

光储微电网运行特性及影响因素分析

杨占刚¹,徐玉磊¹,王成山²,武震²

(1. 中国民航大学 航空自动化学院,天津 300300;2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要: 建立了一个光伏发电微电网测试平台;系统以蓄电池为储能装置,并通过双向逆变器并入微电网,用以维持微电网的暂态功率平衡。当微电网联网运行时,以外电网电压和频率为参考,蓄电池双向逆变器、光伏并网逆变器采用定功率控制;孤岛运行时,双向逆变器的控制策略切换为定电压、定频率控制,用以提供微电网电压和频率参考。实验结果表明,该系统可以稳定地工作在联网模式和孤岛模式,光伏发电功率波动及负荷波动均不会影响微电网的稳态运行,蓄电池的荷电状态对微电网的稳态孤岛运行以及联网和孤岛之间的切换有重要影响。

关键词: 光伏;发电;储能;蓄电池;微电网;逆变器;联网运行;孤岛运行;荷电状态;控制

中图分类号: TM 615;TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.003

0 引言

分布式发电 DG(Distributed Generation)已经成为电力系统中一个新的研究热点^[1-2],将分布式发电供能系统以微电网的形式接入大电网并网运行,与大电网互为支撑,是发挥分布式发电供能系统效能的最有效方式^[3]。分布式发电供能微电网系统,简称微电网,是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发电系统,是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,既可以与大电网并网运行,也可以孤立运行^[4]。微电网(尤其是孤岛运行方式下的微电网)能否可靠运行关注的重要问题之一是能否保持电压和频率稳定性,并且微电网中不同类型分布式电源的控制特性和动态响应速度不同^[5-6];文献[7]对光伏、燃料电池的混合发电系统动态特性进行了仿真研究,但忽略了对蓄电池的充放电过程的控制和管理;文献[8]提出了一种超级电容与蓄电池混合储能系统的功率自适应控制策略,使超级电容和蓄电池输出功率得到合理分配,可满足微电网孤岛运行时的电能质量要求和负荷的功率需求,但均是对独立运行的微电网展开研究;文献[9-10]则重点研究光伏-储能联合发电系统运行机理及控制策略,可实现该类型微电网的稳定运行和对电网的友好接入;文献[11]进行了含多种分布式电源的微电网动态仿真,获得了分布式电源的功率、微电网电压和频率的变化规律,但其在仿真过程中忽略了电池充放电

的动态过程;文献[12]对逆变型分布式电源进行了微电网小信号稳定性动态建模分析,但对于微电网在大扰动下的动态行为没有进行深入研究。基于此,本文针对光伏、储能电池组成的微电网系统,进行系统、完整的动态建模与实验分析,研究光储微电网在联网、孤岛运行及二者之间相互切换条件下的动态行为,重点研究储能电池在微电网运行控制中的作用。

1 光储微电网系统

光储微电网系统以一间家用住宅为依托,在平屋顶、坡屋顶、女儿墙及立面处分别铺设光伏电池,其系统电气结构如图 1 所示,为单相 230 V、50 Hz 系统,由蓄电池储能系统、光伏发电系统及相关控制系统构成。以无太阳辐射、微电网孤岛运行条件下,蓄电池可以支撑负荷运行一天计算,选择蓄电池容量 48 V、420 A·h,并通过双向逆变器并入交流母线。

系统设有上层控制器,通过 485 总线与光伏发电系统和储能系统进行通信,采集系统的功率、电压、频率、工作状态等系统信息,并设置光伏并网逆变器的工作模式、孤岛运行时的电压和频率等稳态参数^[13],本文设置光伏并网逆变器工作在反孤岛运行模式,不考虑其低电压穿越能力。

2 微电网控制策略

目前,微电网的控制策略主要有主从控制(master-slave)^[14]和对等控制(peer to peer)^[15]2 种。本文微电网系统采用主从控制方式,在微电网处于孤岛运行模式时,蓄电池双向逆变器采取定电压和定频率控制(简称 U/f 控制),用于向微电网中的其他分布式电源提供电压和频率参考,其他分布式电源采用定功率控制(简称 PQ 控制)。联网运行时,蓄电池和其他分布式电源均采用定功率控制。

收稿日期:2013-10-17;修回日期:2014-08-07

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(ZXH-2012C006);中国民航大学科研启动基金资助项目(2011-QD02X)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(ZXH2012C006) and Scientific Research Foundation for Civil Aviation University of China(2011-QD02X)

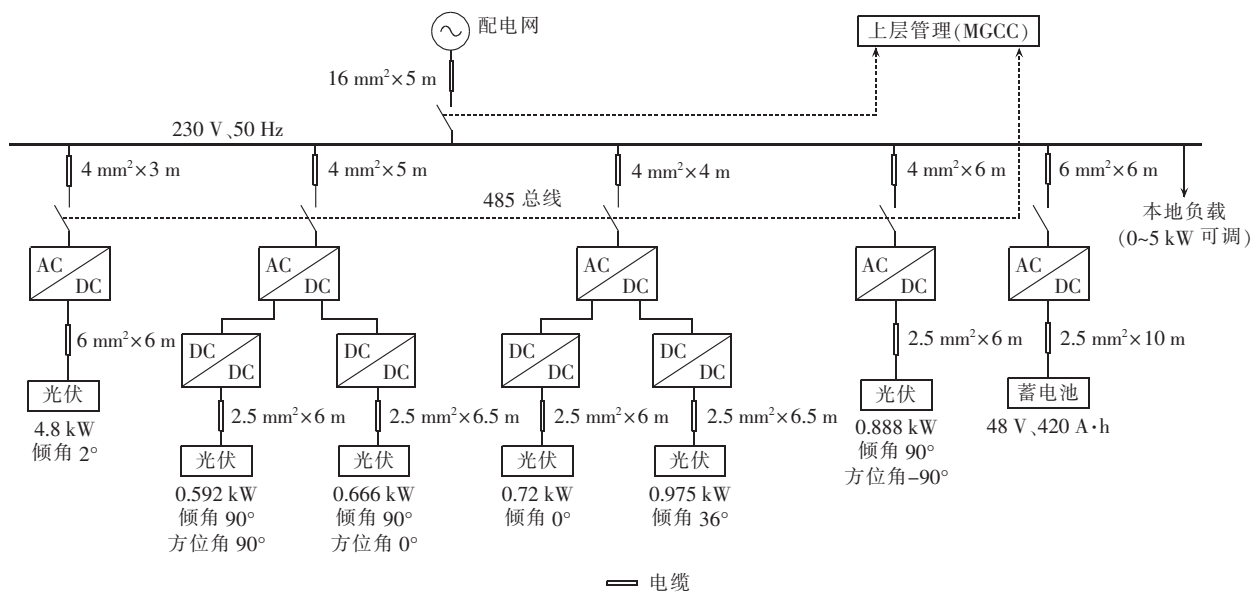


图 1 光伏微电网系统结构

Fig.1 Structure of photovoltaic microgrid system

孤岛运行时,储能装置要维持微电网的电压和频率,跟踪光伏输出功率和负荷波动。由于储能电池的能量存储有限,若系统中光伏或负荷波动较大,将会影响储能装置的充放电状态,进而影响微电网孤岛运行时的动态行为。另外,由于进行联网和孤岛模式切换时,双向逆变器将切换控制策略,并通过运行控制来调整蓄电池输出,以稳定光伏,尽量延长光伏极限切除时间并避免其被切除。关于双向逆变器的控制策略,详见文献[16]。

3 实验与测试分析

针对本文设计的光储微电网系统,在联网、孤岛以及二者之间模式切换状态下,利用电能质量分析仪对实验过程中微电网交流母线处电压、频率以及光伏、蓄电池的输出功率进行实时采样分析。

3.1 孤岛运行模式

孤岛运行模式下,微电网系统的运行状态与蓄电池荷电状态 SOC(State Of Charge)、光伏系统发电功率、负荷功率密切相关。

3.1.1 SOC 处于正常状态

图 2 为 SOC=50 时微电网孤岛运行模式下不同运行条件的实测曲线。

在 0~15 s,光伏发电系统和双向逆变器共同给负荷供电,双向逆变器采用无差的 U/f 控制,微电网电压和频率维持恒定,分别为 231 V、50 Hz;光伏发电系统采用最大功率跟踪控制。

15 s 时,负荷从 600 W 阶跃到 1750 W,微电网的暂态功率平衡被破坏,交流母线电压和频率将发生小幅度波动。因光伏输出不可调度,双向逆变器将增大输出功率以维持暂态功率平衡,经短暂调整

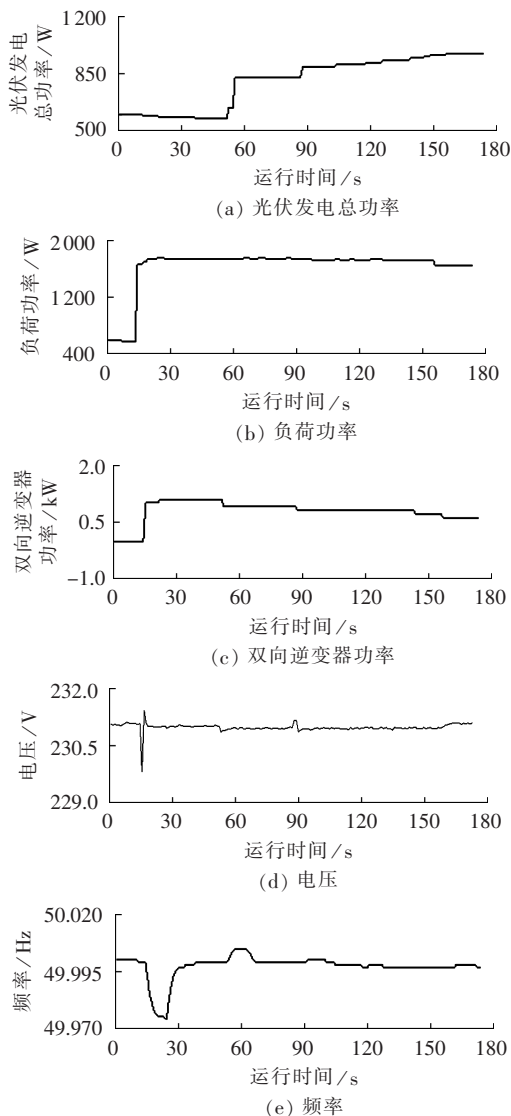


图 2 微电网孤岛运行 (SOC=50)

Fig.2 Microgrid operating in islanding mode (SOC=50)

后可恢复稳态孤岛运行。

52 s 与 90 s 时,光伏发电总功率发生 2 次波动,也会导致微电网电压和频率的小幅波动。

考虑负荷大扰动情况,其实测曲线如图 3 所示。当负荷在 400~3 250 W 之间波动时,电压和频率将会跟随负荷发生波动,见图 3(b)、(c),但电压波动范围小于 1 V,频率波动范围不超过 0.1 Hz,均在允许的范围之内。

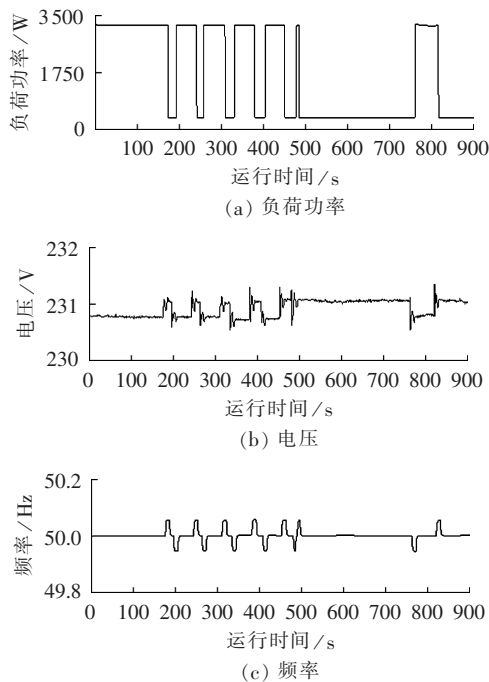


图 3 负荷波动对孤岛运行影响
Fig.3 Influence of load fluctuation on operation in islanding mode

综上,在孤岛运行模式下,当蓄电池 SOC 处于正常状态时,由于蓄电池储能装置的存在,无论是光伏发电系统波动还是负荷波动,微电网中的功率平衡总能较快地得到满足。微电网交流母线电压和频率虽小幅度波动,但均在可接受范围内,光伏发电系统仍可稳定运行而不被切除。

3.1.2 SOC 很高

图 4 为微电网孤岛运行模式且蓄电池 SOC=90 时,不同运行条件的实测曲线。

图 4(a)为光伏发电总功率及负荷耗电功率曲线,当光伏发电总功率大于负荷耗电功率,由于蓄电池充电能力的限制,多余的功率不能被蓄电池完全吸收,微电网中暂态功率平衡得不到满足。为保障微电网中暂态功率平衡及避免对蓄电池的过充电,本文采取提高双向逆变器频率的方法,见图 4(c),当频率上升到 50.8 Hz 时,将分步切除各光伏并网逆变器,直到微电网内功率平衡得到满足,如图 4(a)所示。

可见,当蓄电池 SOC 较高时,光伏发电总功率大于负荷功率会造成微电网频率上升,进而导致光伏

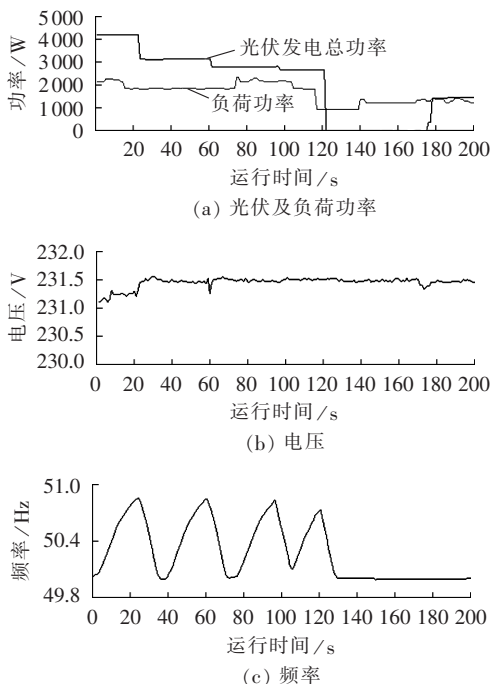


图 4 微电网孤岛运行 (SOC=90)

Fig.4 Microgrid operating in islanding mode (SOC=90)

并网逆变器退出运行,以保证微电网的功率平衡。

3.2 联网模式

图 5 为联网运行模式下的测试曲线。可以看出,联网运行模式下,由于光伏并网逆变器和蓄电池双向逆变器均采用定功率控制,光伏发电总功率的波动及负荷的波动均由外电网来平衡,不会对微电网电压和频率造成影响。蓄电池双向逆变器的输出功率与外界功率变化无关,仅由蓄电池本身的状态决定。微电网的电压和频率以外电网电压和频率为参考,并随外电网波动而波动。

3.3 孤岛转联网模式

微电网由孤岛切换到联网模式,双向逆变器由 U/f 切换到 PQ 控制。此时,外电网除了给负荷供电以外,还要通过双向逆变器给蓄电池充电。若蓄电池 SOC 较低,联网时外电网对蓄电池的充电功率较大,当由孤岛向联网模式切换时,蓄电池双向逆变器的功率变化也相对较大,对微电网电压和频率的影响相应也就越大。因此,以蓄电池 SOC 较低 (SOC=30) 时孤岛向联网切换来衡量微电网的动态特性。如图 6 所示,在运行时间为 70 s 时,微电网由孤岛切换到联网模式,由于外电网可以看作无穷大电源,因此切换后负荷功率及蓄电池充电功率可由外电网迅速补充,保证孤岛到联网模式的平稳过渡。切换瞬间微电网频率下降 0.07 Hz 至 49.93 Hz,能保证光伏并网逆变器继续并网运行而不被切除。

3.4 联网转孤岛模式

外电网停电情况下,微电网将由联网切换到孤岛运行模式,此时由于失去外电网的电压和频率参考,

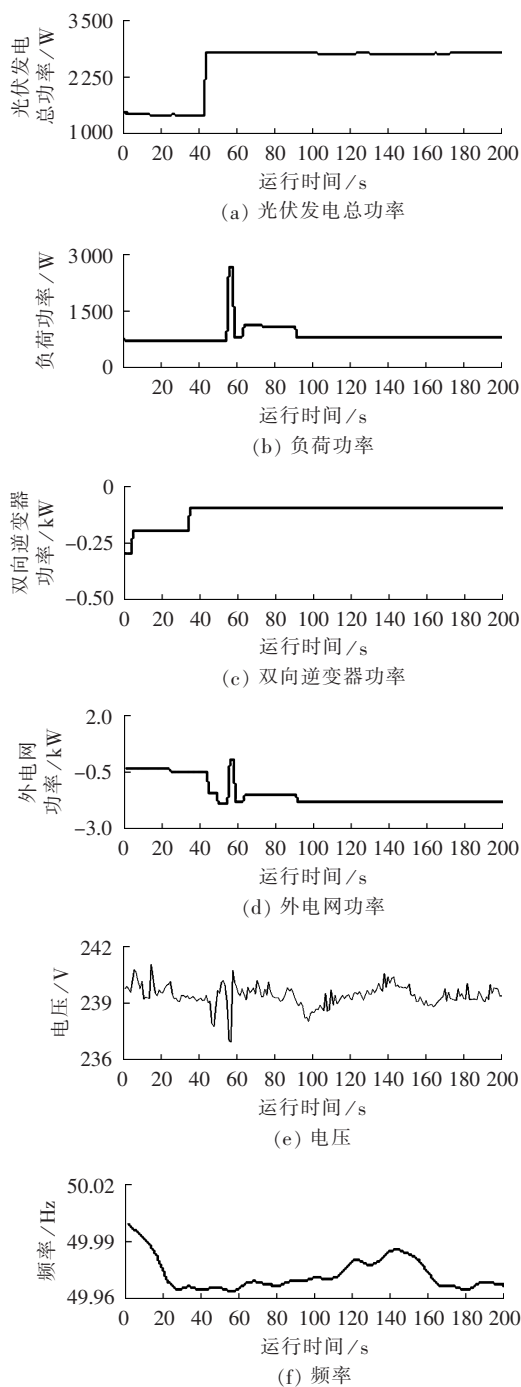


图 5 微电网联网运行

Fig.5 Microgrid operating in grid-connecting mode

双向逆变器切换到 U/f 控制。图 7—9 分别为 SOC 取值 30、50、90 时光储微电网系统从联网切换到孤岛时的动态响应曲线。

SOC=30 时,切换瞬间光伏功率与负荷功率分别为 3.5 kW 和 0.6 kW,此时由于蓄电池对电压与频率的调整能力很弱,电压和频率会出现较大幅度波动,导致光伏并网逆变器被切除。

SOC=50 时,切换瞬间光伏功率与负荷功率分别为 0.4 kW 和 0.3 kW,虽然功率不平衡很小,但切换时蓄电池的电压与频率调整能力较弱,会导致部分光伏

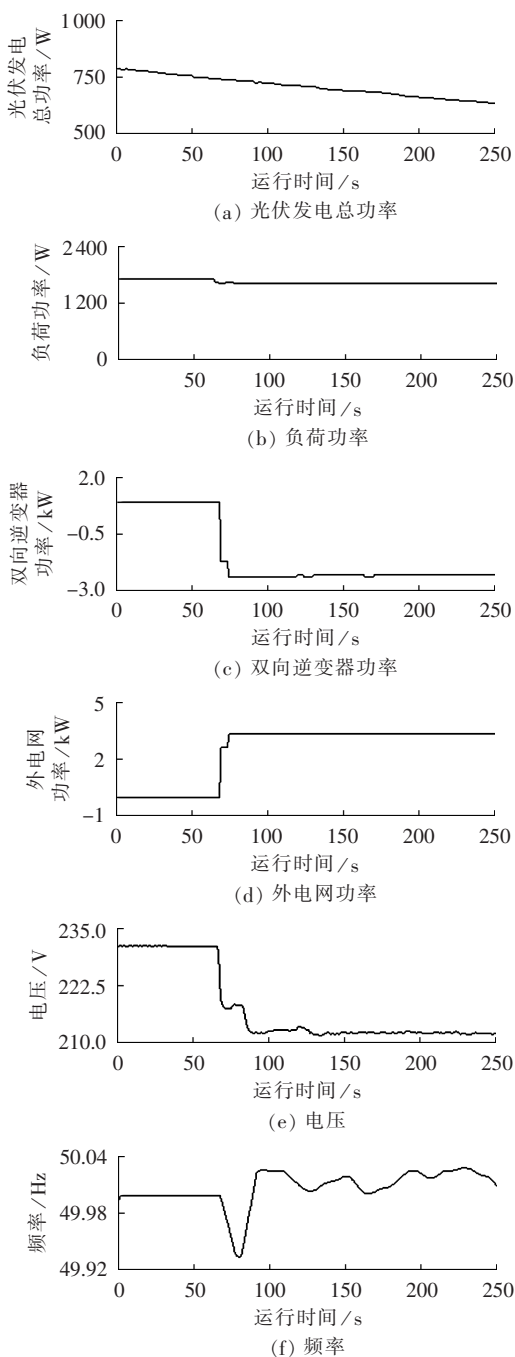


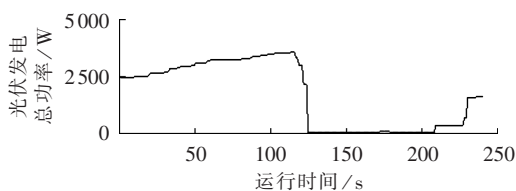
图 6 微电网孤岛转联网运行

Fig.6 Switchover from islanding mode to grid-connecting mode

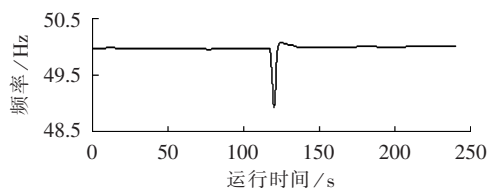
并网逆变器被切除。

SOC=90 时,切换瞬间光伏功率与负荷功率分别为 3 kW 和 0.5 kW,此时功率不平衡与 SOC=30 时基本相同,但由于蓄电池对电压与频率的调整能力较强,电压和频率仍能较好维持,保障光伏并网逆变器不被切除。

需要指出的是,图 9 中微电网由联网转为孤岛运行后,由于光伏发电总功率远大于负荷功率,且蓄电池已处于深度充电状态(SOC=90),为了避免对蓄电池造成过充电,双向逆变器将提高微电网内的设定



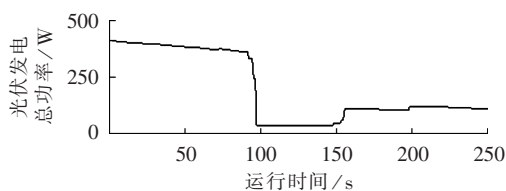
(a) 光伏发电总功率



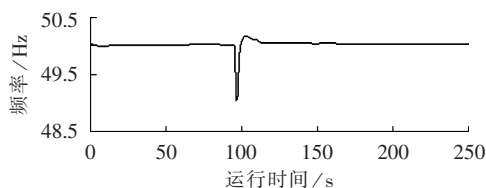
(b) 频率

图 7 微电网联网转孤岛运行(SOC=30)

Fig.7 Switchover from grid-connecting mode to islanding mode(SOC=30)



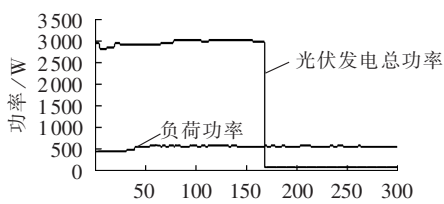
(a) 光伏发电总功率



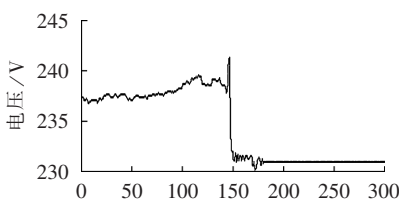
(b) 频率

图 8 微电网联网转孤岛运行(SOC=50)

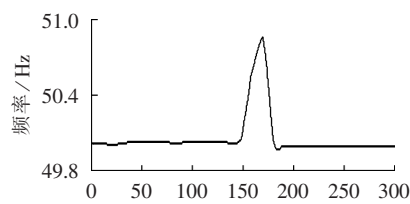
Fig.8 Switchover from grid-connecting mode to islanding mode(SOC=50)



(a) 光伏及负荷功率



(b) 电压



(c) 频率

图 9 微电网联网转孤岛运行(SOC=90)

Fig.9 Switchover from grid-connecting mode to islanding mode(SOC=90)

频率,当频率上升到一定限值(本文为 50.8 Hz)时,光伏并网逆变器由于反孤岛保护动作而退出运行,避免对蓄电池的过充电。

由此可见,保障微电网联网向孤岛系统的平稳过渡,可从两方面着手:一方面,调节光伏与负荷大小保障较好的功率平衡,或者在切换时尽量维持较高的蓄电池 SOC,减小电压和频率的跌落;另一方面,采用具有良好穿越能力的光伏并网逆变器,在较低的电压和频率下仍能维持一定时间的正常运行,实现联网到孤岛的顺利切换。但总体而言,蓄电池的快速动态功率补偿能力仍相对较弱,若实现切换瞬间快速的动态功率补偿以保证各分布式电源不被切除,复合储能技术不失为一种合理化的选择。

4 结论

在建立的以蓄电池为核心的光储微电网系统的基础上,本文对其进行了联网、孤岛以及二者之间相互切换的实验研究,对影响其稳态及动态性能的各因素都进行了详细分析,可得结论如下。

a. 蓄电池 SOC 对微电网系统稳态运行意义重大,准确及时地掌握蓄电池的 SOC 状态信息,对主从控制微电网系统形成准确的调度指令意义重大。

b. 蓄电池 SOC 处于较高或较低状态时,对微电网的孤岛运行有重要影响:SOC 较低时,为避免蓄电

池的过放电,需根据 SOC 制定相应的负荷切除方案;SOC 较高时,需根据 SOC 制定相应的分布式电源切除方案。

c. 蓄电池储能装置在快速动态跟踪方面仍存在一些欠缺:当微电网内存在分布式电源波动、负荷波动或发生运行模式切换时,由于蓄电池放电能力的限制,微电网内的电压和频率均会有小幅度波动。因此,对于一些敏感负荷,需配备一定容量的具有快动态特性的储能装置(超级电容器、飞轮储能等)。

参考文献:

- [1] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备,2004,24(7): 31-36.
DING Ming,WANG Min. Distributed generation technology [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7):31-36.
- [2] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化,2005,29(24):90-97.
WANG Jian,LI Xingyuan, QIU Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(24):90-97.
- [3] LASSETER R,AKHIL A,MARNAY C,et al. White paper on integration of distributed energy resources - the CERTS microgrid concept[EB/OL]. [2009-01-10]. http://certs.lbl.gov/pdf/LBNL_50829.pdf.
- [4] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
WANG Chengshan,WANG Shouxian. Study on some key pro-

- blems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [5] KARINIOTAKIS G N, SOULTANIS N L, TSOCHNIKAS A I, et al. Dynamic modeling of microgrids[C]//2005 International Conference on Future Power Systems. Amsterdam, Netherlands: [s.n.], 2005: 1-7.
- [6] 李鹏, 王成山, 黄碧斌, 等. 分布式发电微电网系统暂态时域仿真方法研究——(二)建模、设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 15-19.
- LI Peng, WANG Chengshan, HUANG Bibin, et al. Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(2): modeling, design and implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 15-19.
- [7] 白园飞, 程启明, 吴凯, 等. 独立交流微电网中储能电池与微型燃气轮机的协调控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 65-70.
- BAI Yuanfei, CHENG Qiming, WU Kai, et al. Coordinated control of storage battery and microturbine in islanded AC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 65-70.
- [8] 李斌, 宝海龙, 郭力. 光储微电网孤岛系统的储能控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 8-15.
- LI Bin, BAO Hailong, GUO Li. Strategy of energy storage control for islanded microgrid with photovoltaic and energy storage systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 8-15.
- [9] 唐西胜, 邓卫, 李宁宁, 等. 基于储能的可再生能源微电网运行控制技术[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 99-103.
- TANG Xisheng, DENG Wei, LI Ningning, et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 99-103.
- [10] 梁亮, 李建林, 惠东. 光伏-储能联合发电系统运行机理及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 20-23.
- LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong. Operating modes of photovoltaic-energy-storage hybrid system and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 20-23.
- [11] 郭力, 王成山. 含多种分布式电源的微电网动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 82-86.
- GUO Li, WANG Chengshan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 82-86.
- [12] 张建华, 苏玲, 刘若溪, 等. 逆变型分布式电源微电网小信号稳定性动态建模分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 97-102.
- ZHANG Jianhua, SU Ling, LIU Ruoxi, et al. Small signal dynamic modeling and analysis of a microgrid composed of inverter interfaced distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 97-102.
- [13] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIGYRIOU N, et al. Microgrids management[J]. Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [14] PECAS LOPES J A, MOREIRA C L. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [15] CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1993, 29(1): 136-143.
- [16] 杨占刚, 王成山, 车延博. 可实现运行模式灵活切换的小型微电网实验系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 89-92.
- YANG Zhangang, WANG Chengshan, CHE Yanbo. A small-scale microgrid system with flexible modes of operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 89-92.

作者简介:



杨占刚(1979—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为分布式发电与微电网技术(E-mail: zgyang@cauc.edu.cn)。

Operating characteristics and influencing factors of photovoltaic-storage microgrid

YANG Zhangang¹, XU Yulei¹, WANG Chengshan², WU Zhen²

(1. Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A test platform of photovoltaic power generation microgrid is built, which adopts a battery as its energy storage device and connects it via a bi-directional inverter to maintain the transient power balance. In grid-connecting mode, both the battery bi-directional inverter and the photovoltaic grid-connecting inverter are under the constant power control with the grid voltage and frequency as the references; in islanding mode, the battery bi-directional inverter is under the constant voltage and frequency control to provide the voltage and frequency references for the microgrid. Experimental results show that, the system can stably operate in both operating modes; its steady-state operation is not affected by the fluctuation of photovoltaic power and load; the SOC(State Of Charge) of battery has important influence on its steady-state operation in islanding mode and the mode switching.

Key words: photovoltaic; electric power generation; energy storage; electric batteries; microgrid; electric inverters; grid-connecting mode; islanding mode; state of charge; control