

基于飞轮储能和蓄电池的微电网控制策略*

刘 霞, 江全元*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 微电网作为一特殊的电网运行方式,可运行在并网和孤岛两种模式下。对微电网中的电源及整个微网进行有效控制是微电网技术中的关键。为保证微电网的稳定可靠运行,并在运行模式改变时,完成有效、平滑的切换,在构建不同类型的分布式电源的基础上,提出了以蓄电池为主电源,用飞轮保证不间断供电的微电网系统协调控制方法。该控制方法保证了微电网经济、稳定运行和良好的供电质量,并且能够在微网运行模式切换过程中维持其内部不间断供电并大幅减少暂态冲击,迅速过渡到稳态运行。建模仿真结果证明了该控制策略的有效性和精确性。

关键词: 微电网;PQ控制;分布式发电;切换控制;主从控制

中图分类号: TM912;TM711

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)05-0553-06

Control strategy of microgrid based on flywheel storage and lead-acid battery

LIU Xia, JIANG Quan-yuan

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As a special way of grid running, microgrid can operate in both grid-connected mode and isolated mode. Effective control strategy for distributed sources and the whole microgrid is the key technology of microgrid. To ensure stable and reliable operation of the microgrid, effective and smooth switch between different operating modes, a coordinated control method of using lead-acid battery as the main source and the flywheel to keep uninterrupted power supply was proposed based on modeling different kinds of distributed source. The stable operation and good quality of power supply were guaranteed by this method. The uninterrupted power supply for load in the microgrid during switching process between the two modes was ensured, as well as the transient oscillation was dramatically reduced for transiting to the steady state swiftly. Modeling and simulation results show the efficiency and precision of the proposed method.

Key words: microgrid;PQ control;distributed generator;switching control ;single-master control

0 引 言

能源危机和长距离输电带来的投资巨大、损耗严重以及电能质量下降、安全性与可靠性降低等问题,使得小容量的分布式发电技术在近年来得到了迅速的发展。分布式发电能源丰富、清洁,能降低输电成本,并能提高用户用电的可靠性和经济性。但大量的分布式电源并网会给大电网的可靠性、电力系统保护、实时调度带来显著的影响。为了整合分布式发电的优势,减

小其对电网的冲击,研究人员提出了微网的概念。微网是一种由负荷、微源和储能共同组成的一个高效、灵活的电力系统,相对外部大电网表现为单一受控单元,并可满足用户对电能质量和供电安全等方面的要求。

微网在实时运行中最需要解决的问题就是控制问题,鉴于微网的特点,其控制要满足以下几点要求:保证供电质量,尤其是电压和频率;微电源能够即插即用,而不影响供电质量;正确灵活地解裂和连接,并在并网和孤岛两种运行方式下正常运行。典型的微网系

收稿日期:2011-11-02

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA05Z221);浙江省科技计划资助项目(2009C34013)

作者简介:刘 霞(1987-),女,湖南益阳人,主要从事微电网分布式发电方面的研究。E-mail:liuxia_212@yahoo.cn

通信联系人:江全元,男,教授,博士生导师。E-mail:jqy@zju.edu.cn

统主要由分布式发电、分布式储能和负荷组成。根据分布式电源与微网接口不同,又可分为两类:一类通过旋转电机与微网相连,如燃汽轮机、柴油发电机等;一类通过电力电子转换器作为耦合媒介与电网相连如光伏电池、燃料电池、蓄电池等。不同的分布式电源(DG)特性不同,其控制方式、动态响应等也不同。文献[1]提出了微网在孤岛运行模式下微源的二次调频控制策略,但是这种控制策略响应速度慢,从断开瞬间电压频率大幅度跌落后到恢复的过程需要几十秒,无法实现平滑不间断的供电。文献[2]介绍了微源的下垂控制与倒下垂控制相结合的综合控制策略,但这种控制策略不能使孤岛后微网的电压和频率恢复到并网前的水平,是一种有差自适应控制过程。文献[3]针对微网中不同的微源,分别采用PQ控制和下垂控制的控制策略优化微电网运行,但是系统中微电源均用直流电压源代替,没有考虑各个DG的不同特性和微源的原动机特性对微网的影响,与实际情况存在差距。文献[4]提出了一种微电网采用对等控制,储能单元蓄电池采用下垂控制的方法来改善微网切换过程暂态特性的方法,但这种方法在切换过程中的波动量仍然很大,电压最大跌落了80%,频率也波动了8%。

笔者在对各种分布式电源建立详细的电磁暂态仿真模型基础上,研究不同分布式电源的特性,并根据其特点加以不同的控制,保证在最大限度利用自然资源的同时有效利用可控微源以保证微网的稳定性。考虑到微电网具有并网和孤网两种运行模式,本研究提出一种典型的微电网控制策略,不仅能够保证微电网在运行过程中满足负荷对频率电压的要求,而且能保证其在两种运行模式下的有效快速切换和不间断供电。

1 微网结构

本研究提出的分布式微电网结构如图1所示。

该系统包括两条馈线:线路1上有风机、光伏及燃

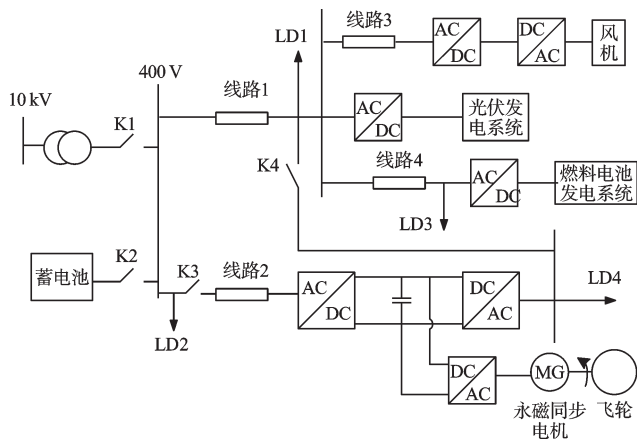


图1 微网系统结构图

料电池等分布式电源和负荷;线路2上有分布式储能单元飞轮以及负荷,而PCC点装有作为系统在孤岛运行时主电源的分布式可控电源蓄电池。

2 微源控制方法

微网中一个重要的组成部分就是分布式微源,对各种分布式电源采取有效地控制,保证微网在不同运行模式下都能满足负荷的电能质量要求,是微网可靠运行的关键。

2.1 飞轮作为UPS的控制方式

飞轮作为近年来迅速发展的一种新的储能方式,具有储能过程清洁、稳定、寿命长等优点,飞轮的充、放电速度很快,可以迅速吸收短期的功率波动,但是受材料和技术的限制,飞轮储能的容量较小,储能过程中自损耗大。飞轮的这些特点使其十分适合电力系统的短期储能,如不间断供电、应急电源等。因此本研究利用飞轮在微网运行模式切换过程中作为短期支撑迅速放电,以保证微网切换过程中负荷的不间断供电。飞轮通过与永磁同步电机相连实现机械能和电能的转换,同步电机通过双向逆变器将交流电转换成直流电,再经并网逆变器与电网相连。负荷通过逆变器连接到直流母线上,只要保证直流母线电压恒定,就能保证负荷供电的稳定。

飞轮主要有3种运行模式^[5]:充电、保持和放电模式。当电网正常运行时,飞轮运行在充电或者保持模式,当电网发生故障或电压跌落时,飞轮运行在放电模式,以维持系统的不间断供电。交流电网侧装有电压传感器,以便随时监测外部电压是否正常。飞轮出口双向功率变换器的控制框图如图2所示,其运行方式的切换用“选择开关”来控制,当外部无故障时,开关接0,此时飞轮一直充电到最大转速后保持,直流母线电压维持恒定(主要是通过AC/DC整流器控制)。当外部电网故障时,开关接1,此时直流母线电压主要是通

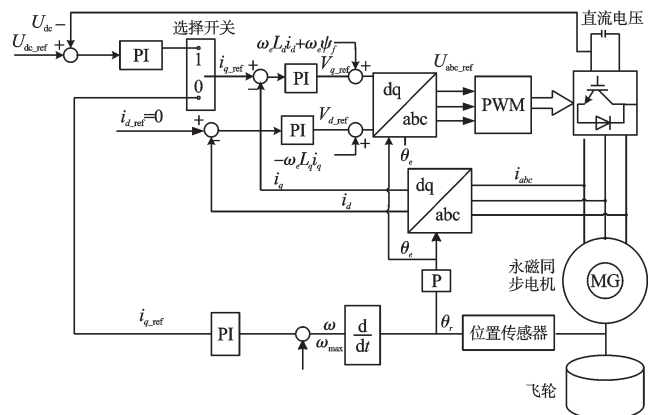


图2 飞轮控制框图

过飞轮来维持。

2.2 非主电源的分布式微源控制方式

逆变器作为微电源接入电网的接口,其控制技术是新能源开发利用的关键和微网控制的基础。该系统中的微源主要可以分为下面几类:一类是像光伏阵列、燃料电池等分布式电源,它们产生的是直流电,经过DC/AC变换为50 Hz的交流电接入电网,必要时可以在中间加一级DC/DC升压环节,如光伏发电、燃料电池。对它们的控制主要是并网逆变器DC/AC的控制。本研究对并网逆变器采用PQ控制方式。PQ控制主要用于间歇式电源以保证最大限度利用可再生能源,也用于燃料电池、燃汽轮机这类要灵活控制其出力的微源上。PQ控制为采用电网电压定向的空间矢量控制,具体框图如图3所示。该控制将有功、无功进行解耦,内环采用PI调节器对电流进行控制,外环为电压控制,最终使逆变器的输出始终跟踪上参考有功、无功指令 P_{ref} 、 Q_{ref} 。

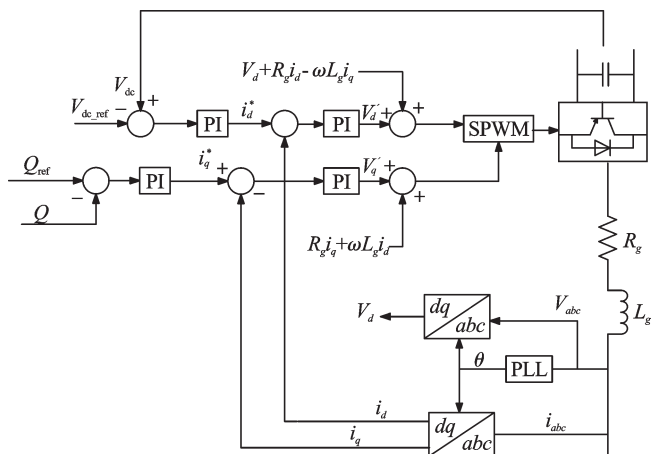


图3 PQ控制框图

该系统中的风机、飞轮等采用电磁感应装置,由原动机拖动电机旋转发出三相交流电,其频率与电网频率有很大的差异,不能直接并网。因此这类通过同步电机发电的分布式发电系统采用“AC-DC-AC”变流结构,后级DC/AC控制与前面的微源相同,仍采用PQ控制,前级AC/DC控制采用 $I_d=0$ 的空间矢量解耦控制^[6]。

2.3 主电源控制方式

微电网在并网运行的时候,整个大电网作为微网电压频率支撑,所有采用PQ控制的微源,通过锁相环检测电网电压的相角,使得微源获得频率支撑。而微网在孤岛模式下运行时,缺少了大电网支撑,因此必须有一个电源来给整个孤立的微电网提供电压和频率参考值,来保证微网的电压和频率水平。本研究采用 V_f 控制某个微源,使其作为微网孤岛运行时的主电源,以保证输出的电压频率保持在一定值。 V_f 控制原理框图如图4所示。

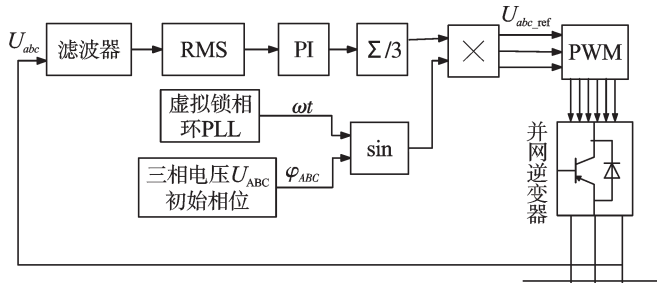


图4 V_f 控制框图

外环电压控制采用PI控制器,以提高稳定精度,同时电压相角采用固定频率(50 Hz/60 Hz)锁相环相角发生器,保证逆变器输出的电压频率维持在一个水平。

3 微电网控制策略

目前微电网控制策略主要有主从控制和对等控制。对等控制中,多个微源采用下垂控制,这些微源按设定的“有功-频率”和“无功-电压特性”运行,同时部分微源采用PQ控制。这种控制通过自适应调节,能保证微网从并网到孤网运行后,电压频率稳定在新的水平上,但无法恢复到并网前的水平,因此在重新并网时,对微网有一定的冲击。主从控制以一个微源作为电网电压和频率参考,以保证整个微网的电压频率稳定以及负荷的正常供电,而微网中其他的微电源则采用PQ控制,通过并网逆变器与电网相连。作为主电源的微源通过控制保证其输出的电压和频率为恒定值,因此能保证微网断网后仍能恢复到并网时的电压频率水平^[7-14]。该微网系统总体采用主从控制策略,控制框图如图5所示。

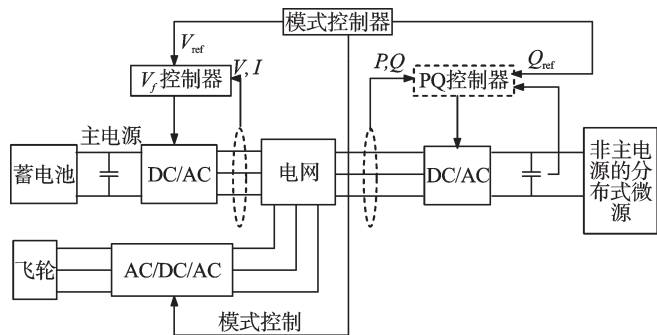


图5 微电网的控制框图

在微网并网时,微电网内的各个微电源只需控制功率流的输出以保证微电网内部功率的平衡和风力等自然资源的最大利用率,所有微源均采用PQ控制方式,飞轮运行在充电或者保持模式,微网的电压水平和额定频率都由配网来支撑和决定。而微网孤岛运行时,将蓄电池作为主电源,担当配网的角色来提供额定电压和频率。蓄电池采用 V_f 控制方法,输出额定电压和频率值,而其他的处于从属地位的微电源采取PQ控制法控制输出的功率和电压来保证微电网内部的功率

平衡。在整个微电网切换过程中,外部电网断电而蓄电池还未建立起稳定电压频率时,飞轮作为短期储能切换到放电模式,维持系统平衡稳定和负荷的不间断供电。具体控制过程如图6所示。

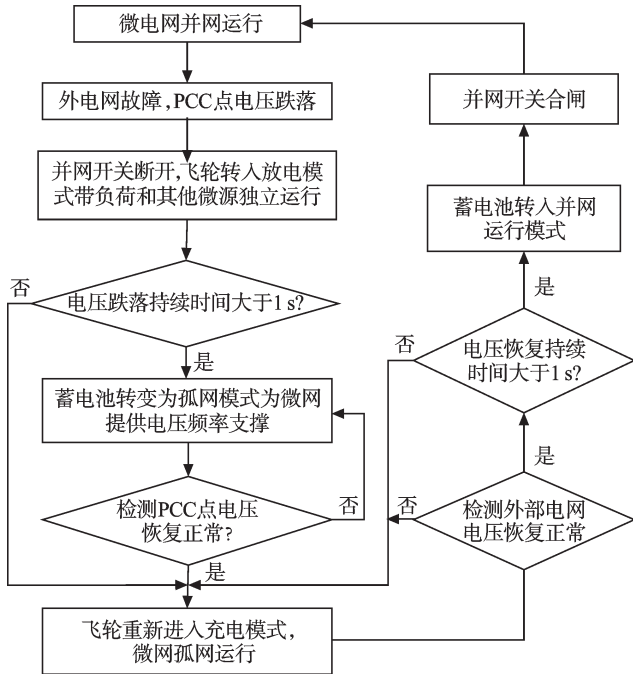


图6 微电网并网/孤岛切换控制策略流程图

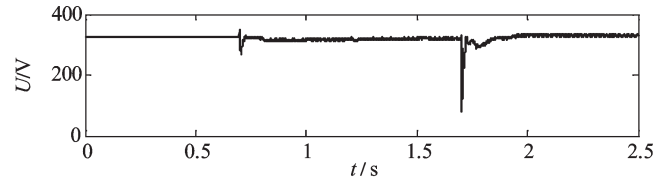
4 微网协调控制仿真

在 Matlab/Simulink 环境下,本研究针对所建立的微电网系统(如图1所示)进行仿真。仿真参数如下:微电网系统低压侧额定电压400 V,额定频率50 Hz;风机额定风速11 m/s,额定功率80 kW;光伏阵列电池额定光照1 000 W/m²,额定环境温度30 ℃,额定功率42 kW;燃料电池额定功率100 kW;飞轮转动惯量0.9 kg·m²,最高转速5 000 r/min,最低转速2 000 r/min,容量0.029 kW·h,最大输出功率40 kW;蓄电池单体规格:电压2 V,容量320 Ah,串联数5,并联数100;负荷1有功功率145 kW,无功功率15 kvar;负荷2有功功率60 kW,无功功率8 kvar;负荷3有功功率135 kW,无功功率10 kvar。

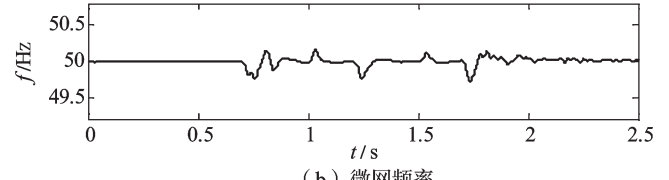
4.1 微电网并网转孤岛过程仿真分析

微网初始运行在并网状态,风机、光伏按最大功率追踪输出有功,按给定指令输出无功,燃料电池运行在PQ方式下,蓄电池带负载独立运行,飞轮运行在充电模式。假设电网电压在0.7 s时开始跌落,0.8 s时跌落到0,仿真结果如图7~11所示。

由图8可知,微网电压在外部电压跌落为0时,通过飞轮和柴油发电机的作用,微网能够一直维持其电压频率在额定值附近,保证电网故障后微网仍保持稳

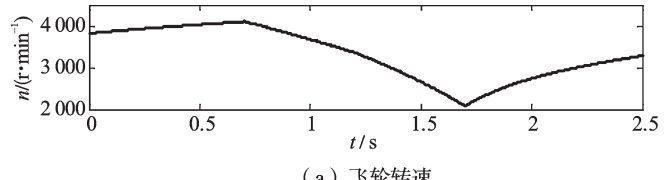


(a) 微网电压

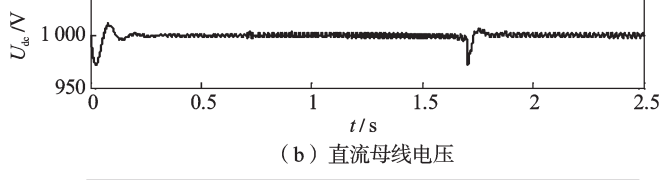


(b) 微网频率

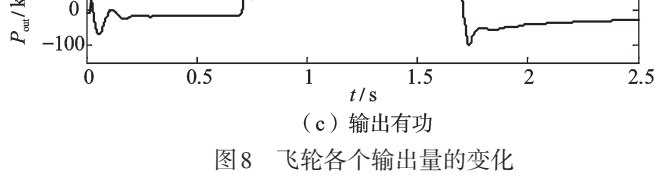
图7 微网电压和频率



(a) 飞轮转速

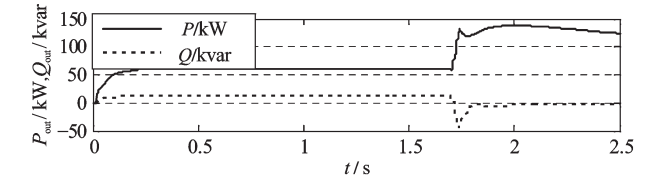


(b) 直流母线电压

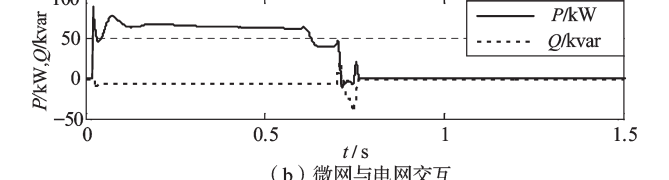


(c) 输出有功

图8 飞轮各个输出量的变化



(a) 蓄电池输出



(b) 微网与电网交互

图9 蓄电池的输出及微网与电网交互的功率

定供电。0.7 s前微网运行在并网模式,由大电网提供电压频率支撑,其电压频率为恒定值;0.7 s时电网电压跌落,蓄电池未建立起稳定的电压频率,飞轮作为短期支撑保证微网不间断供电。1.7 s后蓄电池建立起稳定电压频率,成为微网主电源。从图9中看到,0.7 s前飞轮运行在充电模式,向系统吸收功率,转速不断上升;0.7 s~1.7 s时作为微网短时支撑,向系统放电,转速不断下降;1.7 s时蓄电池并网开关合上,飞轮又进

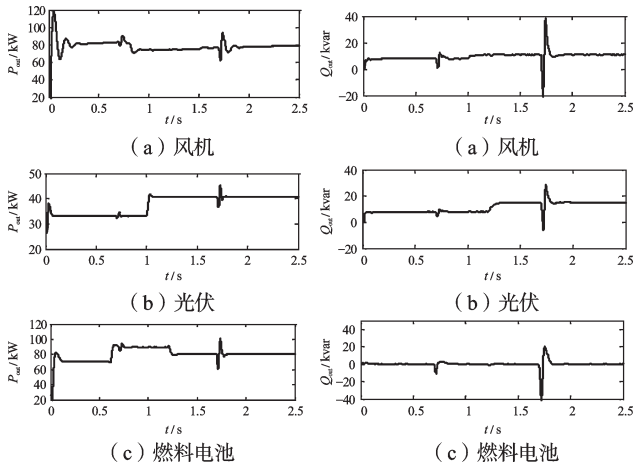


图10 分布式电源的输出有功曲线

入充电模式。整个过程中飞轮一直维持其直流母线电压基本恒定,保证微网不间断供电。从图10、图11中可以看出,0.7 s前电网补充微网内的不平衡功率,之后与微网开关断开,与微网交互功率为0;蓄电池1.7 s前给自带负载供电,并网后自动按微网系统功率缺额输出。所有分布式微源采用PQ控制,设定输入的风速和光照以及分布式电源的P、Q指令为阶跃信号,微电源输出功率据此输出。微网电压和频率如图12所示,图12中微网在1.7 s时由并网到孤网的切换过程中,其电压频率以及各分布式电源输出波动量都很小且暂态过程时间不超过0.1 s,保证了切换过程中良好的动态性能,减少了暂态冲击对微网的影响。

4.2 微网孤网转并网过程仿真

微网在孤岛运行模式下向并网模式转换的仿真结果如下:电网电压初始为0,0.5 s时开始恢复,0.6 s时达到额定电压,仿真结果如图12~16所示。

0.5 s前微网孤网运行,蓄电池作为微网的主电源维持微网的电压频率,0.5 s时电网电压开始恢复,此时本研究判定电压恢复持续时间大于1 s,即在1.5 s时,并网开关合闸,微网转入并网运行,此后微网的电压频率由电网支撑。从图12可看出,微网在孤岛和切

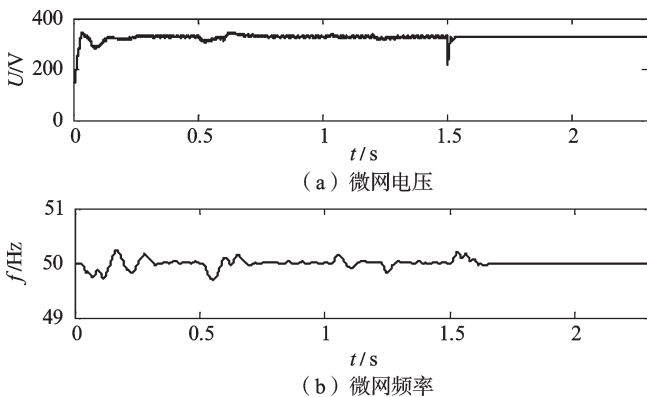


图12 微网电压和频率

换到并网运行的过程中均能保持电压频率的稳定。图13、图14显示,各分布式电源在孤网并网过程中采用PQ控制的控制方式不变,按照指定有功无功向微网输出功率,在孤网转并网时经历短时暂态过程后马上进入稳定运行状态。蓄电池在1.5 s前运行在V/f模式,自

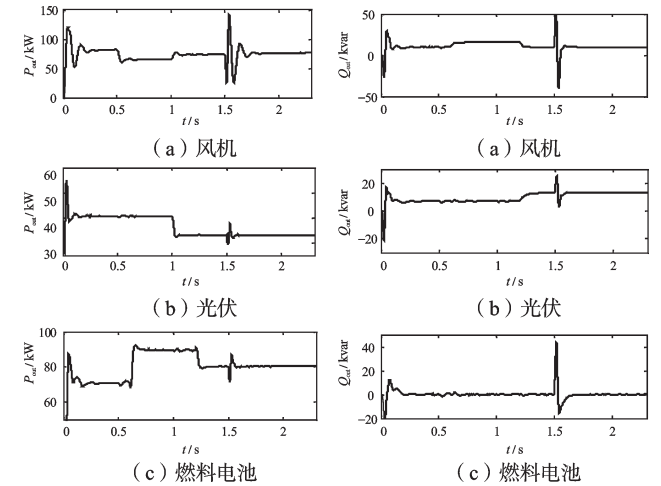


图13 各分布式电源的输出有功曲线

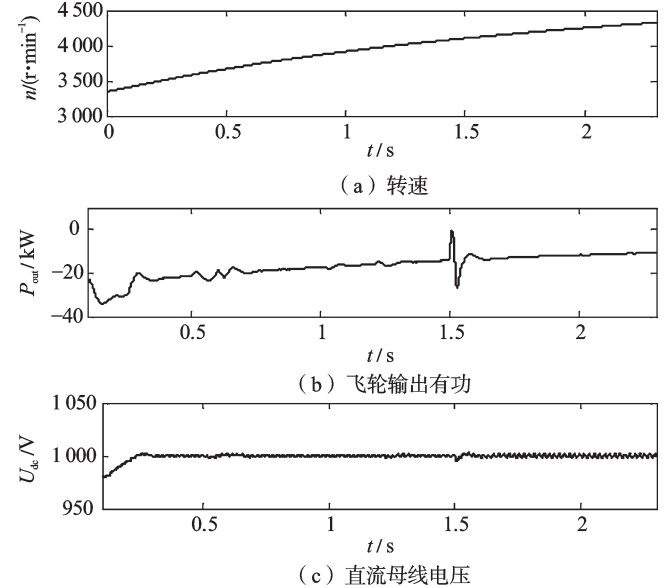


图14 各分布式电源的输出无功曲线

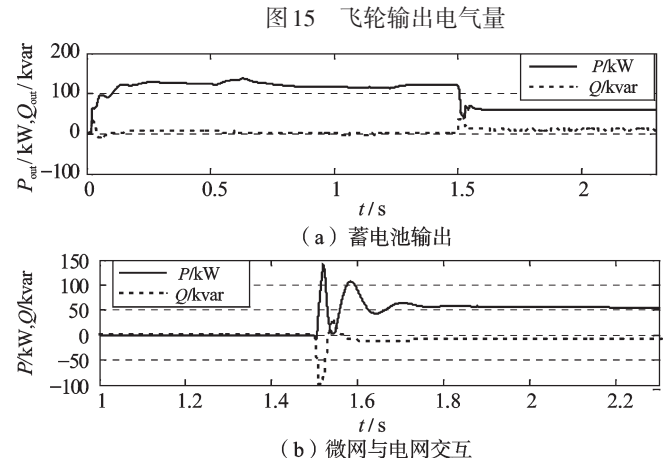


图15 飞轮输出电气量

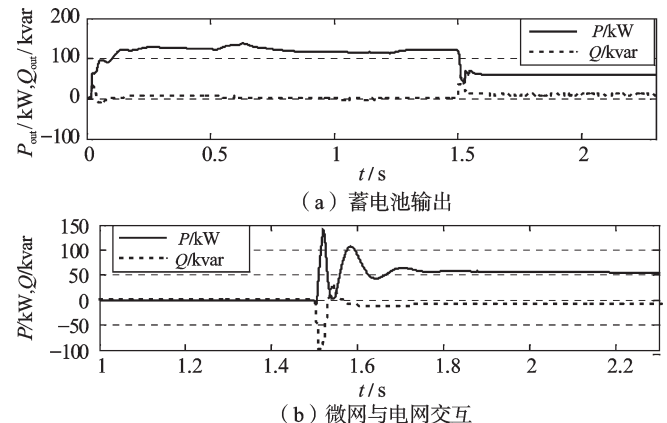


图16 蓄电池的输出及微网和电网的交互功率

动按微网有功无功缺额输出功率,保证微网内部功率平衡。1.5 s后蓄电池与电网断开,带负载独立运行。与并网转孤网切换不同,电网无建立稳定电压的过程,微网可以直接接入,不需要飞轮维持不间断供电。因此,如图16所示,飞轮一直运行在充电模式,从电网吸收有功功率,转速不断上升,母线电压也能保持恒定。

5 结束语

微电网灵活有效的控制策略是其可靠运行的根本保障。本研究采用了一种以蓄电池为主电源,用飞轮保证不间断供电的飞轮并网孤网切换时的控制策略。整个微网采用主从控制,并网时所有元件采用PQ控制,以保证微网的合理运行和最大限度的利用新能源,孤网时蓄电池采用 V/f 控制,为整个微网提供电压和频率支撑。微网运行在两种模式及其相互切换时,都能保证微网的供电电压频率维持在额定值,保证微电网内部稳定供电。从仿真结果可以看出,本研究采用该控制策略,微网在两种运行模式相互切换时,能很好地减少冲击,并迅速过渡到新的状态下稳定运行,保证了控制的高效和精确性。本研究通过对各个分布式电源建立详细的电磁暂态模型,保证了仿真的精确性,也为进一步研究微网特性奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] MADUREIRA A, MOREIRA C, LOPES J P. Secondary Load-Frequency Control for MicroGrids in Islanded Operation [C] //International Conference on Renewable Energy Power Quality, Germany:Frankfurt, 2005:1-4.
- [2] 纪明伟,张兴,杨淑英. 基于电压源逆变器的微电网控制策略[J]. 合肥工业大学学报, 2009, 32(11):1678-1682.
- [3] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7):98-103.
- [4] 郭力,王成山,郭凌旭,等. 对等模式下微网动态特性研究[C]. 国际供电会议, 2008.
- [5] CIMUCA G O, SAUDEMONT C, ROBYNS B. Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2006, 53 (4) : 1074-1085.
- [6] 陈家权,薛娟妮,杨钢锋,等. 直驱风电系统最大功率捕获技术的仿真分析[J]. 可再生能源, 2009, 27(1):23-26.
- [7] ZHOU Long, QI Zhi-ping. Modeling and Control of a Flywheel Energy Storage system for Uninterruptible Power Supply [C] //International conference on Sustainable Power generation and supply, Nanjing, China, 2009:1-6.
- [8] 杨仁花,黄伟,美丽,等. 微网结构和运行控制[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1):48-55.
- [9] LOPES J A P, MADUREIRA A G, RESENDE F O, et al. Control Strategies for Micro-Grids Emergency Operation [C] //International Conference on Future Power System. Amsterdam, Netherlands, 2005:1-6.
- [10] BARSALI S, CERAOLO M, PELACCHI P. Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply [C]. Power Engineering Society Winter Meeting, New York, US, 2002.
- [11] PIAGI P, LASSETER R H. Autonomous Control of Microgrids[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006.
- [12] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA AG. Defining control strategies for micro-grids islanded operation [J]. **IEEE Transaction on Power System**, 2006, 21 (2) : 916-924.
- [13] 池海涛,吴俊宏,艾芊. 含储能装置的直流微电网控制系统研究[J]. 低压电器, 2009(22):46-50.
- [14] 王志群,朱守真,周双喜. 逆变型分布式电源控制系统的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24):61-66.

[编辑:李辉]

(上接第544页)

- [4] 封维忠,杨丽,何君君. 基于磁传感器 MMC212 的电子指南针[J]. 物理实验, 2010, 30(3):16-18, 28.
- [5] 乔建忠,李艳,文丰. 一种各向异性磁阻传感器在车辆探测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5):106-108.
- [6] 李希胜,于广华. 各向异性磁阻传感器在车辆探测中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(6):577-590.
- [7] 马飞,李娜,吕玉祥. 基于各向异性磁阻传感器的车辆监测系统[J]. 微型机与应用, 2011, 30(5):118-120.
- [8] SEBASTIA J P, LLUCH J A, VIZCAINO J L. Signal conditioning for GMR magnetic sensors applied to traffic speed monitoring GMR sensors [J]. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2007, 137(2):230-235.
- [9] 美新半导体(无锡)有限公司. Dual-axis Magnetic Sensor, with I²C Interface[EB/OL]. [2009-05-04]. http://www.mem-sic.com.cn/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=11:datasheets&Itemid=84&lang=zh.
- [10] 秦建新,路林吉. 基于单片机的无线传感器网络设计[J]. 微计算机信息, 2008, 24(19):147-148, 158.
- [11] 潘霓,骆乐. 基于磁阻传感器的车辆检测算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19):245-248.

[编辑:张翔]