电压始终处于正常范围。由式（1）可知，超级电容器主要处理由预测误差带来的不平衡功率。预测误差表现为随机性、突变性，这正与超级电容器功率密度大、循环寿命长的特性相匹配。

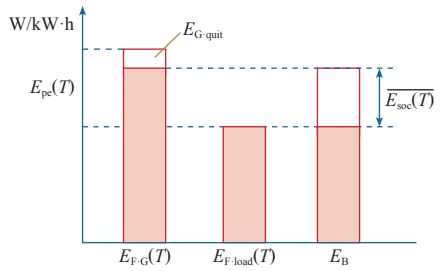
图2中，能量分析是根据发电功率预测、负荷预测结果和电池状态进行微电网的能量供销管理，管理的手段是新能源发电控制和需求侧管理。能量分析为微电网的能量管理提供了时间裕度，一定程度上消除了系统运行状态突然改变时造成的冲击。新能源发电控制可设定光伏电源和双馈风机工作在最大功率跟踪（Maximum Power Point Tracking，MPPT）模式或限制功率输出模式（Limitation），需求侧管理主要是负荷的投切，投切规则可以根据微电网的优化目标函数来确定，本文不对此讨论。

3　混合储能管理与控制

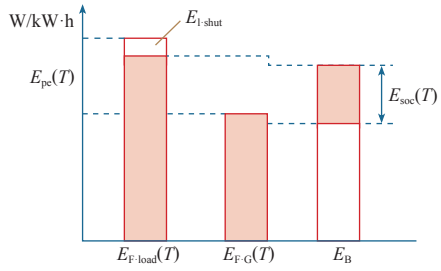
3.1　锂电池能量分析与管理

孤网运行的微电网不仅对实时功率平衡有要求，而且系统的能量供销也需要平衡。锂电池充

（放）电周期T内的能量供给情况如图3所示。



（a）锂电池充电



（b）锂电池放电

图3　微电网孤网运行时的能量分析

锂电池充电周期内能量关系如图3a所示。其中，$E_{F\cdot G}(T)$为周期T内新能源预计总的发电量；$E_{F\cdot load}(T)$为周期T内负荷预计消耗能量；E_B为电池总储能；$\overline{E_{soc}(T)}$为该周期内锂电池最大可充电能；$E_{pe}(T)$为周期T内微电网的能量供求差，$E_{pe}(T)=E_{F\cdot G}(T)-E_{F\cdot load}(T)$。从图3a可见，$E_{F\cdot G}(T)>E_{F\cdot load}(T)+\overline{E_{soc}(T)}$，新能源发电所产生的能量供给过剩，需通过发电管理弃掉部分风能、太阳能，$E_{F\cdot G}(T)-E_{G\cdot quit}=E_{F\cdot load}(T)+\overline{E_{soc}(T)}$。其中，$E_{G\cdot quit}$为通过负荷管理增加一定的可控负荷，增加能量消耗。

锂电池放电周期内能量关系如图3b所示，$E_{F\cdot G}(T)+E_{soc}(T)<E_{F\cdot load}(T)$，其中，$E_{soc}(T)$为周期$T$内初始锂电池剩余能量。当风电、光伏微电源和锂电池可提供的能量不能满足负荷需求时，必须切除一定量的负荷，$E_{F\cdot G}(T)+E_{soc}(T)=E_{F\cdot load}(T)-E_{l\cdot shut}$。其中$E_{l\cdot shut}$指减少的能量。

上述$E_{pe}(T)$、$E_{soc}(T)$和$\overline{E_{soc}(T)}$的计算公式分别参考式（2）～式（5），即

$$E_{soc}(T)=E_{soc}(T-1)+\int_{T-1}\frac{P_{Li\cdot ref}(t)}{\eta_D}dt \tag{2}$$

当（$T-1$）为锂电池充电周期时

$$E_{soc}(T)=E_{soc}(T-1)+\int_{T-1}\eta_C P_{Li\cdot ref}(t)dt \tag{3}$$

$$E_{pe}(T)=\int_T(P_{F\cdot G}-P_{F\cdot load})dt \tag{4}$$

当（$T-1$）为锂电池放电周期时

$$\overline{E_{soc}(T)}=E_B-E_{soc}(T) \tag{5}$$

式（2）、式（3）中，η_C和η_D为电池充、放电效率。过充、过放对锂电池有很大的损害，因此在策略中设置锂电池最大允许荷电状态SOC_{max}和最小允许荷电状态SOC_{min}。图4为锂电池控制基本流程图。

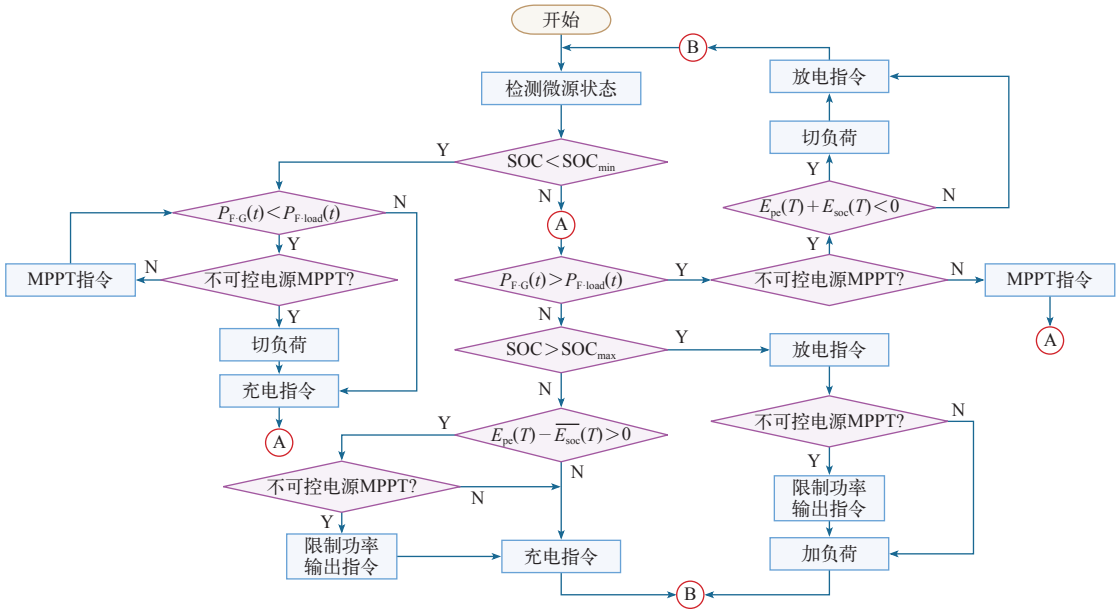


图4　锂电池控制基本流程图

3.2 超级电容器管理策略

微电网系统内部功率通过锂电池的平复作用已基本实现平衡。瞬时不平衡功率主要表现在发电预测和负荷预测中产生的误差，以及微电源、控制器的动作延迟。预测误差造成的不平衡功率呈现随机性、突变性的特点，而动作延时会造成当控制方式改变等情况下系统短暂的功率不平衡。而系统实时功率不平衡又直接表现为电压和频率的变化。利用电压频率控制（即V/f控制）下的超级电容器完成能量管理的实时调整，可以消除这些扰动对微电网运行的不利影响。

超级电容器受限于较小的能量密度，当超级电容器长时间处于充电（或放电）状态时易造成内部储能达到最大值（或最小值）。超级电容器的存储能量E和端电压U_{sc}存在$E=0.5CU_{sc}^2$的关系，因此，超级电容器的过充过放反映在端电压超过规定的电压上、下限。

端电压过高时可能发生击穿损坏电容器，端压过低时易发生过电流烧坏电容器[18]。这都会威胁到微电网的安全可靠运行，因此必须对超级电容器的端电压进行有效的管理，使其尽量工作在正常区域。但超级电容器的控制方式决定了不能直接进行端电压调整，所以可以通过调节采用功率控制的锂电池输出功率达到间接控制超级电容器端电压的目的。

具体的端电压控制规则如图5所示。

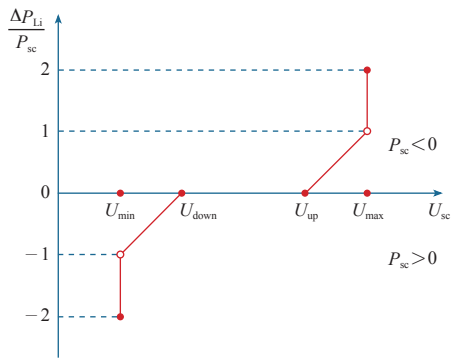


图5　超级电容器端电压控制规则

将超级电容器工作电压区间（U_{max}，U_{min}）划分为5个子区间，分别是：欠压区$U_{sc}\leqslant U_{min}$；低压区$U_{min}<U_{sc}<U_{down}$；正常区$U_{down}\leqslant U_{sc}\leqslant U_{up}$；高压区$U_{up}<U_{sc}<U_{max}$；过压区$U_{sc}\geqslant U_{max}$。由表1可知，$U_{max}=480$ V，$U_{min}=240$ V；本文设定$U_{up}=440$ V，$U_{down}=280$ V。

当超级电容器工作在过压区时，只允许其放电。当t时刻超级电容器输出功率$P_{sc}(t)>0$时，锂电池调节功率$\Delta P_{Li}=0$；当$P_{sc}(t)<0$时，$\Delta P_{Li}=2P_{sc}(t)$，调整后的超级电容器输出功率$P'_{sc}(t)=P_{sc}(t)-\Delta P_{Li}=-P_{sc}(t)>0$，此时超级电容器由充电状态转换为放电状态。

当超级电容器工作在高压区时，要通过减少充电量延缓端电压的上升速度。当$P_{sc}(t)>0$时，$\Delta P_{Li}=0$；当$P_{sc}(t)<0$时，$\Delta P_{Li}=\alpha_{up}P_{sc}(t)$；$P'_{sc}(t)=P_{sc}(t)-\Delta P_{Li}=(1-\alpha_{up})P_{sc}(t)$。

其中

$$\alpha_{up}=\frac{U_{sc}-U_{up}}{U_{max}-U_{up}} \tag{6}$$

当超级电容器工作在正常区时，$\Delta P_{Li}=0$，$P'_{sc}(t)=P_{sc}(t)$。

当超级电容器工作在低压区时，要通过减少其放电量延缓端电压下降速度。当$P_{sc}(t)<0$时，$\Delta P_{Li}=0$；当$P_{sc}(t)>0$时，$\Delta P_{Li}=\alpha_{down}P_{sc}(t)$；$P'_{sc}(t)=P_{sc}(t)+\Delta P_{Li}=(1+\alpha_{down})P_{sc}(t)$。

其中

$$\alpha_{down}=\left(\frac{U_{sc}-U_{min}}{U_{down}-U_{min}}\right)-1 \tag{7}$$

当超级电容器工作在欠压区时，只允许其充电。当$P_{sc}(t)<0$，$\Delta P_{Li}=0$；当$P_{sc}(t)>0$，$\Delta P_{Li}=-2P_{sc}(t)$；$P'_{sc}(t)=P_{sc}(t)+\Delta P_{Li}=-P_{sc}(t)<0$。

4 混合储能控制器设计

由于锂电池和超级电容器在系统中担当不同的角色，遂为两者设计独立的控制器。

锂电池逆变器采用恒功率控制，如图6所示，其本质是电流环。将交流母线电压u_{abc}经过派克变换为同步坐标系下的d、q轴分量u_d、u_q，根据功率参考值P_{ref}、Q_{ref}得到电流环输入参考值i^*_{ld}、i^*_{lq}，该参考值分别与电感电流d、q轴分量i_{ld}、i_{lq}作差经PI环节输出电压参考值u^*_d、u^*_q控制电压型逆变器。

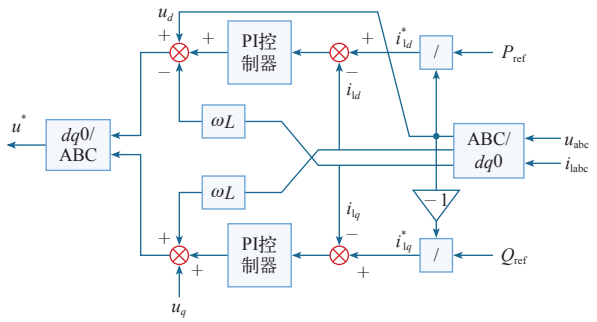


图6 锂电池功率控制框图

以锂电池为例，其逆变器和Buck/Boost变换器之间电容电压要保持稳定，一方面保证逆变器能够正常工作，另一方面也保证了直流侧功率能够跟随交流侧功率的变化。

采用电压电流双环控制的Buck/Boost变换器将电容电压控制在800 V，结构如图7所示。

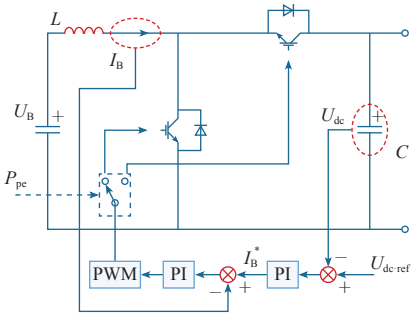


图7 Buck/Boost变换器控制结构图

电容C实际电压U_{dc}与参考电压$U_{dc\cdot ref}$的差值作为电压外环的输入。当交流侧功率需求减小，导致U_{dc}增大，差值（$U_{dc\cdot ref}-U_{dc}$）经过PI控制器得到的电流参考值I_B^*减小，电流内环控制锂电池电流I_B跟随I_B^*变化。即锂电池的输出功率受控减小，电容的输入功率减小则U_{dc}减小，达到了控制U_{dc}稳定的目的，反之亦然。锂电池充放电切换由Buck/Boost变换器根据微电网净功率$P_{pe}=P_{PV}+P_{WG}-P_L$决定。当$P_{pe}>0$，Buck工作电池充电；当$P_{pe}<0$，Boost工作电池放电。

超级电容器要稳定系统电压频率，其逆变器采用电压频率控制，如图8所示。其中，电压外环保持交流母线电压稳定，电容电流内环控制功率流动，单位功率因数时$u_{d\cdot ref}=0$。图8中，i_{cd}、i_{cq}为滤波器电容电流d、q轴分量；i^*_{cd}、i^*_{cq}为电压外环输出电容电流d、q轴参考值；u^*为三相电压参考值。直流侧Buck/Boost变换器也采用图7控制方式。

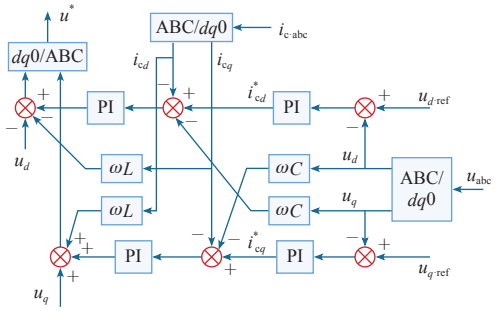


图8 超级电容器电压频率控制框图

5 仿真分析

在Matlab中搭建仿真模型验证本文提出混合储能管理与控制策略的正确性。锂电池采用Simullink中Battery模块，选择“Battery type”为“Lithium－Ion”，其他参数按照表1给定值设定。超级电容器采用简化的RC模型，内阻为0.5 Ω。风电、光伏微电源则用理想交流电流源等效。模型中交－直流变换器的部分参数如表2所示。

表2 交－直流变换器部分参数

项目		参数
Buck/Boos变换器	储能电感L/mH	3
	直流侧电容C/μF	1 000
超级电容器逆变器	滤波电感L_1/mH	10
	滤波电容C_1/μF	400
锂电池	滤波电感L_2/mH	15
逆变器	滤波电容C_2/μF	100

本文的研究重点在混合储能管理和控制，所以预先给定MPPT模式下风电、光伏微电源实际输出功率总和P_G和风电、光伏微电源预测输出功率总和P_{FG}。P_G为在P_{FG}的基础上增加±15%P_{FG}的随机量。负荷功率P_L分别在3 s和9 s有阶跃变化，如图9所示。

5.1 微电网孤网运行

锂电池控制目标为平滑系统的功率波动，其充放电区间由$P_{F\cdot load}$和$P_{F\cdot G}$确定。仿真期间，锂电池功率输出如图10所示，SOC变化如图11所示。从仿

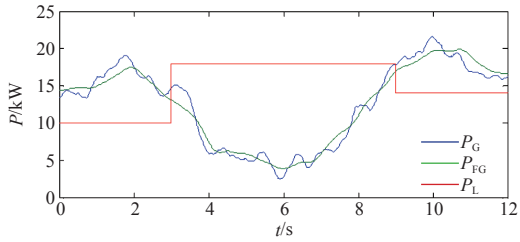


图9　超级电容器电压频率控制图

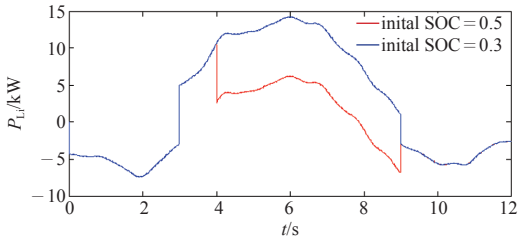


图10　不同初始荷电状态下锂电池与微电网的交换功率

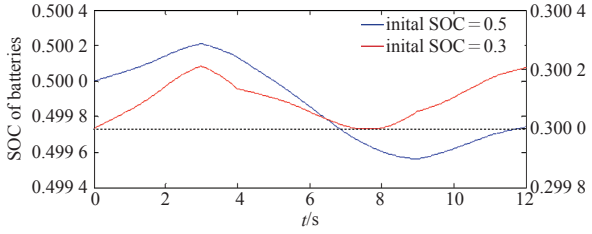


图11　不同初始条件下锂电池荷电状态变化情况

真结果中可以看出，锂电池能够迅速跟随参考功率变化，说明功率控制能够使锂电池达到按需输出、平滑系统功率波动的目标。

锂电池平滑波动后，超级电容器迅速补偿由于预测误差造成的实时功率缺额，保证微电网电压、频率的稳定。图12为超级电容器端电压U_{sc}和逆变器直流侧电容电压U_{dc}波形，说明超级电容器充放电状态切换迅速；U_{dc}始终被稳定在600 V，只在充放电切换时刻有短暂脉动。

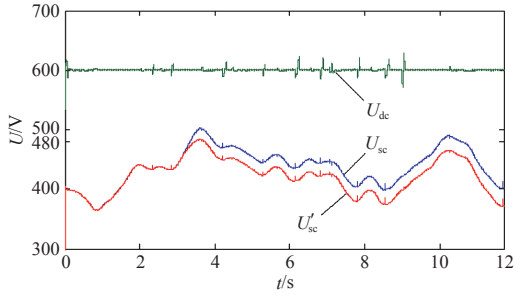


图12　超级电容器端电压及其直流侧电压

图13为超级电容器的交换功率变化情况，说明超级电容器能够实现实时功率平衡。对比图10、图13，锂电池输出功率较为平滑。反观超级电容器，频繁充放电正是新能源输出随机性特点的体现。

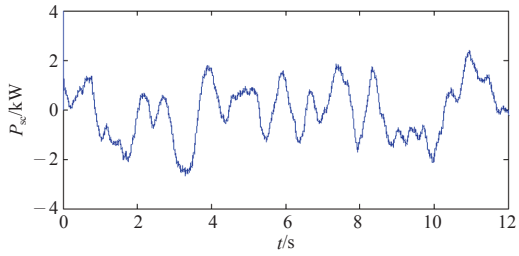


图13　超级电容器与微电网的交换功率

图14为微电网电压和频率波形图。通过混合储能中超级电容器和锂电池的协调配合，系统的电压和频率稳定在额定值附近。即便在负荷突变时，电压有效值脉动峰值小于10 V，满足电压波动在±5%之内的要求，频率脉动峰值小于0.15 Hz，系统响应迅速。由以上分析表明，所提出的管理和控制策略能够保证微电网在孤网运行时的稳定、可靠。

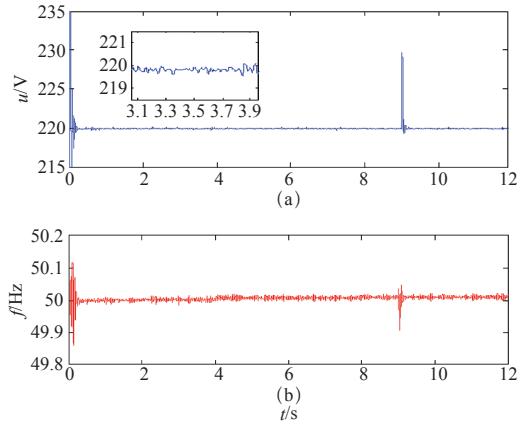


图14　微电网的电压有效值和频率

5.2　微电网能量分析

将SOC参数重新设定为0.3，再次进行仿真。锂电池同样经历充、放、充三个阶段。第一阶段开始SOC等于下限SOC_{min}，遂当前充电周期内$E_{soc}(1)=0$，通过计算，$E_{pe}(1)=14.09$ W·h。经过3 s充电后，有$E_{soc}(2)=E_{soc}(1)+E_{pe}(1)=14.09$ W·h，

而$E_{pe}(2)=-22.31$ W·h。由判定条件$E_{soc}(2)+E_{pe}(2)<0$，可知锂电池中存储的电能不能满足本放电周期内的负荷需求，据图3a可采取切除定量负荷或调节风电、光伏电源至MPPT模式的措施。本次仿真采取切负荷措施，锂电池输出功率参见图10；在4 s时切除8 kW的负荷，经过第二阶段的放电，锂电池SOC被有效控制在SOC_{min}以上，避免了深度放电的危害。

如果没有能量分析环节，当电池SOC到达保护边界时，需求侧管理突然的切负荷措施很有可能威胁到重要负荷供电，降低了系统可靠性。

5.3 超级电容器端电压控制

同5.1节相同，超级电容器的初始电压设置为400 V。不采取SC端电压控制时，在5.1节的仿真过程中，U_{sc}在3.5 s左右达到了最大值即接近500 V，远超实际超级电容器允许最大工作电压480 V。当实际运行中，若超级电容器端电压到达上下限，相当于微电网失去了电压频率调节能力，必然会威胁到系统的稳定运行。加入端电压控制环节后，再仿真得到U'_{sc}，参见图12，通过如图15所示的锂电池调节输出功率ΔP_{Li}，U_{sc}被控制在480 V以下。

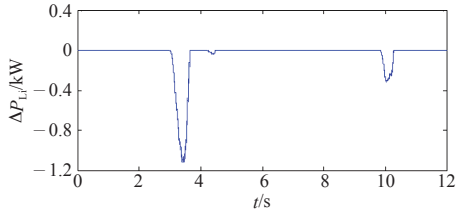


图15 锂电池调节功率变化情况

6 结束语

1）独立风光储微电网中，锂电池采用功率控制方式，超级电容器采用电压频率控制方式，打破了传统孤网条件下以锂电池作为主源的控制模式。这种控制策略下，锂电池有更大的自由度，可以通过调节其输出功率来达到防止过充过放、优化锂电池寿命的目的。

2）将预测技术与实时控制相结合，一方面为风光储微电网的能量管理提供时间裕度，另一方面实现了混合储能间功率的合理化调度。发电预测和负荷预测是一种功率的趋势性变化，具有平缓特点，锂电池处理可预知的功率波动符合其本身的特性。预测误差存在随机性、突变性，用超级电容器处理不可预知的功率脉动，也与其特性相匹配。

3）超级电容器端电压控制促使超级电容器端电压始终处于正常范围，保证其有能力完成调频调压任务，提高了系统的供电可靠性。

参考文献

[1] 曹阳，李鹏，袁越，等．基于时序仿真的新能源消纳能力分析及其低碳效益评估 [J]．电力系统自动化，2014，38 (17)：60-66．

[2] 刘立群，王志新，顾临峰．基于改进模糊法的分布式风光互补发电系统 MPPT 控制 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (15)：70-79．

[3] 余梦泽，贾林莉，朱浩骏．平抑出力波动的风光储联合发电系统容量优化配置方法 [J]．电气应用，2014，33 (21)：44-48．

[4] 侯世英，房勇，孙韬．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．

[5] 王海波，杨秀，张美霞．平抑光伏系统波动的混合储能控制策略 [J]．电网技术，2013，37 (9)：2452-2458．

[6] 张国驹，唐西胜，齐智平．超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用 [J]．电力系统自动化，2010，34 (12)：85-89．

[7] 丁明，张颖媛，茆美琴，等．集中控制式微网系统的稳态建模与运行优化 [J]．电力系统自动化，2009，33 (24)：78-82．

[8] 石庆均，耿光超，江全元．独立运行模式下的微网实时能量优化调度 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (16)：26-35．

[9] Kim Jongyul，Jeon Jinhong，Kim Seulki，et al．Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation [J]．IEEE Transactions on Power

Electronics，2010，25 (12)：3037-3048.

[10] 李少林，姚国兴．风光互补发电蓄电池超级电容器混合储能研究 [J]．电力电子新技术，2010，44 (2)：12-14.

[11] 丁明，林根德，陈自年．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.

[12] Kanchev H，Lu D，Colas F，et al．Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58 (10)：4583-4592.

[13] 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设计 [J]．电力系统自动化，2013，37 (1)：70-75.

[14] Zhou H，Tanmoy B，Duong T，et al．Composite energy storage system involving battery and ultra capacitor with dynamic energy management in microgrid applications [J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2011，26 (3)：923-930.

[15] 王琦，孙洁，汤奕．风光柴储联合发电系统智能控制策略研究 [J]．电气应用，2012，31 (24)：96-100.

[16] Mid E，Seong W，Seung W．Energy management optimization in a battery/supercapacitor hybrid energy storage system [J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2012，3 (1)：463-472.

[17] 张雪莉，刘其辉，李建宁，等．储能技术的发展及其在电力系统中的应用 [J]．电气应用，2012，31 (12)：50-57.

[18] 张野，郭力，贾宏杰，等．基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法 [J]．电力系统自动化，2012，36 (12)：36-41.

（收稿日期：2016－04－03）EA

Weidmüller

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪
—— 高效透明的生产电能监测

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪不仅能监测电能的消耗，它还能监测电能质量的基本参数和分析来自不同导体的电流的细微差别，使电力行业用户能够快速地了解生产设备中电能参数的变化情况，保证其稳定和高效率地使用。具有综合功能的Energy Meter电力参数测量仪使您可以将生产点的能源网络分块测量，尽可能精确地进行监测，配备有一体的液晶显示屏，重要的监测数据如电压、电流、功率和能耗都能一目了然。

扫一扫，关注魏德米勒官方微信

Let's connect.

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn