

光伏发电系统蓄电池充放电均衡控制仿真研究

为了保证光伏发电系统供电的可靠性及稳定性,为了提高光伏发电系统中蓄电池的运行效率和工作寿命,提出一种基于直流母线电压变化的蓄电池充放电控制策略。控制策略以直流母线电压瞬时值作为输入变量,蓄电池的充放电状态作为输出变量。在确保外界因素发生变化时,光伏发电系统仍能为负载提供稳定可靠电能的同时,避免蓄电池在工作模式之间发生误切换和频繁切换对系统造成的影响。在Matlab/Simulink环境中,搭建了基于双向DC/DC变换器的蓄电池充放电仿真电路,并搭建光储并联供电仿真模型,在不同条件下进行了仿真验证,仿真结果验证了充放电控制策略的有效性。

王国军 邵天章/陆军工程大学石家庄校区车辆与电气工程系

0 引言

储能装置对于独立直流微电网系统进行稳定性方面起着重要的作用,由于光伏发电系统本身受到很多不稳定因素的影响,例如光照强度大小和温度高低等,易造成电能输出不稳定,故需要与储能装置联合供电来保证整个系统的稳定。因此,为了使光伏发电系统有比较稳定的输出以及平衡系统功率,必须要有适合储能装置的充放电控制策略^[1-2]。储能装置具有能量双向流动和响应速度快的特点,在微电网中增加储能装置,能够有效改善微电网电能质量并提高系统稳定性,同时能够提供短时供电、优化分布式电源运行,甚至提高微电网的经济效益^[3-5]。因此对于储能装置的控制策略是需要重点研究的问题。

文献[6]提出以蓄电池电流、蓄电池电压和电网侧电流为控制量的控制策略。文献[7]针对阀控式铅酸蓄电池高效

经济利用问题对比了几种充放电方式的优势和不足,最后提出了一种改进的恒流充放电控制策略。文献[8]提出一种基于模糊控制的光伏发电系统蓄电池充放电状态控制策略,提高了蓄电池充放电状态判断的准确性。

文献[6-7]采用传统的蓄电池充放电控制方法,控制灵活度不够,文献[8]的控制方法计算量比较大。而基于直流母线电压变化的蓄电池充放电控制策略,在传统控制方法的基础上,仅以易于检测和控制的直流母线电压为输入量,根据直流母线电压所处区域自动判断蓄电池的工作模式和模式切换。该控制方法利用四个预定电压值将直流母线电压分为五个区域,蓄电池以直流母线电压瞬时值为参考,根据直流母线电压所在区域及变化情况判断蓄电池的工作模式和模式切换,实现蓄电池在充电、放电和空闲工作模式的控制与自由切换。同时具体探讨了在不同直流母线电压区域蓄电池的充放电控制方法,并搭建光储并联供电仿真模型,在不同条件下进行了仿真验证。

1 光储并联供电系统

光储并联供电系统结构如图1所示,由光伏阵列发电单元、蓄电池、直流母线以及连接直流母线和蓄电池的双向DC/DC变换器组成。光伏发电单元作为分布式电源通过DC/DC变换器的MPPT控制和直流母线连接,蓄电池经双向DC/DC变换器和直流母线连接,通过充放电控制



王国军/硕士研究生

关键词/Keywords

蓄电池·
充放电·
双向DC/DC变换器·
控制策略·

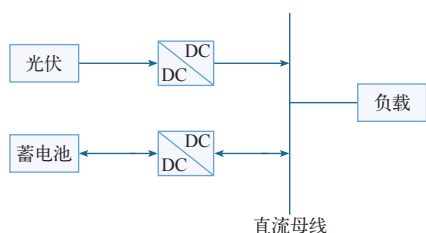


图1 光储并联供电系统结构

保证直流母线电压的稳定。

在Matlab/Simulink环境中搭建的光伏发电和储能系统并联供电仿真模型如图2所示。具体的控制过程为：光伏发电系统提供的功率可以满足负荷功率需求，直流母线电压在小范围内（区域1）波动，蓄电池工作在空闲模式；当外界条件变化使光伏发电系统输出功率增加或负荷减少的情况下，光伏发电系统输出功率将大于负荷功率需求，直流母线电压会升高，当超过一定数值时，控制充电电路导通为蓄电池充电。当蓄电池SOC = 100%时，停止充电，光伏发电系统将从MPPT模式转变为恒压模式运行；当外界条件变化使光伏发电系统输出功率减小或负荷增加的情况下，光伏发电系统输出功率不足以满足负荷功率需求，此时直流母线电压将会降低，当低于某个数值时，控制放电电路导通，当蓄电池的SOC值达到放电下限仍没有使系统功率平衡时，控制蓄电池只能进行充电不能放电，进行甩负荷操作。

2 系统主要模块及其控制

2.1 双向DC/DC变换器

储能装置主要通过双向DC/DC变换器与直流母线相连进行充放电，以调节系统功率平衡，其控制包括蓄电池充电控制和放电控制。本文选取的双向DC/DC变换器为非隔离型双向Buck-Boost变换器，并对其进行了优化设计。双向DC/DC变换器顾名思义是DC/DC变换器的双象限运行，在保证变换器两侧电压极性相同的情况下，根据实际情况调节电流的流动方向，实现变换器双向工作^[9]。当负荷功率需求大于系统输出功率时，可以通过双向DC/DC变换器进行补充；当系统输出功率大于负荷功率需求时，蓄电池还可以存储多余能量。

关于双向DC/DC变换器拓扑的研究很多，按照输入侧和输出侧之间是否有电气隔离（是否含变压器）可以将双向DC/DC变换器分为隔离型和非隔离型两类。非隔离型双向DC/DC变换器的主要拓扑有：双向Buck-Boost变换器、双向Cuk变换器和双向Sepic-Zeta变换器；隔离型双向DC/DC变换器的主要拓扑有：正/反激式、推挽式和半桥/全桥式双向DC/DC变换器^[10-12]。常用的双向DC/DC变换器主要包括双向升降型（Boost-Buck）电路和变压器隔离型全桥变换电路两种结构。后者

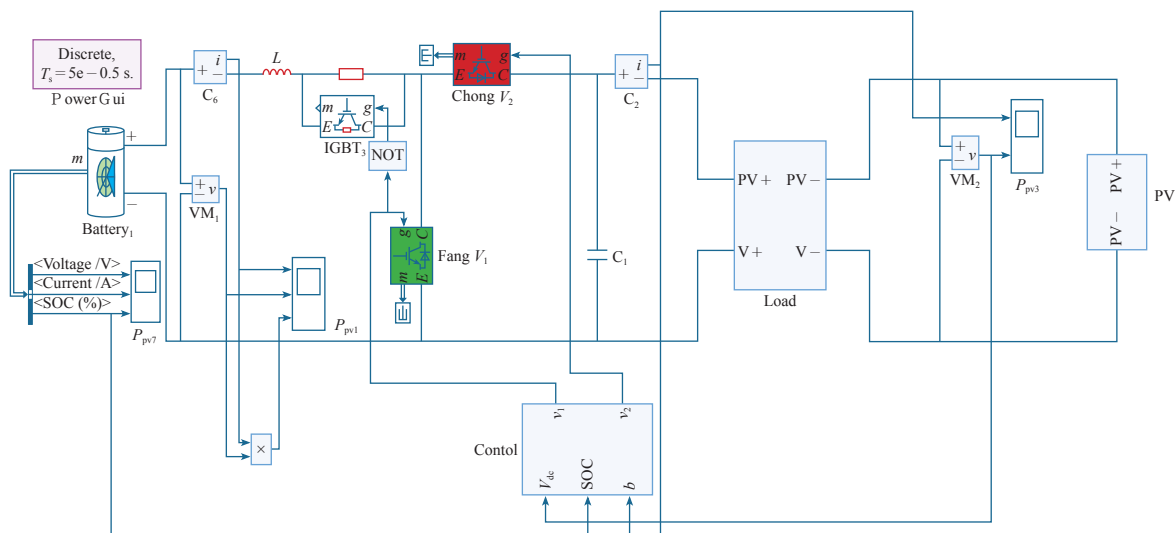


图2 储能系统与光伏系统并联供电仿真模型

由于本身开关管数量较多,效率相对较低,多在大功率条件下使用^[13],不适合小型系统。因此以非隔离单通道Buck-Boost双向DC/DC变换器为基础进行研究,其典型拓扑结构如图3所示。

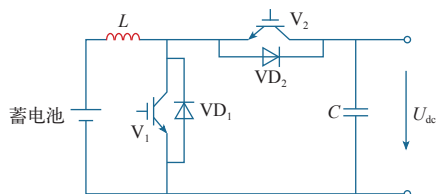


图3 双向Buck-Boost变换器拓扑结构

(1) Boost工作模式

母线输出功率不足以满足负荷功率需求,需要蓄电池放电,此时 V_1 导通, V_2 关断, VD_2 进行续流,双向DC/DC变换器等效为一个Boost变换器,如图4所示。

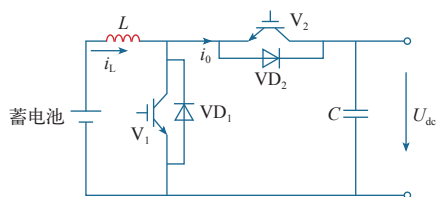


图4 Boost工作模式电路结构

由于该模式下工作电路为升压电路,当 V_1 导通时可能会引起电路过电流,对蓄电池造成损害,所以为了保护蓄电池,在电感后添加了一个限流电阻。考虑到 V_1 关断时,该电阻串联在电路中与负载形成串联分压,既降低负载侧的电压又消耗蓄电池的能量,在电阻侧并联了一个开关,开关信号与 V_1 相反,从而实现了既保护蓄电池又减少能量损耗的目的。改进后Boost模式下的双向DC/DC变换器结构如图5所示。

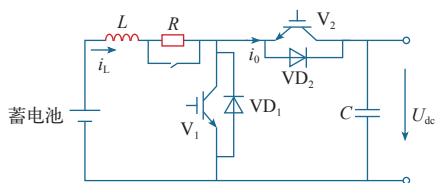


图5 改进后Boost工作模式电路结构

(2) Buck工作模式

当双向DC/DC变换器工作在Buck模式时,一般主电路电能可以满足负载需求,多余的电能可

为蓄电池充电,Buck模式下的双向DC/DC变换器结构如图6所示。

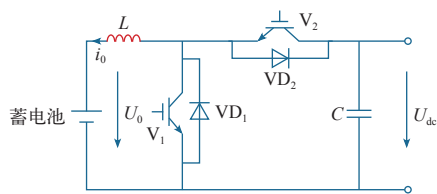


图6 Buck工作模式电路结构

2.2 蓄电池充放电控制策略

基于直流母线电压变化的蓄电池充放电控制策略是利用四个大小不同的电压值将直流母线电压划分为五个区域,以直流母线电压值为参考,决定蓄电池的工作模式。相邻的两个电压值要选取合适,若差值较小,当有外部扰动时会使工作模式发生误切换;若差值较大,直流母线电压变化范围过大,从而降低了系统的可靠性。一般设定相邻电压值之间互差5%,选取的四个电压值与直流母线电压额定值 V_{dc-ref} 间的关系为

$$V_{L_2} < V_{L_1} < V_{dc-ref} < V_{H_1} < V_{H_2} \quad (1)$$

式中, V_{L_2} 、 V_{H_2} 为允许直流母线电压波动的最小值和最大值; V_{L_1} 、 V_{H_1} 为蓄电池放电与充电临界值; V_{dc-ref} 为直流母线电压额定值。

四个电压值将直流母线电压分为五个区域,分别为区域一: $V_{L_1} \leq V_{dc} \leq V_{H_1}$ 、区域二: $V_{H_1} < V_{dc} \leq V_{H_2}$ 、区域三: $V_{L_2} \leq V_{dc} < V_{L_1}$ 、区域四: $V_{dc} > V_{H_1}$ 和区域五: $V_{dc} < V_{L_2}$ 。

表1 直流母线电压边界值

(单位: V)

V_{L_2}	V_{L_1}	V_{dc}	V_{H_1}	V_{H_2}
$0.9V_{dc}$	$0.95V_{dc}$	V_{dc}	$1.05V_{dc}$	$1.1V_{dc}$
360	380	400	420	440

(1) 区域一: $V_{L_1} \leq V_{dc} \leq V_{H_1}$

在系统实际运行时,即使处于稳定状态,由于负荷的变化和分布式电源的不确定性,直流母线电压数值一般不会稳定在额定值,会在小范围内波动。蓄电池的工作模式取决于直流母线电压,通过比较直流母线电压瞬时值与额定值来选择双向DC/DC变换器是工作在Boost模式还是Buck模式。但是由于直流母线电压存在小范围波动,

蓄电池双向DC/DC变换器会在Boost和Buck模式之间来回切换,为了避免这种情况,同时减小电力电子器件频繁动作引起的谐波,区域一下蓄电池工作在空闲模式,光伏发电系统提供的功率可以满足负荷功率需求,柴油发电机组不运行。因此,区域一内负荷功率全部由光伏发电系统提供,为充分利用太阳能,光伏发电系统工作在MPPT模式。

(2) 区域二: $V_{H1} < V_{dc} \leq V_{H2}$

当外界条件变化使光伏发电系统输出功率增加或负荷减少的情况下,光伏发电系统输出功率将大于负荷功率需求,此时直流母线电压将会升高,其数值升至区域二范围内。若蓄电池SOC < 100%时,储能系统的双向DC/DC变换器工作在Buck模式,蓄电池运行于充电模式,以储存系统中的剩余电能。此时的蓄电池作为功率终端,不需要维持直流母线电压,由光伏发电系统维持直流母线电压在额定值。

为了保证蓄电池能够快速、安全地进行充电,应该选取合适的充电控制方法。常见的蓄电池充电方法有:不间断充电法、间断充电法、恒流充电法、恒压充电法、恒流-恒压两阶段充电法和预充-恒流-浮充三阶段充电法等^[14-15],在这些方法中,恒流-恒压两阶段充电法已被证明具有充电速度快等特点,因此采用恒流-恒压两阶段充电法。当蓄电池SOC值较低,设定当

$30\% \leq \text{SOC} < 90\%$ 时,采用恒流充电,并以额定充电电流为蓄电池充电;当蓄电池SOC较高,设定当 $90\% \leq \text{SOC} \leq 100\%$ 时,采用恒压充电,并以额定充电电压为蓄电池充电。在对蓄电池进行充电的过程中,设置电流限幅环节防止充电过程中出现过电流充电,对蓄电池造成损害。当蓄电池SOC = 100%且系统稳定运行时,停止充电,光伏发电系统由MPPT模式转换为恒压模式。

图7为蓄电池充电控制结构, V_{b-ref} 为给定的额定充电电压参考值, I_{b-ref} 为给定的额定充电电流参考值。首先检测蓄电池充电 V_b/I_b 实际值与给定值 V_{b-ref}/I_{b-ref} 相比较生成信号,得出的差值经过PI调节器控制输出控制信号然后进入PWM调制环节,形成控制信号源控制开关管的通断以及控制蓄电池充电电压和电流。在Matlab中建立蓄电池充电控制模型,如图8所示。

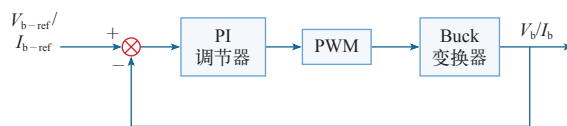


图7 蓄电池充电控制结构

(3) 区域三: $V_{L2} \leq V_{dc} < V_{L1}$

当外界条件变化使光伏发电系统输出功率减小或负荷增加的情况下,光伏发电系统输出功率不足以满足负荷功率需求,此时直流母线电压将

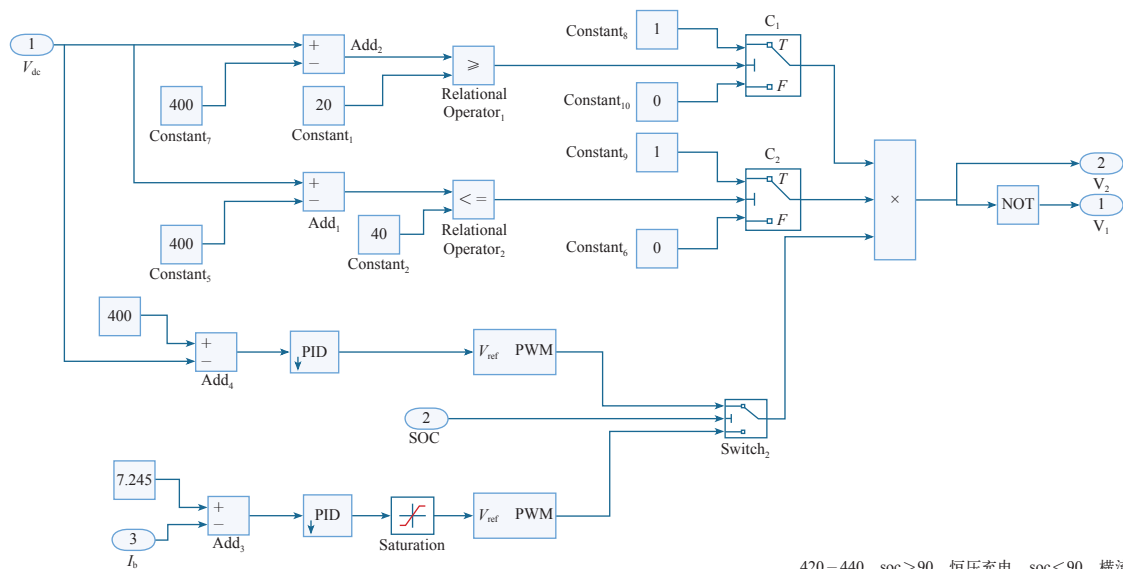


图8 蓄电池充电控制模型

420-440, soc > 90, 恒压充电, soc < 90, 恒流充电

会降低,其数值降至区域三范围内,储能系统的双向DC/DC变换器工作在Boost模式,蓄电池运行于放电模式,对系统的不足功率进行补充。蓄电池放电控制方法大致分为三种:恒流放电、恒功率放电和恒压放电^[14]。考虑到放电模式的蓄电池用来稳定直流母线电压,使直流母线电压恢复至额定值,因此蓄电池采用恒压放电控制模式。

图9为蓄电池恒压放电控制结构, 采用电压外环、电流内环的双环控制。电压外环中直流母线实际电压 V_{dc} 与参考电压 V_{dc-ref} 相比较生成的差值经过PI调节器后输出的值作为内环电流参考值 I_{ref} 进入电流环, 与实际电流 I_b 比较得出的差值经过PI调节器控制输出控制信号, 然后进入PWM调制环节, 形成控制信号控制开关管的通断。在Matlab中建立蓄电池放电控制模型, 如图10所示。

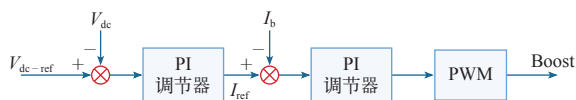


图9 蓄电池恒压放电控制结构

若光伏发电系统和蓄电池的输出功率仍不能满足负荷功率需求, 起动柴油发电机组, 与蓄电池和光伏发电系统同时给负荷供电。为保护蓄电池安全性, 防止过放电对蓄电池造成损害, 选定 $SOC = 30\%$ 作为放电下限, 当蓄电池的 SOC 达到 30% 时, 控制蓄电池只能进行充电不能放电。此阶段光伏发电系统工作在 MPPT 模式。

(4) 区域四: $V_{dc} > V_{H_1}$

当直流母线电压继续升高超过 V_H 时,光伏发

电系统首先仍以MPPT模式运行，蓄电池工作在充电模式；若蓄电池的充电能力并不能够使直流母线电压下降到允许范围内或蓄电池的SOC已经达到100%，则光伏发电系统将从MPPT模式转变为恒压模式运行，并维持直流母线电压稳定在参考值。

(5) 区域五: $V_{dc} < V_L$

在区域三内,若负荷功率需求增加到分布式电源不能满足,并且蓄电池达到了放电下限,系统内没有多余的分布式电源来满足负荷功率需求,则直流母线电压数值在区域三内会继续下降到 V_{L2} 以下。这种情况下系统发电总功率不能满足当前负荷用电需求时,就需要根据用电负荷的重要性按优先级高低供电,保障最重要负荷的正常用电,切除不重要负荷。此时系统需要进行甩负荷操作,按照负载重要性由低到高逐级切除。

3 系统整体控制仿真研究

根据上节对蓄电池充放电工作模式的分析,当直流母线电压仍继续升高超过 V_{H2} 时,蓄电池的充电能力并不能够使直流母线电压下降到允许范围内或蓄电池的SOC已经达到100%,则光伏发电系统将从MPPT模式转变为恒压模式运行,当直流母线电压仍继续下降到 V_{L2} 以下且蓄电池已经达到放电下限,这时需考虑按照负载重要性由低到高逐级切除。本文侧重讨论蓄电池充放电控制研究,对以上两种情况不作深入研究。蓄电池充放电整体的控制流程如图11所示。

为了验证充放电控制策略的有效性,在Matlab/

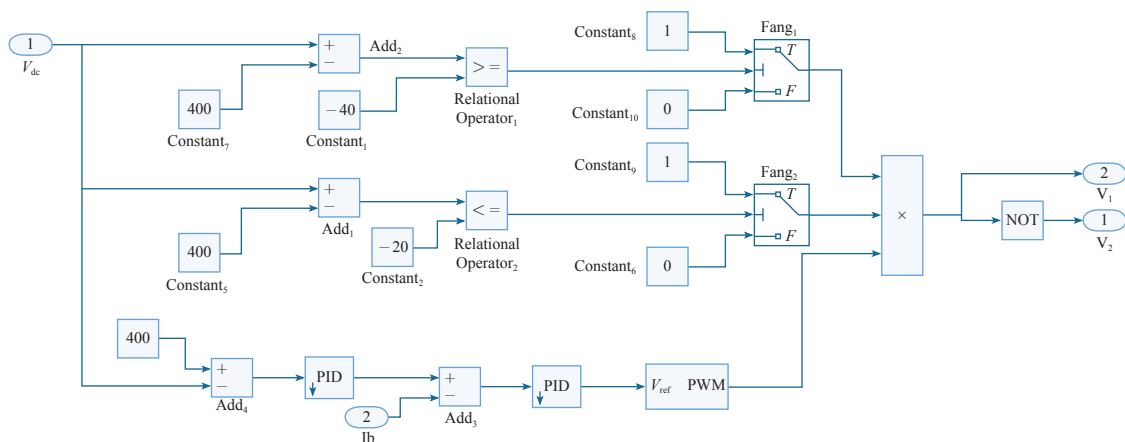


图10 蓄电池放电控制模型

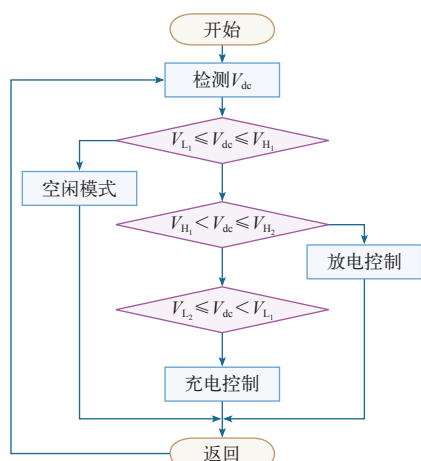


图11 蓄电池充放电整体的控制流程

Simulink环境中搭建光储并联供电仿真模型，让光伏发电系统在标准环境温度和标准光照强度的条件下，通过改变阻性负载的大小改变负载功率的大小，进而使直流母线电压在不同值之间变化。并通过蓄电池荷电容量和充放电电流仿真结果来体现蓄电池充放电过程。

在2 s之前改变阻性负载大小使光伏系统输出功率稍大于负荷功率，在2 s时改变阻性负载大小使光伏系统输出功率稍小于负荷功率，在6 s时又改变阻性负载大小使光伏系统输出功率稍大于负荷功率，仿真结果如图12、图13所示。

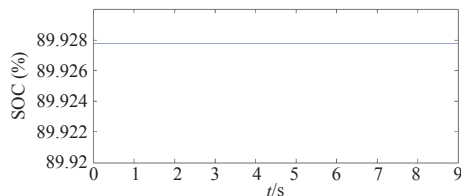


图12 蓄电池荷电容量变化一

由图12、图13可知，直流母线电压在额定值400 V附近即区域一内小范围波动，蓄电池SOC基本没有变化。从图13中可以看出，在负荷需求功率变化幅度不太大的情况下，蓄电池工作在空闲模式，

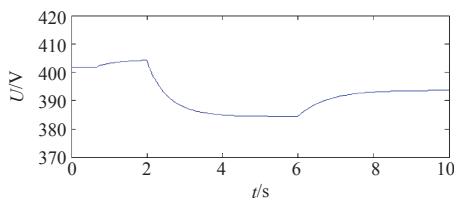


图13 直流母线电压变化一

直流母线电压在380~420 V的允许范围内波动。

在标准环境温度和标准光照强度的条件下，改变阻性负载大小使负荷功率需求大于光伏系统输出功率，仿真结果如图14~图16所示。

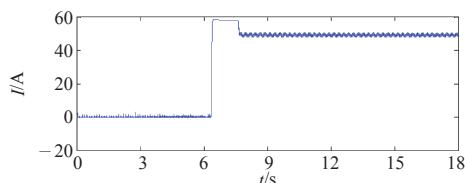


图14 蓄电池放电电流变化

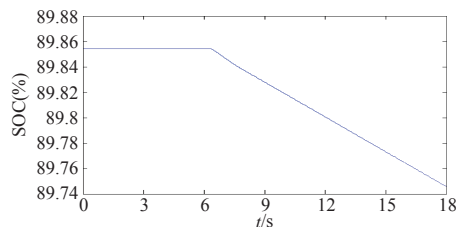


图15 蓄电池荷电容量变化二

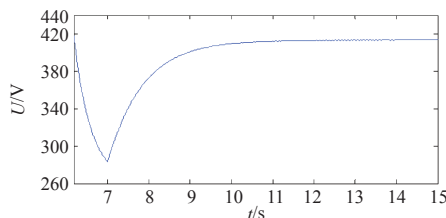


图16 直流母线电压变化二

由图14~图16可知，在6 s之前蓄电池工作在空闲模式，仿真图形中的蓄电池充放电电流为零以及荷电容量没有变化可以证明。6 s后使负荷功率需求大于光伏系统输出功率，直流母线电压由400 V左右迅速下降，而此时蓄电池为了补充光伏系统的功率不足，立即进行放电。一段时间以后，通过蓄电池对功率进行补充，直流母线电压逐渐恢复稳定。

在标准环境温度和标准光照强度的条件下，改变阻性负载大小使负荷功率需求远小于光伏系统输出功率，仿真结果如图17~图19所示。

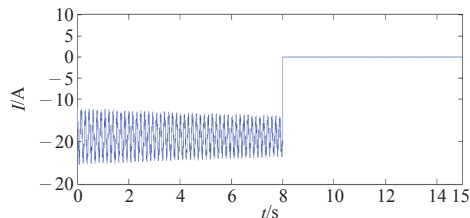


图17 蓄电池充电电流变化

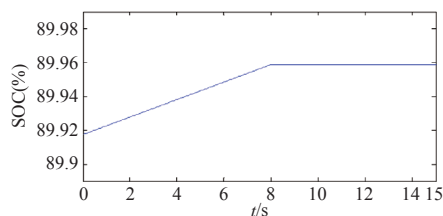


图18 蓄电池荷电容量变化三

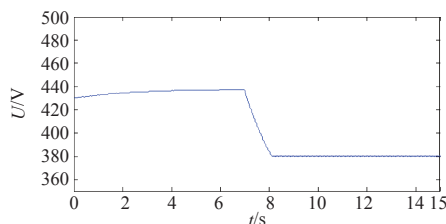


图19 直流母线电压变化三

由图17~图19可知,在8 s之前直流母线电压高于 $V_{H1}=1.05V_{dc-ref}=420$ V,说明光伏发电系统输出功率大于负荷功率需求。从图17、图18中可以看出,在这段时间内蓄电池荷电容量逐渐上升,并以一定数值的电流进行充电,蓄电池工作在充电模式,吸收光伏系统多余的能量。当直流母线电压恢复到380~420 V范围内时,蓄电池空闲,充电电流为零,蓄电池荷电容量不变。

4 结束语

基于储能和光伏并联供电的直流微电网系统,提出一种基于直流母线电压变化的蓄电池充放电控制策略,在Matlab环境中,搭建了基于双向DC/DC变换器的充放电仿真电路,并搭建储能系统与光伏系统并联供电仿真模型,在不同条件下进行了仿真验证,验证了充放电控制策略的正确性。仿真结果表明,双向DC/DC变换器及蓄电池能够根据直流母线电压的变化在不同工作模式之间工作和切换,充分地证明了电路拓扑结构的正确性及整体控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 张家臣,李茂军,李雪.光伏发电系统中蓄电池充放电状态的模糊控制[J].计算技术与自动化,2014(1):24-28.
- [2] 陈海.独立光伏发电系统蓄电池充放电控制策略

[D].乌鲁木齐:新疆大学,2010.

- [3] 周林,黄勇,郭珂,等.微电网储能技术研究综述[J].电力系统保护与控制,2011,39(7):147-152.
- [4] Coppez G, Chowdhury S, Chowdhury S P. The importance of energy storage in renewable power generation: a review [C]. Universities Power Engineering Conference, IEEE, 2010: 1-5.
- [5] 孔令怡,廖丽莹,张海武,等.电池储能系统在电力系统中的应用[J].电气开关,2008,46(5):61-62.
- [6] 高海洲,胡国珍.蓄电池双向充放电控制策略研究[J].工业控制计算机,2011,24(12):110-111.
- [7] 郭金东.光伏微网系统中蓄电池充放电管理策略[C].北京:中国光伏大会,2013.
- [8] 张家臣,李茂军,李雪.光伏发电系统中蓄电池充放电状态的模糊控制[J].计算技术与自动化,2014,33(1):24-28.
- [9] 刘冠男,张相军.基于超级电容储能双向DC/DC变换器控制模型分析[J].电力电子技术,2013,47(10):81-83.
- [10] 王兆安,黄俊.电力电子技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [11] 陈坚.电力电子学—电力电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [12] Martinez L, Poveda A, Font J, et al. On the synthesis and control of bidirectional switching converters [C]. Power Electronics Specialists Conference, IEEE, 2002: 197-202.
- [13] 许海平.大功率双向DC-DC变换器拓扑结构及其分析理论研究[D].北京:中国科学院研究生院,2005.
- [14] 肖青.光伏微网系统中蓄电池充放电控制技术研究[D].武汉:湖北工业大学,2012.
- [15] Wagner R, Sauer D U. Charge strategies for valve-regulated lead/acid batteries in solar power applications [J]. Journal of Power Sources, 2001, 95(1): 141-152.

(收稿日期:2018-01-31) **EA**