

微源不同控制策略带不平衡负荷能力研究

朱云梦¹ 陈莎莎¹ 母晓莉²

(1. 国网成都市高新供电公司, 四川 成都 610041;

2. 四川省电力公司电力经济技术研究院, 四川 成都 610065)

摘要: 微网中各类本地负荷靠近微源接入微网使得该微源输出电压易受本地负荷影响。而随着微网的发展, 大量单相负荷及三相不对称负荷的接入会造成微源输出电压不对称, 影响微网电能质量。在相同的硬件条件和控制参数下对 PQ 控制、V/f 控制、滑模变结构控制 3 种控制策略搭建了各系统模型, 调整参数使系统能在各控制策略下达到最优控制效果。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件仿真结果分析了 3 种控制方式在相同不平衡负荷情况下运行的抗不平衡度能力。

关键词: 微源; 控制策略; 不平衡负荷; 滑模变结构

Abstract: The output voltage of micro-source is easily affected by local load caused by all kinds of local load in micro-grid closing to micro-source when connecting with the micro-grid. With the development of micro-grid, the integration of a large number of single-phase and three-phase unbalanced load may cause the output voltage of micro-source asymmetry, which may affect the power quality of micro-grid. Under the same conditions and control parameters, the system models for PQ control, V/f control and sliding-mode variable structure control are built, which allows the system to adjust the parameters to achieve the optimal control results in each control strategy. Finally according to the PSCAD/EMTDC software simulation results, the anti-unbalance ability in three control methods under the same unbalanced load is analyzed.

Key words: micro-source; control strategy; unbalanced load; sliding-mode various structure control (SMVSC)

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0065-06

0 前言

随着以煤、石油为首的传统化石能源的日益枯竭, 寻求一种能满足社会不断增长的能源需求和兼顾功耗与环保平衡的新兴能源成为必然。因此, 具有投资省、损耗低、清洁环保的太阳能、风力发电等分布式发电技术获得了越来越多的重视和应用。各类分布式发电单元及本地负荷通常以组成微网的形式并网或独立运行。然而在微网中各类本地负荷与微源的距离可能致使微源输出电压易受本地负荷影响。即随着微网中大量单相负荷和三相不对称负荷的投入, 造成了微源本地运行负荷的不平衡问题^[1-2]。

微源本地负荷不平衡会引起微源逆变器输出端三相电压不平衡、产生基波负序和三次谐波^[3]。而输出电压的不对称会造成微网中电力电子设备运行失常甚至损坏^[4-5]。而在当今微网控制中对逆变型

微源通常采用的控制方式有 PQ 控制、V/f 控制^[6]。在针对各类微网及微源控制的分析中, 研究的主要方向为时变性微源的 MPPT 输出、各微源之间的协调控制、微网不同运行模式之间的切换等, 未将各控制方式单独带不平衡负荷能力进行分析。

下面分别利用 PQ 控制、V/f 控制、滑模变结构控制^[7] 3 种控制策略进行研究, 选择每种控制策略的控制传递函数并进行相关理论推导。根据其控制策略搭建各系统模型, 调整控制参数得出每种控制的理想控制结果。针对每种控制策略在相同的硬件结构和控制参数情况下进行了微源本地带平衡负荷和不平衡负荷的研究。

1 微源结构

研究微源结构如图 1 所示, 分布式发电系统通常由风力机(光伏板)、发电系统、逆变单元、滤波单元构成。在研究中, 为了简化分析, 逆变型微源将用

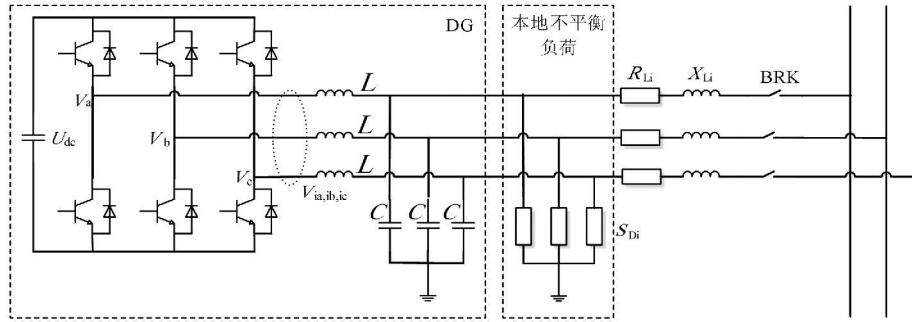


图 1 微源结构图

一个恒定直流电压源表示。微源输出电流经逆变器通过 LC 滤波器滤除高次谐波后并入微电网。滤波器的电感为 L , 电容为 C , 本地三相负荷为 $R + jL$ 。

2 PQ 控制抗不平衡能力分析

通常 PQ 控制适用于微电网在并网时中光伏、风机等时变性和随机性较大的分布式电源控制。在该状态下, 微电网内负荷波动、频率和电压扰动由大电网承担, 各微源不参与频率和电压调节, 直接采用电网频率和电压作为支撑。但在实际微网中, 可能由于采用 PQ 控制的微源所带大量单相本地负荷的分布不对称性, 故需分析其在带不平衡负荷的电压稳定能力。

在 PQ 控制方式下, 通过选择合理的同步旋转轴在 PARK 变换下将逆变器输出电压转化为 $dq0$ 分量, 并使 q 轴电压分量 $V_{gq} = 0$, 则逆变器输出功率可以表示为

$$\begin{cases} P_{ref} = u_{gd} \times i_{gd} + u_{gq} \times i_{gq} = u_{gd} \times i_{gd} \\ Q_{ref} = -u_{gd} \times i_{gq} + u_{gq} \times i_{gd} = -u_{gd} \times i_{gq} \end{cases}$$

由此可以得到电流内环的 d, q 轴参考值为

$$\begin{cases} i_{gd, ref} = P_{ref} / u_{gd} \\ i_{gq, ref} = -Q_{ref} / u_{gd} \end{cases} \quad (2)$$

由于在 VSR 中 d, q 轴变量相互耦合, 因而给内环控制器的设计造成一定困难, 为此, 可采用前馈解耦控制策略, 当电流调节器采用 PI 调节器时, u_d, u_q 的控制方程如下。

$$\begin{cases} u_d = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) (i_{gd} - i_{gd, ref}) - \omega L i_{gq} + u_{gd} \\ u_q = (K_{ip} + \frac{K_{il}}{s}) (i_{gq} - i_{gq, ref}) - \omega L i_{gd} + u_{gq} \end{cases} \quad (3)$$

式中 K_{ip}, K_{il} 为电流内环的比例调节增益和积分调节增益; $i_{gd, ref}, i_{gq, ref}$ 为内环电流参考信号。其控制流

程图如图 2 所示。

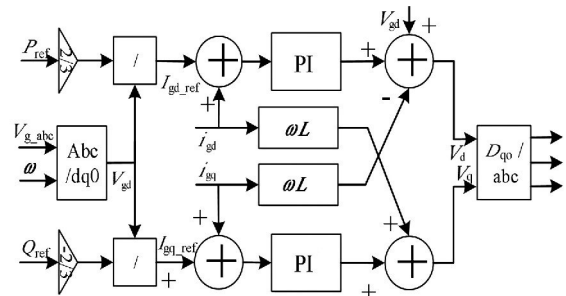


图 2 PQ 控制图

为了防止在 PQ 控制时因微源出力与负荷功率不匹配引起的电压频率不稳定对仿真结果对比的影响, 故在三组实验条件下负荷功率均设置为 PQ 控制额定输出功率。通过在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建如图 2 所示模型, 其部分参数如表 1 所示。

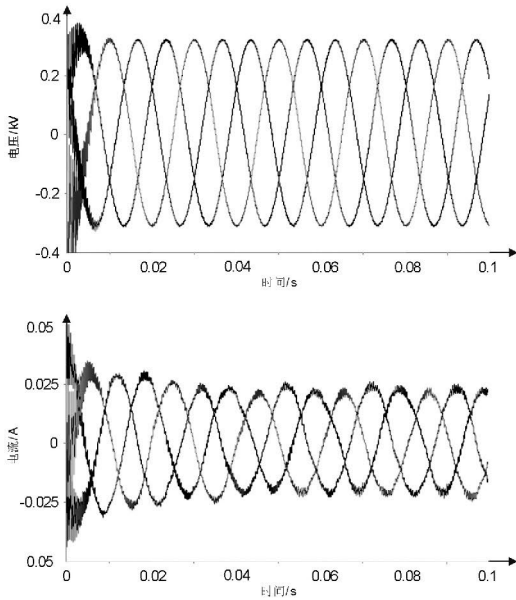
表 1 部分仿真参数

参 数	数值
开关频率/Hz	5 000
滤波电感 L /mH	3
滤波电容 C /uF	160
三相平衡负荷/ Ω	5 5 5
三相不平衡负荷/ Ω	5 5 4

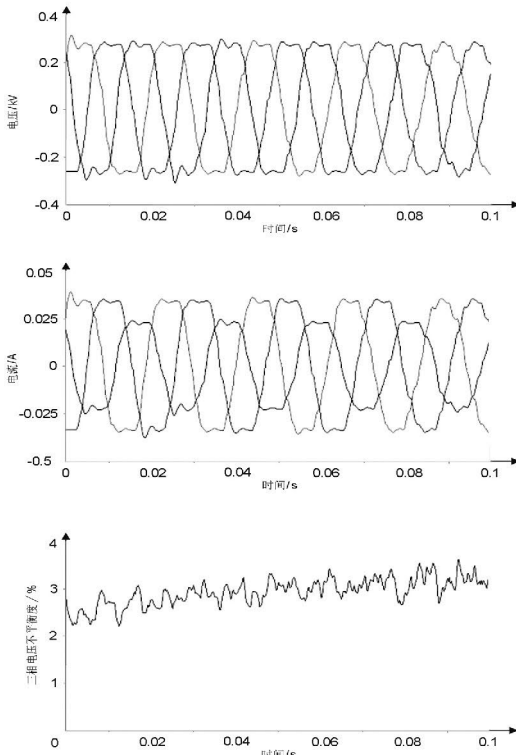
仿真结果如图 3 所示。

3 V/f 控制抗不平衡能力分析

在传统微网控制中, PQ 控制与 V/f 控制同属于双环控制。即外环控制在体现控制目标的同时产生内环控制的参考信号, 但动态响应较慢。而内环控制则是利用其精细的调节提高系统的动态响应。PQ 控制与 V/f 控制的差别仅在于其内环信号产生的不同, 在 V/f 控制时, 电流控制内环参考信号即是额定电压(频率)与实际电压(频率)的差值经 PI 环节得到。



(a) 带平衡负荷时电压电流仿真结果



(b) 带不平衡负荷时电压电流仿真结果

图3 PQ控制电流仿真图

采用恒压恒频控制的目的是逆变器出口的电压幅值和系统输出的频率维持不随分布式电源的输出功率变化而变化,其控制原理如图4所示。

分布式电源系统的初始运行点为A,系统输出频率为 f_{ref} ,分布式电源所接交流母线的电压为 U_{ref} ,分布式电源输出的有功功率和无功功率分别为 P_0 和 Q_0 。频率控制器通过调节分布式电源输出的有

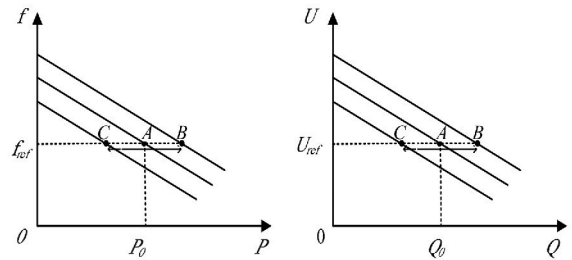


图4 恒压恒频控制原理图

功功率,是频率维持在给定的参考值;电压调节器调节分布式电源输出的无功功率,是电压维持在给定的参考值。这种控制方式主要用于主从控制模式的微网运行在孤网状态的主源逆变器,该源主要为微网系统提供电压和频率支撑,相当于常规电力系统中的平衡节点。由于任何分布式电源都有容量限制,只能提供有限的功率,采用此控制方法时需要提前确定孤岛运行条件下负荷于电源之间的功率匹配情况。根据上述原理,图5给出了一种典型的恒压恒频外环控制器结构。

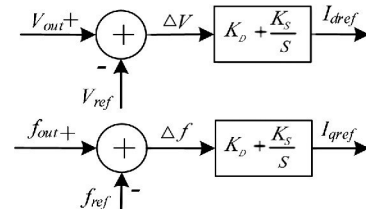


图5 电压外环示意图

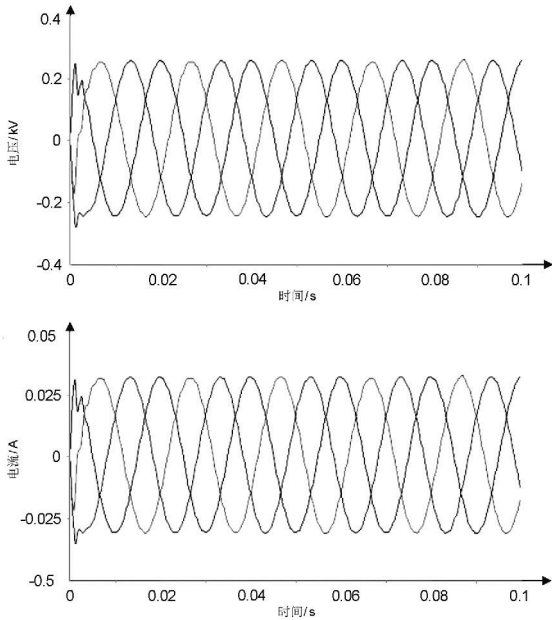
与PQ控制相比,V/f控制的差别主要在外环控制。在外部环节中,由锁相环输出的系统频率 f 与 f_{ref} 相比较,差值通过PI调节器产生内环所需的d轴电流参考信号。电压与参考电压相比较,差值通过PI调节器产生内环所需的q轴电流参考信号。电流内环调节与PQ控制一致。

仿真结果如图6所示。

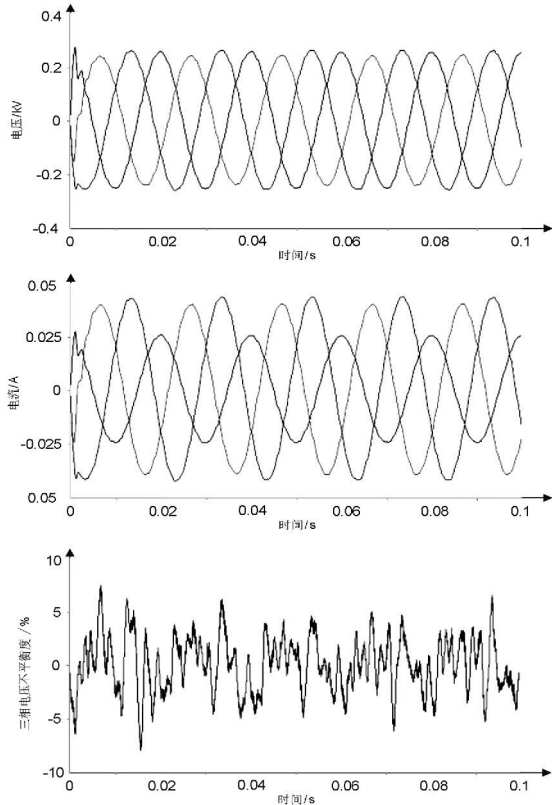
4 滑模变结构控制抗不平衡能力分析

研究中,在分析PQ、V/f控制带不平衡负荷能力的基础上,利用滑模变结构控制对系统的变化和外界参数扰动不敏感、鲁棒性好的特点,设计了如图7所示适用于微源逆变器的滑模控制器。

图7所示为图1所示结构的控制示意图。通过



(a) 带平衡负荷时电压电流仿真图



(b) 带不平衡负荷时电压电流仿真图

图6 V/f控制电流仿真图

采集滤波器输出的电压作为滑模控制器的信号输入,再将滑模控制器的输出信号、滤波器输出的电压电流值及三相全桥的输出电流作为逆系统的输入,进而得到门极控制信号。

根据图7示意图中所示电压电流关系可建立数学模型为

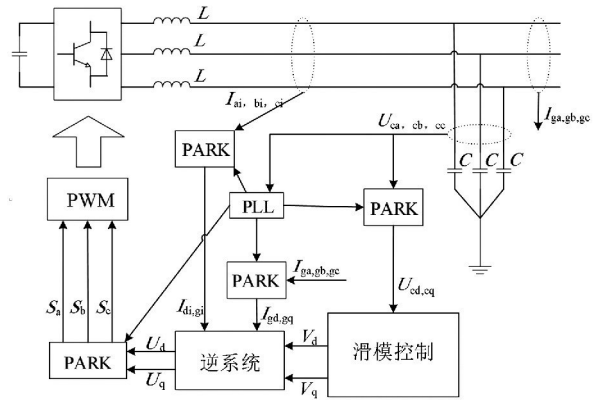


图7 滑模变结构示意图

$$\begin{cases} U_{Ca} = (I_{ai} - I_{ga}) / C \\ U_{Cb} = (I_{bi} - I_{gb}) / C \\ U_{Cc} = (I_{ci} - I_{gc}) / C \\ I_{ai} = (U_a - U_{Ca}) / L \\ I_{bi} = (U_b - U_{Cb}) / L \\ I_{ci} = (U_c - U_{Cc}) / L \end{cases} \quad (4)$$

通过式(5)可以得出逆变器在 d, q 坐标下的数学模型为

$$\begin{cases} U_{C-dq} = \frac{I_{i-dq}}{C} - \frac{I_{g-dq}}{C} + \omega J U_{C-dq} \\ I_{L-dq} = -\frac{U_{C-dq}}{L} - \frac{U_{dq}}{L} + \omega J I_{L-dq} \end{cases} \quad (5)$$

设 $U_{C-d}, U_{C-q}, I_{i-d}, I_{i-q}$ 为 x_1, x_2, x_3, x_4 则原系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 / C - I_{g-d} / C + \omega x_1 \\ \dot{x}_2 = x_4 / C - I_{g-d} / C + \omega x_2 \\ \dot{x}_3 = -x_1 / L + U_d / L + \omega x_3 \\ \dot{x}_4 = -x_2 / L + U_q / L + \omega x_3 \\ y_1 = x_1 - x_{10} \\ y_2 = x_2 - x_{20} \end{cases} \quad (6)$$

式中 x_1, x_2, x_3, x_4 为状态变量; U_d, U_q 为控制输入; y_1, y_2 为控制输出; x_{10}, x_{20} 为给定指令值。

进一步,令

$$\begin{cases} v_1 = \dot{y}_1 = -\left(\frac{1}{CL} + \omega^2\right) x_1 + \frac{2\omega I_{g-q}}{C} - \frac{I_{g-d}}{C} + \frac{U_d}{CL} - \frac{\omega I_{g-q}}{C} \\ v_2 = \dot{y}_2 = -\left(\frac{1}{CL} + \omega^2\right) x_2 + \frac{2\omega I_{g-d}}{C} - \frac{I_{g-q}}{C} + \frac{U_q}{CL} - \frac{\omega I_{g-d}}{C} \end{cases} \quad (7)$$

可求解出逆系统方程如下。

$$\begin{cases} U_q = CLv_1 + (1 + LC\omega^2)x_1 - 2L\omega I_{i-q} + LI_{g-d} + L\omega I_{g-q} \\ U_d = CLv_2 + (1 + LC\omega^2)x_2 - 2L\omega I_{i-d} + LI_{g-q} + L\omega I_{g-d} \end{cases} \quad (8)$$

解耦得出两个线性子系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ y_1 = x_1 - x_{10} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}_2 = v_2 \\ y_2 = x_2 - x_{20} \end{cases} \quad (9)$$

所研究的主要控制对象为三相电压,主要通过对比电压不平衡度来比较各控制方式的优缺点,故在设计时选择参考信号与状态信号之差与其导数的函数作为滑模面,以求得到期望的三相电压。

$$\begin{cases} S_1 = c_1 y_1 + \dot{y}_1 \\ S_2 = c_2 y_2 + \dot{y}_2 \end{cases} \quad (10)$$

为了保持变结构固有的鲁棒性和减小滑模控制器本身的抖震。这里采用指数趋近率。

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(S_1) - kS_1 \\ \dot{S}_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn}(S_2) - kS_2 \end{cases} \quad (11)$$

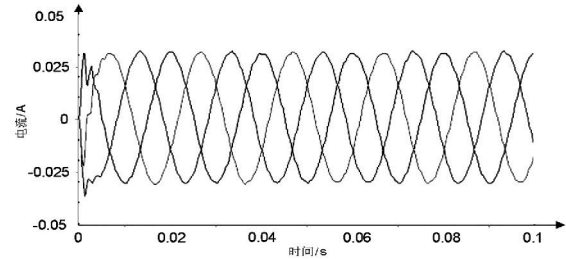
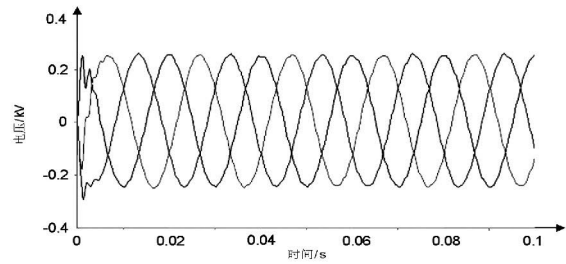
联立解式(8)、(10)、(11)、(12),可得

$$\begin{cases} v_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(S_1) - kS_1 - c_1 \dot{y}_1 \\ v_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn}(S_2) - kS_2 - c_2 \dot{y}_2 \end{cases} \quad (12)$$

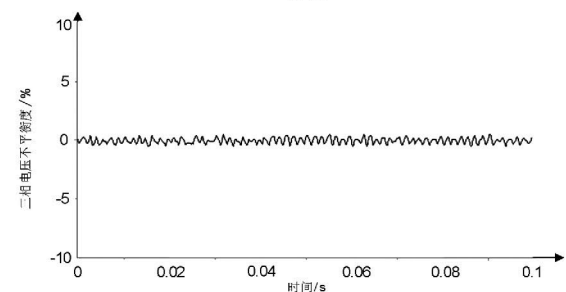
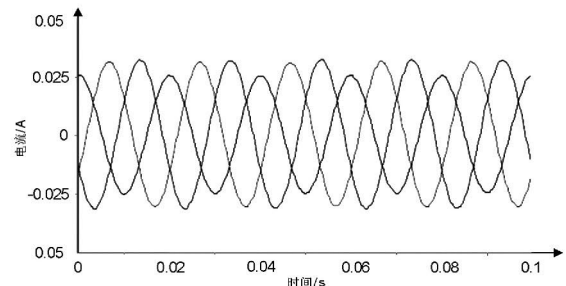
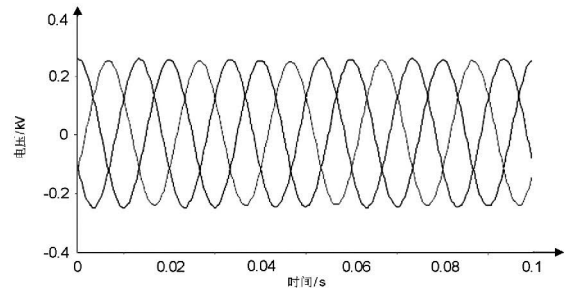
由式(9)可得出变结构控制律 U_d 、 U_q ,进而由派克变换得出 U_a 、 U_b 、 U_c 。仿真结果如图 8 所示。

5 分析与结论

通过以上仿真可知,典型微网控制方式带不平衡负荷能力有较大差异。从控制过程上看,3种控制方式算法都较易实现,但从式(10)可以看出滑模变结构的控制效果与线路参数无关,鲁棒性好,而其他两种控制方式则不然。从控制效果上看,当在3种控制方式负载都设定在 PQ 控制额定值时,3种控制方式带平衡负荷能力相差不大,电压不平衡度均能保持在电网规定安全范围内^[8]。但当负载为三相不平衡负荷时,3种控制方式的控制效果相差较大: PQ 控制的抗不平衡度低,在其控制作用下电压不平衡度已超出电力系统安全稳定运行范围,并且电网中有大量谐波产生。V/f 控制效果介于其他两种控制效果之间,但电压不平衡度波动范围较大,不能保证系统运行在安全的范围。滑模变结构控制因其不受线路参数摄动影响、鲁棒性强而能取得很好的控制效果,电压不平衡度仅为 1% 左右,系统能安全稳定地运行。



(a) 带平衡负荷电压电流仿真图



(b) 带不平衡负荷电压电流仿真图

图 8 滑模变结构控制电流仿真图

参考文献

- [1] Zhang Haiyang Li Shande. Research on Micro-grid [C]//2011The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. 2011: 595 - 598.
- [2] Seyed Ali Arefifar, Yasser A. - R. I. Mohamed, Tarek

H. M. EL - Fouly. Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply Security [J]. IEEE Trans. on Smart Grid 2013 ,4(3) : 1567 - 1575.

[3] 池源. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学 2012.

[4] 周龙华, 舒杰, 张先勇, 等. 分布式能源微网电压质量的控制策略研究[J]. 电网技术. 2012 ,36(10) : 17 - 22.

[5] Blaabjerg Frede , Teodorescu Remus , Liserre Macro , et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics 2006 53(5) : 1398 - 1409.

[6] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北

京: 中国电力出版社 2012.

[7] Phongsak Phakamach , Chumphol Akkaraphong. An Optimal Feedforward Integral Variable Structure Controller for the Electrohydraulic Position Servo Control Systems [J]. Tencon 2004(4) : 459 - 462.

[8] 中国标准出版社. 电能质量标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社 2013.

作者简介:

朱云梦(1983) 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电;

陈莎莎(1983) 研究方向为分布式发电控制;

母晓莉(1984) 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电。 (收稿日期: 2014 - 09 - 02)

(上接第54页)

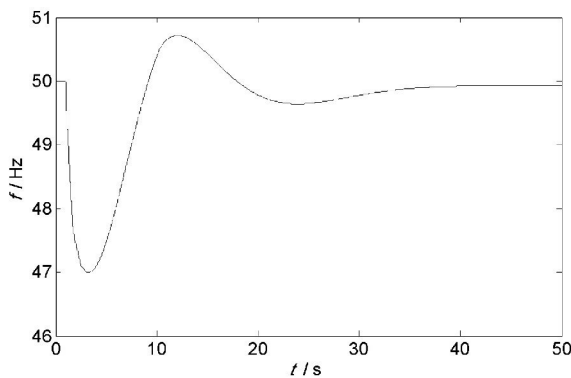


图13 系统频率恢复曲线

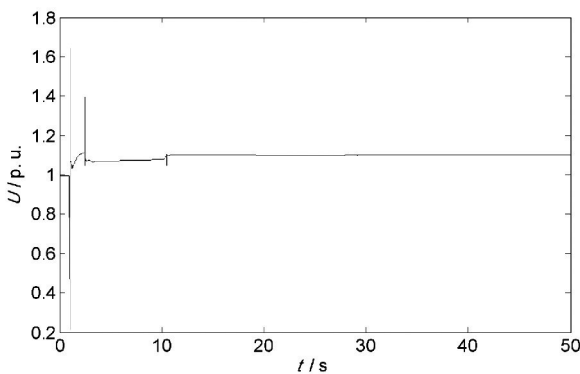


图14 电动机负荷母线电压

参考文献

[1] IEEE/CIGRE Joint Task Force. On Stability Terms and Definitions Definition and Classification of Power System Stability [J]. IEEE Trans. PWRS ,2004 ,19(2) : 1387 - 1401.

[2] Jonathan Horne , Damian Flynn and Tim Littler. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition ,2004.

[3] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北

京: 中国电力出版社 2007: 141 - 175

[4] P. Kundur 著, 周孝信、李兴源, 等译. 电力系统稳定和控制[M]. 北京: 中国电力出版社 2002.

[5] Kottick D , Or O. Neural - networks for Predicting the Operation of an Under - frequency Load Shedding System [J]. IEEE Trans , on Power Systems ,1996 ,11(3) : 1350 - 1358.

[6] Luan W. P , Irving M. R , Daniel J. S. Genetic Algorithm for Supply Restoration and Optimal Load Shedding in Power System Distribution Networks [J]. IEE Proceedings - Generation , Transmission and Distribution , 2002 , 149(2) : 145 - 151.

[7] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究[J]. 电力系统保护与控制 2010 ,38(3) : 30 - 33.

[8] 何恒靖, 解大, 常喜强, 等. 基于割集的电力系统低频减载同调分区算法[J]. 电力系统保护与控制 2010 , 38(9) : 12 - 17.

[9] 秦明亮, 杨秀朝. 在频率紧急控制装置中扩充 df/dt 应用的探讨[J]. 电网技术 ,1998 22(6) : 39 - 41 45.

[10] 常喜强, 何恒靖, 解大. 计及频率差变化率低频减载方案的研究[J]. 电力系统保护与控制 ,2010 ,38(4) : 12 - 17.

[11] Concordia C , Fink L H , Poullikkas G. Load Shedding on an Isolated System [J]. IEEE Transactions on Power Systems ,1995 ,10(3) : 1467 - 1472.

[12] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化 ,2007 31(2) : 94 - 97.

[13] 王正风. 无功功率与电力系统运行[M]. 北京: 中国电力出版社 2009: 41 - 44.

[14] 杨传箭. 电力系统运行[M]. 北京: 水利电力出版社 ,1995: 26 - 36.

[15] 鞠平, 代飞. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社 2008: 102 - 109.

(收稿日期: 2014 - 11 - 10)