

三相逆变器并联系统中零序环流的研究

张宇, 段善旭, 康勇, 陈坚

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

The Research of Zero-sequence Circulating Currents Between Parallel Three-phase Inverters

ZHANG Yu, DUAN Shan-xu, KANG Yong, CHEN Jian

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: It is well known that zero-sequence circulating currents could exist in parallel three-phase converters. However, these conclusions are normally drawn out without considering the magnetic couples caused by the three-pole transformers and three-pole reactors. In fact, for the cost and size, the three-phase reactors and transformers used in three-phase inverters normally have only three poles. In parallel three-phase inverter systems, the magnetic couples between three phases in each three-phase inverter make the zero-sequence circulating currents behave differently from those of three-phase inverters with only three single-phase reactors and three single-phase transformers. In this paper, the instantaneous model of zero-sequence circulating current between parallel three-phase inverters with three-pole reactors and three-pole transformers is established. The analysis based on this model indicates that magnetic couples caused by three-pole reactors and transformers have great influence on the zero-sequence circulating currents. Simulations and experiments validated the above conclusion.

KEY WORDS: Power electronics; Three-phase inverter; Magnetic couple; Parallel; Zero-sequence circulating current; Three-pole reactor; Three-pole transformer

摘要: 现有的文献已经论证了在三相逆变器并联系统中,存在着零序环流的通路。然而,这些结论基本上都是在无输出变压器及忽略了三磁柱电感磁路耦合的前提下得出的。事实上,在三相逆变器中,出于体积和成本的考虑,滤波电感和输出变压器通常都采用三磁柱铁芯来绕制,由此带来的三相间磁路耦合使得三相逆变器的零序相量特性与三个单相逆变器构成的三相逆变器是完全不同的,这对三相逆变器并联系统中的零序环流也产生了很大的影响。该文基于三磁柱变压器及三磁柱电感的动态方程建立了带三磁柱电感及三磁柱变压器的三相逆变器瞬时零序分量模型。基于该模型的分

析发现,三相逆变器并联系统中,三磁柱电感及三磁柱变压器的采用使得零序环流的大小和通路发生了很大的变化。仿真与实验验证了上述结论。

关键词: 电力电子; 三相逆变器; 磁路耦合; 并联; 零序环流; 三磁柱电感; 三磁柱变压器

0 引言

在三相逆变器中,为减轻体积和成本,其三相滤波电感和三相输出变压器通常都采用三磁柱的铁芯结构。基于稳态的对称相量分析可知^[1-3],由于三相磁路的对称性,使得零序磁通只能通过钢制外壳及空气构成回路,因而零序励磁阻抗是较小的。而在逆变器中,变压器通常没有专门的外壳,零序磁通大部分通过空气构成回路,零序励磁阻抗将会更小,这使得三相逆变器的零序相量的特性与正序、负序相量存在着很大的差异^[2-3]。

采用了三磁柱电感及变压器,三相逆变器的三相间将通过磁路产生耦合,因此三相逆变器的动态模型及瞬态分析都比较复杂^[4-5]。目前,三相逆变器的动态建模通常都回避了三相间的磁路耦合,而将三磁柱变压器看作3个单相变压器,将三磁柱电感看作三个单相电感的近似处理,在三相逆变桥的输出完全对称时所得出的结论是可以接受的^[5-6]。

现有的文献^[6-7]已经论证了在三相逆变器并联系统中,存在着零序环流的流电路径,当三相逆变器共直流母线时,零序环流将通过直流母线形成环路。然而,这些结论都是在忽略了三相间磁路耦合的前提下得出的。事实上,由于三磁柱变压器及三磁柱电感带来了相间磁路耦合,使得三相逆变器并联系统中,零序环流变得更为复杂。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50237020)。

Project Supported by National Natural Science Key Foundation of China 50237020) .

对于图 1 所示的三相六桥臂组合式逆变器结构，由于 IGBT 承担的电流较低，且可采用单极倍频 SPWM 方式降低开关频率，已被广泛应用于大功率场合。但在这种逆变器中，三相逆变桥所产生的零序电压可以畅通无阻地加到三相输出变压器的原边，对三相逆变器的运行产生了很大的影响^[8]。如果以这种逆变器构成并联系统，三磁柱滤波电感 L 和三磁柱输出变压器 T_r 的磁路耦合将对零序环流的通路及大小产生很大的影响。

本文基于三磁柱电感和三磁柱变压器在 ABC 静止坐标系中的瞬时磁链及电压方程，得出了它们的瞬时零序分量表达式，进而建立了图 1 所示的三相逆变器的瞬时零序分量数学模型。基于该模型对三相逆变器并联系统的零序环流进行研究后发现，三磁柱电感及三磁柱变压器的相间磁路耦合，使得零序环流的通路及大小产生了很大的变化。

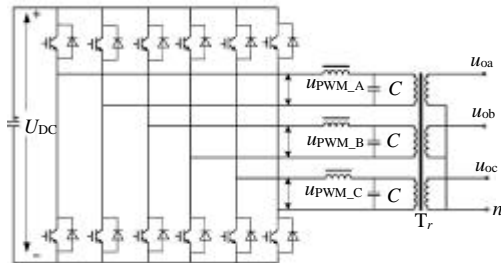


图 1 三相六桥臂组合式逆变器
Fig. 1 Three-phase full bridge inverter

1 瞬时零序分量

瞬时零序分量的表达式为^[4,9-10]。

$$x^0(t) = x_a(t) + x_b(t) + x_c(t) \quad (1)$$

式中 $x_a(t)$, $x_b(t)$, $x_c(t)$ 为三相瞬时变量， $x^0(t)$ 为三相瞬时变量对应的瞬时零序分量。

式(1)中的瞬时零序分量是由三相瞬时变量求得，因此不一定为正弦波。在三相系统中，三相相量可通过对称分量变换得到稳态的零序分量^[3-4]，本

$$\begin{bmatrix} y_A(t) \\ y_B(t) \\ y_C(t) \\ y'_a(t) \\ y'_b(t) \\ y'_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1m} + L_{1l} & -L_{1m}/2 & -L_{1m}/2 & L_{1m} & -L_{1m}/2 & -L_{1m}/2 \\ -L_{1m}/2 & L_{1m} + L_{1l} & -L_{1m}/2 & -L_{1m}/2 & L_{1m} & -L_{1m}/2 \\ -L_{1m}/2 & -L_{1m}/2 & L_{1m} + L_{1l} & -\frac{1}{2}L_{1m} & -L_{1m}/2 & L_{1m} \\ L_{1m} & -L_{1m}/2 & -L_{1m}/2 & L_{1m} + L'_{2l} & -L_{1m}/2 & -L_{1m}/2 \\ -L_{1m}/2 & L_{1m} & -L_{1m}/2 & -\frac{1}{2}L_{1m} & L_{1m} + L'_{2l} & -L_{1m}/2 \\ -L_{1m}/2 & -L_{1m}/2 & L_{1m} & -\frac{1}{2}L_{1m} & -L_{1m}/2 & L_{1m} + L'_{2l} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \\ i'_a(t) \\ i'_b(t) \\ i'_c(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

为书写方便，下面的方程中，折算后得到的副边变量及参数不再加写符号“'”，所有副边变量及参数都默认为已折算到变压器的原边。

文称之为零序相量，它是瞬时零序分量的稳态形式。

2 三磁柱变压器的瞬时零序分量模型

假定电压、电流、磁链的正方向符合右手螺旋法则，且不考虑变压器磁路的饱和，三相绕组电压电流的参考方向如图 2 所示。设 $Y_A(t)$, $Y_B(t)$, $Y_C(t)$ 为原边三相绕组相交链的磁链， $Y_a(t)$, $Y_b(t)$, $Y_c(t)$ 为副边三相绕组相交链的磁链； $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ 为原边三相绕组的电流， $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ 为副边三相绕组的电流，则在 ABC 静止坐标系中，三相绕组的磁链如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} y_A(t) \\ y_B(t) \\ y_C(t) \\ y_a(t) \\ y_b(t) \\ y_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & M_{Aa} & M_{Ab} & M_{Ac} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & M_{Ba} & M_{Bb} & M_{Bc} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & M_{Ca} & M_{Cb} & M_{Cc} \\ M_{aA} & M_{aB} & M_{aC} & L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{bA} & M_{bB} & M_{bC} & M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{cA} & M_{cB} & M_{cC} & M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \\ i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

如果变压器的三相磁路完全对称， I 为每相磁路的磁导，则与主磁通相对应的原边每相自感为

$$L_{1m} = [N_1 \cdot (i_A \cdot N_1) \cdot I] / i_A = I N_1^2 \quad (3)$$

与主磁通对应的副边每相自感以及原副边之间的互感为

$$L_{2m} = [N_2 \cdot (i_a \cdot N_2) \cdot I] / i_a = I N_2^2 \quad (4)$$

$$M_{12} = [N_1 \cdot (i_a \cdot N_2) \cdot I] / i_a = I N_1 N_2 \quad (5)$$

如果将变压器副边参数折算到原边，可得副边每相的参数为

$$L'_{2m} = M'_{12} = L_{1m} \quad (6)$$

$$L'_{2l} = L_{2l} \cdot (N_1/N_2)^2 \quad (7)$$

$$r'_2 = r_2 \cdot (N_1/N_2)^2 \quad (8)$$

于是可得磁链方程如下：

设 $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ 为变压器原边三相绕组的电压， $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ 为副边三相绕组的电压，设 $D=d/dt$ 为微分算子，则三磁柱变压器 6 个绕组的电

压方程为

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \\ u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \\ i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} y_A(t) \\ y_B(t) \\ y_C(t) \\ y_a(t) \\ y_b(t) \\ y_c(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(3)、(4)可得出三磁柱变压器磁链及电压的瞬时零序分量, 如式(11)和(12)所示。

$$\begin{cases} y_1^0(t) = L_{l1} \cdot i_1^0(t) \\ y_2^0(t) = L_{l2} \cdot i_2^0(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} u_1^0 = r_1 \cdot i_1^0 + D(y_1^0) = r_1 \cdot i_1^0 + L_{l1} \cdot D(i_1^0) \\ u_2^0 = r_2 \cdot i_2^0 + D(y_2^0) = r_2 \cdot i_2^0 + L_{l2} \cdot D(i_2^0) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $u_1^0(t)$ 为原边三相电压瞬时值对应的瞬时零序分量; $u_2^0(t)$ 为副边三相电压瞬时值对应的瞬时零序分量; 下标“1”代表原边变量; 下标“2”代表副边变量, 电流、磁链的表示方法与此相同。

根据方程(2)可画出三磁柱变压器的瞬时零序分量的等效电路, 如图3所示。

由图3可知, 三磁柱变压器使得瞬时零序电压分量被原边短路掉而无法传送到副边。

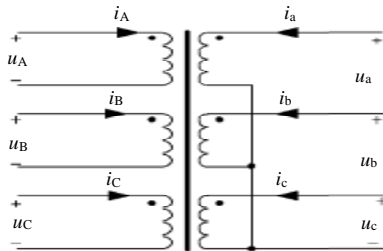


图2 三相变压器的电压电流

Fig. 2 The voltages and currents of three-pole transformers

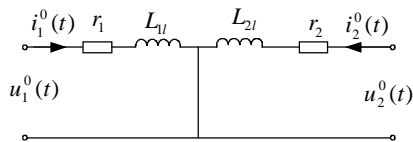


图3 三相变压器瞬时零序分量等效电路

Fig. 3 The equivalent zero-sequence components circuit of three-pole transformers

3 三磁柱电感的瞬时零序分量模型

三磁柱电感只有3个绕组, 设 $Y_A(t)$, $Y_B(t)$, $Y_C(t)$ 为三相绕组相交链的磁链; $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ 为三相绕组的瞬时电流。在 ABC 坐标系中, 三相电感的磁链方程如式(13)所示。

$$\begin{bmatrix} y_A(t) \\ y_B(t) \\ y_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_l + L_m & -L_m/2 & -L_m/2 \\ -L_m/2 & L_l + L_m & -L_m/2 \\ -L_m/2 & -L_m/2 & L_l + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: r_L 为电感每相损耗的等效电阻; L_l 为每相的漏感; L_m 为三相间的互感。

令 $y_L^0(t)$ 为三相瞬时磁链对应的瞬时零序分量, $i_L^0(t)$ 为三相瞬时电流对应的瞬时零序分量, 则由式(13)可得出三相磁链的瞬时零序分量方程为

$$y_L^0(t) = L_l \cdot i_L^0(t) \quad (14)$$

其中, $L = L_l + L_m$ 。

同时可得三磁柱电感三个绕组的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_L & 0 & 0 \\ 0 & r_L & 0 \\ 0 & 0 & r_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} y_A(t) \\ y_B(t) \\ y_C(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

令 $u_L^0(t)$ 为三相电压瞬时值对应的瞬时零序分量, 参照三磁柱变压器可求得三磁柱电感的电压瞬时零序分量为

$$u_L^0 = r_L \cdot i_L^0 + D(y_L^0) = r_L \cdot i_L^0 + L_l \cdot D(i_L^0) \quad (16)$$

根据式(16)可画出三磁柱电感的瞬时零序分量等效电路, 如图4所示。

由图4可知, 三磁柱电感对瞬时零序分量的电感只表现为漏抗 L_l , 而漏抗是很小的, 近似为零, 因此三磁柱电感对零序分量近似为短路状态。

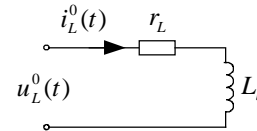


图4 三相电感瞬时零序分量等效电路

Fig. 4 The equivalent zero-sequence components circuit of three-pole reactors

4 三相逆变器的瞬时零序分量模型

综合三磁柱电感、三磁柱变压器的瞬时零序分量数学模型, 对图1的三相组合式逆变器, 可得出瞬时零序分量的等效电路, 如图5所示。

该模型中, 逆变桥输出的电压零序分量被变压器原边短路掉而无法传递到负载上, 而负载侧因不

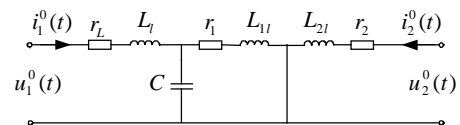


图5 三相逆变器瞬时零序分量等效电路

Fig. 5 The zero-sequence equivalent circuit of three-phase inverters

平衡负载或非线性负载所产生的零序电流则被变压器旁路而无法作用到逆变桥。

5 三相逆变器并系统中的瞬时零序环流

2 台单相逆变器的并联等效电路如图 6 所示。图中， r_{o1} 、 r_{o2} 为电感和线缆的损耗等效电阻； Z_1 、 Z_2 为并机电抗，可由输出变压器 T_r 的漏抗实现。环流定义为^[11-12]

$$i_H(t) = \frac{i_{o1}(t) - i_{o2}(t)}{2} \quad (17)$$

如果忽略并机电感的等效电阻 r_{k1} 和 r_{k2} ，且 $Z_1 = Z_2 = j\omega L_K$ ，则由图 6 可得

$$I_H(s) = \frac{U_{o1}(s) - U_{o2}(s)}{2 \cdot s \cdot L_K} \quad (18)$$

如果三相逆变器采用 3 个单相电感及 3 个单相变压器，则三相逆变器可等效为 3 个单相逆变器进行分析，每相的等效电路与图 6 相同，零序分量的等效电路也和图 6 相同。此时，并联的逆变器之间将存在零序环流的通路，当三相逆变器共直流母线时，零序环流将通过直流母线形成环路^[6-7]。如果忽略 C_1 及 C_2 ，且 2 台三相逆变器中， $L_1 = L_2 = L$ ， $r_{o1} = r_{o2} = r$ ，则零序环流可表示为

$$I_H^0(s) = \frac{U_{PWM1}^0(s) - U_{PWM2}^0(s)}{2 \cdot [r + s(L + L_K)]} = \frac{(s_1^0 - s_2^0) \cdot U_{DC}}{2 \cdot [r + s(L + L_K)]} \quad (19)$$

式中 s_1^0 、 s_2^0 分别为 2 台逆变器三相 SPWM 开关函数的零序分量； U_{DC} 为直流母线电压。

零序环流的存在对逆变器的并联运行是不利的，必须予以抑制^[6-7]。

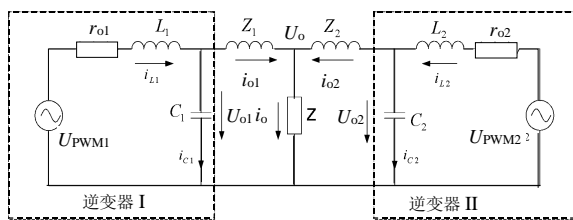


图 6 单相逆变器并联等效电路
Fig. 6 The equivalent circuit of parallel single-phase inverters

6 三磁柱电感及变压器对零序环流的影响

在实际的三相逆变器中，出于体积与成本的考虑，通常都采用三磁柱铁心来绕制三相电感及三相变压器，并机电感可利用变压器的漏感来实现。因此，结合图 5 及图 6 可画出三相逆变器并系统的

零序分量等效电路，如图 7 所示（图中忽略了三相电感及三相变压器的损耗等效电阻 r ， r_1 及 r_2 ）。由该等效电路可以清楚地看出，逆变桥输出的零序分量由于被变压器短路而无法形成零序环流。

在图 7 中，如果不忽略三磁柱电感及三磁柱变压器的损耗等效电阻，由于滤波电容 C 的阻抗较大，与 r_1 、 L_{l1} 相并联时可以忽略，同时令 $r_d = r + r_1$ ，可列出微分方程

$$u_{PWM}^0(t) = r_d \cdot i_1^0(t) + (L_{l1} + L_l) \cdot D[i_1^0(t)] \quad (20)$$

进而可求得原边的零序励磁电流

$$i_1^0(t) = \frac{u_{PWM}^0(t)}{r_d + (L_l + L_{l1}) \cdot D} \quad (21)$$

因此，由于 r_d 、 L_l 、 L_{l1} 的值很小，当三相逆变桥输出电压出现零序分量 $u_{PWM}^0(t)$ 时，会在主电路中产生很大的零序励磁电流 $i_1^0(t)$ ^[13]，而死区引起的三次谐波（表现为零序分量）会使变压器的励磁电流波形产生了畸变^[6]。

在三相三线制的高频链逆变器中^[14]，工频输出变压器通常被去掉，而同时保留三磁柱滤波电感，此时，可得并联等效电路，如图 8 所示。

由图 8 可得零序环流公式

$$I_H^0(s) = \frac{U_{PWM1}^0(s) - U_{PWM2}^0(s)}{2 \cdot s \cdot L_l} = \frac{(s_1^0 - s_2^0) \cdot U_{DC}}{2 \cdot s \cdot L_l} \quad (22)$$

可以看到，由于三相电感的漏抗 L_l 非常小，一旦两台三相逆变器出现零序分量的差异，会引起很大的零序环流，因此，在高频链逆变器并系统中，当采用三磁柱滤波电感时，应当尽量避免三相逆变桥输出 SPWM 电压中零序分量的出现。

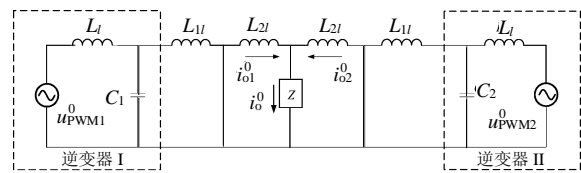


图 7 三相组合式逆变器并联零序分量等效电路
Fig. 7 The zero-sequence equivalent circuit of parallel three-phase inverters with three-pole output transformers

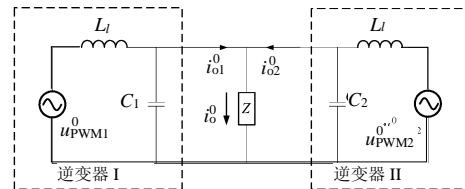


图 8 三相高频链逆变器并联零序分量等效电路
Fig. 8 The zero-sequence equivalent circuit of parallel three-phase inverters without output transformer

当采用三磁柱电感作并机电感时,可画出零序分量的等效电路,如图9所示。图中, L_{kl} 为并机电感的漏抗。

由图9可得零序环流公式为

$$i_H^0(s) = \frac{u_{o1}^0(s) - u_{o2}^0(s)}{2 \cdot L_{kl}} \quad (23)$$

由于 L_{kl} 很小,三磁柱并机电感对零序环流并无抑制作用。因此,当采用三磁柱电感作为并机电感时,应避免逆变器输出中零序分量的出现。

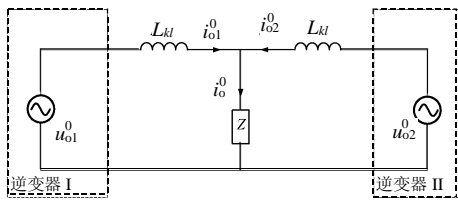


图9 三相并机电感零序分量等效电路

Fig.9 The zero-sequence equivalent circuit of parallel three-phase inverters with three-pole parallel reactors

7 三相逆变桥输出中零序分量的产生

在图1所示的三相逆变器中,三相逆变桥的零序分量主要由两种因素产生:

(1) 电压零序分量由死区等因素造成^[15]。死区使得三相逆变桥输出的SPWM波中含有大量的低次谐波,其中的 $3k$ 次谐波构成了瞬时零序分量。对于三相三线制的逆变器而言,零序分量构成了不了回路,但对图1所示的逆变器,零序分量会造成输出变压器励磁电流的畸变。

(2) 三相逆变器构成并联系统时,当逆变器为实现三相均流而对三相电压的幅值和相位进行独立调节时,会使三相逆变桥输出的SPWM波产生很高的基波零序分量,当采用三磁柱滤波电感及三磁柱输出变压器时三磁柱滤波电感对其基本没有抑制作用^[8]。零序分量基本上处于短路状态,由于三相变压器的励磁电流剧增,很容易引起过载保护。

8 仿真与实验

在图1所示的50 kVA三相逆变器上进行了相关实验。三相逆变器的主电路参数为: $L=0.43\text{mH}$, $C=140\mu\text{F}$,死区设置为 $4\mu\text{s}$ 。

正常情况下,当死区较小,且三相逆变桥的调制波完全对称时,励磁电流只有5A左右,励磁电流近似为正弦波。将A、B相SPWM调制波的相位差由 120° 改为 122.3° 后,对A相励磁电流进行了观

测,实测波形如图10所示。由于三磁柱电感及三磁柱变压器对逆变桥输出的零序分量接近于短路状态,即使逆变器为空载状态,励磁电流也达到了20A,而死区引起的零序分量使变压器的励磁电流波形产生了一定的畸变。

三相调制波不对称时,三相逆变桥的输出也会含有一定的负序相量,但它比正序相量小很多,由于负序励磁阻抗和正序励磁阻抗相同,使得负序励磁电流比5A小很多,因此实验中高达20A的励磁电流主要是由零序相量产生的。

基于三相逆变器的瞬时零序分量模型对三相变压器的励磁电流进行了相应的仿真,如图11所示。

仿真结果显示,当采用三磁柱电感及三磁柱输出变压器时,零序分量使变压器的励磁电流大大增加,而死区效应使其产生了畸变,这和实验结果是完全一致的。

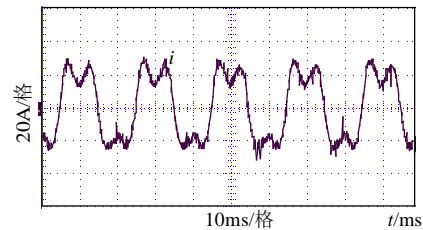


图10 实验: 零序分量产生的励磁电流畸变

Fig.10 Experiment: The distortion of magnetic currents caused by zero-sequence voltage

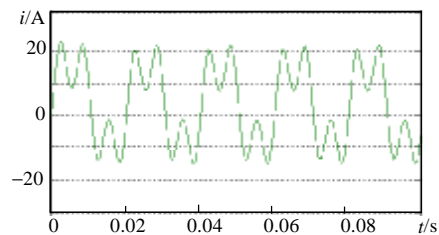


图11 仿真: 零序分量产生的励磁电流畸变

Fig.11 Simulation: The distortion of the magnetic currents caused by the zero-sequence voltage

9 结论

本文从瞬态的角度,基于三磁柱变压器及三磁柱电感的瞬时磁链及电压方程,建立了带三磁柱滤波电感及三磁柱输出变压器的三相逆变器的瞬时零序分量模型。基于该模型对三相逆变器并联系统中的零序环流进行研究后发现,采用三磁柱电感和变压器的三相逆变器对于三相逆变桥输出的零序分量近似于短路状态,将这种三相逆变器构成并联系统

时,三磁柱输出变压器将使零序环流无法流通,同时使变压器的励磁电流大大增加。不采用输出变压器时,三磁柱滤波电感及三磁柱并机电抗对零序环流的抑制作用很小。仿真和实验验证了这一结论。因此,在三相逆变器并联系统的设计中,必须充分考虑三磁柱电感及三磁柱变压器对零序环流的影响,否则将会带来非常不利的后果。

参考文献

- [1] Fortescue C L. Method of symmetrical coordinates applied to solution of poly-phase networks[J]. AIEE Trans., 1918, 37: 1027-1140.
- [2] 何仰赞,温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [3] 辜承林. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [4] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [5] 詹长江, 康勇, 刘平, 等. 电压型PWM高频整流器统一数学模型及系统仿真[J]. 电工技术学报, 1996, 11(6): 58-62.
Zhang Changjiang, Kang Yong, Liu Ping, et al. General mathematical model and system simulation of the pwm reversible rectifier[J]. Transactions of China Electro-Technical Society, 1996, 11(6): 58-62(in Chinese).
- [6] Zhihong Ye, D Boroyevich, Fred C Lee. Modeling and control of zero-sequence currents in parallel multi-phase converters[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Galway, 2000, 2: 680-685.
- [7] Zhihong Ye, D Boroyevich, Fred C Lee. Paralleling non-isolated multi-phase PWM converters[C]. IEEE Industry Applications Conference, Rome, 2000, 4: 2433-2439.
- [8] 彭力, 白丹, 康勇, 等. 三相逆变器不平衡抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 23(6): 175-180.
Peng Li, Bai Dan, Kang Yong, et al. Research on three-phase inverter with unbalance load[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 23(6): 175-180(in Chinese).
- [9] Lyon W V. Transient analysis of alternating-current machinery [M]. Technology Press of MIT and John Wiley @ Sons Inc, New York, USA, 1954.
- [10] 张宇, 段善旭, 康勇, 等. 基于瞬时对称分量的三相逆变器特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 15-20.
Zhang Yu, Duan Shanxu, Kang Yong, et al. The analysis of three-phase inverters based on instantaneous symmetrical components[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 15-20(in Chinese).
- [11] 邢岩, 严仰光. 电流型调节逆变器的冗余并联控制方法[J]. 电机工程学报, 2004, 24(11): 199-202.
Xing Yan, Yan Yangguang. Control for current regulated inverters in redundant parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 199-202(in Chinese).
- [12] 姜桂宾, 裴云庆, 杨旭, 等. SPWM 逆变电源的无互联信号线并联控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 94-98.
Jiang Geibin, Pei Yunqi, Yang Xu, et al. Parallel operation of sinusoid wave inverters without control interconnections[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 94-98(in Chinese).
- [13] 张宇, 康勇, 陈坚. 三相输出变压器对逆变器并联的影响[J]. 电力电子技术, 2005, 39(4): 24-26.
Zhang Yu, Kang Yong, Chen Jian. Influence of three-phase transformers on parallel inverters[J]. Power Electronics, 2005, 39(4): 24-26(in Chinese).
- [14] 万山明, 吴芳, 黄声华. 三相四桥臂电压源高频链逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 26(1): 47-51.
Wan Shanming, Wu Fang, Huang Shenghua. Three-phase four-leg voltage source high frequency link inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 26(1): 47-51(in Chinese).
- [15] Jeong Seung-Gi. The analysis and compensation of dead time effects in PWM Inverters[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 1991, 38 (2): 108-114.

收稿日期: 2006-02-15。

作者简介:

张宇(1970—), 男, 江苏无锡人, 博士, 从事电力电子与电力传动的研究, zyu1126@pulic-wh.hb.cn。

(编辑 王彦骏)