

基于孤岛模式下 V/f 控制的微电网系统研究

孟杰, 丁泉, 黄超

(国电南京自动化股份有限公司, 南京 210032)

摘要:介绍了铅酸蓄电池的经典一阶模型及充放电电路的拓扑结构,并分别研究了有功和无功功率(PQ)源和 V/f 源储能系统下双向变流器的控制方式。结合西藏尼玛县可再生能源局域网建设项目背景,针对初期西藏尼玛县现场 V/f 源因过充或过放导致微电网溃网情况,提出一种基于孤岛模式下储能蓄电池的荷电状态 SOC(State of Charge)稳定的控制策略,即控制 V/f 源下的蓄电池 SOC 在阈值附近小幅度波动,从而保持蓄电池小功率的充放电。基于 EMTDC/PSCAD 软件对系统进行仿真,结果表明了该控制策略的有效性,为孤岛模式下微电网的稳定运行提供了一种很好的解决方案。

关键词:铅酸蓄电池;经典一阶模型;V/f 源储能系统;PQ 源储能系统;电池荷电状态

中图分类号:TP 23

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2017)08-0001-05

1 可再生能源储能概况

随着风力发电和光伏发电等绿色能源技术的发展,带动了储能技术的迅速发展。储能系统能够快速提供有功功率,增强电网调频和调峰的能力,减小负荷峰谷差;同时储能系统能大规模地储存电能,可以在用电高峰、晚间或阴雨天气下保证负荷正常工作。

西藏尼玛县可再生能源局域网建设项目主要由华电集团援建,国电南京自动化股份有限公司承建,主要由光伏发电、柴油发电、储能有功和无功功率(PQ)源和储能 V/f 源组成。由于目前大电网还没有覆盖西藏尼玛县城,需依靠储能 V/f 源为微电网提供稳定的频率和电压。初期尼玛光伏系统运行中常出现溃网问题,主要原因是 V/f 源过充或过放引起的,尼玛微电网项目的 V/f 源稳定是解决溃网的方法之一,通过优化控制策略在保证母线电压和频率稳定的同时并维持储能系统的荷电状态 SOC(State of Charge)在一定范围内,保持蓄电池小功率的充放电。当尼玛县城负载功率变化时,只进行光伏系统、储能 PQ 源和柴油发电系统相应的功率调节。并在此思路下基于 EMTDC/PSCAD 软件进行仿真,结果表明该控制策略能有效解决微电网溃网问题,同时延长了蓄电池的寿命。

2 铅酸蓄电池充放电控制器优化

文献[1]针对铅酸蓄电池研究了两阶段脉冲充电模式,并在充分考虑了充电时间、温度、开关频率和脉冲周期对蓄电池的影响下提出一种快速充电方法。文献[2]研制了多路电池组的充放电变换器,

实现电池组间相互充放电的功能,能够适用于宽范围电压的场合。本文针对西藏尼玛县可再生能源局域网建设项目运行初期经常溃网的情况,提出基于稳定 V/f 源储能蓄电池的 SOC 的控制策略,即当蓄电池的 SOC 增大或减小到某个阈值附近时,储能 V/f 源不再和外部进行大功率的能量转换,只保持小功率的充放电。储能系统主电路如图 1 所示。

2.1 铅酸蓄电池经典一阶模型

文献[3-4]中 Massimo Ceraolo 提出铅酸蓄电池的三阶动态模型主要包含 2 部分:主反应支路和寄生反应支路。主反应支路主要用于描述电池端电压变化情况,寄生支路用于描述电池内部的水解和析气反应情况。经典一阶模型是在三阶动态模型基础上,简化了三阶模型中的寄生反应支路,电气模型如图 2 所示。

图 2 中 E_0 为可控电压源,主要受电池端的初始电压、内部温度及当前的荷电状态影响, R_1 和 C_1 分别为蓄电池的极化电阻和极化电容, R_2 为电解质浓度等效电阻, R_0 为内阻。

$$E_0 = E_{m0} - K_E(273 + T)(1 - SOC), \quad (1)$$

式(1)中: E_{m0} 为铅酸电池的初始电压, K_E 为经验系数, T 为电池内部温度, SOC 为当前荷电状态。

$$SOC = 1 - \frac{Q_t}{Q_0}, \quad (2)$$

$$Q_t = \int_0^t i_m dt, \quad (3)$$

式(2),(3)中: Q_0 为蓄电池的初始容量。 Q_t 表示电池消耗的能量,为充放电电流 i_m 对时间 t 的积分,放电时 Q_t 逐渐增大;充电时,电流反向, Q_t 逐渐减小。

2.2 PQ 源储能蓄电池充放电电路模型

蓄电池工作时,需双向 DC-DC 电路对其进行

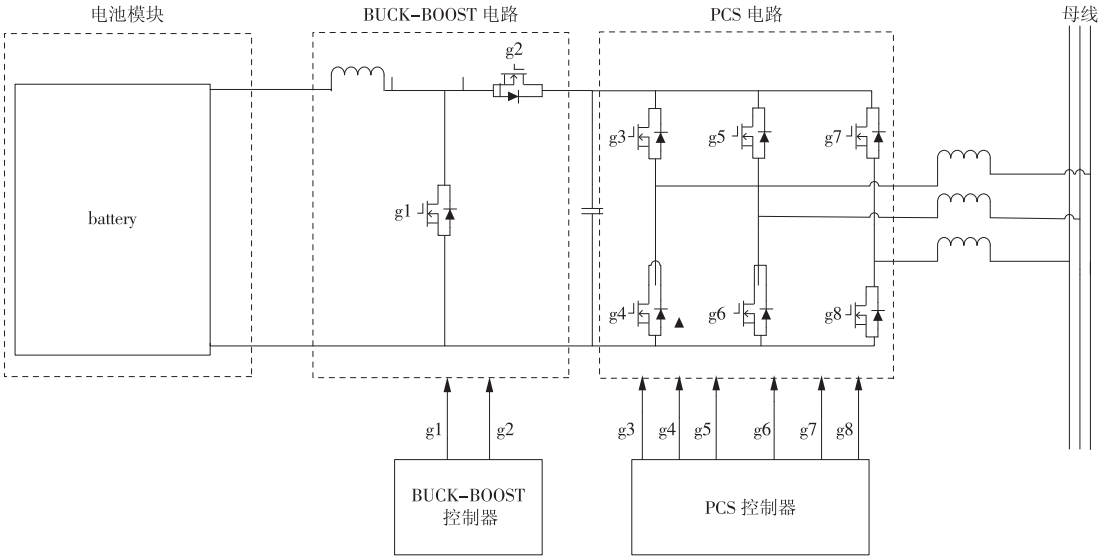


图 1 储能系统主电路

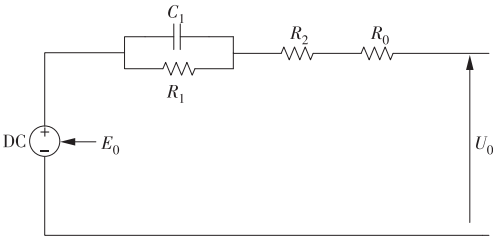


图 2 铅酸蓄电池一阶模型

充放电。文献[5]介绍了目前双向 DC - DC 电路常用的拓扑结构,有两大类:隔离型和非隔离型。其中非隔离型拓扑电路因效率高和成本低等优点而应用广泛。双向 BUCK - BOOST 拓扑电路有着结构简单和器件数量少等优点,故本文蓄电池的充放电电路选择 BUCK - BOOST 拓扑结构。蓄电池工作在 BUCK 电路下时,相当于降压变换器,光伏发电系统等外部能源可对蓄电池进行充电;工作在 BOOST 电路下时,相当于升压变换器,蓄电池对外部负荷供电。

PQ 源储能系统的蓄电池可以采用两阶段充电模式:当 SOC 较小时,采用单电流环控制策略,保证蓄电池快速的充电;当系统监测到 SOC 达到设定值时,此时蓄电池端电压有明显的升高,系统切换至恒压充电。蓄电池放电时,采用恒电流控制。具体的放电和充电控制策略如图 3、图 4 所示。

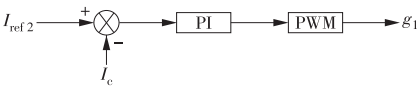


图 3 蓄电池放电时的控制策略

蓄电池放电时,如图 3 所示,采取恒流控制, I_{ref2} 为设定的放电电流参考值,和实际检测到的电流比较后进入 PI 控制器,得到的信号和载波比较后生成开关管导通信号。电池充电时一般采取两阶段充电

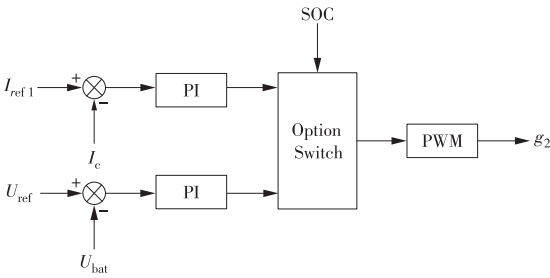


图 4 蓄电池充电时的控制策略

模式,如图 4 所示。SOC 比较低时,采用大电流充电, I_{ref1} 为设定的充电电流参考值,和实际检测到的电流信号比较后进入 PI 控制器;SOC 比较高时,需采用恒压充电, U_{ref} 为设定的充电电压参考值,与实际检测到的端电压信号比较后进入 PI 控制器。Option Switch 根据检测到的 SOC 值大小判断是否进行恒流充电或恒压充电。

2.3 基于 V/f 源 SOC 稳定的控制策略

西藏尼玛县可再生能源局域网建设项目运行初期,因天气变化或县城负载突变导致现场 V/f 源储能蓄电池常发生过充或过放情况,从而导致微电网溃网。针对该现象本文提出一种基于孤岛模式下储能蓄电池的 SOC 稳定的控制策略,即维持 V/f 源下的蓄电池 SOC 在阈值附近小幅度波动,从而保持蓄电池小功率的充放电,当天气变化或负载突变时,能量管理系统后台对其他能源进行调度,V/f 源不参与大功率流动。V/f 源储能系统蓄电池为了维持 SOC 的稳定,需增加开关监测 SOC 大小且在设定的 SOC 阈值点进行充放电路的切换,具体的控制策略如图 5 所示。

图 5 中, I_c 和 U_{bat} 是蓄电池充电电路采集到的电流和电压信号, I_{ref1} 和 U_{ref} 为相应的参考值,实际采样到的信号和参考值比较后进入 PI 控制器,通过

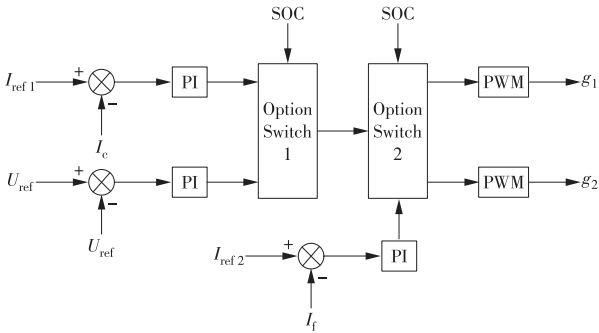


图 5 蓄电池充放电控制策略

Option Switch 1 检测 SOC 大小来选择恒流充电或恒压充电。 I_f 是电路中采集到的放电电流信号, I_{ref2} 是放电电流参考值,两者相比较后进入 PI 控制器,通过 Option Switch 2 对蓄电池的 SOC 进行监测,当 SOC 值达到阈值附近时进行充放电的切换,以保持蓄电池小功率的充放电。

3 孤岛模式下双向变流器模型

微电网中的多数电源需要通过相应的交流装置实现并网运行,目前双向变流装置最常用的有 2 种:电流源型和电压源型。电流型变流器的主要特点是直流环节采用电感作为储能元件,保证直流侧电流稳定;电压型变流器的主要特点是直流中间环节采用大电容作为储能元件,保证直流侧电压稳定。本文以常用的电压源型双向变流器为研究对象,其主电路拓扑如图 6 所示。

图 6 中,三相全桥直流侧并联大电容,交流侧电流和电压经过滤波电路后并入母线。滤波器可以滤除变流器输出电压中的谐波分量,从而改善电能质量。

变流器的低频数学模型是基于基波分析,忽略了开关频率所引起的高次谐波,文献[6]在建立数

学模型时假设:电网三相电压平衡;三相电感和电容参数相同,且都为理想元件;忽略开关器件的死区时间。电网电压可以表示为

$$\begin{cases} U_a = U_m \sin(\omega t) \\ U_b = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ U_c = U_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases}, \quad (4)$$

式(4)中: U_m 为电网相电压的幅值,若电网电压和并网电流同频同相,此时电流可以表示为

$$\begin{cases} I_a = I_m \sin(\omega t) \\ I_b = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ I_c = I_m \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases}, \quad (5)$$

式(5)中: I_m 为并网相流的幅值,根据基尔霍夫电压定律,双向变流器在 abc 坐标系下的状态方程表示为

$$\begin{bmatrix} L \frac{dI_a}{dt} \\ L \frac{dI_b}{dt} \\ L \frac{dI_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式(6)中:电感 $L = L_1 + L_2$, 为了便于分析和设计,对其进行 dq 变换,dq 变换和反变换矩阵状态方程表示为

$$T_{abc/dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$T_{dq/abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

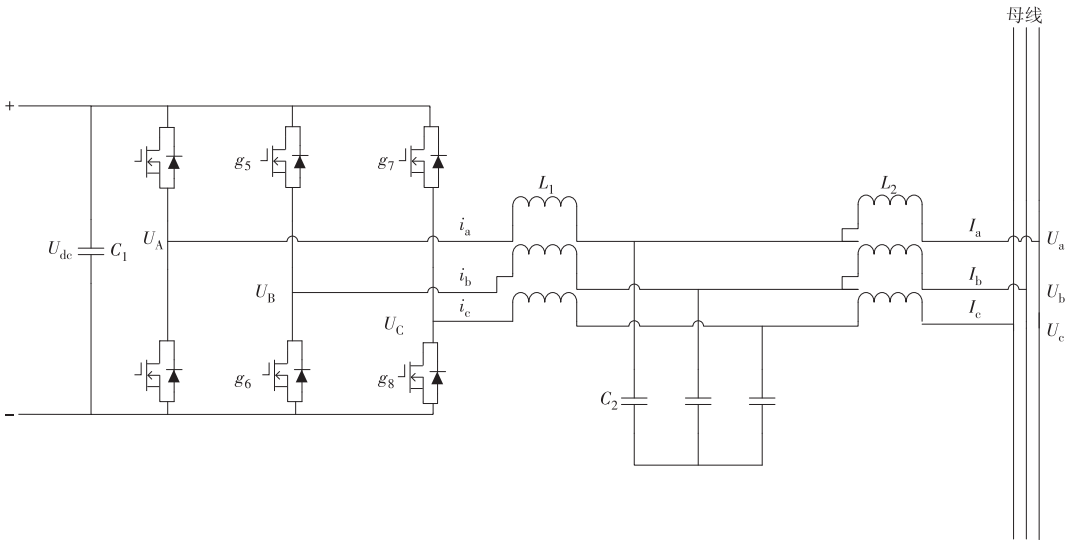


图 6 三相电压型双向变流器拓扑结构

3.1 PQ 源储能系统变流器研究

分布式储能系统的类型不同,其变流器在微电网中实现的功能也不同。目前变流器的控制方法主要有恒功率控制(PQ 控制)和恒压恒频控制(V/f 控制)2 种。

采用恒功率控制,可以根据外界功率需求设定变流器的有功功率和无功功率参考,从而达到供需平衡。采用恒功率控制的储能系统需电网或其他能源来维持系统的频率和电压。恒功率控制策略如图7所示。

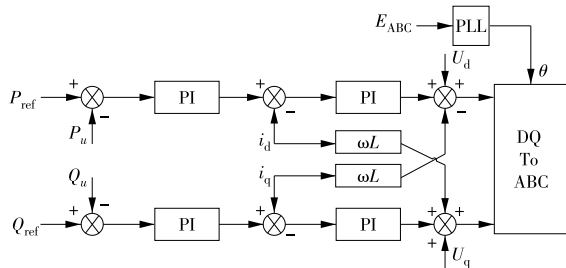


图7 变流器恒功率控制框图

图 7 中, P_{ref} 和 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率的参考值; P_u 和 Q_u 分别为采样到的有功功率和无功功率的实际值; i_d 和 i_q 分别为坐标变换后并网点的电流。恒功率控制器结构可以分为 2 个环节: 外环功率控制环节和内环电流控制环节。外部环节中, 根据设定的变流器输出或输入功率参考值和实际值进行比较, 比较后的误差进入 PI 控制器, 得到内环控制的电流参考值。内环控制环节采用 dq 坐标变换, 将坐标变换的电流信号和之前得到的电流参考值进行比较, 对所得误差进行 PI 控制, 并通过电压前馈补偿和交叉耦合补偿, 得到的电压信号进入坐标反变换器中, 生成三相电压控制信号。

3.2 V/f 源储能系统变流器研究

V/f 源控制的目的是不论外部功率如何变化,变流器所接交流母线的电压幅值和频率保持不变。其中,电压控制器调节分布式能源的无功功率,使系统电压和设定的参考值相等;频率控制器调节分布式能源的有功功率,使系统输出频率和设定的参考值相等。实际中,V/f 储能系统容量有限,只能提供有限的有功功率和无功功率支撑,因此需要提前估算系统中负荷和能源之间的功率匹配。V/f 源变流器控制策略如图 8 所示。

图8中采用电压外环电流内环解耦的双闭环控制,其中频率控制是通过频率参考值和初始相位角产生微电网的参考电压,进而通过锁相环来参与坐标变换与反变换过程来产生三相电压的调制波,最终和载波进行比较生成控制开关管的导通信号。

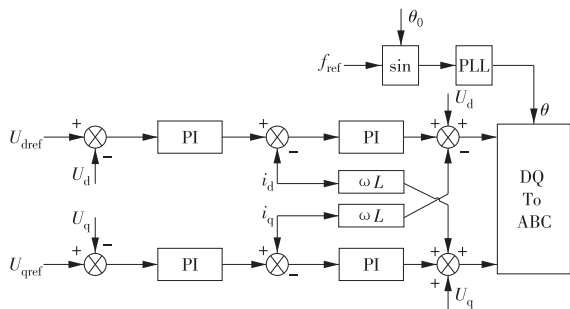


图 8 变流器恒频恒压控制策略框图

4 孤岛模式下微电网系统仿真

在 EMTDC/PSCAD 中搭建了如图 9 所示的电网仿真验证系统, 分别对 V/f 源和 PQ 源控制策略进行验证。表 1 为单体铅酸蓄电池性能参数。

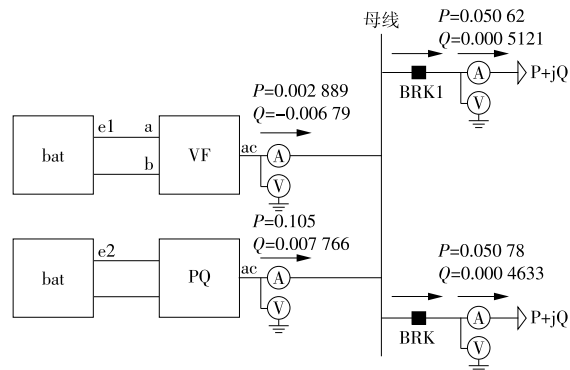


图9 微电网系统仿真电路

表 1 铅酸蓄电池性能参数

项目	参数
电池型号	LEOCH LP2-1.2AH
额定电压/V	12.0
额定容量/(A·h)	1.2
放电截止电压/V	10.8
充电截止电压/V	13.5
最大放电电流/A	18

本文采用 34 个 12 V 铅酸蓄电池单体串联,组成电池储能单元,额定电压为 410 V。

如图9所示,系统母线连接V/f源、PQ源和负载,母线额定电压为0.41 kV,负载大小为0.1 MW + j0.01 MV · A,储能蓄电池的SOC初始值为1.0。设定维持V/f源的储能蓄电池SOC稳定的阈值为0.8,仿真波形如图10、图11、图12、图13所示。

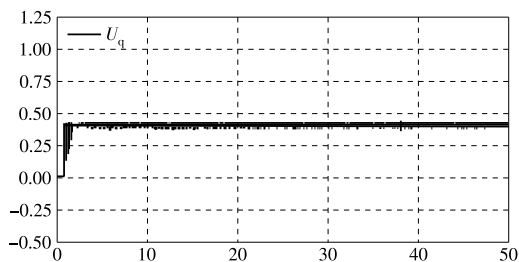


图 10 交流母线电压有效值仿真波形(截图)

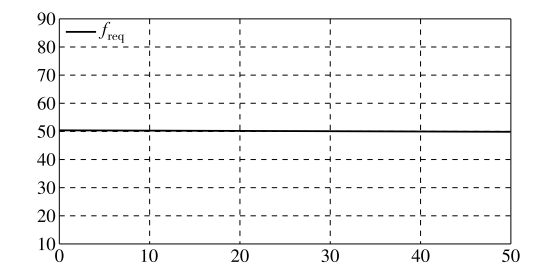


图 11 系统频率仿真波形(截图)

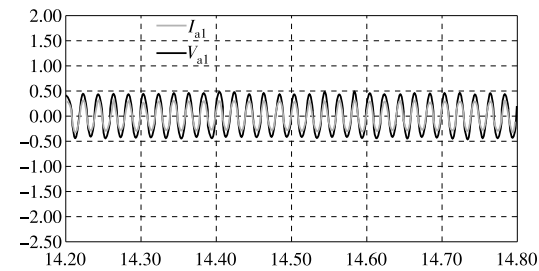


图 12 系统 A 相电压和电流仿真波形(截图)

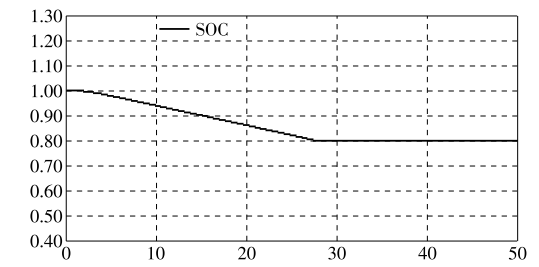


图 13 蓄电池 SOC 仿真波形(截图)

V/f 源储能系统变流器经 dq 坐标变换后 q 轴电压逐渐稳定在参考值 0.4 kV 附近,系统频率稳定在 50 Hz,蓄电池的 SOC 由初始值 1.0 下降到 0.8 时,逐渐稳定。

5 结束语

本文对铅酸蓄电池经典一阶模型和充放电拓扑电路进行了介绍,针对西藏尼玛县可再生能源局域网建设项目的 V/f 源因过充或过放出现溃网现象,研制了能够稳定 V/f 源蓄电池 SOC 的控制器,并给

出了 V/f 源、PQ 源和负载存在下的微电网仿真波形,仿真结果表明本文研制的蓄电池充放电控制器具有稳定蓄电池 SOC 功能,让其小功率的充放电,保证了微电网的稳定工作,延长了蓄电池的使用寿命。

参考文献:

[1]HUA C C, LIN M Y. A study of charging control of lead – acid battery for electric vehicles [C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2000: 135 – 140.

[2]李立,刘刚. 多电池组储能系统双向 DC – DC 变换器的研制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(3) :90 – 94.

[3]BARSALI S,CERAOLO M. Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues [J]. IEEE Transactionson Energy Conversion,2002,17(1) :16 – 23.

[4]CERAOLO M. New dynamical models of lead – acid batteries[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(4) : 1184 – 1190.

[5]彭秋波. 10 kW 钒液流储能双向变流器研制[D]. 湘潭:湘潭大学,2014.

[6]武凤霞. 并网电池储能系统中双向变流器的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

(本文责编:刘炳锋)

作者简介:

孟杰(1986—),男,江苏南京人,工程师,工学硕士,主要从事分布式能源及微电网相关产品与技术研发工作(E-mail:mj – jie. meng@ sac – china. com)。

丁泉(1979—),男,江苏南京人,高级工程师,工学硕士,主要从事电力系统自动化相关技术的研发与管理工作(E-mail:quan – ding @ sac – china. com)。

黄超(1991—),女,江苏南京人,工学硕士,主要从事分布式能源及微电网相关产品与技术研发工作(E-mail:hc – chao. huang@ sac – china. com)。

广 告 索 引

郑州光力科技股份有限公司	(封面)	郑州科源耐磨防腐工程有限公司(跨版)	(前插 8,9)
北京新世翼节能环保科技股份有限公司	(封二)	华电重工股份有限公司	(目次页右)
华电技术	(封三)	辽宁鸿盛环境技术集团有限公司	(中插 1)
郑州科润机电工程有限公司	(封底)	大唐南京环保科技有限公司	(中插 2)
南京苏夏工程设计有限公司	(前插 1)	长沙开元仪器股份有限公司	(中插 3)
青岛捷能汽轮机集团股份有限公司	(前插 2)	南京大自然环境科技有限公司(跨版)	(中插 4,5)
山东恒涛节能环保有限公司	(前插 3)	华电环保系统工程有限公司(跨版)	(中插 6,7)
青岛高远热能动力设备有限公司	(前插 4)	江苏法尔机械制造有限公司	(中插 8)
上纬新材料科技股份有限公司	(前插 5)	南京圣诺热管有限公司	(后插 1)
华电重工股份有限公司(跨版)	(前插 6,7)	华东理工大学上海华昌聚合物有限公司	(后插 2)