

DOI: 10.7667/PSPC161727

并联三相逆变器环流的双变零矢量控制研究

马璐¹, 刘莉¹, 雷蕾², 陈启宏¹

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 神龙汽车有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 并联三相逆变器的参数不可避免地存在差异, 导致逆变器间会产生环流。环流会造成逆变器损耗增加、输出电压、电流波形畸变等危害。为了解决这个问题, 提出通过零序占空比来抑制环流的控制策略。在建立零序环流数学模型的基础上, 针对传统零序环流控制策略中基于空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法中一个载波周期内仅单次调节零矢量的作用时间, 导致环流抑制效果不佳的问题, 提出在一个载波周期内进行两次零矢量作用时间调节, 提高零序环流控制实时性; 并基于各逆变器输出的瞬时功率反馈来实现并联逆变器负载功率自适应均分的控制方案。该方案不仅能够很好地抑制环流, 实现负载均分, 而且能显著地改善三相逆变器输出电压和电流波形。通过仿真和半实物仿真实验平台验证了该方案的有效性。

关键词: 三相逆变器; 零序环流; SVPWM; 负载均分

Research on circulation current control of double changed zero vector for parallel three-phase inverters

MA Lu¹, LIU Li¹, LEI Lei², CHEN Qihong¹

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Dongfeng Peugeot Citroen Automobile Company Ltd, Wuhan 430056, China)

Abstract: Parameters of parallel three-phase inverters are inevitably different, which causes circulation current among inverters. Circulation current will increase energy loss, distortion of output voltage and current waveform, etc. In order to solve these problems, this paper proposes a control strategy that depresses circulation current by controlling zero sequence duty ratio. In SVPWM-based algorithm of traditional zero-sequence circulation control strategy, it only regulates the operating time once in a carrier cycle, resulting in poor circulation suppressing results. To solve the problem and on the basis of establishing zero-sequence circulated mathematical model, this paper proposes to carry out zero vector operating time twice in a carrier cycle to improve zero-sequence circulation suppressing real-timely, and realize the control scheme of shunt inverter load power adaptive sharing based on the instantaneous power feedback output by each inverter. The method can not only suppress circulation current, realize load sharing, but also can significantly improve output voltage and current waveform of three-phase inverters. The validity of the proposed method is verified by simulation and the semi-physical simulation experiment platform.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61374050).

Key words: three-phase inverter; zero sequence circulation current; SVPWM; load sharing

0 引言

随着新能源发电系统的功率逐渐增大, 单台逆变器往往难以满足实际的功率需求, 目前逆变器模块化并联运行是一种有效的解决方法。这种方法不仅可以灵活地配置逆变系统的功率容量, 而且可以通过并联系统的冗余性提高其可靠性。

因逆变器自身参数、功率管开关频率和控制时序等不可避免地存在差异, 会导致并联三相逆变器

之间产生环流^[1-4]。环流会导致逆变器输出电流畸变, 负载不均分, 严重时会导致逆变器出现过流故障, 从而损坏功率器件。

为抑制并联逆变器之间的环流, 通常采用硬件和软件两种类型的方法。第一种方法常用逆变器直流侧或交流侧隔离法, 阻断环流通路^[5], 或者在逆变器输出端串联电感^[6], 但这些方法会增加逆变器体积和成本。第二种方法一般使用控制零序环流的方法来抑制环流: 文献[7]采用零序环流滞环控制的方法调节两个零矢量作用时间来限制零序环流大小, 但是该方法仅适用于不连续空间矢量调制, 而

且滞环宽度也不易控制; 文献[8]应用准谐振控制器来抑制三倍频及其以上的零序环流, 但是还会存在基频的零序环流; 文献[9-10]应用零序占空比与零序环流的关系, 通过改变零矢量作用时间来减小零序环流, 但是存在较大的零序环流控制真空期, 使得控制效果不理想。除以上方法外, 文献[11]采用多载波消除零矢量的作用时间, 并采用无差拍实现环流抑制, 但并联系统的环流抑制效果并不理想, 实际值较大, 而且多载波的控制过程也较复杂; 文献[12]基于平均均流模式的逆变器并联分布式控制的基础上, 针对不同容量逆变器并联的负载电流分配问题, 提出逆变器的双外环控制, 能够实现功率容量分配, 也具有较好的冗余性; 文献[13]应用改进下垂控制来调节各逆变器的输出电压幅值和相位, 但对于共直流母线的并联逆变器, 输出电压的给定值差异也会产生环流, 而且其输出电压外特性较差。

本文在基于 SVPWM 算法的传统零序环流控制策略上提出双变零矢量控制策略, 即在一个载波周期内更新两次零矢量作用时间, 提高零序环流控制实时性。另外针对离网型三相逆变器并联系统负载功率均分问题^[14-16], 提出负载功率自适应均分控制策略, 来提高并联逆变器的均流特性, 实现并联逆变器的负载均分。

1 并联逆变器及环流模型

本文针对图 1 所示的三相逆变器开展并联环流抑制控制, 图中逆变器功率电路为传统的三相三桥臂结构, 滤波器采用 LCL 电路。为了简化系统分析和环流数学模型的推导, 假定三相负载平衡。L₁、L₂ 分别是两台逆变器的滤波电感, R₁、R₂ 分别是两台逆变器的死区效应和线路等效阻抗。

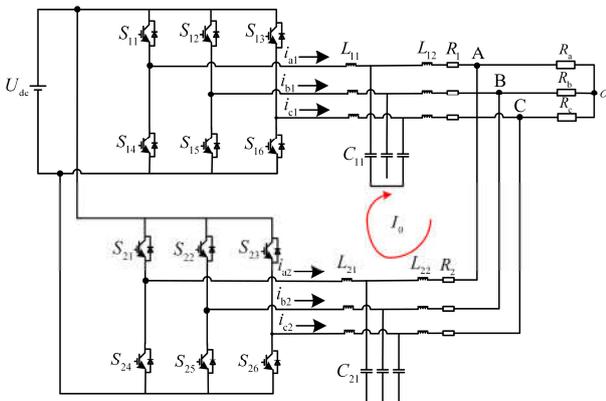


图 1 并联三相逆变器拓扑结构

Fig. 1 Topology of parallel three-phase inverters

因为功率管的开关频率远远大于逆变器输出的交流电压频率, 在一个开关周期内, 逆变器的输出电压可以看作一个受控的电压源。

定义零序占空比为

$$d_z = d_a + d_b + d_c \quad (1)$$

由式(1)可以推导出:

$$(d_a - \frac{d_z}{3}) + (d_b - \frac{d_z}{3}) + (d_c - \frac{d_z}{3}) = 0 \quad (2)$$

单台三相逆变器因为环流通路不存在, 所以不会存在环流。对于并联三相逆变器, 由于环流通路的存在, 所以可能存在环流, 定义零序环流为三相电流之和。

$$I_0 = I_a + I_b + I_c \quad (3)$$

$$\text{令 } d_1 = (d_a - \frac{d_z}{3}), d_2 = (d_b - \frac{d_z}{3}), d_3 = (d_c - \frac{d_z}{3}),$$

那么可以得到并联三相逆变器的开关周期平均模型, 如图 2 所示。由图 2 可以得到并联三相逆变器的电压回路方程组, 如式(4)一式(6)表示。

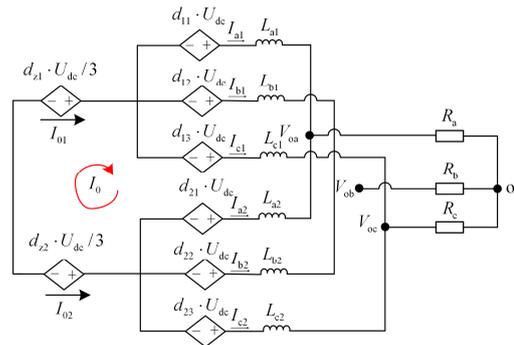


图 2 并联逆变器的平均开关模型

Fig. 2 Average switch model of parallel inverters

$$\frac{d_{z1} \cdot U_{dc}}{3} + d_{21} \cdot U_{dc} - L_1 \frac{dI_{a1}}{dt} - R_1 I_{a1} = \quad (4)$$

$$\frac{d_{z2} \cdot U_{dc}}{3} + d_{22} \cdot U_{dc} - L_1 \frac{dI_{a2}}{dt} - R_1 I_{a2} =$$

$$\frac{d_{z1} \cdot U_{dc}}{3} + d_{21} \cdot U_{dc} - L_1 \frac{dI_{b1}}{dt} - R_1 I_{b1} = \quad (5)$$

$$\frac{d_{z2} \cdot U_{dc}}{3} + d_{22} \cdot U_{dc} - L_1 \frac{dI_{b2}}{dt} - R_1 I_{b2} =$$

$$\frac{d_{z1} \cdot U_{dc}}{3} + d_{21} \cdot U_{dc} - L_1 \frac{dI_{c1}}{dt} - R_1 I_{c1} = \quad (6)$$

$$\frac{d_{z2} \cdot U_{dc}}{3} + d_{22} \cdot U_{dc} - L_1 \frac{dI_{c2}}{dt} - R_1 I_{c2} =$$

综合式(2)一式(6)可以得出零序环流的数学模型为

$$U_{dc} \cdot (d_{z1} - d_{z2}) = (L_1 - L_2) \frac{dI_0}{dt} + (R_1 + R_2) I_0 \quad (7)$$

从式(7)可知, 零序环流与两台逆变器的零序占空比之差、三相逆变器的自身参数有关。所以零序环流的抑制可以在尽量保证电感和电阻一致的情况下, 进一步减小零序占空比之差的研究方向开展。

2 环流控制策略

离网型三相逆变器采用电压电流双闭环控制策略和空间矢量调制(SVPWM)技术。由于 SVPWM 技术中零矢量的作用时间调节不会影响到控制目标, 所以抑制零序环流的方法是通过改变合成矢量中零矢量的作用时间分配来减小零序占空比的差值。

2.1 传统环流控制策略

传统的零序环流控制策略, 是在一个载波周期中, 采集一次环流, 并据此来改变一次零矢量作用时间, 从而减小并联逆变器间零序占空比之差。下面叙述如何通过采集到的环流来改变零矢量作用时间分配。

用 p 、 n 分别表示某一桥臂上、下桥臂开关管导通和关闭的状态, d_0 、 d_7 表示两个零矢量 nnn 、 ppp 在一个开关周期内的作用时间占空比。用未知量 m ($-0.5 < m < 0.5$) 表示需要调节的两个零矢量作用时间占空比的改变量, 在七段式的 SVPWM 算法中, 两个未经改变的零矢量作用时间分配原本是相同的。图 3 为加入改变量 m 后的一个载波周期里的开关波形。在加入 m 后, 两个零矢量的作用时间不再相同, 零序占空比也随之改变。

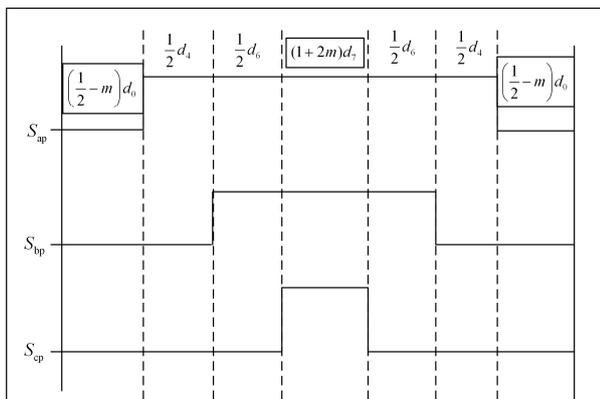


图 3 变零矢量调制开关波形

Fig. 3 Changed zero vector modulation switch waveform

从图 3 可以得到零序占空比值为

$$d_z = d_a + d_b + d_c = d_4 + 2d_6 + (3 + 6m)d_7 \quad (8)$$

并联三相逆变器的控制目标之一是使各三相逆变器的输出电压幅值和相位一致, 因此空间矢量调

制中合成矢量的非零矢量须保持一致。流经两台三相逆变器的零序环流大小相等、方向相反, 因此只需要控制流经其中一台的零序环流即可。使其中一台三相逆变器开关周期内的两个零矢量作用时间平均分配, 即令 $m = 0$; 另一台三相逆变器根据采集的环流大小计算出 m 值, 调节零矢量作用时间占空比。计算公式为

$$d_{z1} - d_{z2} = (d_{11} + 2d_{12} + 3d_7) - (d_{21} + 2d_{22} + (3 + 6m)d_7) = 6md_7 = 6md_0 \quad (9)$$

由式(7)一式(9)可以得到:

$$U_{dc} \cdot 6md_0 = (L_1 + L_2) \frac{dI_0}{dt} + (R_1 + R_2) I_0 \quad (10)$$

将式(10)进行拉普拉斯变换, 得到零序环流和 m 的关系为

$$I_0(s) = \frac{6m(s)}{(L_1 + L_2)s + (R_1 + R_2)} U_{dc} \quad (11)$$

在一个载波周期中, 采集到的零序环流经过 PI 控制器计算得出 m , 零矢量作用时间占空比改变量 m 的计算过程如式(12)所示。

$$m = K_p (i_{0_ref} - i_0) + K_i \int (i_{0_ref} - i_0) dt \quad (12)$$

式中: i_{0_ref} 代表零序环流给定值; K_p 表示比例系数; K_i 表示积分系数。

计算出 m 后, 在该载波周期内改变一次合成矢量中零矢量的作用时间分配, 即可减小两台三相逆变器的零序占空比差值, 使零序环流得到抑制。零序环流控制框图如图 4 所示。

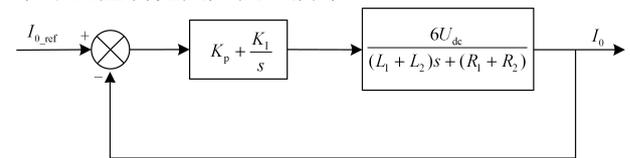


图 4 零序环流控制框图

Fig. 4 Block diagram of zero sequence circulation current control

这种传统的控制策略虽然能够抑制零序环流, 但只能在一个载波周期采集一次零序环流并改变一次零矢量作用时间分配, 在两个环流采集点之间的一个载波周期内存在控制真空期, 在这期间零序环流不受监控, 零矢量作用时间分配也不再发生改变。如果零序环流在载波周期内的时间点发生突变, 那么该控制策略无法做出有效的应对。

2.2 双变零矢量环流控制策略

基于上述传统零序环流控制策略方案, 将零序环流采样频率提高至一个载波周期两次, 零矢量的

作用时间分配同样改变两次, 实现双变零矢量控制。如图 5 所示, 假设一个载波周期为 T_c , 在第 k 个载波周期的开始和中间进行零序环流采集, 并计算得出 m 值, 进而改变零矢量的作用时间分配。具体过程如下所述。

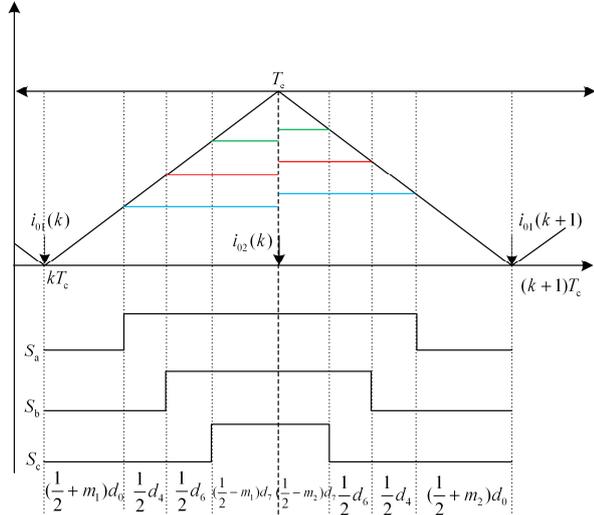


图 5 双变零矢量调制开关波形

Fig. 5 Double changed zero vector modulation switch waveform

在时间点 kT_c , 进行第一次零序环流采集 $i_{01}(k)$, 然后计算出 $m_1(k)$, 改变该载波周期内前半周期的零矢量作用时间; 在时间点 $(k+0.5)T_c$, 进行第二次零序环流采集 $i_{02}(k)$, 然后计算出 $m_2(k)$, 改变该载波周期后半周期的零矢量作用时间; 如此在每个载波周期内重复。

可以看出, 即使在一个载波周期内改变了两次零矢量作用时间分配, 也不会影响非零矢量的作用时间, 即不会影响逆变器的电压输出。

相比传统零序环流控制策略, 双变零矢量零序环流控制策略会多一个零序环流采样和计算的过程, 但对于高速数字处理芯片, 这个过程只占一个载波周期很小部分的时间比例, 因此采集和计算时间增加量相比于并联三相逆变器性能的提升是可以忽略的。

3 负载功率自适应均分控制策略

如果并联三相逆变器间的参数差异性过大, 即使上述控制策略能够较好地抑制零序环流, 却会出现并联三相逆变器间功率不均分的情况。负载功率不均分直接表现在各台三相逆变器输出的电流幅值的差异。一旦出现差异过大的情况, 会使得各三相逆变器功率应力不同, 承受较大功率的三相逆变器受损。

在采用零序环流控制策略的同时, 加入负载功率自适应均分控制策略, 不仅能够使得各逆变器输出电流接近一致从而达到负载均分的目的, 也能够有效改善各三相逆变器输出电压和电流波形。

通过采集各三相逆变器的输出电压和电流来计算出各自的瞬时输出负载功率, 取平均值作为瞬时负载功率给定值, 与各三相逆变器瞬时负载功率输出比较, 得到瞬时负载功率误差, 最后通过瞬时负载功率闭环调压器得到电压修正值, 从而实现各三相逆变器的瞬时负载功率输出跟踪瞬时负载功率给定值。改变了各三相逆变器的电压基准给定值后, 使其输出电流改变, 从而达到一致。图 6 为负载功率自适应均分控制框图。

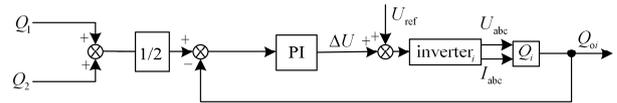


图 6 负载功率自适应均分控制框图

Fig. 6 Block diagram of adaptive load sharing control

负载功率自适应均分调压器为 PI 控制器, 由图 6 可得逆变器电压修正参考值 U_i ($i=1, 2$) 的计算公式为

$$U_i = \left(K_{Q_P} + \frac{K_{Q_I}}{s} \right) \cdot (Q_{ref} - Q_i) + U_{ref} \quad (13)$$

式中: K_{Q_P} 、 K_{Q_I} 分别是 PI 调压器的比例、积分系数; Q_i 是每台逆变器的输出负载瞬时功率; Q_{ref} 是两台逆变器输出负载瞬时功率的平均值, 并作为负载功率基准信号。

通过电压修正值来改变各逆变器的输出电压参考值, 各逆变器改变后的输出电压参考值就能使输出电流保持一致。因此在加入负载功率自适应均分控制策略后, 并联三相逆变器在负载功率均分上的问题得到了解决。

并联三相逆变器的总体控制框图如图 7 所示。

4 仿真与实验

为验证上述控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 搭建了 50 kW 三相逆变器并联仿真平台, 并搭建了以 TMS320F28335 为核心控制器的半实物仿真实验平台。验证分为以下三种情况:

- 1) 不加入零序环流控制策略和负载功率自适应均分控制策略;
- 2) 加入零序环流控制策略但不加入负载功率自适应均分控制策略;
- 3) 同时加入零序环流控制策略和负载功率自适应均分控制策略。

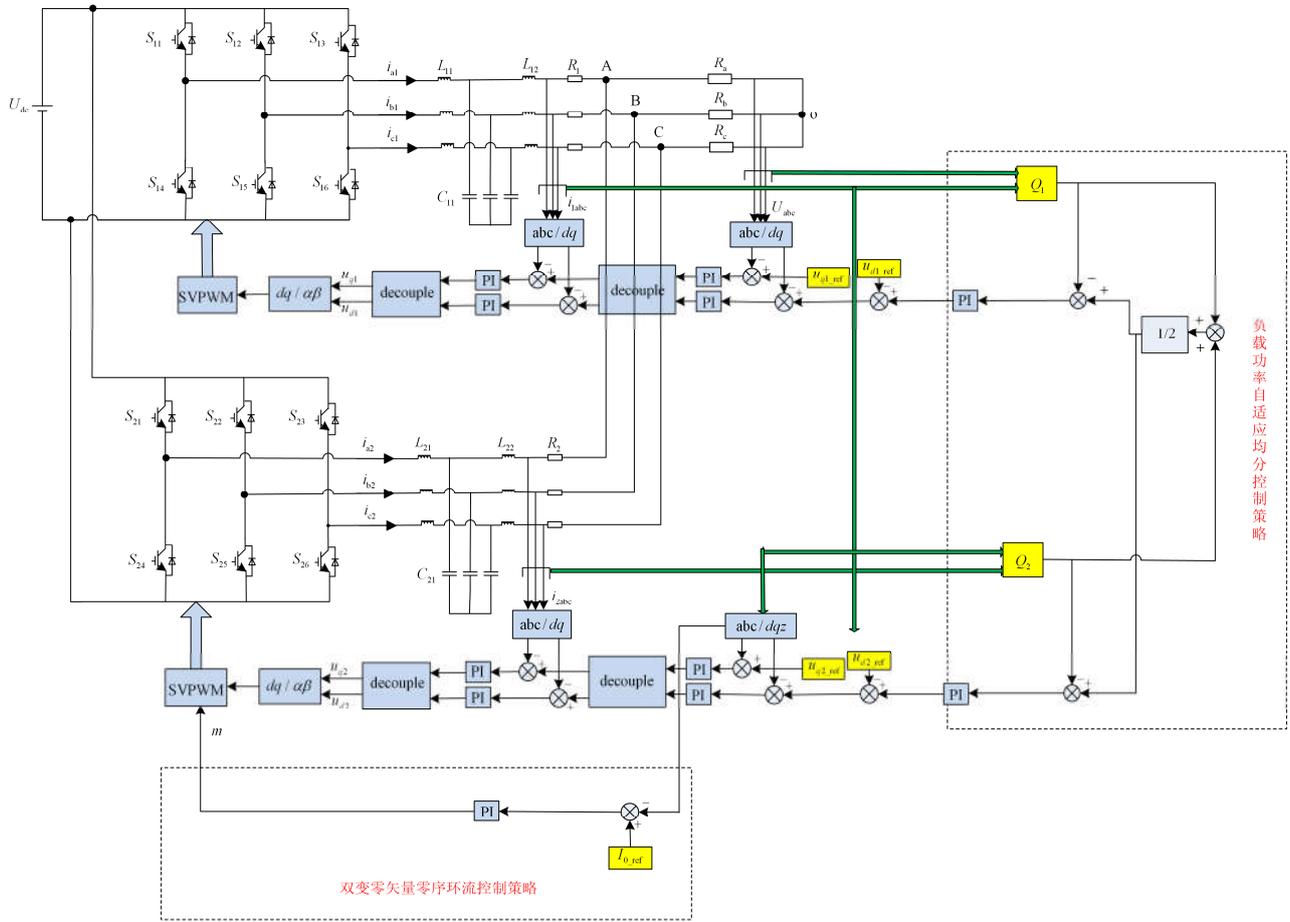


图 7 并联三相逆变器总体控制框图

Fig. 7 Block diagram of parallel inverters overall control

并联三相逆变器 LCL 滤波电路中的无源阻尼阻值为 24Ω ，逆变器死区和线路阻抗等效阻值为 0.1Ω 。考虑 2 台逆变器并联运行参数的差异，将其中一台逆变器各参数设置如下：

1) LCL 滤波电路中电感、电容参数和线路阻抗分别变为 0.7 mH 、 $30 \mu\text{F}$ 和 0.2Ω ；

2) 死区时间变为 $4 \mu\text{s}$ ，开关频率变为 19 kHz ，SVPWM 驱动信号延迟 $1 \mu\text{s}$ 。

仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

名称	数值
直流侧电压	680 V
L_1	0.6 mH
L_2	0.2 mH
C	20 μF
交流侧电压幅值	311 V
开关频率	20 kHz
死区时间	3 μs
并联输出功率	50 kW

未加入零序环流控制策略情况的仿真结果如图 8 所示。逆变器输出的 a 相电流的幅值为 55 A，从仿真结果看出输出电流出现很大畸形，而零序环流的最大值达到了 20 A，说明零序环流的数值很大。

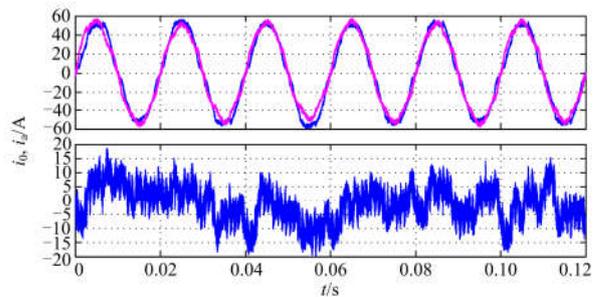


图 8 a 相电流和环流

Fig. 8 Current and circulation current of phase a

加入零序环流控制策略后，两台逆变器 a 相电流和零序环流如图 9 所示。图 9(a)是传统的零序环流控制策略下的仿真结果，图 9(b)是本文提出的双变零矢量零序环流控制策略下的仿真结果。从图 9

可以看出, 双变零矢量零序环流控制策略下的零序环流最大值为 10.3 A, 而传统零序环流控制策略下的零序环流最大值为 13.6 A, 因此双变零矢量零序环流控制策略下的环流抑制效果更好。

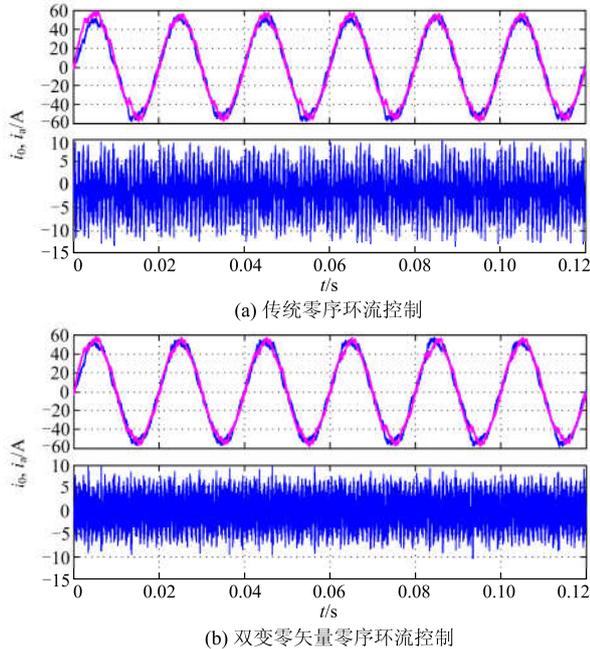


图 9 a 相电流和零序环流

Fig. 9 Current and zero sequence circulation current of phase a

在各种情况下仿真的并联三相逆变器输出电流和负载电流 *THD* 值见表 2。随着控制策略的完善, *THD* 值也逐渐变小。特别是加入负载功率自适应均分控制策略后, *THD* 值有了明显的减小。

表 2 仿真输出电流 *THD* 值

Table 2 Simulation *THD* of output current

控制策略	第一台	第二台	负载电流
传统零序环流控制	9.57%	8.57%	1.63%
双变零矢量零序环流控制	7.84%	7.23%	1.52%
加入负载功率自适应均分控制	6.28%	5.55%	1.48%

半实物仿真实验平台如图 10 所示。该实验平台主要由 DSP(TMS320F28335)控制板、FPGA 仿真板、AD/DA 板卡和上位机组成。

具体实验过程是: 利用 verilog 语言建立逆变器中所包含的开关管、电感、电容等各个元器件模型, 将各元器件模型连接起来构成并联三相逆变器拓扑结构模型写入 FPGA, 作为半实物仿真平台的模型部分; 然后将三相逆变器运行程序, 环流控制和负载功率自适应均分控制程序烧写至 DSP 控制器中。DSP 控制板和 FPGA 仿真板之间通过 AD/DA 进行数据传输, FPGA 和上位机之间同样通过 AD/DA 传

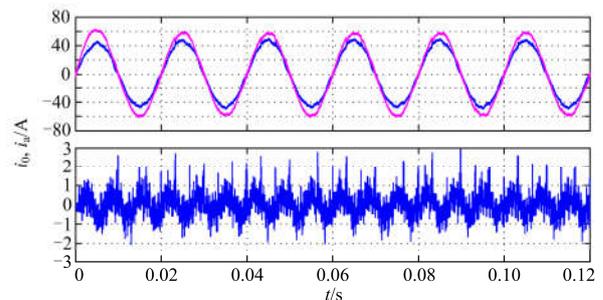
输数据, 将并联三相逆变器关键位置的电压、电流等信号传送到上位机并显示, 实验过程中, 包括电压、电流、环流等数据传输至 DSP 中处理, 最后输出并联逆变器的输出电压、电流和环流波形图。



图 10 半实物仿真实验平台

Fig. 10 Semi-physical simulation experiment platform

在半实物仿真实验平台上研究负载功率自适应均分控制策略的必要性。假设两台逆变器参数差异较大时, 令其中一台逆变器线路阻抗变为 0.5Ω , 其他参数一致时, 实验结果如图 11(a)。虽零序环流抑制效果较好, 但两台逆变器输出电流幅值出现较大差异, 分别是 59.2 A 和 49.6 A。在上述情况下加入负载功率自适应均分控制策略后, 实验得到各逆变器的输出电流和零序环流如图 11(b)所示。可以看出两台逆变器输出电流基本相同, 零序环流也保持较小, 达到了负载功率均分的目的, 同时也较好地改善了输出电流的波形, 使整个并联系统更加稳定可靠。



(a) 零序环流控制

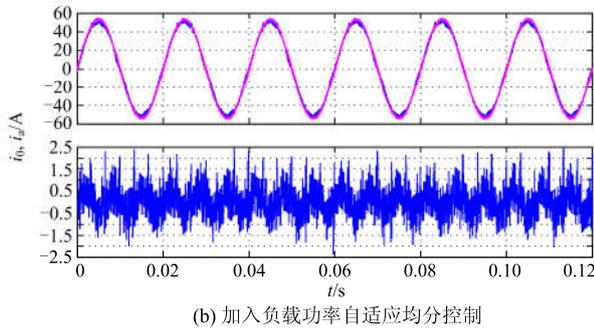
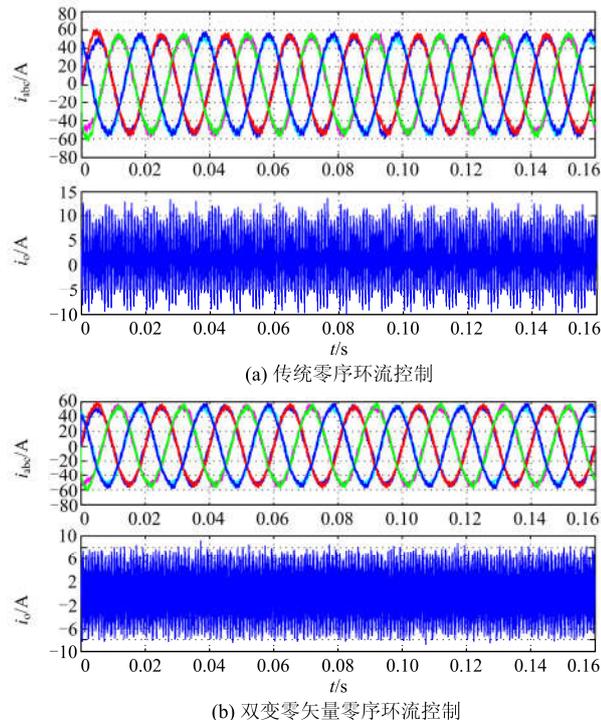


图 11 a 相电流和零序环流

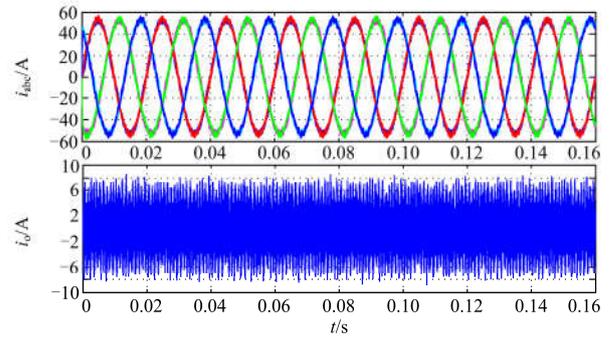
Fig. 11 Current and zero sequence circulation current of phase a

在该平台上进行上述条件下的实验，实验结果如图 12 所示。图 12(a)、(b)和(c)分别是传统零序环流控制策略、双变零矢量零序环流控制策略和双变零矢量零序环流控制及负载功率自适应均分控制两种策略共同作用的实验结果。图 12(a)中环流的幅值达到了 14 A，并且环流数值超过 10 A 的时间占比较大，说明环流抑制效果不佳。图 12(b)中环流幅值为 9.2 A，环流抑制效果明显比传统零序环流控制策略好。图 12(c)中环流抑制效果与图 12(b)中环流抑制效果相近，但三相逆变器输出电流波形较好。

两台三相逆变器输出电流和并联输出负载电流的 THD 值见表 3。从表 3 可以看出，实验结果与仿真结果相近，在加入负载功率自适应均分控制策略之后，在使零序环流抑制效果较好的同时，能够减小各逆变器输出电流、电压的 THD 值。



(b) 双变零矢量零序环流控制



(c) 加入负载功率自适应均分控制

图 12 三相电流和零序环流

Fig. 12 Three phase current and zero sequence circulation current

表 3 实验输出电流 THD 值

Table 3 Experiment THD of output current

控制策略	第一台	第二台	负载电流
传统零序环流控制	6.97%	6.16%	1.55%
双变零矢量零序环流控制	6.36%	5.65%	1.47%
加入负载功率自适应均分控制	5.43%	5.02%	1.45%

5 结论

为抑制并联三相逆变器间的环流，本文提出的双变零矢量零序环流控制策略，相比传统的零序环流控制策略，提高了控制实时性，显著地提升了环流抑制效果。另外，该策略包含的负载功率自适应均分控制策略，不仅能实现负载均分，还能有效地改善各三相逆变器输出电压和输出电流波形，降低其 THD 值，使并联三相逆变器运行更可靠。

参考文献

- [1] PAN C T, CHANG J Y, LAI C M, et al. Modeling of circulating currents for grid-connected parallel three-phase inverters[C] // Sice Conference: IEEE, 2008: 1319-1322.
 - [2] JIANG Y, XIONG S, HUANG S D, et al. Control of circulating current in parallel three-phase inverter in MW wind power system[C] // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on: IEEE, 2010: 133-136.
 - [3] ZHANG Y, KANG Y, CHEN J. The zero-sequence circulating currents between parallel three-phase inverters with three-pole transformers and reactors[C] // Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06. 2006: 7pp.
 - [4] 陈良亮, 肖岚, 胡文斌, 等. 一种基于耦合电感的逆变器并联系统环流抑制方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 205-209.
- CHEN Liangliang, XIAO Lan, HU Wenbin, et al.

- Circulating-current restraining method based on coupled inductors in parallel inverter system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(2): 205-209.
- [5] CHEN T P. Common-mode ripple current estimator for parallel three-phase inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1330-1339.
- [6] 许铁岩, 罗耀华. 基于准谐振控制器的零序环流抑制[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(11): 64-69.
XU Tiejian, LUO Yaohua. The zero sequence circulating current suppression based on quasi resonant controller[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(11): 64-69.
- [7] YE Z, BOROYEVICH D, LEE F C. Modeling and control of zero-sequence current in parallel multi-phase converters[C] // Power Electronics Specialists Conference: IEEE, 2000: 680-685.
- [8] 陈素华. 基于多载波和 PR 控制实现变换器并联环流抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 129-134.
CHEN Suhua. Multicarrier PWM and PR control strategy of circulating current reduction for grid-connected converters[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 129-134.
- [9] 李依璘, 王明渝, 梁慧慧, 等. 基于分布式控制的不同容量逆变器并联技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 123-128.
LI Yilin, WANG Mingyu, LIANG Huihui, et al. Study on distribution controlled inverter parallel system with different power ratings[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 123-128.
- [10] 徐玉琴, 马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 103-107.
XU Yuqin, MA Huanjun. Parallel operation technology of inverters based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 103-107.
- [11] 王立建, 王明渝, 刘洋, 等. 一种新型的电压源逆变器并联控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 51-55.
WANG Lijian, WANG Mingyu, LIU Yang, et al. A novel control strategy for parallel operation of voltage source inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 51-55.
- [12] TAN J, LIN H, ZHANG J, et al. A novel load sharing control technique for paralleled inverters[C] // PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2003, 3: 1432-1437.
- [13] SUO J, YANG Y, QI C. Control of circulating current for direct parallel grid-connected inverters in photovoltaic power generation[C] // International Conference on Mechatronics and Automation: IEEE, 2009: 3805-3810.
- [14] 肖兵, 陈祥旺, 余师棠. 并联三相并网逆变器环流的控制[J]. 电器与能效管理技术, 2010(1): 42-45.
XIAO Bing, CHEN Xiangwang, YU Shitang. Circulation current control of parallel three-phase grid-connected inverters[J]. Electrical and Energy Efficiency Management Technology, 2010(1): 42-45.
- [15] CHEN Y, SMEDLEY K M. One-cycle-controlled three-phase grid-connected inverters and their parallel operation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(2): 663-671.
- [16] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0012-2

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2017-01-05

作者简介:

马璐(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子、DC/AC变换; E-mail: 1290108882@qq.com

刘莉(1975—), 女, 通信作者, 硕士, 实验师, 主要研究方向为新能源电力变换与控制、电力电子技术; E-mail: liuly@whut.edu.cn

雷蕾(1976—), 女, 硕士, 主要研究方向为车用新能源动力装置与控制。E-mail: leilei@dpca.com.cn

(编辑 姜新丽)