

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.014

基于自抗扰控制器的逆变器并联控制研究

刘峻铭, 肖强晖

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 提出了一种基于自抗扰控制器的三相逆变器并联系统控制策略。该控制策略通过实时监测各逆变器模块的输出瞬时电压和电流, 得到瞬时输出有功功率和无功功率, 再通过调节各模块的瞬时有功功率和无功功率, 实现并联系统中各模块之间的均流和功率均分; 为了获得更佳的控制效果, 将自抗扰控制器取代传统的PI控制器。仿真结果表明: 本控制法可有效地控制均流, 并联系统运行稳定。

关键词: 并联控制; 均流; 自抗扰控制

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)04-0071-04

Inverter Parallel Control Based on Active Disturbance Rejection Controller

Liu Junming, Xiao Qianghui

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The control strategy for parallel system of three-phase inverters based on active disturbance rejection controller is proposed. The method firstly monitors the real-time instantaneous output voltage and current of each inverter module and obtains the instantaneous active power and reactive power, then adjusts the instantaneous active power and reactive power to achieve current sharing and power sharing between each module of the parallel system. In order to improve control precision, the method applies active disturbance rejection controller to replace the conventional PI controller, and simulation results show that it is capable to control current sharing effectively and the parallel system operates steadily.

Keywords: parallel operation; current sharing; active disturbance rejection control

0 引言

采用逆变电源进行交流供电已被广泛应用于各领域, 其中, 并联控制技术是逆变电源技术的核心之一。目前, 国内外研究学者提出了多种并联控制策略, 其控制效果各有千秋。主要的控制方法有: 集中控制法、主从控制法、平均值控制法等。集中控制法是通过一个公共的并联模块控制逆变模块, 一旦并联控制单元失效, 整个系统将无法工作, 因此, 其可靠性低; 主从控制法是各模块之间通过信号联

接线传递控制信息, 但该控制方法比较复杂; 平均值控制法是将整个模块的有功和无功功率的平均值作为基准信号, 以消除输出电流的不平衡, 但由于各模块之间的信号线较多, 信号容易受到噪声干扰, 导致其控制精度较低^[1]。

为了解决上述并联控制技术中存在的问题, 本文提出了一种基于自抗扰控制器的并联控制算法。该算法通过控制各模块的输出电压幅值和相位, 以减小各模块有功和无功功率之间的偏差来实现各模

收稿日期: 2013-05-05

作者简介: 刘峻铭(1987-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代电力电子技术,

E-mail: ayulove@163.com

块之间的均流和功率均分。

1 理论介绍

图1为2个逆变器并联运行的等效电路。图中， $U_1 \angle \delta_1$ ， $U_2 \angle \delta_2$ 分别为逆变器1和逆变器2的输出电压； i_1 ， i_2 分别为输出电流； $U_0 \angle \delta_0$ 为负载电压。

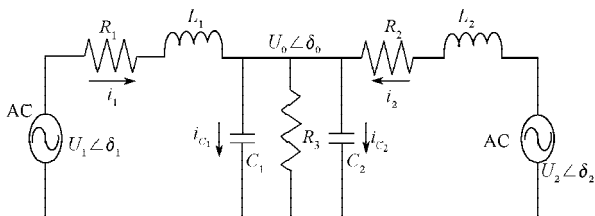


图1 逆变器并联等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of two parallel inverters

逆变器1的输出视在功率为

$$S = U_0 \times I^* = U_0 \angle 0^\circ \times \left(\frac{U_0 \angle \delta_0 - U_1 \angle \delta_1}{jZ} \right) = \frac{U_1 \times U_0}{Z} \sin \delta_1 + j \frac{1}{Z} (U_1 U_0 \cos \delta_1 - U_0^2) = P_1 + jQ_1,$$

式中： $Z=r_1+j\omega L_1=r_2+j\omega L_2$;

P_1 ， Q_1 为逆变器1的输出有功和无功功率，即

$$P_1 = \frac{U_1 U_0}{Z} \sin \delta_1, Q_1 = \frac{1}{Z} (U_1 U_0 \cos \delta_1 - U_0^2).$$

逆变器2的输出有功和无功功率分别为：

$$P_2 = \frac{U_2 U_0}{Z} \sin \delta_2, Q_2 = \frac{1}{Z} (U_2 U_0 \cos \delta_2 - U_0^2).$$

由以上式子可知，单个逆变模块的输出有功功率的大小是由逆变器的功率因素角决定，输出无功功率是由逆变器的空载电动势与负载电动势的幅值差决定。因此，本文通过调节各逆变模块的输出电压的幅值和相位，以实现各模块之间的有功功率和无功功率的均分^[2]。

2 并联控制系统设计

2.1 系统工作原理

本并联控制系统的工作原理如下：一个逆变模块通过瞬时电压和电流检测电路获得其实时电压和电流，通过DSP (digital signal processing) 芯片计算该模块的瞬时有功功率和瞬时无功功率，利用D/A转换器获取它们的模拟量；然后，将该模块的瞬时有功功率和无功功率值送至最大值电路和最小值电路，与其它并联模块的瞬时有功和无功功率值进行比较，从而获得系统中所有并联模块的瞬时有功功率的最大值 P_{max} 和最小值 P_{min} ，瞬时无功功率的最大值 Q_{max} 和最小值 Q_{min} ；再将这4个量送往公共信号总线，求其平均值^[3] P_{ref} ， Q_{ref} ，其中 $P_{ref} = (P_{max} + P_{min})/2$ ，

$Q_{ref} = (Q_{max} + Q_{min})/2$ ； P_{ref} ， Q_{ref} 作为控制给定值被送回各逆变模块，并与各模块自身的瞬时有功功率和瞬时无功功率进行比较，通过特定的控制算法，得到电压幅值调节信号 ΔE_i 和电压频率调节信号 Δf_i ，并将其送至逆变器控制器，调节逆变器的输出电压矢量，从而实现并联系统的均流；逆变器之间的同步通过同步锁相技术实现，各逆变器将自己的同步信号 S_{SYNi} 发送到公共信号总线，并获得公共的同步参考信号 S_{ref} ，并联控制器通过同步锁相技术得到与同步参考信号同步的本机同步参考信号 S_{refi} ，将其发送给逆变器控制器，调节各逆变器的输出电压跟随同步参考信号。并联控制系统结构如图2所示。

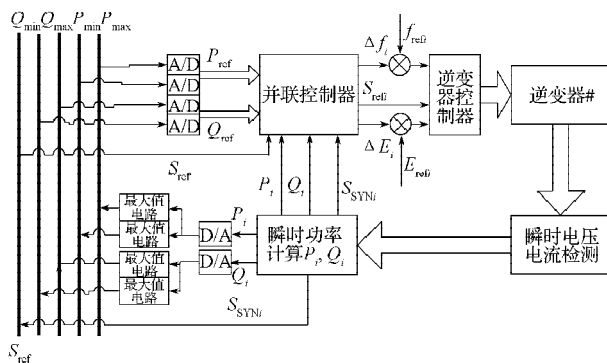


图2 系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of system structure

2.2 并联控制原理

如果逆变器 i 的输出无功功率 Q_i 小于系统中的其它逆变器，则 Q_i 小于系统的参考无功功率 Q_{ref} ，通过上文对功率基本理论的分析可知，逆变器 i 的输出电压幅值会大于其它逆变器，因此， Q_i 与 Q_{ref} 的误差可通过自抗扰控制器 (active disturbance rejection control, ADRC) 对逆变器 i 的无功功率进行补偿，可提高输出无功功率，使输出电压幅值 E_i 减小。如果逆变器 i 的输出无功功率 Q_i 大于其它逆变器，则通过补偿法提高输出无功功率，输出电压幅值 E_i 也会增大^[4]。基于自抗扰控制器的并联控制框图见图3。

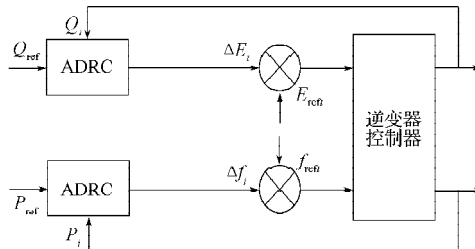


图3 并联控制框图

Fig. 3 Block diagram of parallel control

2.3 自抗扰控制器

自抗扰控制技术是中国科学院著名的控制理论学家韩京清提出的一种针对非线性不确定系统的控

制方法。该方法吸取了经典PID^[6-8](proportional-integral-differential)控制算法的精髓“基于误差来消除误差”,并且采用具有特殊功能的非线性误差反馈机制处理误差信号,从根本上克服了PID控制器“简单处理误差”所带来的局限性。

自抗扰控制器主要由3部分组成:

1)“安排过渡过程”的追踪微分器(tracking differentiat, TD)。

TD主要是对系统给定的输入信号进行无超调、快速跟踪,以最快的速度准确地跟踪给定信号,获得微分信号^[5]。其具体算法如下:

$$\begin{cases} v_1(t+h) = v_1(t) + h \times v_2(t), \\ v_2(t+h) = v_2(t) + h \times f[v_1(t), v_2(t), v(t), r, h_0] \end{cases}$$

式中: $v_i(t)$ 为有功功率或无功功率的参考值; h 为积分步长; h_0 为滤波常数,其取值通常为 h 的整数倍; r 为时间尺度,通常取积分步长的倒数;非线性函数 $f(v_1, v_2, v, r, h_0)$ 为

$$f(v_1, v_2, v, r, h_0) = \begin{cases} d = rh_0, \\ d_0 = dh_0, \\ y = v_1 - v + h_0v_2, \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|}, \\ a = \begin{cases} v_2 + \frac{|y|}{h_0}, & |y| \leq d_0, \\ v_2 + \frac{\text{sgn}(y) \cdot (a_0 - d)}{2}, & |y| > d_0, \end{cases} \\ \text{fst} = \begin{cases} -r \cdot a/d, & |a| \leq d, \\ -r \cdot \text{sgn}(a), & |a| > d. \end{cases} \end{cases}$$

2)“观测系统状态量以及提取系统总扰动的实时作用量”的扩张状态观测器(extended state observer, ESO)。

ESO是对状态观测器的扩展,不依赖于产生扰动的具体数学模型,主要通过观测系统的输入和输出信号对作用于系统的“未知扰动”力进行估计。ESO是在经典状态观测器的基础上将系统变量扩张一个维度的状态,把作用于系统的所有未知加速度部分扩张为新的状态变量,通过动态补偿线性化,将复杂的系统简化成积分器并联的形式,从而克服了经典状态观测器非线性化和不确定性的缺陷,提高了控制效率^[6]。其具体算法如下:

$$\begin{cases} \varepsilon(t) = z_1(t) - y(t), \\ z_1(t+h) = z_1(t) + h(z_2(t) - \beta_{01}\varepsilon(t)), \\ z_2(t+h) = z_2(t) + h \left[z_3(t) - \beta_{02}f_1\left(\varepsilon(t), \frac{1}{2}, \delta\right) + bu(t) \right], \\ z_3(t+h) = z_3(t) - h\beta_{03}f_1\left(\varepsilon(t), \frac{1}{4}, \delta\right). \end{cases}$$

式中:非线性函数 $f_1(\varepsilon, \alpha, \delta)$ 为

$$f_1(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}}, & |\varepsilon| \leq \delta, \\ |\varepsilon|^\alpha \text{sgn}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta, \end{cases}$$

其中, ε 为调整参数通, δ 为线性段的区间长度;

$u(t)$ 为被控对象的输入信号, $y(t)$ 为被控对象的输出信号,两者均为ESO的输入信号;

$z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 为系统的状态观测量;

$z_3(t)$ 为对系统内部和外部总扰动的观测量;

b 为输入量的调节参数;

$\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为ESO的可调节参数。

3)非线性状态误差反馈控制律(nonlinear state error feedback law, NLSEF)。

二阶NLSEF控制器的离散形式可表示为:

$$\begin{cases} e_1 = v_1(k) - z_1(k), \\ e_2 = v_2(k) - z_2(k), \\ u_0 = \beta_1 f_1(e_1, \alpha_1, \delta_1) + \beta_2 f_1(e_2, \alpha_2, \delta_2). \end{cases}$$

式中: e_1, e_2 为误差; β_1, β_2 为可调节参数。

3 试验结果与分析

为了验证基于瞬时功率的均流控制方案在逆变器并联系统上的有效性,本文将其运行在2台三相逆变器构成的并联系统上进行仿真试验。单台逆变模块的参数为:输入电压600V,输出电压220V,输出频率50Hz,扼流电感3mH,输出端串联电阻1Ω。

图4为并联系统满载运行的波形图。系统所带负载为感性负载,功率为 $P=60\text{ kW}$, $Q=40\text{ kW}$ 。图中 u_a, i_a 为逆变器1a相的输出电压和电流, u_A, i_A 为逆变器2a相上的输出电压和电流。从图中可以看出,系统在满载运行时能获得较好的均流效果。

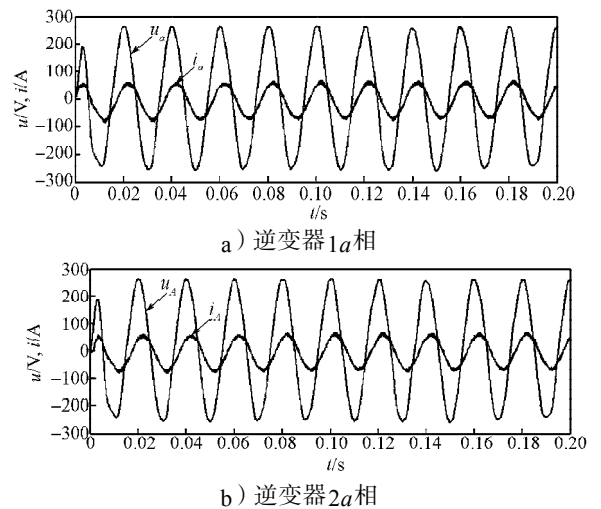


图4 并联系统满载运行波形图

Fig. 4 The full loading operation waveform of parallel system

图5为并联系统突加负载的波形图。当突卸负载时,由于系统惯性,输出电压波形刚开始有少许波动,之后,2台逆变器能保持较好地均流。

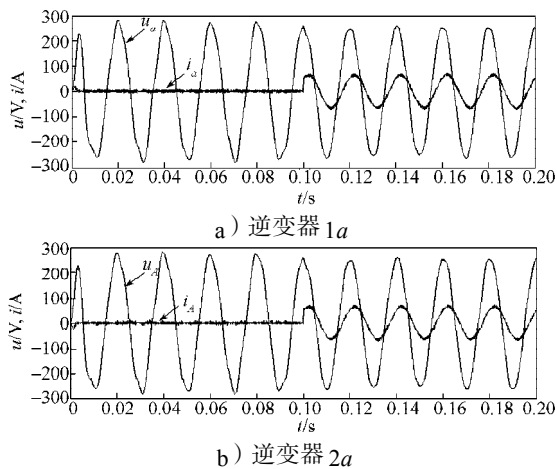


图5 并联系统突加负载的波形图

Fig. 5 The sudden loading operation waveform of parallel system

通过以上仿真分析可知,基于瞬时功率理论的均流控制法在各种环境下都能够实现逆变器并联系统的均流,且能保证其优良的动态特性。

本文提出了三相逆变器并联控制策略,对其工作原理进行了详细分析,将该控制方法在并联系统满载和突卸负载的2种情况下进行仿真试验。仿真结果显示,逆变器并联模块的输出动态效果较好,各逆变模块之间能实现较好的均流和功率均分。

参考文献:

- [1] 张怀梅. 多逆变器并联控制技术[D]. 西安: 长安大学, 2005.
Zhang Huaimei. Research on Parallel Control Technology of Multiple Inverters[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005.
- [2] 阮玉镇, 杨富文. UPS并联运行控制技术[J]. 福建电脑, 2003(9): 37, 39.
- [3] 黄蕾. 并联逆变器控制技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
Huang Lei. Parallel Inverter Control Technology Research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [4] 王茂海, 刘会金. 通用瞬时功率理论的完善与负载性能评价指标的建立[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 58-61.
Wang Maohai, Liu Huijin. The Improvement of the Universal Instantaneous Power Theory and the Establishment of Load Performance Evaluation Index[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (7): 58-61.
- [5] Guerrero J M, De Vicuna L G, Matas J, et al. A Wireless Controller to Enhance Dynamic Performance of Parallel Inverters in Distributed Generation Systems[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2004, 19(5): 1205-1213.
- [6] Chen T P. Circulating Zero-Sequence Current Control of Parallel Three-Phase Inverters[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2006, 153(2): 282-288.
- [7] 江伟, 王建波. 模糊自适应PID控制在开关磁阻风力发电系统中的应用研究[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(5): 41-45.
Jiang Wei, Wang Jianbo. Application and Research of Fuzzy Adaptive PID Control in the SRG Wind Power System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(5): 41-45.
- [8] 冯鹏辉, 谭兮, 刘国营, 孙延军. 基于模型参考自适应的异步电机矢量控制系统[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(4): 46-51.
Feng Penghui, Tan Xi, Liu Guoying, Sun Yanjun. Vector Control of Asynchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(4): 46-51.

(责任编辑: 邓彬)