[微电网]

适于电动汽车充电的光伏微电网的设计与仿真

文/江苏建筑职业技术学院机电学院　刘江文　梁　纯
江苏瑞奇自动化有限公司　舒武强

设计了一种可供电动汽车充电的直流微电网运行方案，仿真试验表明，能够确保该微电网带负载正常运行。此方案弥补了光伏新能源可靠性差的缺点，为电动汽车充电与光伏新能源的结合提供了新的思路，如果得到推广，一定能大幅缓解大量普及的电动汽车对公用电网的压力。

随着电动汽车逐步进入普通家庭，国家已明确提出了充电基础设施建设的发展路线。多年的光伏发电领域的发展经验表明，大力发展分布式光伏发电应用，有助于转变能源生产与消费方式、优化能源结构。分布式光伏发电与电动汽车充电结合起来的光伏微电网充电运行模式将会成为电动汽车充电站建设的重要方向。分布式光伏发电供能系统与储能技术结合的直流微电网与大电网并网运行，互为补充、互为支撑，充分发挥各自电网能源的效能，也是新型智能电网的发展方向。

适用于电动汽车充电的光伏微电网的设计

1. 光伏微电网的拓扑结构设计

本设计中的光伏直流微电网主要由光伏阵列发电单元、锂离子电池及超级电容混合储能单元、电动汽车充电负载单元和公用电网单元组成，如图1所示。由直流母线汇集光伏发电、储能协调、电动汽车充电、交直流负荷功率需求和公用电网并网等环节，实现协调优化控制运行。其中，直流微电网采用无逆流并网，从公用电网吸收能量，不向公用电网倒送能量，公用电网仅相当于一个无限大的备用电源，为直流微电网提供强大的能量补给。

（1）光伏发电单元

光伏发电单元由光伏阵列和单向DC/DC变换器组成，光伏组件串并联组成光伏阵列，将由太阳能转化而来的小电压、小电流直流电汇集成大电压、大电流，并经单向DC/DC Boost变流器接入，向直流母线汇集。

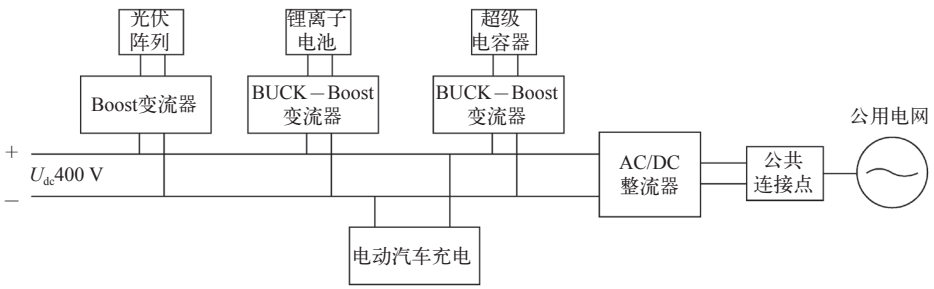

图1　光伏微电网的拓扑结构

基金项目：徐州市科技计划项目（KH17003）徐州市科技情报研究课题（XKQ2017013）

（2）混合储能单元

本文采用锂离子电池和超级电容储能协调优化的混合储能，由锂离子电池平滑系统中的低频功率分量，超级电容储能补偿系统中的高频功率分析，为直流母线提供电压稳定支撑。超级电容器的快速充放电特性，避免了锂离子电池经常性的小电流充放电，提高了其使用寿命。储能单元的DC/DC双向Boost－Buck变流器视微电网能量需求状况，实现充放电的双向能量流动。

（3）负载单元

电动汽车充电DC 400 V负载接入微电网。

（4）公用电网单元

直流微网和公用电网之间实行能量单向流动，AC/DC整流器在直流微网并网运行时，只从公用电网吸收能量，不向公用电网输送能量。

2．光伏微电网的工作模式

根据光伏电池发电量与负载工作消耗电量大小对比，合理地调整此直流微网的工作模式，使整个系统的能量流动处于动态平衡。

（1）普通充放电模式

当光伏电池的发电量大于负载正常工作所需要的电量时，光伏电池发出的能量首先充分供给负载，再将剩余的发电量存储于储能系统。光伏电池工作于MPPT（Maximum Power Point Tracking）模式，储能系统工作于充电模式。当光伏电池的发电量小于负载正常工作所需要的电量时，此时储能系统放电，若还未达到过放电状态，则光伏电池和储能系统共同为负载提供电能。

（3）极端过充电模式

如果负载所需能量较少，储能系统已吸收过剩的光伏发电量而达到过充电状态，储能系统进入截止状态，光伏发电模块以直流母线电压额定值为基准，工作于恒压控制CVC（Constant Voltage Control）模式，为负载提供能量。

（4）极端过放电模式

如果储能系统的能量不足以满足负载所需，储能系统达到了过放电状态，储能系统也进入截止状态。此时直流微网开启无逆流并网，从公用电网吸收不足的能量，维持系统能量平衡。

在此直流微网中，直流母线电压是衡量系统功率是否平衡的唯一标准，功率平衡的调节主要是依靠储能单元的充放电过程来完成。系统首先检测直流母线电压并与参考值400 V比对，确定出储能系统的运行状态，再检测锂离子电池的电荷状态（State of Charge，SOC），如果处于电池允许的充放电范围（20%～80%），那么直流微电网的运行在普通充放电模式；如果SOC低于20%，说明电池达到过放电临界点，则进入过放电模式，启动无逆流并网，从公用电网吸收功率；如SOC超过80%，说明电池达到过充临界点，此时进入过充电模式，光伏发电单元采取CVC运行方式。

光伏微电网组成单元的功率变换器控制策略

在直流微网中，所有单元模块都是通过直流母线连接在一起的，通过微网中四个单元变流器的协调控制，平衡各单元之间能量流动，从而控制直流母线电压稳定。各单元变流器之间的协调控制属于无主从控制，只有直流母线作为唯一的连接线路，实现各单元之间的能量流通。

1．光伏发电单元Boost变流器控制策略

光伏发电单元是微网中的主要供电模块，实行能量单向流动，选用Boost升压整流器使其平滑接入微网。在极端过充电模式下，Boost整流器工作于恒压控制（CVC）模式，其他情况下均工作于MPPT模式，充分利用光伏电池发电，获取最大的光伏发电功率转换效率。

2．储能单元双向Buck－Boost变流器控制策略

锂离子为主要储能介质，负责平抑微网中长时间的功率波动，通过控制其充放电过程来维持直流母线电压稳定；超级电容器为辅助储能介质，负责平抑短时间内功率突变，通过其吸收或释放能量来平滑锂离子电池的充放电特性。

锂离子电池的工作模式分为充电模式（Buck模式）、放电模式（Boost模式）和截止模式（保护模式）。图2为锂离子电池Buck－Boost变流器Matlab/Simulink控制仿真模型图。

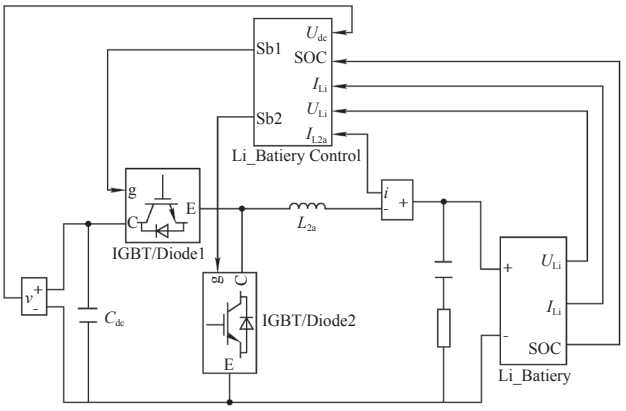

图2　锂离子电池Buck－Boost变流器控制仿真模型

锂离子电池Buck－Boost变流器的控制采用双PI环控制，外环为电压控制，内环为储能电感电流控制。依据直流母线电压实际值与参考值（400 V）的大小比较，决定变流器工作于Buck模式还是Boost模式：

当U_{dc}＞400 V时，说明光伏发电功率大于负载消耗功率，此时母线有剩余能量，储能系统工作于Buck模式。电压外环为锂离子电池的最大满充电压，经过双PI环控制，触发IGBT/Diodel导通，锂离子电池进行充电，吸收直流微网中多余电能。

当U_{dc}＜400 V时，说明光伏发电功率小于负载消耗功率，此时母线需要吸收外来能量才能维持电压稳定，储能系统工作于Boost模式。电压外环为直流母线电压，经过双PI环控制，触发IGBT/Diode2导通，锂离子电池放电，维持直流母线电压稳定。

锂离子电池剩余充电状态SOC超过其80%或低于其20%时，需要使电池进入截止模式，对电池进行充放电保护。

图3所示为超级电容器Matlab/Simulink控制仿真模型图，超级电容器Buck－Boost变流器采用基于高频功率的双PI环控制，内环仍然是储能电感电流控制，外环则由超级电容器需要吸收（或释放）的高频功率控制。混合储能总功率P_{es}减去经低通滤波器后得到的锂离子电池低频功率，得到超级电容器的高频功率，其中系数K可调节总能量中高低频功率分配，一般取0.7～0.9。超级电容器具有高功率密度，允许大电流充放电，但其端电压随着负载功率变化会波动较大，因此需要根据电压的变化对其设定保护，取其电压最大波动范围为（0.4～1.4）U_{sc}N。

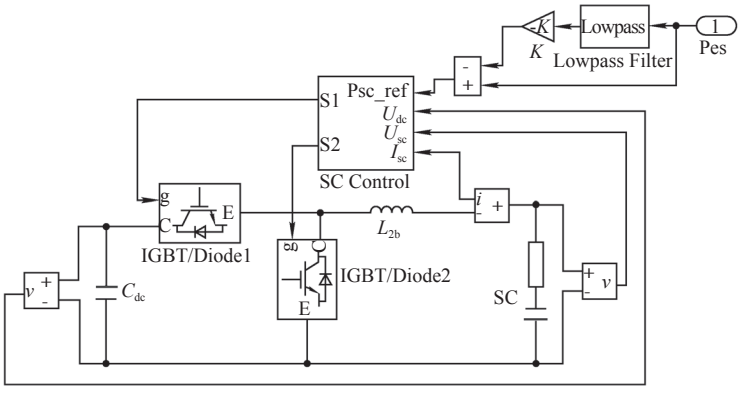

图3　超级电容器Buck－Boost变流器控制仿真模型

3．公用电网单元无逆流并网变流器控制策略

当储能单元已达到过放电状态，且光伏发电输出功率已无法满足负载需求时需要启动无逆流并网环节，电能从公用电网输送到直流母线，在此实现能量转换的变流器采用AC/DC整流器。本文选择单相电压型全桥PWM整流电路来实现此功率转换，其结构如图4所示。该PWM整流电路实际是一个升压型整流电路，图4中Lg表示Boost升压电感，具有滤波作用；Rg表示系统损耗等效内阻，基于全控型器件IGBT的PWM整流电路可以减少交流电网谐波干扰，稳定直流侧电压，具有更高的功率转换效率。

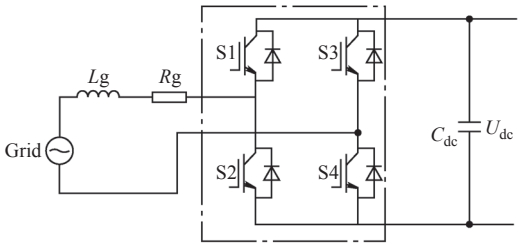

图4　单相电压型全桥PWM整流电路

图5所示为单相全桥PWM整流电路Matlab/Simulink控制仿真模型图，电路采用基于直接电流控制的双闭环控制系统，其外环为是直流母线电压PI控制，内环为交流电流PR控制，可实现无静差电流跟踪，减少公用电网对控制电路的干扰。

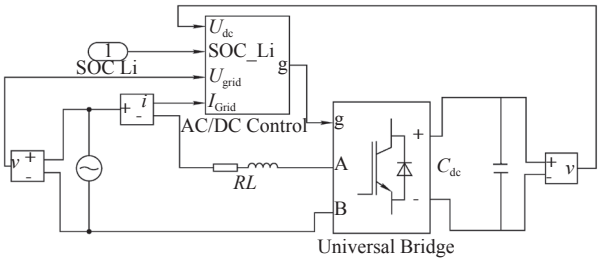

图5　单相全桥PWM整流电路控制仿真模型

适于电动汽车充电的光伏微电网仿真运行

在Matlab/Simulink中搭建直流微网整体运行仿真模型，如图6所示。设定仿真采样时间为T_s＝1e－5 s，直流母线电压额定值为U_{dc}＝400 V，公用电网采用单相电压U_{grid}＝220 V，频率为50 Hz。光伏发电单元在标准测试条件（T＝25 ℃，S＝1 000 W/m^2）下最大输出功率P_{pv}＝7 kW。混合储能中锂离子电池额定电压为U_{Li}＝160 V，额定容量为12 A·h，超级电容器的额定电压U_{sc}＝27 V，额定电容为75 F。

光伏发电输出功率发生变化，负载消耗功率保持不变，对负载单元直流供电进行仿真分析。DC 400 V电动汽车充电负载功率为P_2＝4 kW。

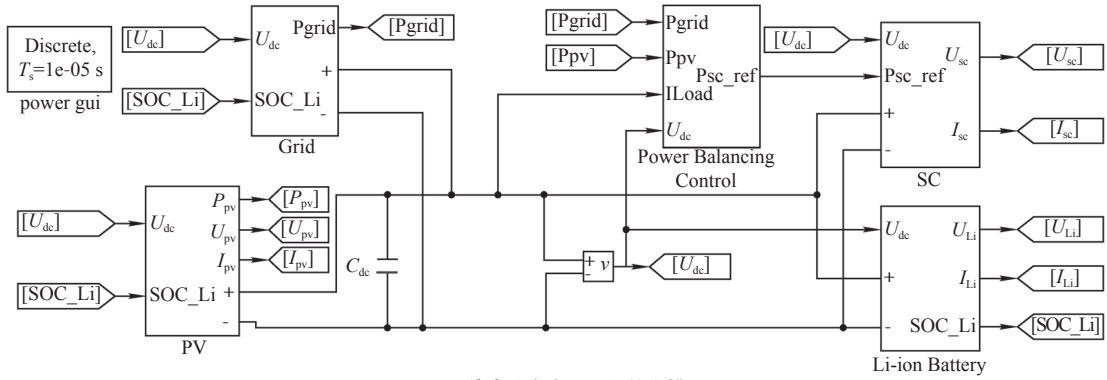

图6　光伏直流微电网运行仿真模型

（1）普通充放电模式

设定环境温度T=25℃，根据一天中太阳光照强度的变化，选取中午时间左右的光照范围，进行适当的仿真参数比例调整，设定光照强度S=[500，700，1 000，800，600]W/m^2，对应仿真时间t=[0，0.5，1，2，2.5]s，锂离子电池初始SOC=50%，仿真总时间为3 s。

图7所示为光伏发电功率P_{pv}、负载消耗功率P_{load}和直流母线电压U_{dc}的仿真结果图，可以看出：仅在仿真启动时，U_{dc}电压发生微小波动，其他时间段波动很小，整个过程中直流母线电压稳定在400 V，纹波电压完全控制在2%以内。

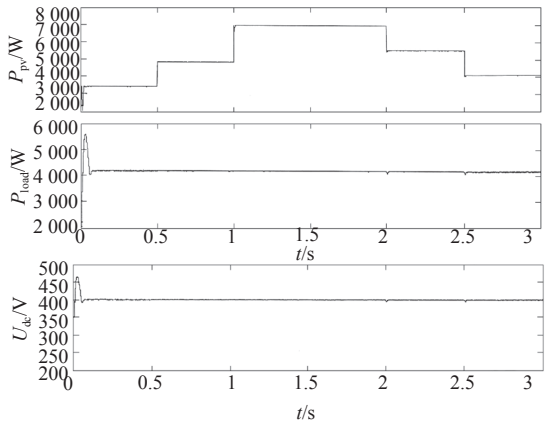

图7 光伏发电功率、负载消耗功率、直流母线电压变化仿真结果

（2）极端过放电模式

设定光照强度S=[400，500，300]W/m^2，对应时间t=[0，0.5，1]s，环境温度T=25℃，仿真总时间为1.5 s，锂离子电池初始SOC=18%。仿真结果如图8所示。光伏发电输出功率P_{pv}较低，储能电池不放电，依靠从公用电网吸收能量P_{grid}，直流母线电压维持在400 V左右，整体波动非常小。

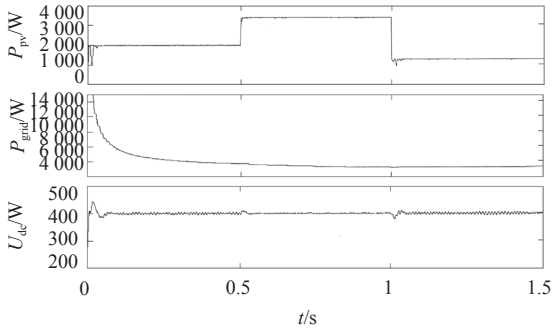

图8 光伏发电功率、电网输出功率、直流母线电压仿真结果

(3) 极端过充电模式

设定光照强度S=[800，1 000，1 200]W/m^2，对应时间t=[0，0.5，1]s，环境温度T=25℃，仿真时间为1.5 s，锂离子电池初始SOC=85% 。仿真结果表明，光伏发电在CVC控制下，其输出电压在系统运行稳定后变化较小，直流母线电压最终维持在400 V。

仿真结果证明，光伏直流微电网在各种工作模式下均能有效平抑功率波动，稳定直流母线电压，使微电网系统功率达到动态平衡，维持微电网系统平稳高效运行。

结束语

多数分布式微电源提供的都是直流电，储能设备的充放电过程也是直流传输，而且直流微网比交流微网具有更加灵活的重构能力。随着纯电动汽车技术和动力电池技术的迅速发展，电动汽车在我国将开启蓬勃式发展，构建适于电动汽车充电的光伏微电网，可以高效地利用新能源发电量，明显增强节能减排效果和提高经济效益。**EA**

（收稿日期：2018.06.22）
（编辑：朱金凤）