

# 含多种分布式电源的微网建模及并网控制仿真

毛盛龙<sup>1</sup>, 梅劲松<sup>1</sup>, 袁家斌<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:**针对微电网中分布式发电的控制策略问题, 利用 Matlab/Simulink 分别搭建了光伏电池、风力发电机、燃料电池及微型燃气轮机等分布式电源的模型, 并在此基础上建立了包含上述分布式电源的低压微网系统仿真系统。在并网控制策略方面, 光伏电池与风力发电机采用 P/Q 控制方式, 燃料电池与微型燃气轮机采用下垂控制方式。通过仿真研究了该系统模型及控制策略在并网与孤岛模式下的动态特性。结果验证了该系统的可行性和有效性, 为建立微网实验平台和示范工程奠定了基础。

**关键词:**分布式电源; 微网; P/Q 控制; 下垂控制

**中图分类号:** TP39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2013)06-0158-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-629X.2013-06.041

## Micro-Grid Modeling and Paralleling Control Simulation with Different Types of Distributed Generations

MAO Sheng-long<sup>1</sup>, MEI Jin-song<sup>1</sup>, YUAN Jia-bin<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at distributed generation control strategies in the micro-grid, use Matlab/Simulink to build the distributed generation models of the photovoltaic generation, the wind turbine, the fuel cell and the micro-turbine respectively, and then establish a low voltage micro-grid system involving the distributed generation above. On the respect of control strategy, the photovoltaic generation and the wind turbine is used P/Q control, and the fuel cell and the micro-turbine droop control. The dynamic characteristics of these system models and control strategies under the grid-connected and island mode were studied through the simulation. The results verify the feasibility and validity of this system, which is laid the foundation of the establishment of micro-grid experimental platform and demonstration project.

**Key words:** distributed generation; micro-grid; P/Q control; droop control

## 0 引言

微网是指由分布式电源 (Distributed Generation, DG)、储能系统、负荷及保护装置汇集而成的配电子系统<sup>[1]</sup>。微网内的 DG 主要包含微型燃气轮机、燃料电池、风力发电、光伏发电、蓄电池等。微电网内部电源的能量转换主要由电力电子器件负责, 并提供必须的控制; 同时微电网相对于外部大电网表现为单一的受控单元<sup>[2]</sup>。微电网既可以并网运行, 同时在主电网故障时又可以脱离电网进入孤岛模式; 当主电网恢复正

常后, 又可以重新进入并网模式<sup>[3,4]</sup>。

文中通过算例仿真研究了包含四种不同 DG 的微网的动态行为。重点研究了 P/Q 控制与下垂控制在微网中的综合控制方式。

## 1 分布式电源模型

### 1.1 微型燃气轮机

微型燃气轮机模型如图 1 所示, 模型及参数主要参考 Rowen 的单轴循环重负荷微燃机模型<sup>[5]</sup>。该模

收稿日期: 2012-09-03

修回日期: 2012-12-08

网络出版时间: 2013-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61104020); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目 (NP2001053)

作者简介: 毛盛龙 (1988-), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、分布式发电系统; 梅劲松, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为无人机飞行控制技术、自动化控制与检测技术、超声探伤检测技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130514.1707.004.html>

型主要由温度控制系统、速度控制系统、加速度控制以及燃料供给系统组成。排气温度函数  $F_{cn}$  与转矩函数  $F_{cn1}$  分别为:

$$F_{cn} = 950 - 700(1 - W_f) + 55(1 - \omega) \quad (1)$$

$$F_{cn1} = 1.3(W_f - 0.23) + 0.5(1 - \omega) \quad (2)$$

其中  $W_f$  为燃料量信号,  $\omega$  为微燃机转速。

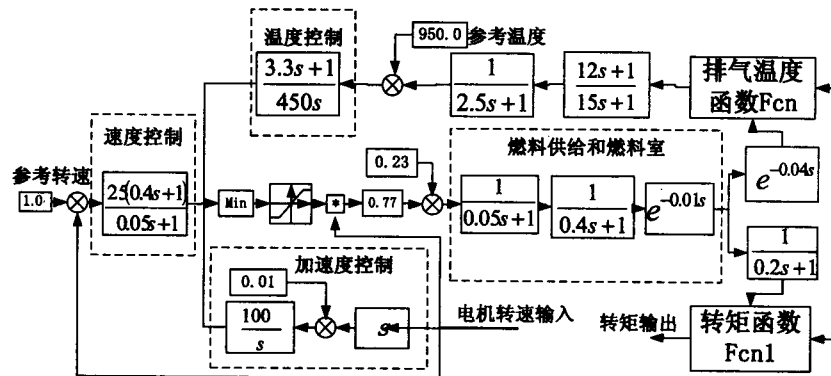


图1 微型燃气轮机仿真模型

## 1.2 光伏阵列模型

文中采用工程用的光伏阵列模型<sup>[6,7]</sup>。当光伏阵列电压为  $V$  时,其对应电流为:

$$I = I(1 - C_1(e^{(V-DV)/C_1V_{sc}} - 1)) + DI \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_1 = (1 - I_m/I_{sc}) e^{-V_m/C_1V_{sc}} \\ C_2 = (V_m/V_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m/I_{sc}) \\ DI = \alpha R/R_{ref} DT + (R/R_{ref} - 1) I_{sc} \\ DV = -\beta \beta DT - R_s DI \\ DT = T - T_{ref} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $I_{sc}$  为短路电流;  $V_{oc}$  为开路电压;  $I_m$  和  $V_m$  分别为最大功率点电流和电压;  $R$  和  $R_{ref}$  分别为太阳辐射值和辐射参考值;  $T$  和  $T_{ref}$  分别为电池温度和温度参考值;  $R_s$  为光伏阵列串联电阻;  $\alpha$  为电流变化温度系数;  $\beta$  为电压变化温度系数。

光伏系统的最大功率点跟踪采用扰动观察法<sup>[8]</sup>。通过对阵列输出电压施加扰动,再根据输出功率的变化决定下一步的动作以实现最大功率跟踪。

## 1.3 燃料电池模型

文中选择固体氧化物燃料电池 SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) 作为发电模型<sup>[9,10]</sup>,如图2所示。

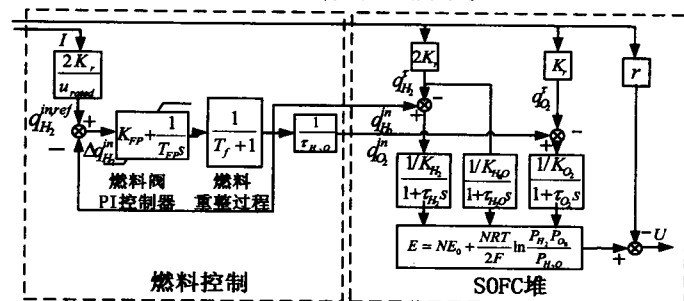


图2 SOFC 动态模型

其中,  $r$  为等效总欧姆损耗电阻;  $E$  为内电动势;  $N$  为电池的数目;  $E_0$  为电池的理想电动势;  $R$  为通用气体常数;  $T$  为电池的绝对温度;  $F$  为法拉第常数; 氢气、水、氧气的分压为  $P_{H_2}$ 、 $P_{H_2O}$ 、 $P_{O_2}$ ; 阀摩尔常数为  $K_{H_2}$ 、 $K_{H_2O}$ 、 $K_{O_2}$ , 响应时间常数为  $\tau_{H_2}$ 、 $\tau_{H_2O}$ 、 $\tau_{O_2}$ ;  $K_r$  为常量, 其值为  $N/(4F)$ 。

## 1.4 风力机模型

风力发电机由风力机和发电机组组成。其中风力机的机械功率  $P$  及输出转矩  $T$  为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^2 C_p(\lambda, \beta) / \lambda \quad (6)$$

其中:  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风轮半径;  $V$  为风速;  $C_p(\lambda, \beta)$  为风能利用系数<sup>[11]</sup>, 其中  $\lambda = \omega R/V$ ,  $\omega$  为风轮角速度。

## 2 微网控制策略

### 2.1 并网模式下的 P/Q 控制策略

P/Q 控制策略是通过调节有功及无功电流使其对参考电流进行跟踪<sup>[12]</sup>, 控制方式框图如图3所示:

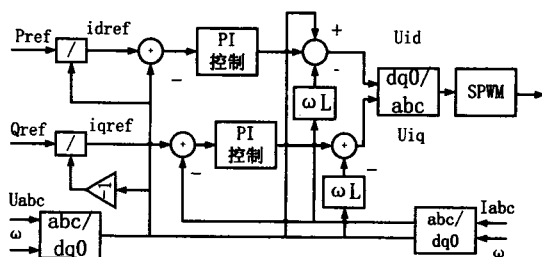


图3 P/Q 控制策略框图

在该控制方式下,通过 Park 变换将逆变器输出的三相电压转换成  $dq0$  分量,并使  $q$  轴分量  $u_q = 0$ ,得出逆变器输出功率表达式为:

$$\begin{cases} P_{ref} = u_d \times i_d + u_q \times i_q = u_d \times i_d \\ Q_{ref} = -u_d \times i_q + u_q \times i_d = -u_d \times i_q \end{cases} \quad (7)$$

则电流内环  $dq$  轴参考值为:

$$\begin{cases} i_{d,ref} = P_{ref}/u_d \\ i_{q,ref} = -Q_{ref}/u_d \end{cases} \quad (8)$$

由(8)式可知,对逆变器输出功率的控制问题转为对电流的控制问题,有功功率  $P$  由  $i_d$  决定,无功功率  $Q$  由  $i_q$  决定,从而实现了有功和无功功率的解耦控制。

### 2.2 孤岛模式下的下垂控制

下垂控制策略源于逆变器并联技术,各逆

变单元的输出有功功率和无功功率分别如下所示<sup>[13,14]</sup>:

$$\begin{cases} P_n = \frac{UU_n}{X_n} \delta_n \\ Q_n = \frac{UU_n - V^2}{X_n} \end{cases} \quad (9)$$

由(9)式可知有功功率与角 $\delta_n$ 有关,而电压差值与无功功率有关,因此有功功率控制即频率控制可以通过公角 $\delta_n$ 进行控制,而电压差值可以直接通过无功功率进行控制。其控制框图如图4所示:

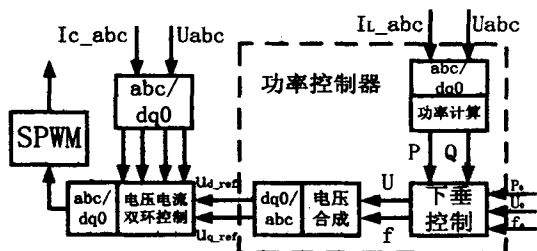


图4 下垂控制策略框图

### 3 微电网并网运行仿真分析

文中微电网仿真系统的示意图如图5所示。其中:DG1为100kW燃料电池系统,采用下垂控制;DG2的8kW光伏发电系统、DG3的30kW微型燃气轮机以及DG4的15kW风力发电系统均采用P/Q控制;微燃机和风力发电系统的发电机部分采用Matlab自带的永磁同步电机仿真模块(Permanent Magnet Synchronous Machine)<sup>[15,16]</sup>。微网通过10kV/0.4kV变压器接入10kV主配网。为计算方便,主配网采用10kV交流电源。

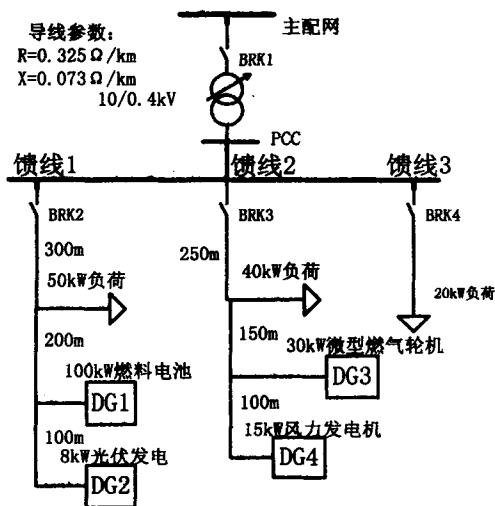


图5 微电网仿真系统示意图

下面分析四种情况下微网动态特性。

- 1) 0~0.4s时,断路器BRK1闭合,系统处于并网状态;
- 2) 0.4~1s时,断路器BRK1断开,系统进入孤岛

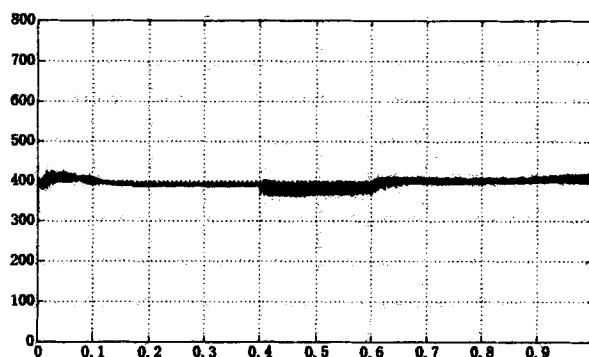
模式;

3) 0.6s时,断路器BRK4断开,20kW负荷脱离微网,仿真相关波形如图6、7所示。

在0~1s的仿真过程当中,如图6所示,PCC点电压稳定在0.4kV左右,孤岛运行过程中有小幅度震荡。微网频率稳定在50Hz左右。

本算例中,微网总负荷110kW。仿真过程功率输出如图7所示,并网时燃料电池、微型燃气轮机、风力发电机、光伏电池分别发出有功功率80、30、15、7.8kW;孤岛运行时燃料电池在略微波动后稳定在52~53kW,其余DG在P/Q控制作用下在略微波动后都稳定下来。在断开20kW负荷后,燃料电池有功功率降至40kW,其余DG有功输出均有小幅度跌落。

PCC点频率(单位:Hz)



PCC点频率(单位:Hz)

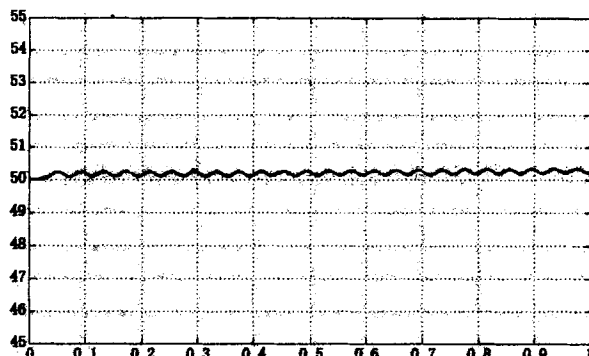


图6 PCC点电压幅值与频率

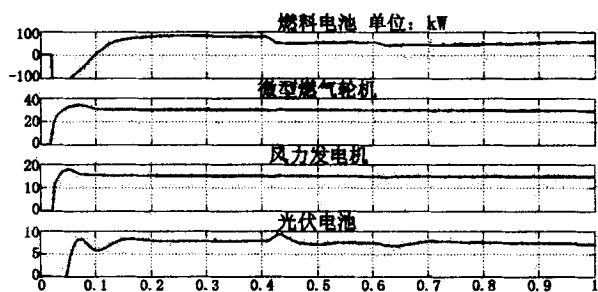


图7 各DG输出功率

### 4 结束语

仿真结果表明选用下垂控制的燃料电池能够有效跟踪负荷变化,对电压、频率进行调节,使得微网在孤

岛运行时的电压和频率得到稳定。其余 DG 在 P/Q 控制下很好地稳定了功率输出。

#### 参考文献:

- [1] European research project MicroGrids[R/OL]. [2008-06-12]. <http://MicroGrids.power.ece.ntua.gr>.
- [2] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.
- [3] Lasseter R, Akhil A, Marnay C, et al. White paper on integration of distributed energy resources: the CERTS MicroGrid concept[R/OL]. [2008-06-12]. [http://certs.lbl.gov/pdf/LBNL\\_50829.pdf](http://certs.lbl.gov/pdf/LBNL_50829.pdf).
- [4] Lasseter R H, Piagi P. MicroGrid; a conceptual solution[C]// Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: [s. n.], 2004.
- [5] Rowen I. Simplified Mathematical Representations of Heavy-duty Gas Turbines[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(4): 865-869.
- [6] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4): 409-412.
- [7] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [8] 李炜, 朱新坚. 光伏系统最大功率点跟踪控制仿真模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(6): 239-243.
- [9] Padull S J, Ault G W, McDonald J R. An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1-2): 495-500.
- [10] Zhu Y, Tomsovic K. Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(1): 1-11.
- [11] Sloatweg J G, Polinder H, Kling W L. Initialization of wind turbine models in power systems dynamics simulation[C]// IEEE Proto Power Tech Conference. Porto, Portugal: [s. n.], 2001.
- [12] 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): 98-102.
- [13] 纪明伟. 分布式发电中微网技术控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [14] 鞠新洪. 分布式微网电力系统中多逆变电源的并网控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [15] 李军军, 吴政球. 微型燃气轮机分布式发电系统的建模和仿真[J]. 湖南大学学报, 2010, 37(10): 57-62.
- [16] 董桐宇. 直驱式风力发电机的建模与并网仿真分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.

(上接第 157 页)

需要进行: 震音→移相→混响→镶边→合唱; 合唱→延时→失真。共计 6 次切换。

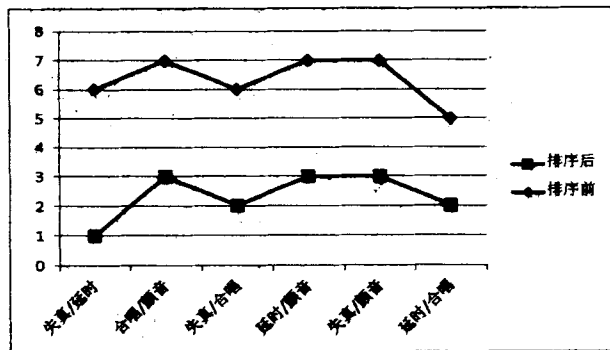


图2 系统仿真图

而经过实验排序后的结果只需要进行: 失真→延时→合唱。只需 2 次切换。

## 5 结束语


综上所述, 具有存储、排序功能的智能数字效果器较普通数字效果器很大程度地提高了用户选择的效率, 每当用户多次使用某一音效时, 该效果就会随着用户的使用渐渐地移到前面, 以方便用户下一次选取, 文中提出的具有存储、排序功能的智能数字效果器, 同时能满足用户的个性化需求, 提高用户选择效率。该系统为智能数字效果器的研究提供了一个新的思

路<sup>[9-11]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 张雄伟, 陈铁勇, 陈亮. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [2] 游林儒, 景博, 唐郁文. 基于 ADSP-21261 的数字效果器的设计[J]. 电声技术, 2005(12): 22-25.
- [3] Malko M, Kovacevic J. Implementation of digital audio effects for electric guitar on DSP platform[C]//19th Telecommunications Forum on TELFOR. [s. l.]: [s. n.], 2011: 1099-1102.
- [4] 陆秋琴, 黄光球, 周娇. 基于生物记忆原理的智能拼音输入法模型[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(9): 56-61.
- [5] 马忠梅, 籍顺心, 张凯. 单片机的 C 语言应用程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [6] Nonzee V, Poongbunkor P. DSP audio effects[M]. [s. l.]: [s. n.], 2001.
- [7] Zoltzer U. Digital audio effects[M]. [s. l.]: Jhon Wiley & Sons, 2005: 63-75.
- [8] 刘学练, 张航, 熊富强. TMS320 在交通流视频检测中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(12): 27-30.
- [9] Puckette M. 电子音乐技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [10] 柯蒂斯·罗兹. 计算机音乐技术[M]. 北京: 人民音乐出版社, 2011.
- [11] 许鹏, 陆达, 张小夫. 新媒体艺术论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

含多种分布式电源的微网建模及并网控制仿真

作者：[毛盛龙](#)，[梅劲松](#)，[袁家斌](#)，[MAO Sheng-long](#)，[MEI Jin-song](#)，[YUAN Jia-bin](#)  
作者单位：[毛盛龙, 梅劲松, MAO Sheng-long, MEI Jin-song\(南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京, 210016\)](#)，[袁家斌, YUAN Jia-bin\(南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 江苏南京, 210016\)](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)   
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)  
年，卷(期)：2013, 23(6)

本文链接：[http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201306041.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201306041.aspx)