

基于 DSP 的半周相移并联逆变器

王晓华¹, 余勇²

(1.合肥工业大学, 安徽 合肥 230009; 2.合肥阳光电源有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:由于模块化逆变器并联运行便于系统的扩容和系统可靠性的提高,因而由逆变器并联组成的电源系统的应用正向众多领域扩展。分析了基于半周相移 SPWM 技术的并联逆变器环流特性,提出了均流电抗的设计方法及其相应的控制策略。采用 TMS320F2406 构建了数字控制系统,并在两台 5 kVA 电压型逆变器上进行了并联实验,其结果验证了系统设计的有效性。

关键词:逆变器; 并联; 脉宽调制 / 半周相移

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2008)05-0080-02

Half-period Phase-shifted Parallel Inverters based on DSP

WANG Xiao-hua¹, YU Yong²

(1.Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2.Sungrow Power Supply Co., Ltd, Hefei 230088, China)

Abstract: Parallel operation of inverters is easy to expand the capacity and increase the reliability of the system. Therefore, the parallel power supply system composed of several inverters is applying to more fields. The circulating current feature of the parallel inverter based on the half-period phase-shifted SPWM technology is analyzed. The design method of circulating current reactor and the corresponding control strategy are presented. Parallel connecting experiment based on DSP TMS320F2406 was performed on two 5 kVA voltage source inverters, and the results show the validity of the system designing.

Keywords: inverter; parallel; pulse width modulation / half-period phase-shifting

1 引言

逆变电源广泛运用于 UPS、有源电力滤波器 (APF)、太阳能电池系统等供电设备及电网设备,而多台 SPWM 逆变电源的并联运行可以扩大系统容量,组成并联冗余系统以提高系统的可靠性及可维护性,同时通过逆变电源的并联运行可以有效消除低次谐波,甚至构建完美的无谐波大功率变频器,其容量可达 315 kW~100 MW。目前,模块化电源的研究技术正成为一个热点^[1-3]。

对于大功率逆变电源而言,为了满足低损耗要求,功率器件的开关频率通常选在 2~3 kHz 左右,因此不能单纯依靠 PWM 的方法实现低谐波。相移多重化技术已被用于变流器容量的扩大和谐波的抑制。目前,电压型逆变器交流侧实现多重化的方法分为两种,一种是并联相移变压器式,另一种是中心抽头电抗器式。比较而言,后者较为经济,但在控制上要考虑环流抑制^[4]。

2 耦合电抗器的设计

图 1a 以 n 组电压型逆变器并联为例,给出了基于耦合电抗器的逆变器并联电路。为了实现逆变器并联输出和抑制环流,可采取独立电抗器方式设置其交流输出侧中心抽头电抗器,即环流抑制电抗器。

但在大功率开关器件工作频率较低、直流侧电压较高的情况下,势必要求较大的电感量,导致电感体积增加。而利用电感间的耦合作用不但能更好地抑制环流,还避免了上述缺点,其连接方式如图 1b 所示。

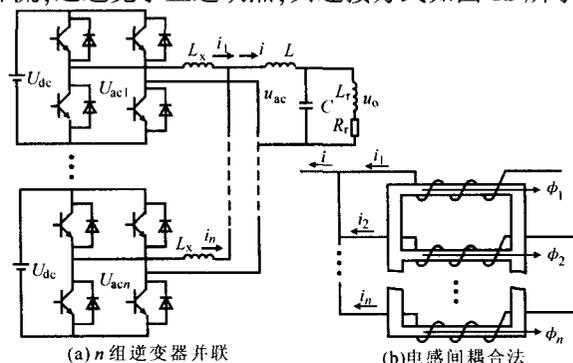


图 1 基于耦合电抗器的逆变器并联

在使用环流抑制电抗器时,电压型逆变器之间环流的产生原因可分为两类:①由逆变器输出基波电压的幅值、频率或相位的不同而导致的基波频率环流成份;②由逆变器输出电压瞬时差而导致的开关频率环流成份。在不同状况下,原因①相对于各逆变器呈现出不同的负载特性,或为有功或为无功;而原因②不对系统的功率分配产生影响,其抑制效果将完全取决于输出电抗器参数设计、功率器件开关频率以及各电压型逆变器 PWM 控制方式。

设各逆变器环流抑制电感值为 L_x , 电感间紧密耦合,则任意两个电感之间的互感表达式为:

$$m=L_x/(n-1) \quad (n \geq 2) \quad (1)$$

定稿日期:2008-02-26

作者简介:王晓华(1976-),女,河南舞阳人,博士,讲师。

研究方向为计算机数字控制及单片机应用。

定义 i_{jx} 为并联逆变器间环流, 其值为各逆变器输入电流与单逆变器平均输入电流之差, 即:

$$\begin{cases} i_{jx} = I/n - i_j \\ \vdots \\ i_{jx} = I/n - i_n \end{cases} \quad (2)$$

式中: I 为输出总直流。

由于 $I = \sum_{k=1}^n i_k$, 可得:

$$\sum_{k=1}^n i_{kx} = 0 \quad (3)$$

设并联逆变电源总输出电压为 u_{ac} , 各逆变器交流侧输出电压 u_{acj} ($j=1, 2, \dots, n$); 由基尔霍夫电压定理可得方程组:

$$\begin{cases} u_{ac} = u_{ac1} - i_1 L_x s + i_2 m s + \dots + i_n m s \\ u_{ac} = u_{ac2} - i_2 L_x s + i_1 m s + \dots + i_n m s \\ \vdots \\ u_{ac} = u_{acn} - i_n L_x s + i_1 m s + \dots + i_{n-1} m s \end{cases} \quad (4)$$

联立式(2)~式(4), 可得:

$$i_{jx} = \frac{(n-1)}{n} \cdot \frac{\sum_{k=1}^n u_{ack} - n u_{acj}}{n L_x s}, \quad u_{ac} = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ack}}{n} \quad (5)$$

如果各逆变器环流抑制电感之间不耦合, 即 $m=0$, 则可得:

$$i_{jx} = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ack} - n u_{acj}}{n L_x s}, \quad u_{ac} = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ack} - I L_x s}{n} \quad (6)$$

可以看出, 使用耦合均流电抗器后, 在不产生基波输出电压损失的同时, 能更好地抑制环流, 改善均流效果。为进一步改善多重化输出电压波形品质, 提出将单极性调制技术与载波相移技术相结合的半周相移 SPWM 技术^[5]。半周相移 SPWM 技术要求 n 组逆变器各三角载波相位按一定的预先次序依次错开 π/n , 同时在每组逆变器中, 进行 SPWM 单极性调制。

在环流电抗器设计中, 可以将 u_{acj} 等效为占空比 $D=50\%$ 、周期为 T_k 的方波电压, 则依据半周相移 SPWM 技术原理即可得 $\sum_{k=1}^n u_{ack} = 0$ 。

式(6)中前式可改写为:

$$i_{jx} = -\frac{n-1}{n} \cdot \frac{u_{acj} e^{-(j-1)\pi x}}{L_x s} \quad (7)$$

取 u_{acj} 的峰值为直流侧电压 U_{dc} , 最大环流为 $i_{x\max}$, 根据式(7)即可得环流电抗器感值 $L_x \geq \frac{U_{dc} T_k}{2i_{x\max}}$ 。

3 并联控制

在设计控制系统时, 即要考虑负载电压跟踪精度, 又要保证各逆变器输出间电流均流。设计中以两组逆变器并联为例, 借鉴了 3C 控制思想^[6], 见图 2。

该方案是基于瞬时波形反馈的控制技术, 不影响相移技术的实施, 但线路阻抗的差别对并联电压

型逆变器最后的输出效果将略有影响。控制方案中还采用了前馈控制技术, 以提高系统动态响应能力。基本程序框图如图 3 所示。

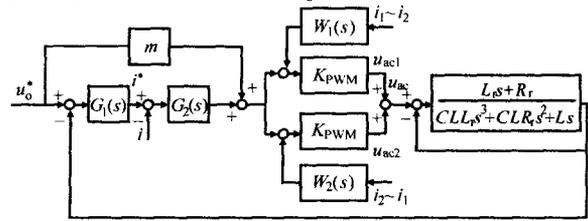


图 2 并联逆变器控制方案

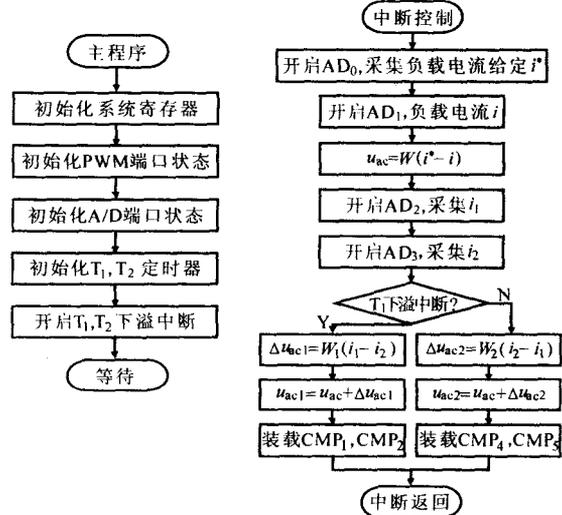


图 3 软件框图

4 实验及结论

利用两台电压型逆变器进行了试验验证, 单组电压型逆变器容量约为 5 kVA; 单组开关频率 2 kHz; 直流侧电压 300 V; 负载电感 15 mH, 电阻 80 mΩ; 最大负载电流 40 A; 均流电抗器 0.5 mH。试验结果如图 4 所示。

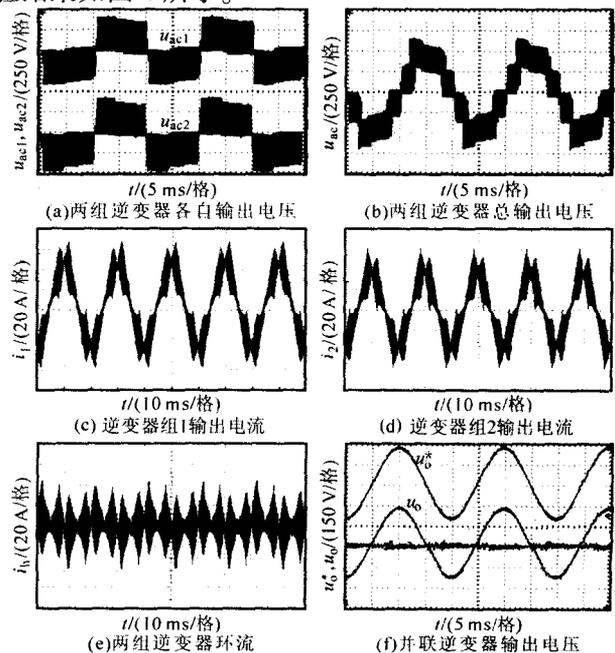


图 4 半周相移逆变器并联试验结果

可以看出, 两组逆变器经过半周移(下转第 68 页)

2 位置切换到 1 位置。根据式(7), 可通过改变系数 k 实现阻尼系数随 S 的改变。 k 值根据 S 来确定, S 越高, k 越小, 而对应的阻尼电流越大。

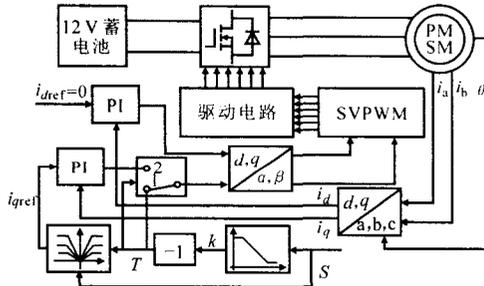


图 4 开发的永磁同步电机 EPS 控制系统

5 实验结果

实验台架^[5]转向轴上装有转矩传感器, 用于检测驾驶员施加于转向盘上的力矩。车速信号由信号发生器给出。采用弹簧模拟转向系统的负载。电机与转向管柱通过一个蜗轮蜗杆减速器连接。测试过程是在阻尼控制模式下, 匀速转动转向盘使电机匀速转动, 此时测量相电流 i_a 和 i_d, i_q 。图 5 为采用传统阻尼控制方法时测试得到的 i_d, i_q 变化情况。

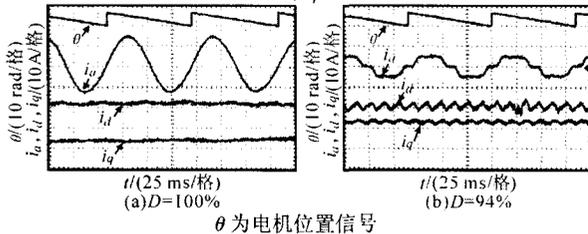


图 5 传统阻尼控制策略下电机电流

由图可见, 当 $D=100\%$ 时, 电流不发生畸变; 当 $D=94\%$ 时, i_a 不再是正弦波, i_d, i_q 出现波动, 其波动频率为 $6f_e$ 。说明上述分析是正确的。

测试结果如图 6 所示。当 $k=0$ 时, 相当于完全短路, 电机能提供最大阻尼电流, 其阻尼电流值和图 6a 中 $D=100\%$ 的情形相同。当 $k \neq 0$ 时, 阻尼电流值

减小, i_a 仍为正弦波形, i_d, i_q 未出现波动。

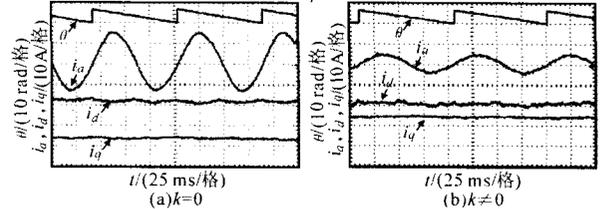


图 6 电机电流实验波形

6 结论

分析了传统阻尼控制方法出现转矩波动的原因, 提出了一种 PMSM 的 EPS 阻尼控制方法。得出结论: ①在对三相桥臂下管同时施加一个占空比来实现阻尼控制情况下, 由于逆变器施加到电机上的电压矢量随电流方向发生变化, 由此引发转矩波动, 使在 d, q 坐标系下的电压矢量亦出现波动, 从而导致了 i_d, i_q 的波动; ②在旋转坐标系下实施所提出的阻尼控制方案, i_d, i_q 将不再出现波动, 而且能实现随车速变化而改变阻尼系数, 满足 EPS 的要求。实验结果证明了这一点。

参考文献

- [1] 喜福隆之. 电动助力转向的控制技术[J]. 三菱电机技报(日), 1996(9): 923-928.
- [2] 张 磊, 瞿文龙. 一种降低无刷直流电机 EPS 系统损耗的 PWM 控制策略[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 83-89.
- [3] 张 磊. 无刷直流电机的控制技术和 EPS 系统研究[D]. 北京: 清华大学电机工程系, 2007.
- [4] Pragasen Pillay, Ramu Krishnan. Modeling, Simulation and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1989, 25(2): 265-273.
- [5] Hu Y S, Ji X W, Chen K Y, et al. Elementary study on BLDC controller for electric power steering system[R]. SAE Paper. 2004, 2004-01-1096.

(上接第 81 页)相控制后输出电压等效波形相当于 4 组移相并联逆变器, 在均流电抗器的作用下, 谐波抑制效果更明显。采用瞬时电流反馈控制策略, 在较好地抑制环流的同时, 保证了负载电压的跟踪精度, 系统运行稳定。

参考文献

- [1] Yu-Kai Chen, Yu-En Wu, Tsai-Fu Wu, et al. ACSS for Parallel Multi-inverter Systems with DSP-based Robust Controls[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 1002-1015.
- [2] Xiao Sun, Yim-Shu Lee, Dehong Xu. Modeling, Analysis and Implementation of Parallel Multi-inverter Systems with Instantaneous Average-current-sharing Scheme[J]. IEEE Trans.

on Power Electronics, 2003, 18(3): 844-856.

- [3] Ramos R, Biel D, Guinjoan F, et al. Design Considerations in Sliding-mode Controlled Parallel-Connected Inverters [A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS'02[C]. [S.l.]: [s.n.], 2002, (4): 357-360.
- [4] Chen Liangliang, Xiao Lan, Yan Yangguang. A Novel Parallel Inverter System based on Coupled Inductors [A]. The 25th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC'03[C]. [S.l.]: [s.n.], 2003: 46-50
- [5] 王立乔, 王长永, 黄玉水, 等. 基于移相 SPWM 技术的级联型多电平变流器[J]. 高压技术, 2002, 28(7): 17-18.
- [6] Tsai-Fu Wu, Yu-Kai Chen, Yong-Heh Huang. 3C Strategy for Inverters in Parallel Operation Achieving an Equal Current Distribution[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 273-281.