

一种海岛分布式光伏发电微电网

张先勇, 舒杰, 吴昌宏, 周龙华, 宋香荣

(中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 针对目前微电网组成及控制复杂, 快速实现及扩容难的现状, 提出了一种工程实用的模块化分布式光伏发电独立微电网结构, 以实现快速组网、安全及高效运行。对该独立光伏发电微电网的运行原理、关键电力电子装置以及模块间调度控制策略等进行了分析设计。基于该拓扑结构, 在海岛进行了光/柴/蓄独立光伏发电微电网实证研究, 实现了海岛负荷不间断供电运行。进行了海岛光伏发电微电网运行状态的测试分析, 试验结果验证了该微电网架构的有效性, 并对存在的问题提出了建议。

关键词: 微电网; 分布式发电; 控制; 光伏; 双向变流器

Island microgrid based on distributed photovoltaic generation

ZHANG Xian-yong, SHU Jie, WU Chang-hong, ZHOU Long-hua, SONG Xiang-rong

(Guangzhou Institute of Energy conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In the view of the situation that structure of micro-grid and its control strategy are very complex, as well as difficult to fast implement and expand, this paper proposes a practical engineering stand-alone microgrid based on distributed photovoltaic generation, to realize fast construction and safe and efficient operation. The key technologies such as construction and operation mechanism, the power electronic device development, and energy management and dispatch strategy are studied. Based on the topology, the demonstration microgrid composed of photovoltaic, diesel generator, and storage battery is constructed on the island, and an uninterruptible power supply is produced. Operation test analysis of the stand-alone microgrid verifies the effectiveness of the microgrid architecture, and some suggestions are recommended for the problems existed.

Key words: microgrid; distributed power generation; control; photovoltaic; bi-directional converter

中图分类号: TM727

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)10-0055-07

0 引言

在海岛、牧区等缺电或无电地区, 采用太阳能、风能等分布式可再生能源发电对于解决能源短缺, 推动节能减排以及当地经济社会发展具有重要意义。采用微电网技术将分布式发电和分布式负载联结起来, 可充分利用可再生能源资源, 实现可再生能源发电就地使用, 减少能量传输损耗, 大幅提高微电网性价比, 促进可再生能源发电大规模应用。

微电网从运行形式看, 可与大电网并网运行, 微电网作为配电网的一个可控负荷, 使配电网的规划和运行从被动式的网络结构向主动式的网络结构转变; 也可独立运行, 自主满足本地负载用电需求,

实现本地能量供需平衡。微电网发电单元和用电单元均数量较少, 可再生能源发电及负载用电均具有波动性和间歇性特点, 既要求电能质量好, 又要求不间断满足负荷的供能要求, 对独立微电网的构建及运行控制提出了较高的要求^[1]。

国内外对微电网进行了大量的研究。文献[2]分析了各种典型微网结构的特点、适用范围, 以微网负荷与电源容量匹配为基本原则, 同时考虑微网地理特点、接入的配电网结构、运行方式等基本要素提出了微电网结构设计流程。文献[3]从电力电子技术、故障检测与保护、通信技术、系统规划设计、运行控制与能量管理、经济性评估等方面对微电网关键技术进行了详细的讨论。独立微电网作为自治系统, 需要建立稳定可靠的电压参考, 可再生能源发电均需要通过电力电子变换装置实现上网, 因此需要对分布式电源采取协调控制实现能量的合理流动与分配。独立微电网中分布式电源的协调控制问

基金项目: 广东省高新区引导项目 (2112B0900023); 广东省粤港招标项目 (2011BZ100101); 院市合作项目 (2012HY1006551)

题非常复杂，有主从站控制，负荷频率二次控制，联络线控制，基于多代理技术的控制，以及分层分布式控制等方法^[4-8]。前述的微电网结构及控制方法复杂，建设运营成本高，性价比低，扩容难，不利于目前微电网工程实践推广利用。本文提出了一种分布式发电微电网架构，既能充分利用现有的电气设备，模块化组网，方便扩容，又能实现微电网内能量的可控流动，安全、可靠及高效运行，提高微电网性价比，促进其推广应用。本文对关键的储能型双向变流器装置，能量管理及调度控制策略等进行了深入分析与设计，并在海岛进行了百千瓦级光/柴/蓄独立微电网示范工程建设及运行测试分析。

1 分布式光伏发电微电网结构

如图 1 所示的分布式光伏发电微电网具有相似的模块结构 A, B, C。每个模块均由蓄电池组，双向变流器，负荷以及可再生能源发电如光伏发电单元组成。各模块中蓄电池组和光伏发电的容量配比根据本地负载用电需求进行计算，尽量实现局部区域内能量的供需平衡，减少能量跨区域传输损耗。模块 A 中的变流器工作在 Vf 模式，为微电网提供稳定的电压参考，蓄电池组和双向变流器组成的供电单元为微电网的主电源，柴油发电机为备用电源，当蓄电池组剩余容量较低时，自动开启柴油发电机，为微电网输入备用功率。模块 B 和 C 具有相同的结构，双向变流器工作在 PQ 模式，根据本地蓄电池组剩余容量及发电和用电之间的能量差额进行蓄电池组充放电。通过模块 B 和模块 C 中变流器的 PQ 能量协调控制，可实现波动的发电及用电能量差额在三个蓄电池组进行均衡分配，平抑蓄电池组充放电能量的波动，提高蓄电池寿命，提高微电网电能

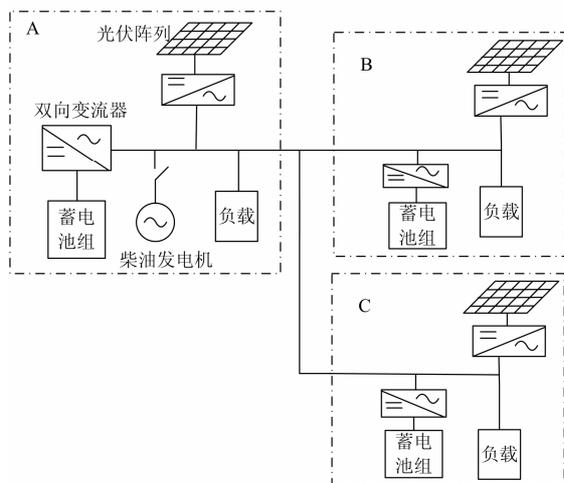


图 1 分布式光伏发电微电网结构

Fig. 1 Microgrid based on distributed photovoltaic generation

质量。该微电网中的光伏发电均采用传统的并网逆变器以电流源的形式注入到微电网中。

2 储能型双向变流器

储能型双向变流器是独立微电网的核心组网装置，也是提高新能源发电微电网运行效率与可靠性的关键技术之一。在微电网中，三相负载的不平衡程度及非线性程度较大电网更明显，因此三相逆变器应具有同时向平衡/不平衡、线性/非线性负载供电的能力。常用的有插入 Δ/Y 变压器拓扑，三相分裂电容式逆变拓扑，三相四桥臂逆变拓扑，以及采用三个单相全桥经变压器耦合成三相逆变器的拓扑结构。插入 Δ/Y 变压器拓扑是在传统的三相三桥臂逆变器和负载之间插入一个 Δ/Y 变压器，为负载不平衡产生的中性电流提供通路^[9]。分裂电容式三相逆变拓扑是将三相负载的中性点连接到传统三相逆变器的直流侧电容中点，可保证负载不平衡时仍能保持三相输出电压的对称，但需要较大的直流滤波电容，且需要对分离电容电压进行平衡控制^[10]。三相四桥臂逆变拓扑在传统的三相逆变拓扑基础上增加了一个第四桥臂，并将负载中性点与第四桥臂中点相连，直接对中性电流进行控制^[11-12]。前三种三相逆变拓扑均是基于传统的三相三桥臂矫正而来，逆变桥臂上存在固有的三相耦合，所需直流电压高，三相解耦控制复杂。微电网中储能型双向变流器直流侧通常接蓄电池组，蓄电池单体性能差异使得直流母线电压不宜过高，采用三个单相全桥经变压器耦合成三相逆变器的三相逆变器拓扑硬件结构上基本实现了三相电路的解耦，软件控制简单，直流电压利用率高，可靠性高，在可再生能源发电微电网这种运行工况较恶劣的情况下具有较大的实用价值，并可根据需要组建单相/三相微电网，经过综合考虑，在本项目中采用该种拓扑结构。

本项目中采用的储能型双向变流器拓扑如图 2 所示，原边为三个单相全桥电路，副边采用 Y 形接法，滤波电感和输出变压器采用一体化三磁柱铁芯结构。模块 B 和模块 C 中双向变流器工作在三相对称可控整流状态，采用空间矢量控制方式即可实现蓄电池与双向变流器之间给定功率可控充放电，具体实现此处不再赘述。模块 A 中变流器工作在 Vf 模式，要求在平衡/不平衡，线性/非线性负载下保持高质量的电压参考，控制要求较高，本文主要讨论该情况下变流器的控制及实现。

根据组网及运行控制需要，可工作在逆变或整流状态。图 2 所示的双向变流器为三个单相全桥结构，变流器的控制可简化为三个单相逆变器的控制，

abc 三相具有相同的控制结构。变流器的控制主要分为两部分, 分别为锁相控制和电压波形控制。a 相电压参考正弦表正向过零点与同步脉冲上升沿的相角差, 进行比例运算后调整 PWM 波的周期值, 实现两者零相差锁相, b 相和 c 相参考电压波形可将 a 相电压参考正弦表依次延时 120° 和 240° 得到。

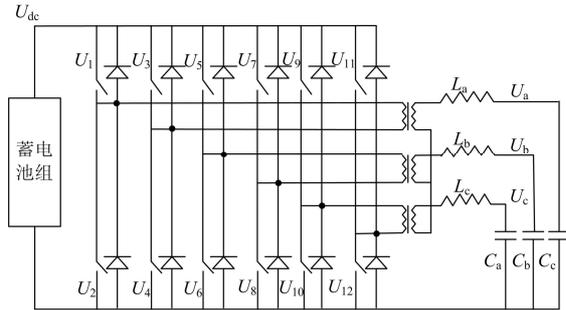


图 2 双向变流器拓扑

Fig. 2 Topology of bi-directional converter

图 3 所示的是电压波形的复合控制策略。瞬时波形控制主要由三部分组成, 分别为前馈控制, 电压电流瞬时值双环控制以及重复控制组成。蓄电池电压 U_{dc} 经过比例环节 K_{ff} 得到开环 PWM 参考波形 $K_{ff}U_{dc}\sin\theta$, 以快速响应充放电过程中蓄电池电压的不断变化, 其中 $\sin\theta$ 为参考正弦表。电压电流瞬时值双环控制中电压电流均采用比例控制, 比例系数分别为 K_u, K_i , 虚线框中的 PR 代表重复控制器, 另一个虚线框代表逆变器本体。

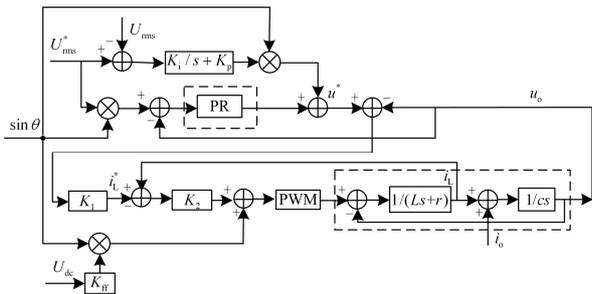


图 3 变流器控制框图

Fig. 3 Block diagram of the converter

重复控制是一种基于内模原理的控制策略。内模原理意味着如果在稳定的闭环系统中含有参考指令的信号发生器, 被控输出就可以无稳态误差地跟踪这组参考指令。如果系统要求对正弦输入具有零稳态误差, 则正弦函数的模型就应该被包含在稳定的闭环传递函数中^[13-16]。

图 4 所示的重复控制器框图中, e_1 为瞬时电压误差信号; z^{-N} 为周期延时环节, K_r 为比例系数, 最终确定输出量的幅值, $Q(z)$ 是为了增强系统鲁棒性

而设计的; 超前环节 z^k 的作用是使控制器根据上一周期的误差信息在下一周期提前 k 拍发出校正量; 补偿器 $S(z)$ 改造被控对象特性, 保证系统稳定。重复控制无法实现短于一个周期的动态响应, 动态特性较差, 因此重复控制与电压电流瞬时值双环控制组合可取得较好的动态响应。在瞬时值控制的基础上, 再增加一个电压有效值的比例积分调节环, 比例系数为 K_p , 积分系数为 K_i , 可实现电压有效值的无差调节。

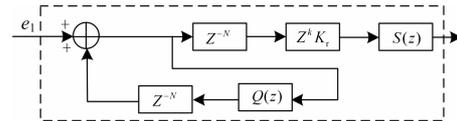


图 4 重复控制器框图

Fig. 4 Block diagram of the repetitive controller

进行了 100 kVA 双向变流器实际开发, 采用 DSP 控制器 TMS320F28335, 主电路参数中电感 $L_a=L_b=L_c=300\mu\text{H}$, 电容 $C_a=C_b=C_c=200\mu\text{F}$, PWM 波调制频率为 9.6 kHz, 波形参考正弦表一个周期离散为 192 个点。重复控制器参数 $N=192, K=5, S(z)=(0.1813z+0.1551)/(z^2-1.294z+0.63), Q(z)=0.95, K_r=0.2$ 。图 5 为带整流性负荷时双向变流器的三相输出电流波形图, 可见三相电流不平衡程度高且为脉冲波。图 6 所示为变流器三相电压波形图, 在图 5 所示的整流性负载情况下电压波形质量仍然较好, a 相失真度为 2.3%, b 相失真度为 2.4%, c 相失真度为 2.6%, 输出电压有效值稳定在 230 V, 可见图 3

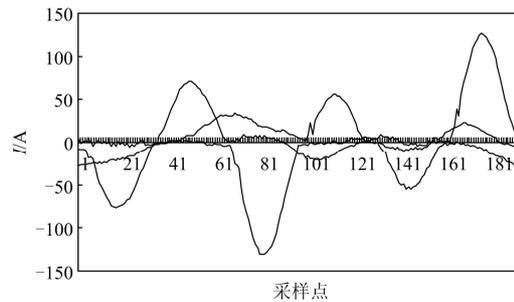


图 5 变流器输出电流

Fig. 5 Output current curve of the converter

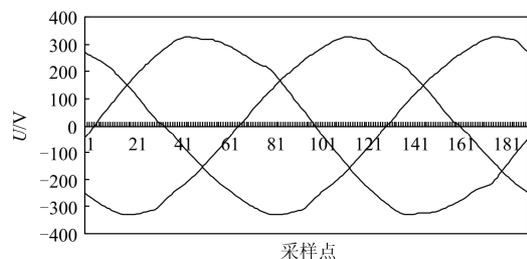


图 6 变流器输出电压波形

Fig. 6 Output voltage curve of the converter

所示的控制策略具有较好的控制效果，能够在蓄电池电压波动及各种负载条件下保持良好的变流器端口电压质量。

3 能量管理及调度策略

储能单元在独立微电网中占据至关重要的位置，是目前微电网中最薄弱的环节之一。可再生能源发电及负荷用电均具有功率波动性及间歇差特性，为了满足负荷较长时间的不间断用电需求，同时尽可能充分利用可再生能源，需要进行发电与用电的优化控制与管理，能量缺额可由两种途径解决，一方面通过原动机如柴油发电机来补充能量缺额，另一方面可配置大容量的储能单元和可再生能源发电单元，第二种不具备经济性，目前采用柴油发电机来补充能量缺额。

蓄电池组处于剧烈不可控充放电状态时，工作环境恶劣，蓄电池组寿命下降很快，大大降低微电网的性价比，同时也使得电能质量较差。而本方案中微电网结构中各个模块通过可控整流环节的功率控制可以平抑本模块内的功率波动，使本模块内的蓄电池单元处于稳定可控充放电状态，大大提供蓄电池组的寿命。各个模块之间可控整流单元协调控制，可以最大程度地将随机波动的可再生能源发电在微电网内部进行合理分配，减少能量冲击幅度，提高全网范围内的电能质量。

本方案采用两级结构的能量管理策略。底层为模块层，顶层为系统层。模块层内的本地控制器根据当前实时电量采样信息进行蓄电池容量预测，一定时间尺度上的光伏发电及负荷用电预测，从而确定本模块的能量缺额或能量富余。系统层控制器根据接收到的各模块的蓄电池当前容量信息，能量缺额或能量富余信息进行综合分析，采用合适的优化方法最终确定各个模块之间可控整流单元的功率输送额度，以及柴油发电机的启停及功率指令，本地控制器根据系统层发出的功率指令执行功率交换。鉴于篇幅，具体的实现算法此处不赘述。

图 7 所示为微电网能量管理及调度系统的结构框图。该系统采用分布式体系结构、面向对象的组件技术等先进的计算机技术，使得系统具有高度开放性和可扩展性。系统主站层包括数据库、SCADA、EMS(能量管理系统)及配网自动化子系统，系统子站为各个模块单元，其中包括分布式电源、变流器、储能单元、配网馈线、分级负荷等。主站层和子站层通过 100/1000 Mb 光纤环网进行通信。

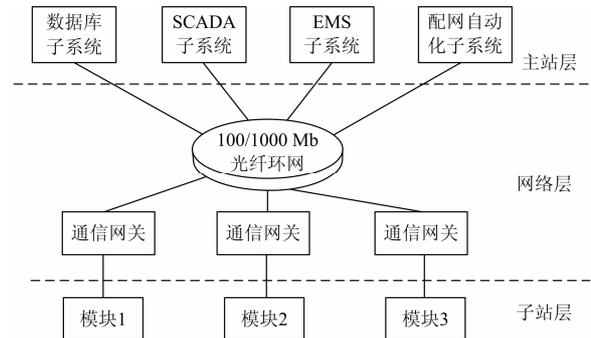


图 7 能量管理及调度系统

Fig. 7 Energy management and dispatch system

4 光/柴/蓄独立微电网的实证研究

根据上述独立微电网关键技术的研究，在海岛进行实证系统建设。光伏发电采用地面光伏电站和屋顶光伏两种形式，屋顶光伏受限于可用建筑屋顶的面积，尽可能实现与本地负载匹配，实现光伏发电的即发即用，减少能量传输损耗。在海岛太阳辐射条件好的坡面进行集中地面电站建设，实现备用能量的生成与存储。海岛用电具有很强的季节性和周期性特性，周末和夏天等旅游季节具有很高的用电尖峰，平时用电较少且较为平衡。由于目前光伏电站的成本较高，现阶段光伏发电总装机量以满足海岛非高峰时平均负荷需求为主，并设计一定的冗余，储能环节蓄电池组至少应能满足一天光伏发电量的存储，减少弃光现象的发生。

根据上述原则，海岛平时总用电负荷为 300 kW 左右，光伏装机总容量为 500 kWp，储能系统总容量可实现 1 600 kWh 的电能存储。具体结构如图 8 所示，两个集中负荷区分别进行模块 B 和 C 的建设，此处的光伏发电采用屋顶光伏的形式，装机容量均为 100 kWp，A 处太阳资源较好，建设地面电站，装机容量为 300 kWp，备用柴油发电机为 300 kVA，A 与 BC 区通过长约 1 km 的 10 kV 中压输电网络连接，蓄电池组采用 2 V，1 000 Ah 的铅酸蓄电池单体，蓄电池组额定电压为 480 V。

以模块 A 的运行状态为例，进行微电网运行状态分析研究。图 9 示出了某天备用柴油发电机启动时 A 模块的运行状态。图 9(a)所示，0:00~6:00 时段内，太阳能发电为零，由蓄电池组与柴油机联合对外部负载供电，柴油机以 125 kW 恒功率向微电网输出电能，蓄电池以 30 kW 放电。6:00~17:20 时段内，柴油发电机停止运行，负载由蓄电池和光伏发电联合供电。8:30 以前，光伏发电量小于负载需求，蓄电池处于放电状态，随着光伏发电量的增加，蓄电池放电功率越来越小。8:30~16:30 时段内，蓄电

池处于充电状态, 14:00 左右, 光伏发电达到最大, 发电与用电量之间的能量富余最大, 此时蓄电池充电功率最大, 约为 60 kW。在 11:30 和 15:00, 由于光伏发电的减少, 蓄电池进入放电状态。17:20~21:20 时段内, 备用柴油机开启, 柴油机以 125 kW 恒功率向微电网输出电能, 随着负载用电的增加, 蓄电池逐渐从充电状态转入放电状态, 21:20~24:00, 柴油发电机以 220 kW 恒功率向微电网输出电能。

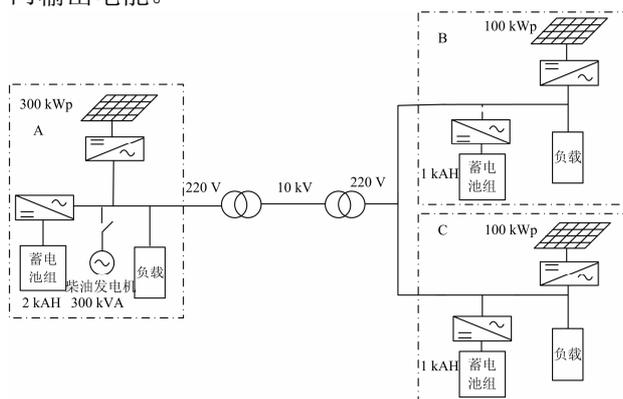


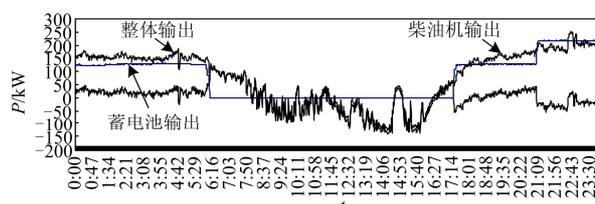
图 8 光/柴/蓄独立微电网系统

Fig. 8 Microgrid composed of photovoltaic, diesel generator, and battery

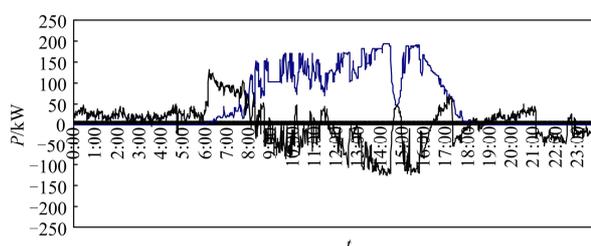
图 9(b)示出了光伏发电与蓄电池的功率图, 在 6:00~18:00 时段内光伏发电输出电能, 光伏发电的波动较大, 最高达到 190 kW, 该天光伏累计发电达到 1 200 kWh。光伏发电功率特性与蓄电池功率特性具有互补性, 光伏发电的剧烈变化引起了蓄电池充放电的剧烈变化。图 9(c)示出了蓄电池电压与充放电特性之间的关系。蓄电池充放电平稳时, 蓄电池端口电压较为稳定。充电时, 蓄电池端口电压上升, 放电时, 蓄电池端口电压下降。充放电电流剧烈变化时, 蓄电池组端口电压也相应剧烈变化。15:20 左右, 蓄电池从 30 kW 放电切换到 30 kW 充电时, 蓄电池端口电压从 460 V 升到 510 V。因此充放电电流剧烈变化时, 对变流器端口电压波形控制也提出了较高的要求。

图 9(d)为 B 模块中某负载测量点三相电流有效值波形图。可见, 在运行过程中, 三相负载电流有效值相差很大, 该天 A 相电流有效值平均为 9.15 A, B 相电流有效值平均为 8.39 A, C 相电流有效值平均为 26.12 A, 三相负载瞬时不平衡程度更大, 微电网经常处于三相不平衡负载运行状态下。相应地, 由于海岛上负荷较为分散, 低压配电线路较长, 随着负荷电流的波动, 图 9(e)示出的该负载测量点的电压有效值也相应波动。输出电流越大, 该相输出

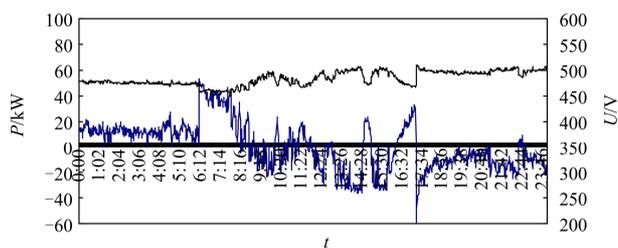
电压越小, 电压有效值在 220~240 V 之间波动, 并且三相电压不平衡程度高。尽管变流器输出端口口的电压如图 6 所示具有较好的电压波形并且始终能够稳定在 230 V 的三相电压对称状态, 但是经过输



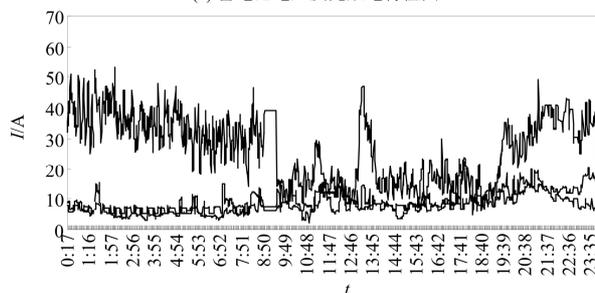
(a) 变流器功率输出特性



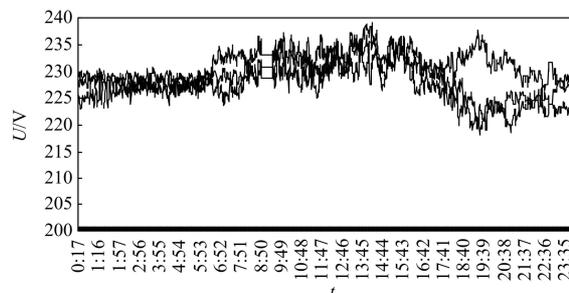
(b) 光伏发电与蓄电池功率图



(c) 蓄电池电压及充放电特性图



(d) 某负载测量点的三相电流



(e) 某负载测量点三相电压波形

图 9 微电网运行状态分析

Fig. 9 Operation analysis of the microgrid

电网络后,各负荷点三相电压有效值均随着潮流变化且存在三相电压不平衡。为了满足重要负荷或者特定负荷的供电要求,一方面要制定合适的微电网运行质量评价指标,根据电网当前运行状态进行控制优化;另一方面要研究合适的微电网输配电网络结构。

B 模块和 C 模块中蓄电池组处于可控整流状态,可实现指定功率的输出调节,模块中物理量具有和 A 模块所述相似的关系,此处不再赘述。

5 结论

本文提出了一种工程实用的模块化分布式光伏发电独立微电网拓扑结构并阐述了该独立微电网的组网原理。对组网的关键硬件装置双向变流器的硬件拓扑和复合控制策略进行了设计和装置开发,建立了以蓄电池容量预测,可再生能源发电及负荷用电预测为核心的微网内模块间能量调度控制策略。基于关键技术的研究,在海岛进行了光/柴/蓄独立微电网的实证研究,测试结果验证了该分布式光伏发电独立微电网方案的有效性,实现了海岛负荷不间断供电运行。同时,测试结果也表明分布式发电独立微电网由于可再生能源发电及负荷用电的波动性和间歇性对微电网的电网质量带来很大影响,在电能质量要求高的场合应用还需要进一步加强微电网输电拓扑结构、优化控制方法、电能质量评估及治理等各方面的研究,以实现微电网供电质量的稳定、可控、优质,促进分布式发电微电网的推广应用。

参考文献

- [1] LARIA A, CUREA O. Survey on microgrids: Unplanned islanding and related inverter control techniques[J]. *Renewable Energy*, 2011, 36(8): 2052-2061.
- [2] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊, 等. 微电网结构特性分析与设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(18): 149-155. HUANG Wen-tao, TAI Neng-ling, FAN Chun-ju, et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(18): 149-155.
- [3] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. *电网技术*, 2009, 33(11): 6-11. DING Ming, ZHANG Ying-yuan, MAO Mei-qin. Key technologies for microgrid being researched[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(11): 6-11.
- [4] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊, 等. 微电网结构特性分析与设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(18): 149-155. HUANG Wen-tao, TAI Neng-ling, FAN Chun-ju, et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(18): 149-155.
- [5] ARBOLEYA P, DIAZ D, GUERRERO J M, et al. An improved control scheme based in droop characteristic for microgrid converters[J]. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80: 1215-1221.
- [6] PECAS LOPES J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2006, 21(2): 916-924.
- [7] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(8): 77-84. SUN Xiao-feng, Lü Qing-qiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(8): 77-84.
- [8] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(2): 248-254. ZHANG Li, SUN Kai, WU Tian-jin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(2): 248-254.
- [9] JENSEN U B, ENJETI P N, BLAABJERG F. A new space vector based control method for ups systems powering nonlinear and unbalanced loads[J]. *IEEE Trans on IA*, 2001, 37(6): 1864-1870.
- [10] ZHANG R, PRASAD V H, BOROYEVICH D, et al. Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converter[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 2002, 17(3): 314-326.
- [11] 孙驰, 马伟明, 鲁军勇. 三相逆变器输出电压不平衡的产生机理分析及其矫正[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(21): 57-64. SUN Chi, MA Wei-ming, LU Jun-yong. Analysis of the unsymmetrical output voltages distortion mechanism of three-phase inverter and its corrections[J]. *Proceedings of*

- the CSEE, 2006, 26(21): 57-64.
- [12] DAI Ning-yi, WONG Man-chung, HAN Ying-duo. Application of a three-level NPC inverter as a three-phase four-wire power quality compensator by generalized 3DSVM[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2006, 21(2): 51-58.
- [13] 王立建, 王明渝, 高文祥, 等. 复合控制技术在独立光伏并网发电系统中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 88-93.
- WANG Li-jian, WANG Ming-yu, GAO Wen-xiang, et al. Research of multiple control technology for stand-alone photovoltaic parallel system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 88-93.
- [14] 李练兵, 赵治国, 赵昭, 等. 基于复合控制算法的三相光伏并网逆变系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 44-47.
- LI Lian-bing, ZHAO Zhi-guo, ZHAO Zhao, et al. Study on three-phase photovoltaic grid-connected inverter system based on compositive control[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 44-47.
- [15] ABDEL-RAHIM N M, QUAICOE J E. Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(4): 532-541.
- [16] 刘飞, 宫金武, 彭光强, 等. 一种复合式重复控制在并联型有源电力滤波器设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 138-145.
- LIU Fei, GONG Jin-wu, PENG Guang-qiang, et al. Application of compound repetitive control in shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 138-145.

收稿日期: 2013-06-24; 修回日期: 2013-07-08

作者简介:

张先勇(1977-), 男, 通讯作者, 博士, 副研究员, 主要研究领域为太阳能发电及可再生能源微电网技术; E-mail: zhangxy@ms.giec.ac.cn

舒杰(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要研究领域为太阳能发电及可再生能源微电网技术。