

基于电流分解的逆变器无连线并联控制

张新亮, 陈照章, 徐晓斌
(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对基本 PQ 控制法对非线性负载均流性能较差的缺点, 采用了基于电流分解的方法对逆变器进行无连线并联控制。给出了功率均分和电流分解原理, 提出了逆变器并联控制的实现方案和 DSP 在并联控制中的应用。实验表明, 该方案对于非线性负载也具有很好的均流性能。

关键词: 逆变器; 并联控制; 功率均分; 电流分解

Wireless and parallel operation control technology of inverters based on current decomposition

ZHANG Xin Liang, CHEN Zhao Zhang, XU Xiao Bin
(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Wireless and parallel operation control approach based on current decomposition has been developed for independent inverters, which have the shortcomings of poor capability of current sharing for the nonlinear loads used basic PQ control approach. To start with, the principles of power sharing and current decomposing are introduced, then parallel operation control scheme and the application of DSP are supplied. The results of experiment have illustrated that the system has good capability of current sharing for the nonlinear loads.

Key words: inverter; parallel operation control; power sharing; current decomposition

随着用电需求量的不断增加, 对逆变电源的容量和可靠性的要求越来越高, 逆变器并联运行是提高电源系统可靠性和扩大供电容量的一种重要途径。相对单台大功率逆变器而言, 多个较小容量的逆变器并联不仅能降低成本, 便于维护, 而且更加灵活、可靠。因此, 通过改变并联逆变器的数目, 可以获得不同的容量; 通过逆变器的冗余并联, 可以提高系统的可靠性。目前, 就各种逆变器并联控制策略的特点来看, 无互连线逆变器并联控制具有明显的优点^[1]。这种控制方式根据模块自身的控制策略来实现并联运行, 无需逆变器模块间进行控制信号交换, 具有抗干扰能力强、扩容和维护方便, 运行更加可靠的显著特点, 但是基本 PQ 控制法存在对非线性负载均流性能较差的缺点。本文在此基本 PQ 法的基础之上采用了基于电流分解的控制策略并利用功能强大的 TMS320LF2407A 为多逆变模块并联控制系统的主控芯片, 经实验证明对非线性负载该控制法取得了较好的控制效果。

1 逆变器无互连线并联原理

1.1 功率均分控制原理^[2]

由潮流理论^[3]可知, 在一个供电系统中, 要使多台逆

变器能保持功率平衡, 可以通过调节各台逆变器输出电压的频率和幅值实现。对于逆变器并联系统, 当不加任何环流抑制措施时, 由于逆变器输出引线阻抗很小, 各模块输出电压幅值和相位等参数的微小变化都将在模块间产生很大的环流, 使得逆变器各模块不能均分负载功率, 因此必须采取措施抑制环流。本文采用的是逆变器输出端直接串联电感^[4-5], 以 2 台逆变器为例, 其简化的原理图如图 1 所示。

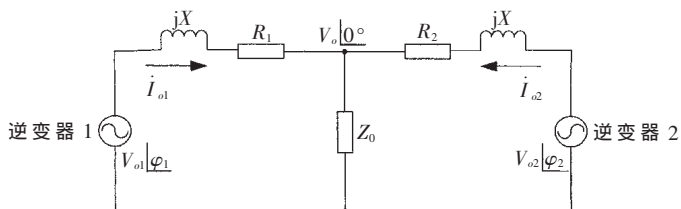


图 1 逆变器并联运行控制图

逆变器 1 输出电流为

$$i_{o1} = \left[\frac{V_{o1}(\cos\varphi_1 + j\sin\varphi_1) - V_o}{R1 + jX1} \right] \quad (1)$$

由于 $R1$ 远小于电感 $X1$ 的感抗, 上式可以简化为:

$$i_{o1} = \left[\frac{V_{o1} \sin \varphi_1 + j(V_{o1} - V_{o1} \cos \varphi_1)}{X1} \right] \quad (2)$$

逆变器 1 输出的复功率:

$$S_{o1} = P_{o1} + jQ_{o1} = V_{o1} \times \dot{I} \quad (3)$$

则其有功功率 P_{o1} 和无功功率 Q_{o1} 分别为:

$$P_{o1} = \frac{V_{o1} V_o}{X1} \sin \varphi_1 \quad (4)$$

$$Q_{o1} = \frac{V_o (V_{o1} \cos \varphi_1 - V_o)}{X1} \quad (5)$$

一般情况下,功率角 $\varphi_i (i=1, 2)$ 比较小,则可对有功功率和无功功率进行简化、微分得:

$$\Delta P_{o1} = \frac{V_o V_{o1}}{X1} \times \Delta \varphi_1 \quad (6)$$

$$\Delta Q_{o1} = \frac{V_o}{X1} \times \Delta V_{d1} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知,输出电压的相位变化影响其输出有功功率的变化,而输出电压的幅值变化则会改变其输出的无功功率。因此,要控制逆变器输出的有功功率和无功功率,只需通过调节逆变器输出电压的幅值和相位即可。由于相位不易检测,一般通过调节输出电压的频率来达到改变输出电压的相位,进而调节逆变器的输出有功功率。这是 PQ 法的基本思想,其控制方程式为:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 - m \times p \\ V = V_0 - n \times q \end{cases} \quad (8)$$

从式中可以看出要得到较好的功率均分特性,必须增大下垂系数 m 和 n 。下垂系数 m 、 n 的上限值分别为: $m_{\max} = \frac{\Delta \omega_{\max}}{\Delta P_{\min}}$; $n_{\max} = \frac{\Delta V_{\max}}{\Delta Q_{\min}}$ 。

1.2 电流分解原理^[6]

当电压型逆变器的负载为非线性时,其输出电流由四个部分组成:

$$i_L(t) = i_o(t) + i_p(t) + i_q(t) + i_h(t) \quad (9)$$

式中, i_o 为直流分量; i_p 为有功电流分量; i_q 为无功电流分量; i_h 为谐波分量。将式(9)扩展可得:

$$i_L(t) = I_o + I_p \cos(\omega t) + I_q \sin(\omega t) + \sum_{j=1}^{\infty} I_{2j} \cos(2j\omega t + \phi_{2j}) + \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k+1} \cos[(2k+1)\omega t + \phi_{2k+1}] \quad (10)$$

在逆变器模块并联系统中,要实现成功并联,各模块输出的有功功率、无功功率和谐波功率要保持基本平衡,而各种功率分量可通过检测输出电流中各分量来得到。图 2 为电流分解原理图。

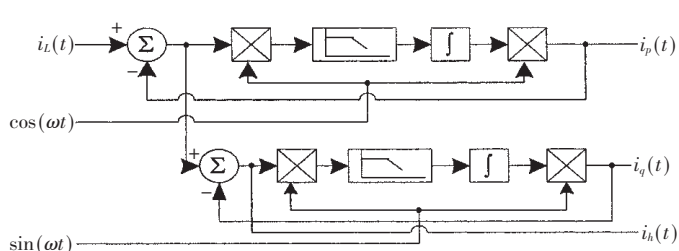


图 2 电流分解结构图

2 无线线并联控制系统

2.1 并联控制方案

并联控制系统原理框图如图 3 所示,为了提高系统的动态性能,基于传统的 PQ 调节做如下改进^[4-5]:

$$\omega = \omega^* - mP - m_d \frac{dP}{dt} \quad (11)$$

$$V = V^* - nQ - n_d \frac{dQ}{dt} \quad (12)$$

式中, m_d 、 n_d 的取值一般是相应的 m 、 n 值的 1% 左右。

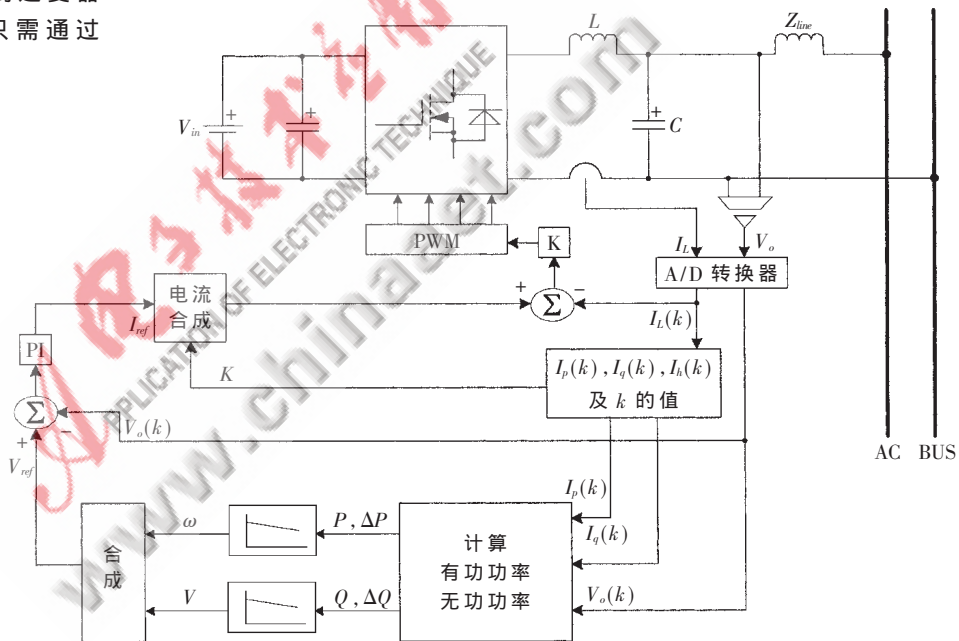


图 3 基于电流分解的无线线并联方案

从图 3 可以看出,系统是通过检测逆变器输出电压和输出电流,每个工频周期计算出它的输出功率,利用 PQ 下垂理论及时地改变逆变器正弦参考信号,以达到各逆变器输出功率在系统中均分的作用。从整个控制结构上看,这种逆变器控制结构具有三环控制结构,外环是一个微调参考信号的慢速控制环节,一个工频周期调节一次;而内环是两个快速控制环节,分别是在一个开关周期内调节输出电压和输出电流,使得输出电压能快速跟随在上一个工频周期已调整后的参考正弦信号。

2.2 功率调节

功率调节所要完成的任务是对功率计算中获得的

功率,按照改进的PQ理论修正相应的幅值和频率,并在下一个工频周期进行调节。将式(11)、(12)进行离散化得:

$$\begin{cases} \omega(k) = \omega_0 - mP(k) - m_d \frac{P(k) - P(k-1)}{T_0} \\ V(k) = V_0 - nQ(k) - n_d \frac{Q(k) - Q(k-1)}{T_0} \end{cases} \quad (13)$$

整理上述表达式得:

$$\begin{cases} \omega(k) = \omega_0 - K_{p1}P(k) + K_{p2}P(k-1) \\ V(k) = V_0 - K_{q1}Q(k) + K_{q2}Q(k-1) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\omega(k)$ 、 $V(k)$ 分别表示当前周期时刻获得的正弦参考信号的频率和幅值; $P(k)$ 、 $P(k-1)$ 、 $Q(k)$ 、 $Q(k-1)$ 分别表示当前周期和前一周期的功率计算量; $K_{p1} = m + \frac{m_d}{T_0}$;

$$K_{p2} = \frac{m_d}{T_0}; K_{q1} = n + \frac{n_d}{T_0}; K_{q2} = \frac{n_d}{T_0}。$$

功率调节的具体流程如图4所示。

3 实验证明

3.1 实验系统的创建

实验系统由两逆变器、开关、连线阻抗和负载组成,如图5所示。本实验采用TMS320LF2407A DSP来进行控制和产生PWM波形。DSP能实现复杂的算法,控制boost变换器的开关,从而实现在各种条件下的快速响应。图5中两个逆变器的额定容量、输入电压、输出参考电压幅值、输出参考电压频率分别为1000VA、400V、220V、50Hz;频率下垂系数 m 、 m_d 分别为0.001、0.000 01;电压下垂系数 n 、 n_d 分别为0.01、0.000 1;连线的阻抗分别为 $0.1 + j0.282\Omega$ 、 $0.12 + j0.301\Omega$ 。输入电压由TDGC2J型接触调压器供给。

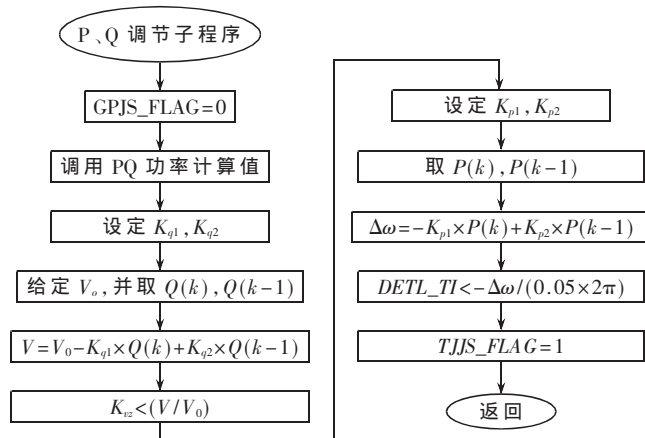


图4 功率调节程序流程图

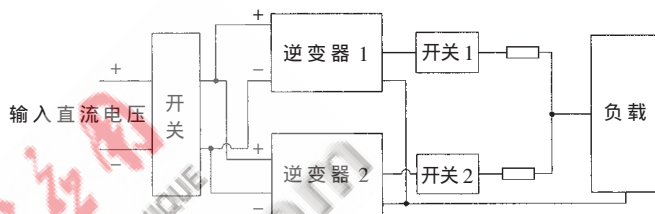
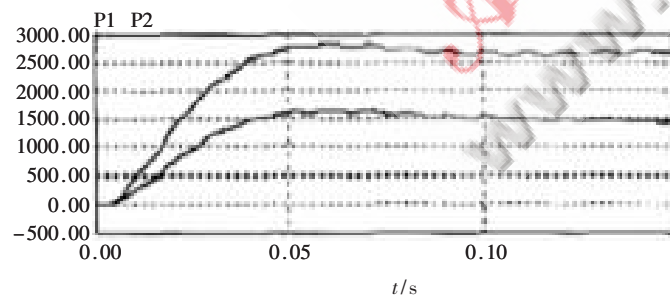


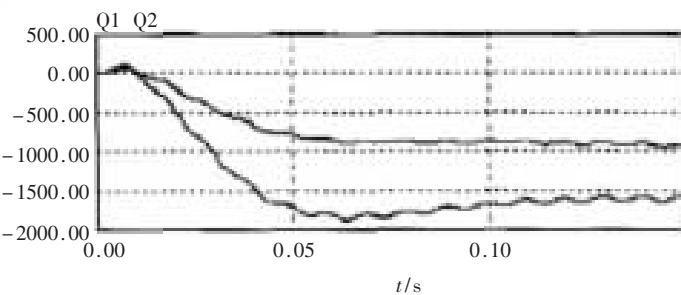
图5 双逆变器并联实验系统

3.2 实验结果讨论

本实验主要验证方案的有效性,即对于非线性负载,基于电流分解的无连线并联控制对功率均分的效果。用电感性负载和整流桥负载来进行仿真,图6是系统带感性负载进行仿真的结果,图6(a)是在基本PQ法的无连线并联方案下得到的P、Q;图6(b)是在基于电流分解的无连线并联方案下得

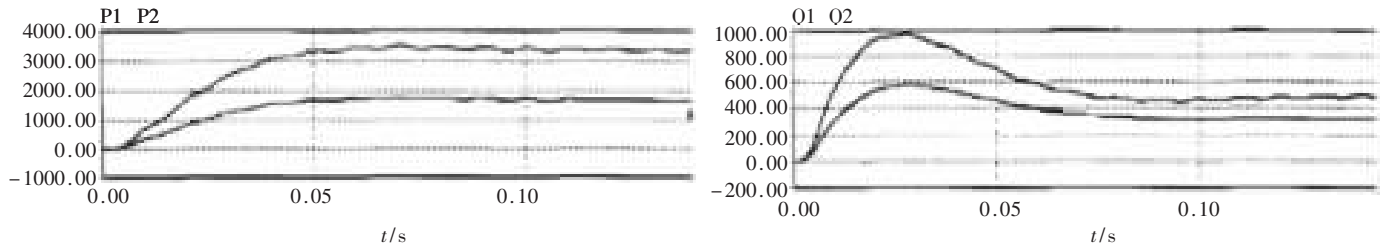


(a)基本PQ并联控制方案

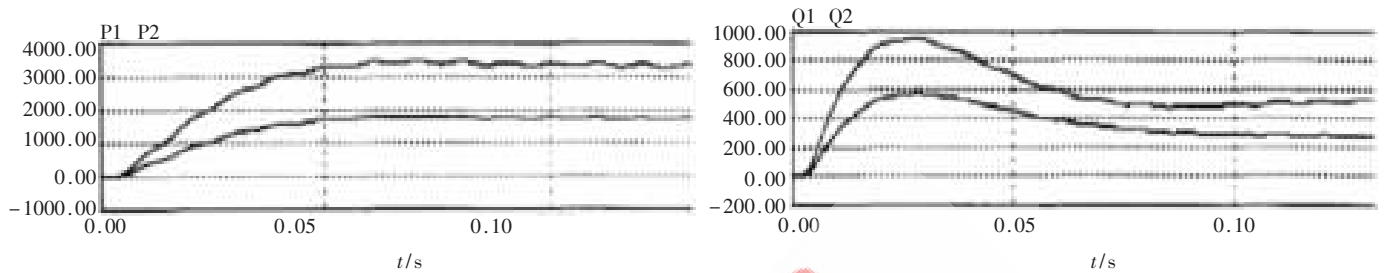


(b)基于电流分解的并联方案

图6 系统带感性负载仿真结果



(a)基本 PQ 并联控制方案



(b)基于电流分解的并联方案

图7 系统带整流桥负载仿真结果

到的P、Q。图7是系统带整流桥负载进行仿真的结果，图7(a)、图7(b)也是分别在基本PQ法的无连线并联方案和基于电流分解的无连线并联方案下得到的P、Q图。

从两类负载的仿真结果来看，基于电流分解的无连线并联具有更强的负载适应力，即对于非线性负载中的无功功率也能进行很好的功率均分。

从实验结果可以看出，基于电流分解的无连线并联控制方案对于非线性负载也能取得很好的控制效果，完全可满足逆变器并联控制的要求。

参考文献

[1] 段善旭,康勇,陈坚.UPS模块化电源系统并联控制策略分析[J].电工技术杂志,2004(1):46-50.
 [2] 王兆安.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2001.
 [3] 韩祯祥.电力系统分析[M].杭州:浙江大学出版社,1993.

[4] TULADHAR A, JIN H, UUGER T, et al.Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections[C].//Applied Power Electronics Conference and Exposition,1997.APEC 97 Conference Proceedings.1997: 94-100.
 [5] TULADHAR A, JIN H, UNGER T, et al.Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of the line impedance effect[C].//Applied Power Electronics Conference and Exposition,1998.APEC 98 Conference Proceedings.1998: 321-328.
 [6] TEPPER J S, DIXON J W, VENEGAS G, et al.A simple frequency-independent method for calculating the reactive and harmonic current in a nonlinear load[J], IEEE Transaction on Industrial Electronics, 1996, 43(6): 647-654.

(收稿日期:2008-06-30)