

文章编号:1674-2869(2017)04-0394-09

# 直流微网供电系统控制技术研究

周广玉<sup>1</sup>,高 腾<sup>2\*</sup>

1. 泰安航天特种车有限公司, 山东 泰安 271000;
2. 武汉永力睿源科技有限公司, 湖北 武汉 430025

**摘 要:** 根据风能发电与太阳能发电的相辅特性以及蓄电池的储能特性,构建了一套多电源供电的直流微网系统发电模型.通过对此系统的能量流动及运行特性的分析,提出了此系统的能量管理方案.分别绘制出了直流微网各组成部分的模块方框图以及仿真模型.针对逆变器的拓扑结构得出了其控制的数学模型,采用基于SVPWM的电压电流双闭环控制实现了微网在并网和离网两种运行模式下的稳定运行和自动平滑切换.最后通过仿真测试验证了分布式电源、蓄电池、负载以及电网在不同的工况下此能源控制方案的可行性,实现了此供电系统的稳定运行.

**关键词:** 风力发电;太阳能发电;蓄电池;直流微网;供电系统控制技术

**中图分类号:**TK513.5      **文献标识码:**A      **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2017.04.014

## Control Technology of Direct-Current Micro-Grid Power Supply System

ZHOU Guangyu<sup>1</sup>,GAO Teng<sup>2\*</sup>

1. Taian Special Vehicle Co., LTD, Tai'an 271000, China;
2. Wuhan Yongli Rayco Technology Co., LTD, Wuhan 430025, China

**Abstract:** This paper constructs a multiple power supply model of direct current micro grid system based on characteristics of the supplement between the wind and solar power generation and the battery storage of the direct current (DC) micro grid power system. And the paper also proposes solutions for the energy management of the system by analyzing the energy flowing and operating. In addition, the paper draws the module block diagrams and the simulation models of the DC micro grid components. Then the mathematical model is obtained according to the topology construction of the inverter. Besides, the stable operation and automatic smooth switch of the micro grid is achieved both in grid and off grid operation model by using the double closed loop control of the SVPWM based voltage and current. Finally, the feasibility of the energy controlling is verified by the simulation test under different working conditions such as distributed generation, the load and the power grid, realizing the stable operation of the system.

**Keywords:** wind power generation; solar power generation; battery; direct current micro grid; controlling technology of power system

新能源的开发和利用是当前社会发展进步的一个重要环节.风能和太阳能做为可再生能源,在时间和空间上具有互补的特性,开发风与光互补复合发电系统可以最大限度地利用风能和太阳

能,是新能源开发利用的有效途径<sup>[1-2]</sup>.

由于分布式发电系统是一个不被控制的单元,并且电网为了减小其它能源对其带来的干扰采取限定和隔离的工作模式,这样就大大降低了

收稿日期:2017-03-20

作者简介:周广玉,助理工程师. E-mail: guangyu0604@163.com

\*通讯作者:高 腾,硕士,工程师. E-mail:56507925@qq.com

引文格式:周广玉,高腾. 直流微网供电系统控制技术研究[J]. 武汉工程大学学报,2017,39(4):394-402.

ZHOU G Y,GAO T. Control technology of direct current micro grid power supply system [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(4):394-402.

分布式能源的利用效率<sup>[3]</sup>. 为了让分布式能源与电网的矛盾得到解决,提高分布式发电系统的利用率,以分布式电源为主导的直流微网系统得到了人们的关注. 其功能特点主要表现为:

- 1)微网能够补偿电网的一些缺陷. 比如电网正常工作时电压和频率会出现不稳定的现象,微网可以维持其稳定运行. 电网出现故障时,微网也可以离网运行,起到不间断供电的作用. 并且微网还可以对一些偏远的地方提供供电,弥补了电网供电的局限性.
- 2)微网可以改善电网的电能质量. 微网系统大部分都采用的是电力电子设备,因此它可以提供给一些有特别电能需求的用户使用<sup>[5]</sup>.

1 直流微网系统

以太阳能光伏发电和风力发电做为分布式供电电源,蓄电池做为分布式电源的储能设备来构建

一套多电源供电的直流微网系统. 其中太阳能发电系统采用MPPT控制可实现光能的最大利用,风力发电系统采用最大风能捕捉可实现风能的最大利用. 逆变器采用SVPWM电压、电流双闭环控制,可实现微网在并网和离网两种工作模式之间的来回切换. 该系统可以根据用户的不同用电需求来灵活配置使用<sup>[6-11]</sup>,使得系统具有可调度性.

2 直流微网系统的能量管理

直流微网系统结构如图1所示,从图1中可以看出直流微网供电系统的能量主要来自于风能和太阳能,蓄电池在供电充足的情况下吸收剩余部分的能量<sup>[12-15]</sup>;当风能和太阳能提供的能量不足时,蓄电池将释放其存储的能量,从而保证了微网系统的电能质量. 为了合理分配系统在不同的外界环境条件下的能量流动形式,归纳设计了9种工作模式,其控制流程如图2所示.

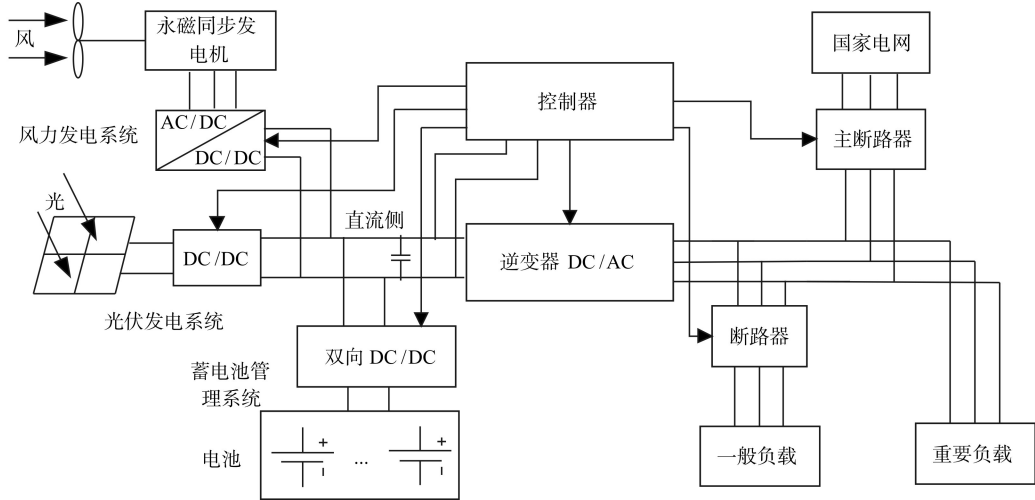


图1 直流微网系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of direct current micro grid

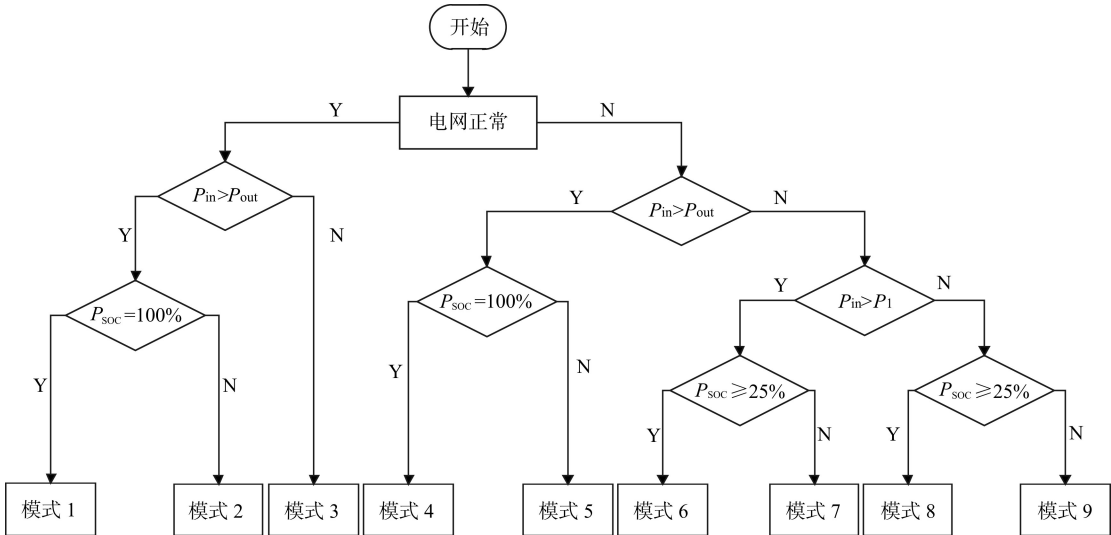


图2 微网供电系统控制流程图

Fig. 2 Control flowchart of micro power system

其中  $P_{in}$  为分布式电源输入功率、 $P_1$  为重要负载所需要的功率、 $P_2$  为一般负载所需要的功率、 $P_{out}$  为重要负载和一般所需的总功率。

电网正常供电时：

模式 1: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 大于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 并且蓄电池电能为 100% 时, 双向 DC/DC 不工作, 输入能量全部并网逆变, 维持母线电压 (800 V) 稳定。

模式 2: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 大于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 并且蓄电池电能容量小于 100% 时, 双向 DC/DC 处于 Buck 工作模式, 输入能量一部分给电池充电, 一部分并网逆变, 维持母线电压 (800 V) 稳定。

模式 3: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 小于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 时, 无论电池处于何种状态双向 DC/DC 都不工作, 输入能量全部并网逆变, 剩余能量由电网提供, 且维持母线电压 (800 V) 稳定。

电网异常时：

模式 4: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 大于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 并且蓄电池电能为 100% 时, 双向 DC/DC 不工作, 输入能量全部离网逆变, 维持母线电压 (800 V) 稳定。

模式 5: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 大于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 并且蓄电池电能容量小于 100% 时, 双向 DC/DC 处于 Buck 工作模式, 输入能量一部分给电池充电, 一部分离网逆变, 维持母线电压 (800 V) 稳定。

模式 6: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 小于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 大于重要负载所需的能量 ( $P_1$ ) 并且电

池电能容量不少于 25% 时, 电池放电, 双向 DC/DC 处于 Boost 工作模式, 输入能量全部离网逆变, 维持母线电压 (800 V) 稳定。

模式 7: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 小于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 大于重要负载所需的能量 ( $P_1$ ) 并且电池电能容量小于 25% 时, 为了延长电池的寿命电池停止放电, 双向 DC/DC 不工作, 输入能量全部离网逆变, 断路器断开一般负载供电电路, 维持母线电压 (600 V) 稳定。

模式 8: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 小于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 且小于重要负载所需的能量 ( $P_1$ )、并且电池电能容量不少于 25% 时, 电池放电, 双向 DC/DC 处于 Boost 工作模式, 输入能量全部离网逆变, 断路器断开一般负载供电电路, 维持母线电压 (600 V) 稳定。

模式 9: 分布式电源供电 ( $P_{in}$ ) 小于总负载所需的能量 ( $P_{out}$ ) 且小于重要负载所需的能量 ( $P_1$ )、并且电池电能容量小于 25% 时, 此时能量已经不足以满足逆变的要求, 电池停止放电, 双向 DC/DC 不工作, 逆变器停止工作。

综上所述可以得出系统在不同的运行环境条件下, 可利用 DC/DC 具备能量的双向流动特性来实现电池充放电的可靠运行。当电网供电正常时, 为了延长电池寿命, 无论在什么情况下电池均不提供能量, 只有在离网且分布式电源供电不足以支撑时, 电池才提供能量来维持母线电压稳定, 以保证逆变器输出的电能质量。其 9 种工作模式如表 1 所示。

表 1 直流微网工作模式  
Tab. 1 Working mode of direct current micro grid

电网状态 grid status	分布式电源 distributed power	蓄电池工作状态 battery working state	充/放电控制状态 charge / discharge control state	直流母线控制策略 DC bus control strategy	逆变器控制状态 inverter control status	负载 load
正常	能量充足	$P_{soc}=100\%$	停止工作	设定 $U_{dref}$ 为 800 V	能量全部并网逆变	全部负载
正常	能量充足	$P_{soc}<100\%$	充电	设定 $U_{dref}$ 为 800V	能量部分并网逆变	全部负载
正常	能量不足	—	停止工作	设定 $U_{dref}$ 为 800 V	能量全部并网逆变	全部负载
故障	能量充足	$P_{soc}=100\%$	停止工作	设定 $U_{dref}$ 为 800 V	能量全部离网逆变	全部负载
故障	能量充足	$P_{soc}<100\%$	充电	设定 $U_{dref}$ 为 800 V	能量部分离网逆变	全部负载
故障	满足重要负载	$P_{soc} \geq 25\%$	放电	设定 $U_{dref}$ 为 800 V	能量全部离网逆变	全部负载
故障	满足重要负载	$P_{soc} < 25\%$	停止放电	设定 $U_{dref}$ 为 600 V	能量全部离网逆变	重要负载
故障	不满足重要负载	$P_{soc} \geq 25\%$	放电	设定 $U_{dref}$ 为 600 V	能量全部离网逆变	重要负载
故障	不满足重要负载	$P_{soc} < 25\%$	停止放电	系统停止工作	停止逆变	—

3 仿真模型

3.1 光伏电池模型

采用太阳能电池生产厂家提供的参数来建立满足工程要求的光伏电池模型如图3所示,光伏电池电流和电压关系为:

$$\begin{cases} I_{pv}=I_{sc}-I_0\exp[\frac{m(U_m+I_mR_s)}{T}] \\ I_{sc}=I_{scref}\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}[1+\alpha(T-T_{ref})] \\ U_{oc}=U_{ocref}[1-\gamma(T-T_{ref})]\ln[e+\beta(\gamma-\gamma_{ref})] \\ I_m=I_{mref}\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}[1+\alpha(T-T_{ref})] \\ U_m=U_{mref}[1-\gamma(T-T_{ref})]\ln[e+\beta(\gamma-\gamma_{ref})] \\ m=\frac{T\ln(1-I_m/I_{sc})}{U_m+I_m-U_{oc}} \\ I_0=I_{sc}\exp(-\frac{mU_{oc}}{T}) \\ R_s=\frac{U_{oc}}{\ln(I_{sc}/I_0)}\ln(\frac{I_{sc}-I_m}{I_0})-U_m \\ I_m \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中  $I_{pv}$  为输出电流;  $U_{pv}$  为输出电压;  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_{sc}$  为短路电流;  $U_{oc}$  为开路电压;  $I_m$  为最大功率点电流;  $U_m$  为最大功率点电压;  $P_m$  为最大功率点功率;  $T_{ref}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\gamma$  为太阳辐照度;  $\gamma_{ref}=1\text{ }000\text{ W/m}^2$ ,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为补偿系数,取  $\alpha=0.002\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $\beta=0.000\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $\gamma=0.002\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

光伏电池仿真模型如图4所示.

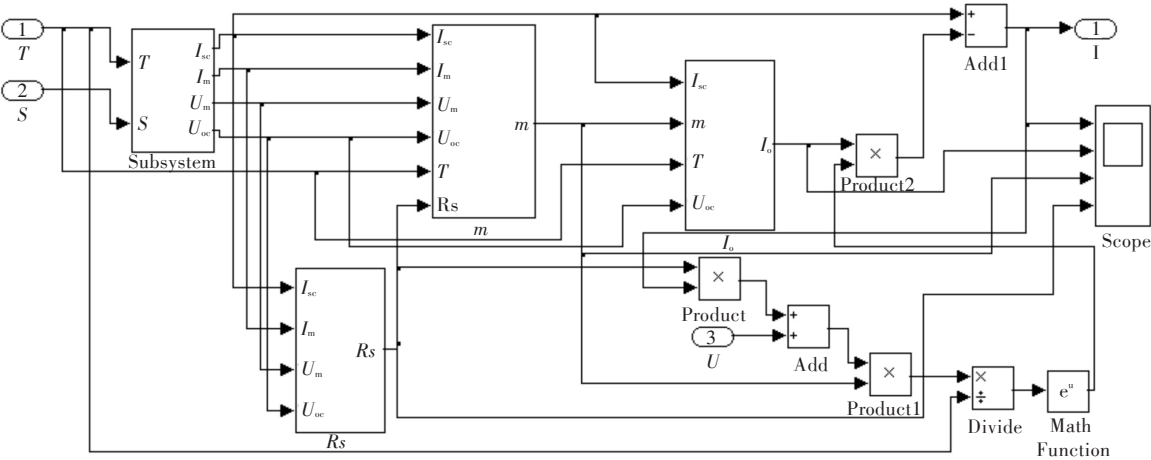


图4 光伏电池的仿真模型

Fig.4 Photovoltaic cells simulation model

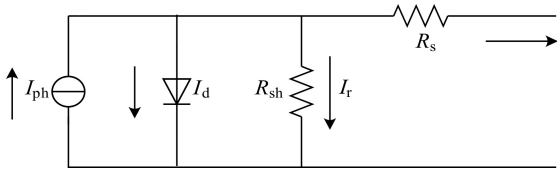


图3 光伏电池的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of photovoltaic cells

3.2 风力发电机模型

风力机模拟根据风速和风力机转速,计算风力机输出转矩,然后将该转矩作为发电机输入转矩.图5为风力发电机的结构图,由风力机的相关理论可知:

$$\begin{cases} P_w=\frac{1}{2}\rho Av^3 \\ P_m=\frac{1}{2}\rho\pi C_p(\lambda,\beta)v^3R^2 \\ C_p=P_m/P_w \\ C_p(\lambda,\beta)=0.5176(116\frac{1}{\lambda_1}-0.4\beta-5)e^{-21\frac{1}{\lambda_1}}+0.0068\lambda \\ \lambda=\frac{\omega R}{v} \\ \frac{1}{\lambda_1}=\frac{1}{\lambda+0.08\beta}-\frac{0.035}{\beta^3+1} \\ T=\frac{P_m}{\omega} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $\rho$  为空气密度,  $A$  为风力机叶片扫掠面积,  $v$  为风速,  $C_p$  为风能利用参数,  $P_w$  为风力机的输出功率,  $P_m$  为风力机的输出功率,  $\lambda$  为叶尖速比,  $\beta$  为桨矩角,  $R$  为风机半径,  $T$  为输出转矩.

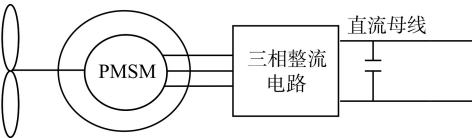


图5 风力发电机的结构图

Fig.5 Structure diagram of wind power generator

仿真模型如图6所示.

3.3 蓄电池模型

蓄电池的等效模型如图7所示.其中受控源  $E_b$  的表达式为:

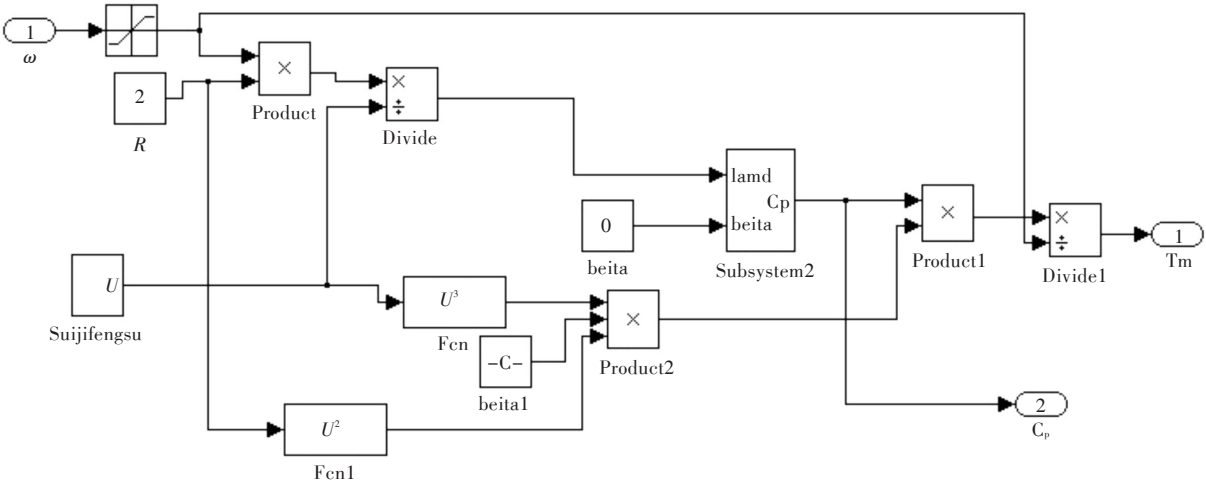


图 6 风力机仿真模型  
Fig. 6 Simulation model of wind power generator

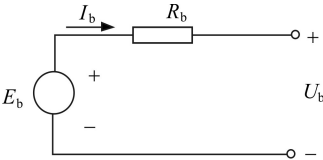


图 7 蓄电池等效模型  
Fig. 7 Battery equivalent model

$$E_b = E_0 - U_k \frac{Q}{Q - \int idt} + C \exp(-B \int idt). \quad (3)$$

式(3)中： $E_0$ 为电池的恒定电压； $E_b$ 为电池的空载电压； $U_k$ 为极化电压； $Q$ 为电池的容量； $C$ 为指数区域幅值； $B$ 为指数区域时间常数的倒数。

蓄电池仿真模型如图 8 所示。

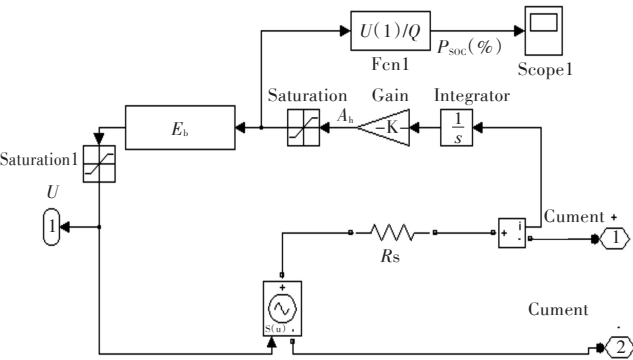


图 8 蓄电池仿真模型  
Fig. 8 Battery simulation model

4 微网逆变器模型及控制技术研究

逆变器部分采用的是基于 SVPWM 电压、电流双闭环控制策略的三相电压源型并网逆变器，其拓扑结构如图 9 所示。

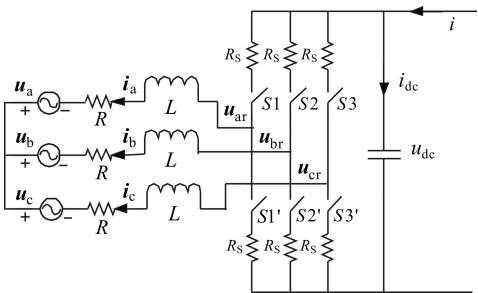


图 9 三相电压型逆变器的拓扑结构  
Fig. 9 Topology structure of three phase voltage source inverter

其中： $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 是输出的三相电流， $i_{dc}$ 为直流母线的电流， $i$ 是输入电流， $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 是电网电压， $u_{ar}$ 、 $u_{br}$ 、 $u_{cr}$ 是逆变器输出电压， $u_{dc}$ 是直流母线电压， $s_a$ 、 $s_b$ 、 $s_c$ 为桥臂的开关函数。

根据  $i_a + i_b + i_c = 0$ 、 $u_a + u_b + u_c = 0$  可得三相电压型逆变器在三相静止坐标系下的数学模型。

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = u_a - Ri_a - (s_a - \frac{s_a + s_b + s_c}{3})u_{dc} \\ L \frac{di_b}{dt} = u_b - Ri_b - (s_b - \frac{s_a + s_b + s_c}{3})u_{dc} \\ L \frac{di_c}{dt} = u_c - Ri_c - (s_c - \frac{s_a + s_b + s_c}{3})u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i - (s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c) \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行坐标变换，可以得到同步旋转的  $d$ - $q$  轴坐标系下的数学模型：

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q - S_d u_{dc} + u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega Li_d - S_q u_{dc} + u_q \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = -S_d i_d - S_q i_q + i \end{cases} \quad (5)$$

在并网状态下,如图 13 仿真图形所示,分布式能源提供能量在 0.15 s 的时候发生下降,此时供电不足以负载使用,剩余的能量通过电网供给来维持母线电压稳定,母线电压略有下降. 在 0.3 s 的时候输入能量恢复,母线电压稳定回到了 800 V. 在分布式电源能量变化时,控制系统能量流动模式如下:  $P_{\text{soc}}=100\%$  时由模式 1 切到模式 3 再到模式 1;  $P_{\text{soc}}<100\%$  时由模式 2 切到模式 3 再到模式 2.

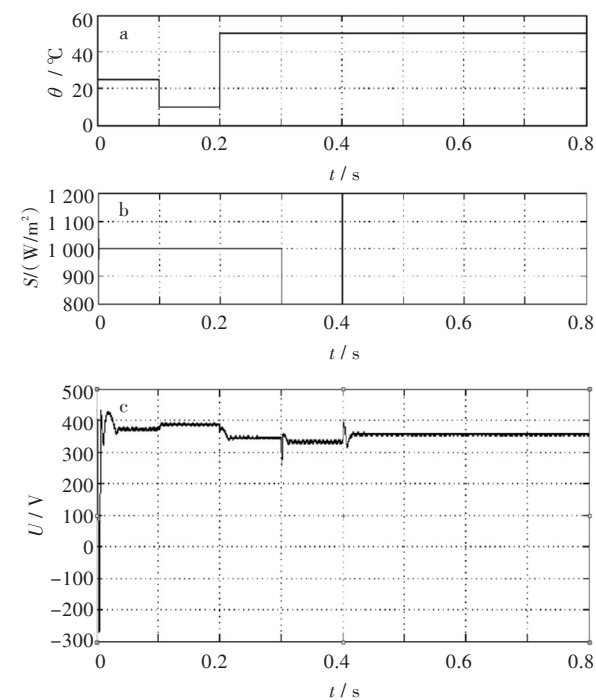


图 11 MPPT 仿真结果

(a)温度仿真图;(b)光照强度仿真图;(c)输出电压仿真图

Fig. 11 Simulation results of MPPT

(a)Simulation diagram of temperature;

(b)Simulation diagram of illumination;

(c)Simulation diagram of output voltage

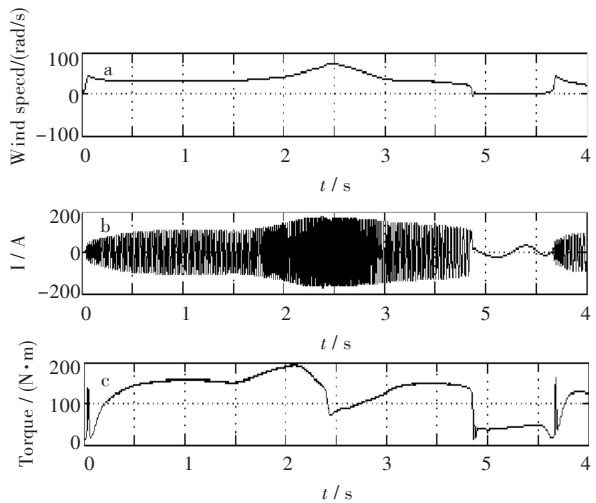


图 12 最大风能捕捉仿真图

(a)风速仿真图;(b)输出电流仿真图;(c)转矩仿真图

Fig. 12 Simulation diagram of capturing maximum wind energy

(a)Simulation diagram of wind speed;

(b)Simulation diagram of output current;

(c)Simulation diagram of torque

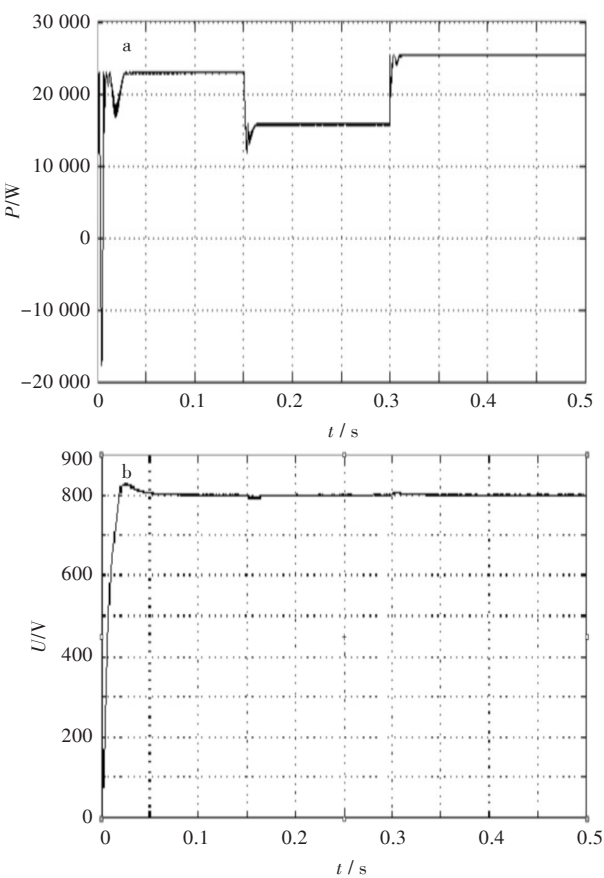


图 13 能量波动时母线电压波形

(a)输入功率仿真图;(b)母线电压仿真图

Fig. 13 Energy fluctuation of bus voltage waveform

(a)Simulation diagram of input power;

(b)Simulation diagram of bus voltage

在电网异常逆变器工作在离网状态下,各种工作模式波形如图 14(a)、14(b)所示,分析可得,前 0.15 s 分布式电源输出功率大于负载所需功率,  $P_{\text{soc}}=100\%$  时系统工作在模式 4,  $P_{\text{soc}}<100\%$  时系统工作在模式 5. 在 0.15 s 时分布式能源突然下降,设定此时  $P_{\text{soc}}\geq 25\%$ ,为了维持母线电压稳定(800 V),蓄电池放电,此时系统工作在模式 6. 输出能量恢复后,蓄电池停止放电,系统回到模式 4 或模式 5 继续工作.

由图 14(c)、14(d)分析可得,前 0.15 s 分布式电源输出功率大于负载所需功率,  $P_{\text{soc}}=100\%$  时系统工作在模式 4,  $P_{\text{soc}}<100\%$  时系统工作在模式 5. 在 0.15 s 时分布式能源突然下降不能满足负载需

求,若此时 $P_{\text{soc}} < 25\%$ ,蓄电池停止工作,此时母线电压下降稳定到600 V,切除一般负载,系统工作在模式7.在0.3 s输出能量恢复后,母线电压恢复至800 V,接入一般负载,系统回到模式4或模式5继续工作.

由图14(e)、14(f)分析可得,前0.15 s系统工

作在模式8,在0.15 s时,分布式电源已无法满足重要负载的需求,设定此时蓄电池的 $P_{\text{soc}} < 25\%$ .直流母线电压下降,当下降到550 V时,无法保证逆变器电能质量需停止逆变器,此时系统工作在模式9.在0.45 s时输入能量恢复,系统继续工作在模式8.

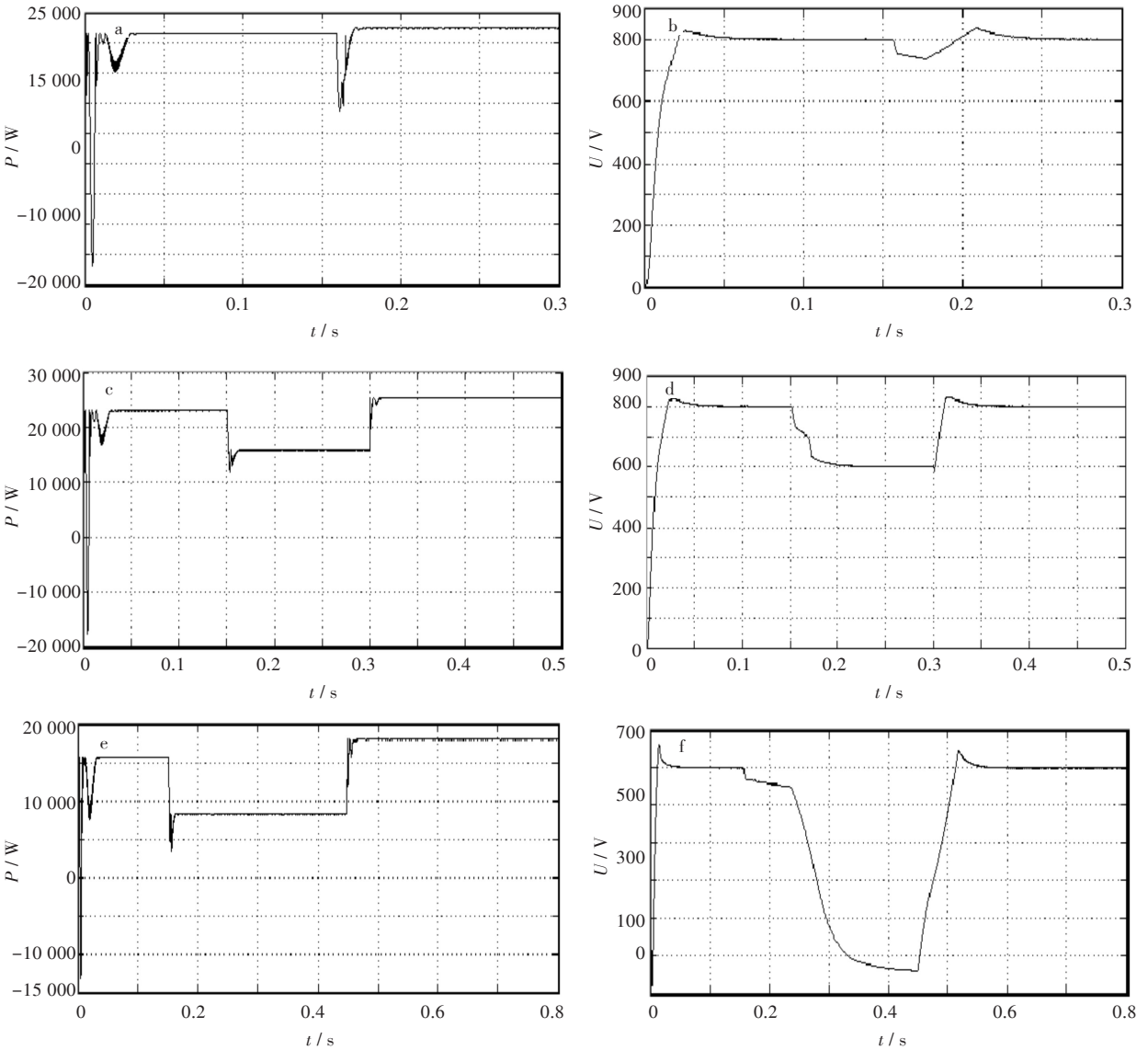


图14 输出功率和母线电压波形

(a)、(c)、(e)太阳能和风能输出功率波形;(b)、(d)、(f)母线电压波形

Fig.14 Output power and bus voltage waveform

(a, c and e) Solar and wind power output waveform ; (b, d and f) Bus voltage waveform

## 6 结 语

以上对分布式电源各组成部分分别进行了参数的设计以及仿真分析,验证了该设计方案的可行性;最后对该系统在并网和离网时不同的工作情况下进行了仿真分析,实现了系统在并网和离网之间来回切换,保证了系统的稳定运行,验证了此控制方案的可行性.研究工作中,对较为复杂的分布式发电拓扑控制技术将在今后的工作中作进一步的深入研究.

### 参考文献:

- [1] 王成山, 扬占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (1): 99-105.  
WANG C S, YANG Z G, WANG S X, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental micro grid systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (1): 99-105.
- [2] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (1): 98-106.  
WU W M, HE Y B, GENG P, et al. Key technologies for DC Micro-Grids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27 (1): 98-106.
- [3] 赵庚申, 王庆章, 许盛之. 最大功率点跟踪原理及实现方法的研究 [J]. 太阳能学报, 2006, 27 (10): 997-1001.  
ZHAO G S, WANG Q Z, XU S Z. Research on realization means and principle of maximum power point tracing [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2006, 27 (10): 997-1001.
- [4] 鲁宗相, 王彩霞. 微网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 100-106.  
LU Z X, WANG C X. Overview on micro grid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (19): 100-106.
- [5] 裴玮, 李澎森, 李惠宇, 等. 微网运行控制的关键技术及其测试平台 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (1): 94-98.  
PEI W, LI P S, LI H Y, et al. Test bed and information integration of EMS for a micro grid with multi-energy generation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (1): 94-98.
- [6] 耿华, 许德伟, 吴斌, 等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析 [J]. 中国机电工程学报, 2009, 29 (23): 68-75.  
GENG H, XU D W, WU B, et al. Control and stability analysis for the permanent magnetic synchronous generator based direct driven variable speed wind energy conversion system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (23): 68-75.
- [7] RADWAN A A A, MOHAMEDE Y A-R I. Linear active stabilization of converter-dominated DC micro grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (1): 203-216.
- [8] CHANG Y C, LIAW C M. Establishment of a switched-reluctance generator-based common DC micro grid system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (9): 2512-2527.
- [9] 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.  
WANG C S, XIAO Z X, WANG S X. Synthetical control and analysis of micro grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (7): 98-103.
- [10] WANG C, NEHRIR M H, GAO H. Control of PEM fuel cell distributed generation systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (2): 586-595.
- [11] KATIRAEI F, IRAVANI M R, LEHN P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 248-257.
- [12] GUERRERO J M, MATAS J, DE Vicuna L G, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (5): 1461-1470.
- [13] MUTOH N. Method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (4): 1055-1065.
- [14] 艾斌, 杨红兴. 风光互补发电系统的优设计 I [J]. 太阳能学报, 2003, 24 (4): 540-547.  
AI B, YANG H X. Optimum sizing of PV/Wind hybrid system (I) cad method [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24 (4): 540-547.
- [15] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (16): 1-8.  
WANG C S, ZHEN H F, XIE Y H, et al. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (16): 1-8.

本文编辑: 陈小平