

面向储能充电桩应用的双输入变换装置

阐述了一种面向户外储能式汽车直流充电桩供电技术下的风光互补发电双路输入直流变换装置的设计与实现。基于新能源联合供电技术考虑并借鉴既有直流变换器技术,设计了一种共地反极性串联双输入直流转换器电路,并将其应用在户外可移动式储能充电桩技术中。装置采用双输入非对称桥式电路拓扑结构,使得风电、光伏两路电源既可同时工作也可独立供电,有效提高了可再生能源的利用率和系统稳定性。这一优化技术措施为储能式充电桩在能量补充充电技术设计时提供了一种新能源多路输入电能的应用技术方案,对户外储能式中小型风光互补共用发电系统而言具有较高的性价比和一定的技术参考意义。

郭青龙/广东绿网新能源科技有限公司

廉世军/可利电气(珠海)有限公司

0 引言

面对近年来电动汽车市场应用,已有研究指出不恰当的或是直接采用既有电网对电动汽车充电带来的大容量用电管理将会变成一种电力负担^[1],但若无法像去加油站一样便捷地补充电能,显然会直接影响电动汽车的用户体验与市场应用。研究对风能及基于峰谷分时电价、储能缓冲系统等方式作为汽车充电的一种技术手段,在现有城市或家庭配电网络中不用做更多增容改造而呈现了其灵活应用的一面^[2-4]。随着“十三五”以电动车为典型汽车工业发展规划的制定,带来了各行业都积极开展与之相关的交流充电桩、直流充电桩等基础设施的建设热情^[5],随之而来的将会是高速公路、加油站点及户外大型停车场等场所进行相关基础建设。基于这些场所的汽车停留时间不长、短时间大容量用电管理及配电设置等原因^[6-8],

这些地点的充电桩设置不可避免会存在一些用电问题。

基于一种户外车位固定式安装小冲击负荷快速充电桩系统的设计技术^[9],借助环境优势,采用风光互补发电与市电协同补充储能,缓冲系统补偿快速充电的功率,能够减小快速充电站的接入对配电网的不利影响和对市电容量的依赖程度^[10]。传统风光互补系统将风电和光伏单纯并联,但因电压、电流等因素并不能同时给负载供电,造成资源浪费。虽也有一些风光互补系统采用各自独立变换器实现,但对小型风光互补系统并不适宜^[11]。也有文献采用双输入端口电路方案,使得这种结构能满足低成本与简单化控制策略下符合各自独立供电的能量管理集约型需求^[12]。但是这些管理并不适用于本项目下的实际用电管理。

1 系统结构^[13-23]

近年来电动汽车入网(Vehicle to Grid, V2G)技术逐步成为研究热点,充电桩是电动车与电网实现能量及信息交互的基本通道。对于V2G技术而言,如何提高电力供需平衡且减小对电网的负荷冲击是关键。因为电动汽车充电桩采用直流快速充电方式运行时,充电桩本级的电能处理能力是其电性能考核关键点之一,但当负荷接入时短时间对供电电源端供电的影响更值得关注^[10]。在一些市电容量输出不足的情况下,储能系统的引入,不仅可以有效增加电源的备用容量,也可实现调节负荷峰谷差或者是电动汽车充电离开时间的能量自



郭青龙/高级工程师

关键词/Keywords

直流充电桩·
混合储能·
双输入·
风光互补·
变流器·

我恢复周期。同时,对应于储能系统而言,蓄电池是充放电管理(Battery Management System, BMS)的关键组件之一,也是电池储能系统(Batter Energy Storage System, BESS)能否良好发挥这一性能的重要因素。当BESS系统中的电池出现充电不足或者过充时,则会导致电池容量下降进而直接影响系统的性能。所以BESS中对储能电池的充电方式或是能量的及时有效补充对系统的性能有着重大影响。结合储能充电桩系统中的BESS电池可以在设备出厂前进行前期的预充电处理,所以本文论述的控制装置采用了恒流恒压方式作为主要输出策略,以实现对其储能电池能量的补充。

1.1 可再生能源混合供电储能系统

由于风能、太阳能等可再生能源均存在一系列不稳定、不连续等缺点,故在中小型应用场合中,只有充分利用这些不同能源之间的互补性才能获得比较稳定的有意义的电能,目前已有研究针对风光互补发电系统的优化设计。而直流充电桩需要短时大电流负荷输出,后续的能量补充即时性需求显然更需要对其充电装置进行小冲击负荷下的优化设计,方可有效降低发电成本和运行成本,降低充电桩对电网的功率依赖。

目前,在一些可以查阅的研究文献或者实际设计的变换器拓扑结构中,要么变压器绕组较多,要么开关管数量多、结构复杂。在风光互补能源系统中,太阳能阵列电池是低压源,而风力发电则被设置成了高压源,相对的可以利用这个特点来设置一种新的变换器进行电能转换,简化结构,以提高系统发电能力。图1为常规混合供电和所设计的基本系统结构对比图。

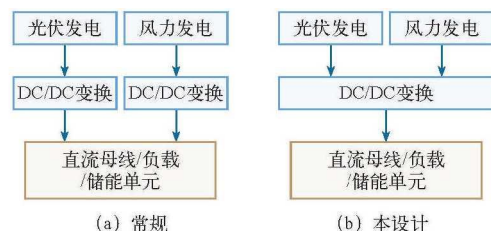


图1 混合供电储能结构对比图

1.2 电路拓扑结构

为了简化系统结构和降低成本,目前大多市

售产品采用双输入的DC/DC变换器(Multiple-Input Converter, MIC)作为研究方向。而MIC按照电路连接方式大致分为电线耦合型、磁耦合型和综合型三类。电线耦合性的双向MIC实际是并联多个单输入变换后将输入源连接在同一母线上来实现能量传递的,而磁耦合变换器则是采用多绕组隔离隔离式变压器将不同电源组合起来,将输入源的电能转化为磁场能以磁场叠加方式实现能量耦合,属于隔离型拓扑,应用范围较为广泛。同时,这种拓扑方式可以体现多个电压源接入时电路效益的最大优越性:输入电压源幅值不要求一致,可以单输入或者是双输入工作、磁耦合电气隔离。充分评估不同电路结构拓扑的不同控制方式与特点,按照所研究的目标搭建一个最简单的转换器:将两个带脉冲的电压源直接串后加至隔离变压器输入端,然后输出整流后向负载供电。这两个脉冲电压源被接入变压器端时虽然有同极性串联也有反极性串联,但最终硬件电路应有利于最大能量的输出。

借鉴脉冲电压源单元反激型半桥变换器的电路特点,综合各电路的优缺点变化后得到如图2所示的不对称式双输入直流变换器。

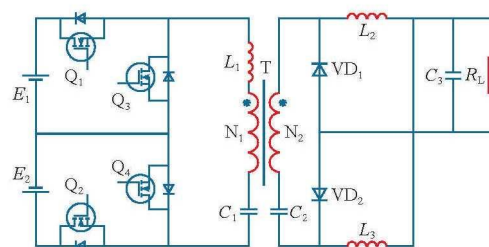


图2 主电路拓扑结构

电路优化变换时,因在类似的脉冲直流变换器串联组合中,反极性串联所需要的隔直电容较小且两电源有公共地,因此这种变换器更具实际应用意义。同时,由于实际工作中肯定存在只有其中一路电源投入工作的运行状况,所以在电路中增加了辅助控制开关管 Q_3 与 Q_4 可实现零关断,简化电路结构提高能源输出。同时,为匹配负载电压与偏磁,这里还采用了带隔直电容的倍压整流电路结构。

2 设计方案

2.1 工作特性

根据图2给出的不对称型拓扑电路结构,分别定义 E_1 、 E_2 为两路输入电压,即风力发电与光伏发电,其中选用的风力发电为直流, Q_1 、 Q_3 组成一路转换器, Q_2 、 Q_4 组成另一路转换器, L_1 为谐振电感, C_1 、 C_2 为隔直电容。

按照应用而言,本文的变换器需实现双路电源同时供电和单路电源独立工作的两种基本模式,但无论何种模式下都应以最大功率输出为基本原则。综合项目需求,采用一种双输入源的控制脉冲大于零移相角的方法实现^[24],也即在双路电源模式下,两个脉冲电压源单元输出之间移相角大于零,单电源模式下维持某一脉冲电压源单元的辅助控制开关管 Q_3 或 Q_4 关闭导通,而主控管 Q_1 或 Q_2 则关断停止输入,实现控制。

若定义 V_1 、 D_{f1} 和 V_2 、 D_{f2} 分别为输入电压源的电压与驱动脉冲占空比,则根据变压器一二次侧上的电压伏秒平衡可知:

1) 当双路电源同时给供电时,隔直电容 C_1 上的端电压 V_{C1} 总满足以下关系^[25-26],即

$$V_{C1} = V_1 D_{f1} + V_2 D_{f2}$$

当变压器电压比为 k 时, R_L 上的电压为

$$V_{R_L} = k(1.5 - D_{f1})D_{f1}V_1 + k(0.5 + D_{f2})D_{f2}V_2$$

此时,仅举例认为 $V_{C1} > 0$,且按照对应同频脉冲移相角大于零、 Q_1 和 Q_2 的占空比即 D_{f1} 和 D_{f2} 的最大值为0.5的控制策略。

2) 同样地,当单路电源输入时(假设为 E_1 满足控制策略条件),则

$$V_{C1} = V_1 D_{f1}$$

当变压器电压比为 k 时, R_L 上的电压为

$$V_{R_L} = 2kD_{f1}(1 - D_{f1})V_1$$

显然,这种拓扑结构和驱动控制方法所得到的变换器输出到变压器一次侧的电压在一个开关周期内的波形并不对称,且其周期内的基本工作原理与不对称半桥类似,所以将本项目使用的电路结构称之为一种不对称桥式变换器。

2.2 电路主参数

为满足项目实际需求并验证电路拓扑的工作适应性,按照工程设置了如下配置。

风力源 E_1 额定值为96 V、1 kW;光伏源 E_2 额定值为120 V、 5×260 Wp;变换器主控开关频率 f_s 为100 kHz,输出为DC 480 V。设计时,结合实际使用环境工况,定义 E_1 为主要输入端, E_2 为补充输入端,由于后级负载采用了储能装置,故装置采用无限制输入,但是对输入端的工作电压、电流进行监测并交由主控MCU判断,以提高转换器的工作效率,减少干扰。设定最小输入起动功率为 P_w 。当 E_1 源的输入功率 P_1 小于 P_w 时, Q_1 回路关闭, Q_4 打开;当 E_2 源的输入功率小于 P_w 时, Q_2 回路关闭, Q_3 打开;当 P_1 与 P_2 均大于 P_w 时,装置系统处于双路输入状态。由于双路输入是本变换器的最大工作点,所以按照双路输入设计变压器T的电压比 k 为

$$k = \frac{2(V_{R_L} + V_D + V_{L_2})}{2D(1 - D)V_1}$$

式中, D 为开关管占空比; V_D 为整流二极管的电压降; V_{L_2} 为滤波电感电压降。

为确保单路电源独立工作时能输出稳定的设计电压,谐振电感 L_1 的电感量应该折中处理^[21],所以这里也按照这一策略实施,即

$$L_1 = \frac{D_L(V_1 - V_{C1})}{4kI_{L_2}f_s}$$

式中, D_L 为最大占空比丢失值; I_{L_2} 为 E_1 电源独立工作时能提供的最大负载电流值。

当输入电压源 E_1 、 E_2 的电压变化时,直接影响变压器一次侧的隔离电容电压 V_{C1} 的值,进而影响输出滤波电感电流的脉动。项目装置参照已有文献的研究成果^[23],根据倍压整流时输入输出的关系确定本项目中使用的滤波电感 L_2 的值。

2.3 控制策略

本项目下的优化MIC变换装置基于既要实现双路电源同时供电,也要满足风电或者是光伏发电其中任意一路的单路供电两种工作模式。即从能量输出角度上来说,单路电压源的工作模式则

只需关闭无输出能力的主控开关管，并打开辅控管即可实现实际的控制与保护功能。在双路电压源输入时，则以输出电压匹配启动门槛为基点开启整个系统充电与输出“过电流保护”（关闭输出）的控制过程。同时采用了反极性串联设计主电路，因此实际控制本变换器的开关脉冲时需要避免两路输出存在交叉重叠的控制脉冲，故本变换器采用如图3所示的基本控制策略实现输出的最大化^[24]。

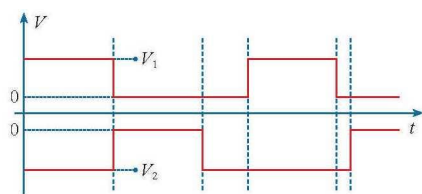


图3 双输入控制策略

目前已有的风光互补发电系统逆变电源设计研究大都采用在扰动法的基础上进行自动调整最大功率点并进行跟踪^[27]，但本转换器则选用主从方式管理两路功率输入：先满足门槛的电压源最先进入第一电源输入启动控制模式，第二电压源在符合启动门槛后随之默认进入第二电源接入模式。对照前文所述控制策略方案，本项目建立由MCU输出PWM到主控管 Q_1 与 Q_2 端实现互补导通控制。项目中的MCU采用AVR的ATmega128芯片，这款高性价比芯片更有利于工厂化批量生产选用^[28]。而对于后期变换器装置智能化升级需要使用的诸如数据通信等外接接口电路，则提前预留好零部件在PCB的布置位置，利于功能与性价比的提升。

3 方案验证

3.1 主控单元^[29-30]

通过前期收集整理并综合分析各研究文献的优化设计，基于风光储系统运行的同时仅对市电电网供电存在小容量依赖，考虑本控制装置实际运行安装空间位置、充电桩使用环境和供电条件等多重因素，设计制作了基于ATmega128芯片的实际样机，用于验证所对应的控制策略。

项目选用核心控制芯片为ATmega128，其自带JTAG接口便于程序调试。其集成外设中有两个8位定时计数器、两个16位定时计数器，两个8位PWM通道、6个16位PWM通道。内置的4个带PWM模块的定时器能够由硬件产生4路相位、占空比独立的PWM信号，并且两个16位定时器可以提供10位准确度PWM信号。同时，其高达1 mips/MHz的数据吞吐能力完全适合后期智能化通信管理和系统处理速度的多种任务需求。其电路结构如图4所示。

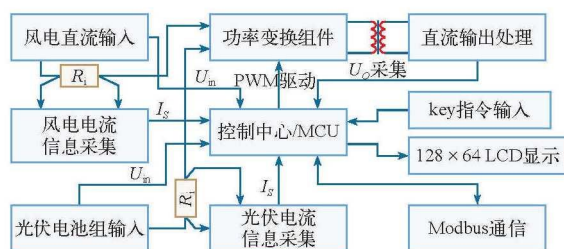


图4 电路系统结构

本项目的控制芯片采用16 MHz主频，鉴于该芯片的硬件资源，设置对应的数据采集回路与PWM驱动输出回路。对于PWM模块，只需要配置好模块相关寄存器参数即可由单片机自动产生PWM信号而不影响其他程序的执行。①TCCR寄存器：包含三个用于设置输出PWM波的位数、输出波形模式与时钟分频数等；②TCNT寄存器的计数范围由设置的PWM具体输出模式而定；③OCR寄存器用来与当前技术支持进行比较匹配并进行相应操作；④ICR寄存器主要用于捕捉当前计数寄存器值，同时在一些PWM输出模式下也被用作计数上限值。

3.2 驱动单元

样机电路基本成型后进行模拟负载下的测试。定义隔直电容 C_1 与谐振电感 L_1 在变压器一次侧外端的电压为 V_{LC} ，滤波电感 L_2 的对地电压为 V_{L2} ，当电路进入双输入模拟电压源控制状态后，电路主要测试点得到的整理波形如图5所示。

而当假设只有拟定的主电压源 E_1 一路存在符合核心MCU内置投切门槛阈值 P_w 的能源回路有输入，而另外一路电压源 E_2 不满足时，得到的各观测点经整理的波形如图6所示。

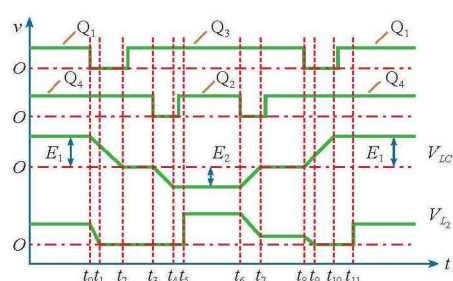


图5 双路输入供电主要点整理波形

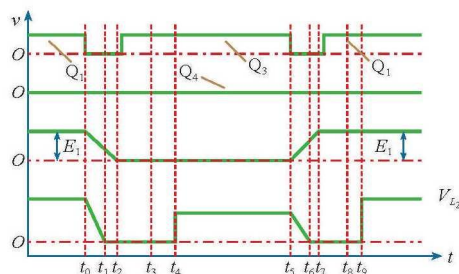


图6 单路输入供电主要点整理波形

3.3 储能充电^[9-10]

鉴于储能单元是本系统装置成套使用中直接配套的关键组成部件之一。也即所研究设计的双输入装置核心被应用为BESS的前级充电单元，系统主体构成方式见图1b。显然，这里考虑的是装置的功率输出及电网负荷冲击（当地用户网）的安全性和经济性带来的用电影响。考虑到经济适用性，结合本项目下的系统装置是BESS前级处理协助电路，验证系统功能时采用的是常规免维护铅酸蓄电池，同时基于确保储能单元安全可靠地完成小冲击负荷基本功能，系统实际装备时还采用了外购的成熟BMS，使得BMS能基于本文研制的控制装置需求下进行有效控制与通信。虽然目前在电动汽车上使用较多的是电流积分和开路电压法来考核电池的荷电状态（State of Charge, SOC），但由于本系统中并不考虑储能与负荷缓冲性能以外的其他效果：电池在一定放电倍率下剩余电量与相同条件下额定容量的比值大小——电池当前具有的能量与最大容量的百分比，也即从电量角度定义SOC。所以还是结合BMS在本系统的输出端接入纯电阻性负载箱实施较为简单的放电试验，以便对储能单元的储能与大电流缓冲效果进行验证。

- 1) 防止储能电池长期处于亏电或者过充状态。
- 2) 基于接入充电的电动汽车具备离开时间和快速充电时间的用户体验应用期望值考虑，要使储能电池的SOC始终处于最大。
- 3) 装置对风能与光伏发电系统储能补充具备的优选效果和收到负载充电大电流充电准备信号下装置输出的自恢复性“过电流保护”关闭（充电），以确保系统本体始终只在设计参数内工作。

当风能和太阳能两者都被模拟存在时，当接通本文研究装置对外联络通信中的BMS管理信息时，装置能按照恒流恒压法对外输出，大电流（负载）冲击时，装置系统判定负载超负荷而自动关闭输出，实现“过电流”保护。整理测试数据，拟合出如图7所示的充电曲线。

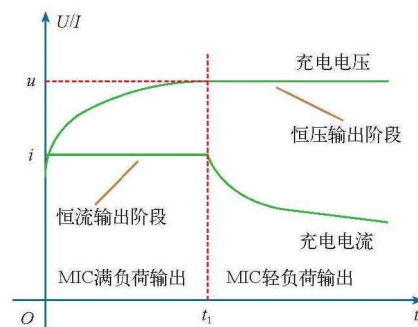


图7 储能充电拟合曲线

图7中， u 、 i 为MIC额定输出的最大值，且在未收到外界大电流负载充电准备信号前一直保持这一最大输出状态，而 t_1 受环境工况与储能电池出厂或运行前的起始电压影响。因测试条件限制暂未考虑诸如温度、电池内阻等其他因素的影响而导致的测量误差。

综合工程样机各项模拟测试结果，并把本项目下的成品样机布置在工厂楼顶四周通透处，连接光伏组件和小型风力发电机系统、可变电阻性大功率负载测试箱后，测试结果与工程模拟结果基本一致，能实现单双路输入下的变换输出，也能独立有效工作。其中的 P_w 值是通过工厂测试配套用风力发电机和光伏电池出厂实际电参数调试验证后输入MCU进行工厂定制固化的。

4 结束语

所述装置在V2G应用技术中是一种供用电友好型装置。按照本项目下的技术理论并基于工厂化量产为主要目的设计制作的工程样机方案,从利用可再生能源应用和储能角度上来说得到了很好的改进,虽然整体输入能量还不是很大,不过作为一种储能充电桩的重要能量补充渠道,显然使得风力发电和光伏发电两种能源在任何时候都具备对储能系统的供电能力。作为储能充电桩而言,减小了工况限制环境下对市电配电网的容量要求,为满足室外高速公路停车场、加油站点布置直流充电桩增加了预期可能与性能稳定的技术参考方案。

参考文献

- [1] Bari A, Jiang J, Saad W, et al. Challenges in the smart grid applications: an overview [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2014 (4): 1-11.
- [2] Huang Q, Jia Q S, Qiu Z, et al. Matching EV charging load with uncertain wind: a simulation-based policy improvement approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (3): 1425-1433.
- [3] 苏海峰, 梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (6): 17-22.
- [4] 周念成, 蒲松林, 王强钢, 等. 电动汽车快速充电桩的储能缓冲系统控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2013 (17): 127-134.
- [5] 陈良亮, 张浩, 倪峰, 等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (14): 11-17.
- [6] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 1-10.
- [7] 周逢权, 连湛伟, 王晓雷, 等. 电动汽车充电站运营模式探析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (21): 63-66.
- [8] 高赐威, 张亮, 薛飞, 等. 考虑集中型充电站定址分容的电网规划研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (7): 40-46.
- [9] 郭青龙, 廉世军. 一种户外车位固定式安装小冲击负荷快速充电站系统: 中国, 201621084531.4 [P]. 2017-04-19.
- [10] 周念成, 蒲松林, 王强钢, 等. 电动汽车快速充电桩的储能缓冲系统控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2013 (17): 127-134.
- [11] 张兴进, 沈锦飞, 曹沛. 风光互补双输入DC/DC变换器研究 [J]. 电力电子技术, 2011, 45 (8): 73-74.
- [12] 杨才俊, 潘庭龙, 纪志成. 风光互补系统双端口输入DC/DC变换器 [J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2014, 13 (2): 143-147.
- [13] 王小蕾. 电动汽车与电池储能的优化管理及效益分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [14] 王志文, 梅魁主, 李维俊. 阀控式密封铅酸蓄电池充电接受能力研究 [J]. 船电技术, 2014, 34 (5): 34-37.
- [15] 朱丽. 风光柴蓄混合发电系统的协调控制策略研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [16] 李品. 独立运行风光储互补发电系统优化设计研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [17] 张商州, 刘宝盈, 种马刚, 等. 储能式电动汽车充电桩系统的设计 [J]. 电子产品世界, 2016, 23 (4): 42-45.
- [18] 王蕾. 单原边绕组电流源型双向多输入全桥变换器的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [19] 张杰. 新型双输入反激DC/DC变换器的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [20] Li H, Zhou W, Zhou S, et al. Analysis and design of high frequency asymmetrical half bridge flyback converter [C]. International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, 2008: 1902-1904.
- [21] 阮新波. 脉宽调制DC/DC全桥变换器的软开关技术 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2013.
- [22] 吕健. 不对称半桥变换器偏磁问题的研究 [D]. 秦

- 皇岛：燕山大学，2012.
- [23] 姚志鸿. 倍流整流式不对称半桥变换器的研究 [D]. 西安：西安理工大学，2015.
- [24] Al-Atrash H, Tian F, Batarseh I. Tri-modal half-bridge converter topology for three-port interface [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (1) : 341-345.
- [25] Hu Y, Xiao W, Cao W, et al. Three-port DC-DC converter for stand-alone photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (6) : 3068-3076.
- [26] Nejabatkhah F, Danyali S, Hosseini S H, et al. Modeling and control of a new three-input DC-DC boost converter for hybrid PV/FC/battery power system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (5) : 2309-2324.
- [27] 葛超铭, 李少纲. 风光互补发电系统MPPT及其逆变电源控制的研究 [J]. 电工电气, 2013 (2) : 6-9.
- [28] 廉世军, 武建文, 张路明, 等. 基于BTM7752G芯片的智能型电动操作机构控制器的研制 [J]. 电工电气, 2014 (12) : 31-34.
- [29] 吴威, 张吉, 崔琛, 等. 双模式风光互补发电系统结构研究 [J]. 电工电气, 2012 (6) : 5-7.
- [30] 沈建良. ATmega128 单片机入门与提高 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2009.
- (收稿日期：2017-05-08) **EA**

(上接第59页)

- [2] 应黎明, 陈允平, 陈明榜. 异步化同步发电机转子励磁的模糊PID控制 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (17) : 163-168.
- [3] 邹旭东. 变速恒频交流励磁双馈风力发电系统及其控制技术研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2005.
- [4] 刘晋. 双馈风力发电系统控制策略研究 [D]. 北京：华北电力大学，2014.
- [5] Padiyar K R, Prabhu N. Analysis of subsynchronous resonance with three level twelve-pulse VSC based SSSC [C]. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region, 2003 (1) : 76-80.
- [6] 滕本科. 向无源网络供电的VSC-HVDC电压质量的研究 [D]. 长沙：长沙理工大学，2013.
- [7] Abad Gonzalo, López Jesús Lopez, Rodriguez Miguel A, et al. 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制 [M]. 胡家兵, 迟永宁, 汤海雁, 译. 北京：机械工业出版社，2014.
- [8] Wu Bin, Lang Yongqiang, Navid Zargari, et al. 风力发电系统的功率变换与控制 [M]. 卫三民, 周京华, 等译. 北京：机械工业出版社，2012.
- [9] 马祎伟, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009 (4) : 202-208.
- [10] 陆明智, 董功俊. 发电机进相运行研究与分析 [J]. 华东电力, 2001, 24 (4) : 15-17, 53.
- [11] 张为杰. 交流励磁电机发展前景 [J]. 大电机技术, 1992 (5) : 1-6.
- [12] 杨顺昌, 廖勇, 李辉, 等. 异步化同步发电机 [M]. 北京：科学出版社，2009.
- (收稿日期：2017-04-10) **EA**