

新型五电平逆变器三维 PWM 控制

唐 净¹, 黄明聪^{1,2}, 韩英铎^{1,2}

(1. 澳门大学科技学院电机与电子工程系, 澳门特区; 2. 清华大学电机系, 北京 100084)

A NOVEL 3-DIMENSIONAL PWM CONTROL FOR 5-LEVEL INVERTER

TANG Jing¹, HUANG Ming-cong^{1,2}, HAN Ying-duo^{1,2}

(1. Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macao, SAR, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: A novel PWM control method, which combined 3-dimension voltage vector PWM and Double-level Hysteresis method, is introduced into the 5-level inverter PWM system. In the 5-level inverters, the 5-level space vector PWM control method is one of the most popular methods. However, it needs many computational steps and it has to determine the corresponding space vector according to the complex algorithm. By the way, the hardware DSP's requirement is high too. The control of 5-level inverter is more complex than the 3-level one not only due to structure but also the complicated algorithm. The proposed algorithm simplifies the control algorithm in 5-level inverter and also has the common advantages of multi-level inverters. In 3-Phase 4-Wire System, there is the neutral line current. 4-Arms Inverters are needed and one arm of them is dedicated to compensating the zero-sequence current. However, three-dimensional PWM is a novel technique in handling 3-phase 4-wire system and was proposed in 2001. The conventional 3-Arms Inverter can be used in 3-Phase 4-Wire System when the 3DPWM control algorithm is used. The novel control algorithm is proposed with 3DPWM in 5-level 3-Phase 4-Wire Inverter. The mathematical model of 5-level inverter is described in detail. The shunt-connected 5-level power inverter in 3-phase 4-wire system as an active filter, which uses the 3-dimensional voltage vectors pulse width modulation technique, is illustrated. The simulation results demonstrate the validity of the proposed method.

KEY WORDS: 3-dimension PWM; Inverter; Voltage vector; 5-level system

摘要: 多电平逆变器已广泛应用于动态电能质量补偿, 但因其电平增加, 控制算法变得更为复杂。文中介绍了一种简单有效的新型控制算法——二层三维脉宽调制(3 Dimensional PWM)滞环控制算法。二层 3DPWM 滞环控制使控制算法大为简化, 降低了对控制系统硬件和软件的要求, 从而提高了系统的控制性能。很多三相四线制系统中中性线电流的补偿需要附加一桥臂分支来实现, 使得原有的三桥臂逆变器变为四桥臂逆变系统, 增加了系统的造

价。利用三桥臂中线分开逆变器, 可以减少四桥臂多电平逆变器中需要的绝缘栅双极晶体管(IGBT)的数量, 降低成本, 其补偿效果优于二电平或三电平的滞环算法。系统仿真结果表明, 二层 3DPWM 滞环控制算法应用于五电平的控制是有效的和可行的。

关键词: 三维脉宽调制; 逆变器; 电压矢量; 五电平系统

1 引言

空间矢量法已广泛应用于五电平系统^[1-3], 但其对软硬件的要求非常高, 因此影响了补偿的实时性, 降低了系统性能。五电平逆变器在结构和算法上都比三电平系统复杂^[4, 5]。现有的五电平空间矢量脉宽调制(PWM)控制算法, 需要经繁杂的运算才能确定相应的空间矢量和空间矢量开关时间。实现复杂的控制算法需要有高性能的处理器, 而且在三相四线制系统中普遍采用四桥臂逆变器补偿中性线电流, 这无疑会增加系统结构的复杂性和造价。利用三桥臂中线分开逆变器可以减少四桥臂多电平逆变器中需要的绝缘栅双极晶体管(IGBT)的数量, 其补偿效果也优于二电平或三电平的滞环算法^[6]。本文介绍的新型的二层三维脉宽调制(3DPWM)滞环控制算法不仅可以简化控制算法, 而且可以在不改变系统结构的基础上快速有效地实现 PWM 控制。PWM 控制矢量的选择是通过 look-up 表实现的, 其不仅可以补偿谐波电流、无功电流和不平衡电流, 还可以补偿中性点电流。本文介绍了该方法的数学模型和控制策略, 并且通过仿真验证了其具有良好的静态和动态性能。

2 五电平逆变器结构和开关逻辑

如图 1 所示, 三相四线制五电平 PWM 逆变器中每相由 8 个绝缘栅双极晶体管(IGBT)开关和

6 个钳位二极管组成。表 1 给出了电压等级和相应的开关状态。表中，1 表示闭合状态，0 表示关断状态。变量 x 表示 a、b、c 三相。忽略开关损耗和电路延时，等效电路如图 2 所示。

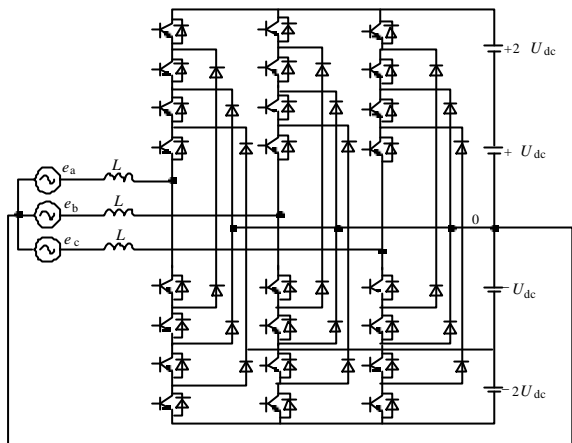


图 1 电路结构

Fig. 1 Circuit configuration

表 1 IGBT 开关逻辑

Tab. 1 IGBT gating logic

| | +2U _{dc} | +U _{dc} | 0 | -U _{dc} | -2U _{dc} |
|-----------------|-------------------|------------------|---|------------------|-------------------|
| S _{x1} | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S _{x2} | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| S _{x3} | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| S _{x4} | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| S _{x5} | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| S _{x6} | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| S _{x7} | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| S _{x8} | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

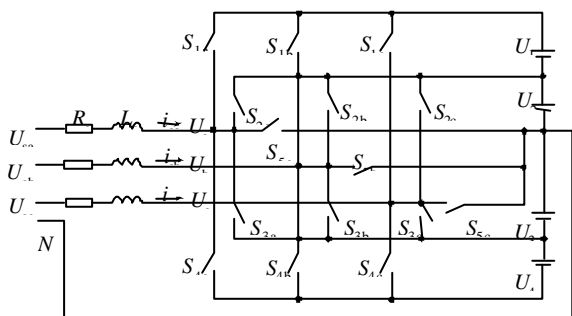


图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

根据等效电路，a 相的开关函数可以表示为

$$S_a = \begin{cases} 2 & \text{当 } S_{1a} \text{ 闭合时} \\ 1 & \text{当 } S_{2a} \text{ 闭合时} \\ 0 & \text{当 } S_{5a} \text{ 闭合时} \\ -1 & \text{当 } S_{3a} \text{ 闭合时} \\ -2 & \text{当 } S_{4a} \text{ 闭合时} \end{cases} \quad (1)$$

五电平逆变器系统中每个分支共有 5 种状态，即 2、1、0、-1 和 -2。b 相和 c 相与 a 相相同，如表 2 所示。

表 2 等效电路对应的开关逻辑

Tab. 2 Switching logic table according to equivalent circuit

| S _x | S _{1x} | S _{2x} | S _{3x} | S _{4x} | S _{5x} |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| -2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

从图 1、图 2 和表 2 可以看出，每一时刻只能有 1 个等效开关闭合。AC 侧补偿电流和逆变器端电压的关系可表示为

$$\begin{cases} L_c \frac{di_{ca}}{dt} = -R_c i_{ca} - u_a + u_{sa} \\ L_c \frac{di_{cb}}{dt} = -R_c i_{cb} - u_b + u_{sb} \\ L_c \frac{di_{cc}}{dt} = -R_c i_{cc} - u_c + u_{sc} \end{cases} \quad (2)$$

将其代入开关函数，端电压 (u_a, u_b, u_c) 和直流侧电压 (U_1, U_2, U_3, U_4) 的关系可以表示为

$$\begin{cases} u_a = S_{1a}U_1 + (S_{1a} + S_{2a})U_2 - (S_{3a} + S_{4a})U_3 - S_{4a}U_4 \\ u_b = S_{1b}U_1 + (S_{1b} + S_{2b})U_2 - (S_{3b} + S_{4b})U_3 - S_{4b}U_4 \\ u_c = S_{1c}U_1 + (S_{1c} + S_{2c})U_2 - (S_{3c} + S_{4c})U_3 - S_{4c}U_4 \end{cases} \quad (3)$$

根据以上公式，整个系统的状态方程可以描述为

$$Z\dot{X} = AX + BU \quad (4)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} -R_c & 0 & 0 & -S_{1a} & -(S_{1a} + S_{2a}) & S_{3a} + S_{4a} & S_{4a} \\ 0 & -R_c & 0 & -S_{1b} & -(S_{1b} + S_{2b}) & S_{3b} + S_{4b} & S_{4b} \\ 0 & 0 & -R_c & -S_{1c} & -(S_{1c} + S_{2c}) & S_{3c} + S_{4c} & S_{4c} \end{bmatrix}$$

$$X = [i_{ca} \ i_{cb} \ i_{cc} \ U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4]^T$$

$$Z = \text{diag}[L_c \ L_c \ L_c]$$

$$B = \text{diag}[1 \ 1 \ 1]$$

$$U = [u_{sa} \ u_{sb} \ u_{sc}]$$

3 三维空间变换

在 3DPWM 滞环控制算法中，电流差值都是在 $a-b-0$ 坐标下，所以电压首先要进行坐标变换，即从 $a-b-c$ 坐标系变换为 $a-b-0$ 坐标系。假设直流电压相等，即 $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 1/2U_{dc}$ ，根据开关函数，在 $a-b-0$ 坐标系下的瞬时电压矢量可表示为

$$U_s = U_{dc} \left[i \sqrt{\frac{2}{3}} \left(S_a - \frac{1}{2} S_b - \frac{1}{2} S_c \right) + j \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) + k \frac{1}{\sqrt{3}} (S_a + S_b + S_c) \right] \quad (5)$$

进一步简化为

$$U_s = U_{dc} \left[i \sqrt{\frac{2}{3}} S_a + j \frac{1}{\sqrt{2}} S_b + k \frac{1}{\sqrt{3}} S_0 \right] \quad (6)$$

式中 $S_a = S_a - \frac{1}{2} S_b - \frac{1}{2} S_c$;
 $S_b = S_b - S_c$;
 $S_0 = S_a + S_b + S_c$

4 五电平逆变器三维电压矢量

假设直流侧电压为 4 个电压值相等的电压源，则对应与小三角形的顶点五电平逆变器具有 61 个

电压矢量。值得注意的是同 1 个电压输出可以由多个不同的开关方式实现。正如图 3 所示，即如果忽略 0 轴，平面 a-b 中只有 61 个电压输出矢量，在这些矢量中根据其幅值大小的不同可以将其分为 9 组。每 1 组中的矢量在平面 a-b 中具有相同的幅值。假设，幅值最小矢量其幅值为 1，那么 9 组矢量名称和幅值可以表示如表 3。以往的二维算法因只考虑平面 a-b，所以只有 61 个电压输出矢量，但在三维 PWM 中由于零序矢量不是零，因而五电平逆变器在三维 PWM 中共有 125 个矢量。

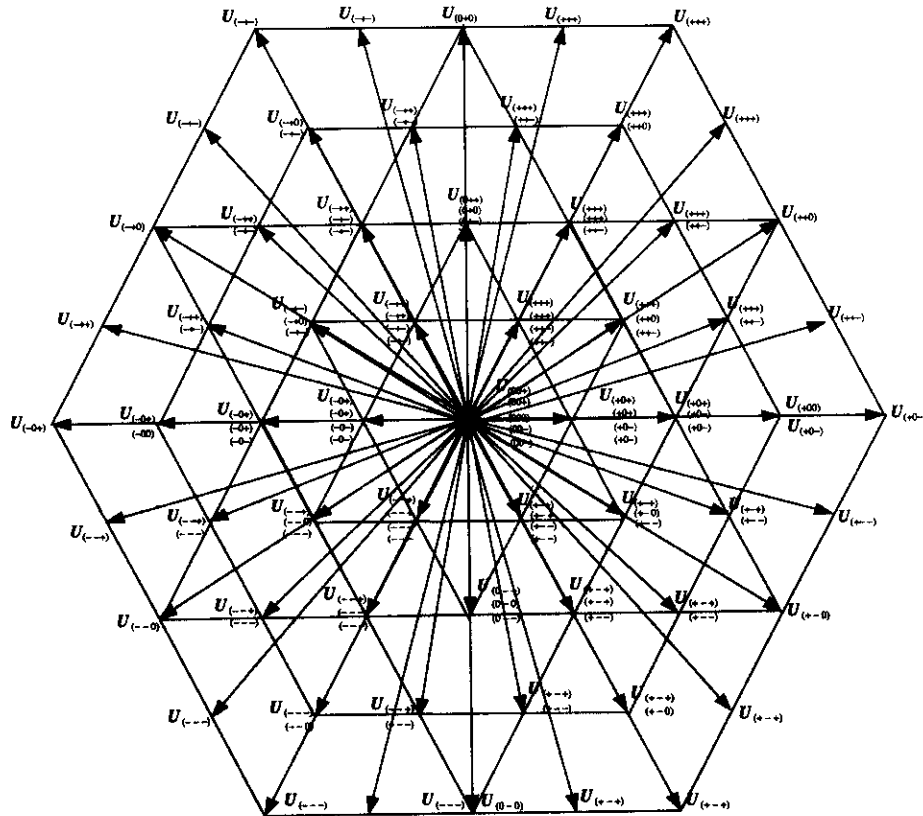


图 3 a-b-0 系统下矢量图
 Fig. 3 Vector chart in a-b-0 coordination system

表 3 矢量分类表

Fig. 3 Vectors classification

| 名称 | 幅值 | 名称 | 幅值 |
|------------|-----------------------|------------|-----------------------|
| MLV (最大矢量) | 4 | SV (小矢量) | 2 |
| VLV (极大矢量) | $\sqrt{3}/2 \times 4$ | VSV (甚小矢量) | $\sqrt{3}/2 \times 2$ |
| LV (大矢量) | 0.9×4 | MSV (最小矢量) | 1 |
| LMV (次大矢量) | $\sqrt{3}/2 \times 3$ | ZV (零矢量) | 0 |
| SMV (次小矢量) | 0.9×3 | | |

注：表中 0.9 为 $\sin 60^\circ / \sin 105^\circ$ 。

对于五电平系统矢量，同一方向上的矢量数较三电平和二电平系统的多。比如，在同一方向上的矢量 $U_{(2,2,-2)}$ 、 $U_{(2,2,-1)}$ 、 $U_{(1,1,-2)}$ 、 $U_{(2,2,0)}$ 、 $U_{(1,1,-1)}$ 、 $U_{(0,0,-2)}$ 、 $U_{(2,2,1)}$ 、 $U_{(1,1,0)}$ 、 $U_{(0,0,-1)}$ 和

$U_{(-1,-1,-2)}$ 却有着不同的幅值，幅值关系为

$$U_{(2,2,-2)} > \{ U_{(2,2,-1)}, U_{(1,1,-2)} \} > \{ U_{(2,2,0)}, U_{(1,1,-1)}, U_{(0,0,-2)} \} > \{ U_{(2,2,1)}, U_{(1,1,0)}, U_{(0,0,-1)}, U_{(-1,-1,-2)} \}$$

5 二层 3DPWM 电压矢量滞环控制策略

近年来，多电平逆变器控制发展迅速，出现了许多新的控制方法^[3, 7, 8]，特别是简单并具有良好的动态性能的滞环控制方法。3DPWM 方法和滞环方法的有机结合可以使得系统更有效地进行谐波补偿、不平衡补偿和中性线电流补偿。

5.1 基本控制策略

该控制方法的基本原理是向负荷电流中注入与谐波电流的幅值相同、方向相反的补偿电流从而达到补偿谐波电流的目的。其基本方面与三电平系统和传统的滞环 PWM 控制系统相类似。图 4 为结构框图。如图所示，五电平逆变器的注入电流经检测后，进行坐标 $a-b-c$ 到 $a-b-0$ 的变换，并且可以参考电压和实际负荷电压的差值进行比较。逆变器注入系统的跟踪电流 i_{ab0}^* 是参考电流 $i_{r,ab0}$ 和实际负荷电流 $i_{l,ab0}$ 的差值。即

$$i_{ab0}^* = i_{r,ab0} - i_{l,ab0} \quad (7)$$

其中 $i_{r,ab0}$ 可由瞬时无功功率补偿得到。跟踪电流 i_{ab0}^* 和逆变器与负荷端之间的耦合电流 $i_{c,ab0}$ 之差值就是控制系统的控制信号。即

$$\Delta i_{ab0} = i_{ab0}^* - i_{c,ab0} \quad (8)$$

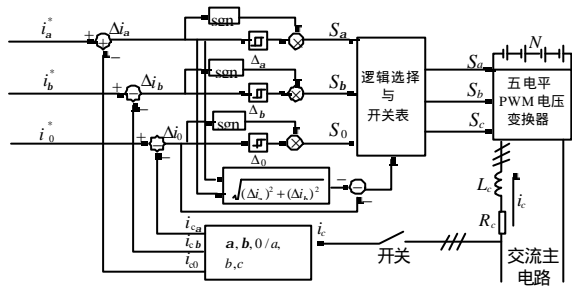


图 4 控制策略

Fig. 4 Control strategy

根据图 4，基本控制策略可以被称为考虑符号的主体滞环 (Sign Cubical Hysteresis, SCH) 控制。但是滞环控制升级为二层，即 $\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta b_1, \Delta b_2, \Delta 0_1, \Delta 0_2$ ，且 $\Delta a_1 < \Delta a_2, \Delta 0_1 < \Delta 0_2, \Delta a_1 = \Delta b_1 = \Delta 0_1, \Delta a_2 = \Delta b_2 = \Delta 0_2$ 。

由于五电平系统电压矢量的众多，二层滞环控制简化了矢量的选择。其中滞环极限是决定系统性能的重要指标。假设系统的最大电流差值是 K ，则第 1 级滞环极限为 $K/10$ ，第 2 级滞环极限为 $K/10+K/5=3K/10$ 。

5.2 开关矢量选择和开关表

由于在五电平逆变器中电压具有 5 个等级，所以在选择正确矢量时触发脉冲的正负是一个非常重要的参数。如果差值大于正向第 2 级极限时，则正 2 被触发；相反，如果差值小于反向第 2 级极限时，则负 2 被触发。如果差值小于正向第 2 级而大于正向第 1 级极限时，则正 1 被触发；相反，则负 1 被触发。如果差值在正反向第 1 级极

限之间，则 0 被触发。并且当差值电流大于 $\Delta a_2, \Delta b_2$ 和 $\Delta 0_2$ 时，则选择 MLV、VL、LV、LMV 和 SMV 组中的矢量；差值电流大于 $\Delta a_1, \Delta b_1$ 和 $\Delta 0_1$ 但小于 $\Delta a_2, \Delta b_2$ 和 $\Delta 0_2$ 时，则选择 SV、VSV 和 MSV。最后，如果差值电流小于 $\Delta a_1, \Delta b_1$ 和 $\Delta 0_1$ ，则 5 个零矢量将被激活。由于在五电平系统中，同一方向上的矢量和同样幅值的矢量都很多，所以对于矢量的选择主要取决于其主要作用在平面 $a-b$ 还是 0 轴上，特别对于同方向的矢量具有不同的幅值 u_{ab} 和 u_0 。

$$|U_s| = U_{dc} \sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}}S_a\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}S_b\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}S_0\right)^2} = U_{dc} \sqrt{U_{ab}^2 + U_0^2} \quad (9)$$

式中
$$U_{ab} = \sqrt{\left[\sqrt{\frac{2}{3}}S_a\right]^2 + \left[\frac{1}{\sqrt{2}}S_b\right]^2}$$

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}S_0$$

理论上，大矢量主要影响 $a-b$ 方向，对零方向的影响远小于小矢量。差值的幅值 $\sqrt{(\Delta i_a)^2 + (\Delta i_b)^2}$ 与 Δi_0 进行比较，其中较大者将用来选择同方向下的矢量从而可减小误差。对于五电平系统中同一方向相同幅值的矢量的选择取决于其在零方向上的幅值。图 5(a) 为两级滞环控制策略图，滞环空间在 $ab0$ 方向上均为两级。图 5(b) 为对应于第 1 象限的矢量图，即图(a)的右部分的放大。

以第 1 象限为例简单介绍矢量的选择，见图 5(b)。

情况 1：如果 $\Delta a_1 < \Delta i_a < \Delta a_2$ 且 $\Delta i_b > \Delta b_2$ ，则选择 U_9 或 U_3 ，并由 Δi_0 决定最终的矢量选择。

情况 2：如果 $\Delta i_a > \Delta a_2$ 且 $\Delta b_1 < \Delta i_b < \Delta b_2$ ，则选择 U_6 或 U_7 ，并由 Δi_0 决定最终的矢量选择。

情况 3：如果 $\Delta i_a > \Delta a_2$ 且 $\Delta i_b > \Delta b_2$ ，则选择 U_1, U_2 和 U_4 ，由 $a-b$ 方向的幅值大小决定选择大矢量还是小矢量，并由 Δi_0 决定最终的矢量选择。

情况 4：如果 $\Delta a_1 < \Delta i_a < \Delta a_2$ 且 $\Delta b_1 < \Delta i_b < \Delta b_2$ ，则选择 U_{5l}, U_{5s}, U_{8l} 和 U_{8s} 。首先根据已介绍的补偿原理决定选择 U_5 还是 U_8 ，然后根据 Δi_0 决定选择 U_l 还是 U_s 。

根据以上讨论可得到相应的开关表，如表 4 所示。

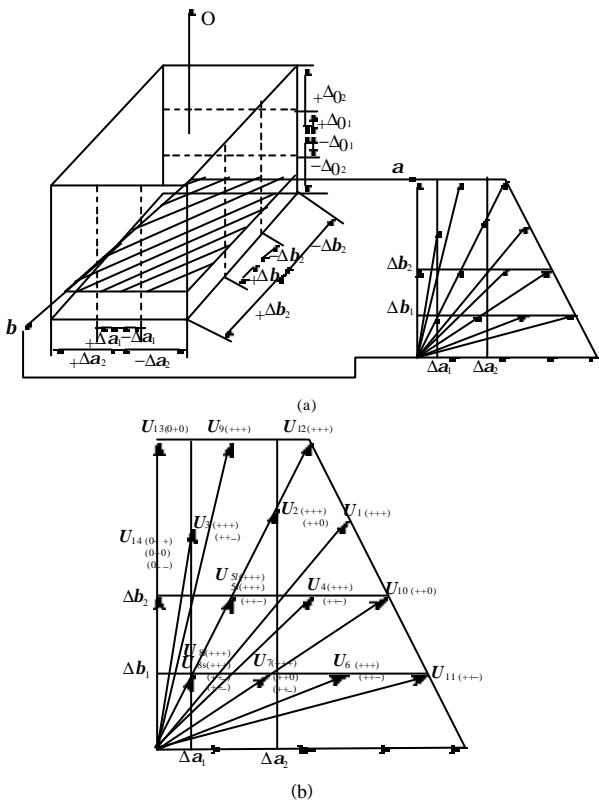


图5 二层滞环控制图

Fig. 5 Control diagram of double-level hysteresis control

表4 开关矢量表
Fig. 4 Vector selection look-up table

| S_{ab0} | S_{abc} | S_{ab0} | S_{abc} | S_{ab0} | S_{abc} | S_{ab0} | S_{abc} |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| +++++ | 2 2 -2 | ++0 | 1 1 -2 | 0 0 -- | -2 -2 -2 | ---+ | 0 -1 2 |
| +++++ | 2 1 -2 | +++ | 0 0 -1 | 0 - ++ | 1 0 2 | ---0 | -1 -1 2 |
| ++++0 | 2 0 -2 | +++ | -1 -1 -2 | 0 - + | 1 0 2 | --- | -1 -2 2 |
| ++++- | 1 0 -2 | +0++ | 2 1 1 | 0 - 0 | 0 -1 1 | --- | -2 -2 1 |
| ++++- | 1 -1 -2 | +0+ | 1 0 0 | 0 - - | -1 -1 0 | ---+ | 0 2 1 |
| +++++ | 2 1 -1 | +0 0 | 2 -1 -1 | 0 - - | -2 -2 -1 | ---+ | -1 2 0 |
| ++++ | 2 0 -1 | +0 - | 0 -1 -1 | 0 - ++ | 1 -1 2 | ---+0 | -2 2 0 |
| +++0 | 2 0 -2 | +0 - | -1 -2 -2 | 0 - ++ | 1 -1 2 | ---+ | -2 2 -1 |
| +++ - | 2 -1 -2 | + - ++ | 2 0 2 | 0 - 0 | 0 -2 2 | ---+ | -2 2 -2 |
| +++ - | 0 -1 -2 | + + + | 1 -1 1 | 0 - - | -1 -2 1 | ---+ | -1 2 1 |
| ++0++ | 2 0 0 | + - 0 | 1 -2 1 | 0 - - | -1 -2 0 | ---+ | -2 2 1 |
| ++0+ | 1 -1 -1 | + - - | 0 -1 0 | - + + + | 0 0 2 | ---0 | -2 2 0 |
| ++0 0 | 2 -1 -1 | + - - | -1 -2 -1 | - + + + | 0 2 -1 | ---+ | -2 1 0 |
| +0 - | 2 -2 -2 | + - + + | 2 -1 2 | - + + 0 | -1 1 0 | ---+ | -2 1 -1 |
| +0 - | 1 -2 -2 | + - + + | 1 -2 2 | - + - | -1 2 -2 | -0 ++ | -1 2 2 |
| + - + + | 2 -1 1 | + - - 0 | 1 -2 1 | - + - - | -2 1 -2 | -0 + | -2 2 2 |
| + - + - | 2 -1 0 | + - - - | 0 -2 1 | - + + + | 1 2 1 | -0 0 | -2 1 1 |
| + - 0 | 2 -2 0 | + - - - | 0 -2 0 | - + + | 0 1 0 | -0 - | -2 0 0 |
| + - - | 2 -2 -1 | 0 + + + | 1 2 0 | - 0 + | -1 1 0 | -0 - | -2 0 0 |
| + - - - | 0 -2 -1 | 0 + + + | 1 2 -1 | - + - | -1 1 -1 | ---+ | 0 1 2 |
| + - - + | 2 -2 2 | 0 + + 0 | 0 2 -2 | - + - | -2 0 -2 | ---+ | -2 1 2 |
| + - - + | 2 -2 1 | 0 + + - | -1 1 -2 | -0 + + | 0 2 2 | -0 - | -2 0 2 |
| + - - 0 | 2 -2 0 | 0 + + - | -1 0 -2 | -0 + | 0 1 1 | --- | -2 0 1 |
| + - - - | 1 -2 0 | 0 + + + | 2 2 1 | -0 0 | -2 1 1 | --- | -2 -1 1 |
| + - - - | 1 -2 -1 | 0 + + | 1 2 0 | - 0 - | -1 0 0 | ---+ | -1 1 2 |
| + + + + | 2 2 -1 | 0 + 0 | 0 1 -1 | -0 - | -2 -1 -1 | ---+ | -1 0 2 |
| + + + + | 1 2 -2 | 0 + - | -1 0 -1 | - - + + | 1 1 2 | ---0 | -2 0 2 |
| + + + 0 | 1 1 -2 | 0 + - | -2 -1 -2 | - - + | 0 0 1 | --- | -2 -1 2 |
| + + + - | 0 1 -2 | 0 0 + + | 2 2 2 | - - 0 | -1 0 1 | --- | -2 -2 2 |
| + + + - | 0 0 -2 | 0 0 + | 1 1 1 | - - - | -1 -1 1 | --- | -1 -1 1 |
| + + + + | 2 2 0 | 0 0 0 | 0 0 0 | - - - | -2 -2 0 | --- | -2 -2 0 |
| + + + + | 2 1 0 | 0 0 - | -1 -1 -1 | - - + + | 0 0 2 | --- | -2 -2 2 |

6 仿真结果

图6~图9为五电平逆变器作为有源滤波器在三相四线制非线性负荷系统中的仿真结果。其中开关频率为20 kHz。图6和图7分别为补偿前在时域和三维空间的电流波形。图8和图9为补偿后的电流波形。由图可见，该控制方法是正确的。

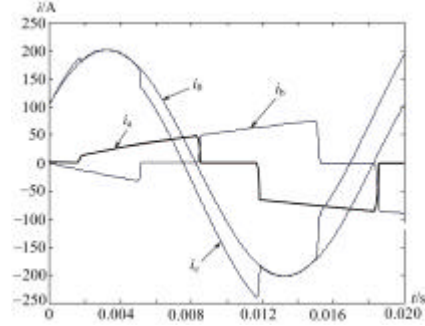


图6 负荷电流
Fig. 6 Load current

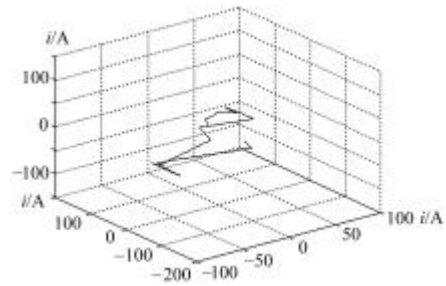


图7 三维负荷电流
Fig. 7 Load current in 3D

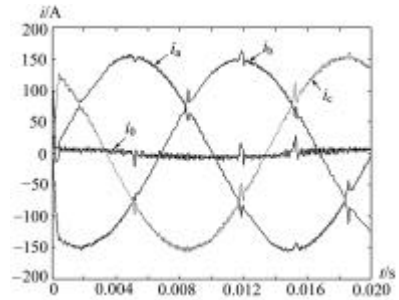


图8 补偿后电流
Fig. 8 Source current by five-level inverter compensation, 20 kHz

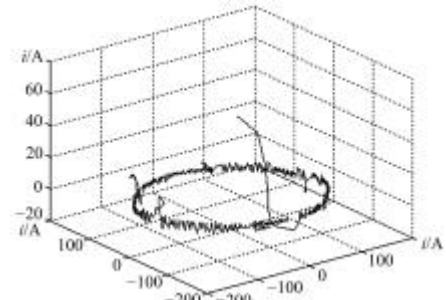


图9 补偿后三维电流
Fig. 9 Source current 3D by five-level inverter compensation, 20 kHz

7 结论

本文描述了五电平二层 3DPWM 滞环控制算法及其数学模型。证明了 3DPWM 方法可以有效地应用于三相四线制五电平系统中的电能质量补偿。并且简化了的五电平的控制算法,使传统的三桥臂中线分开逆变器可以应用于三相四线制系统的谐波电流补偿、不平衡电流补偿、无功功率补偿和中性线电流补偿。

参考文献

- [1] Kazmierkowski M P, Sulkowski W. Novel space vector based current controllers for PWM inverter[A]. in Proc PESC'89[C], 1989: 657-664.
- [2] Akagi H. New trends in active power filters[A]. In Proc EPE95[C], 1995, 1: 664.
- [3] Matsuse K, Sugita K, Kitahata T *et al.* A control method of a three phase five-level PWM converter[A]. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, Volume 2[C], 1998: 750-754.
- [4] Takeshita T, Matsui N. PWM control and input characteristics of three-phase multi-level AC/DC converter[A]. Power Electronics Specialists Conference[C], 23rd Annual IEEE, 1992: 175-180.
- [5] Suh Jae-Hyeong, Choi Chang-Ho, Hyun Dong-Seok. A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters[A]. Applied Power

Electronics Conference and Exposition, Fourteenth Annual, Volume 1, 1999: 515-520.

- [6] Wong Man-chung, Zhao Zheng-yi, Han Ying-duo *et al.* Three-dimensional pulse-width modulation technique in three-level power inverters for three-phase four-wired system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(3): 719-725.
- [7] Veenstra M, Rufer A. PWM-control of multi-level voltage-source inverters[A]. Power Electronics Specialists Conference, 2000 IEEE 31st Annual, Volume 3[C], 2000: 1387-1393.
- [8] Kim Young-Seek, Seo Beom-Seok, Hyun Dong-Seok. A novel structure of multi-level high voltage source inverter[A]. Computer, Communication, Control and Power Engineering, Proceedings[C], TENCON '93, 1993 IEEE Region 10 Conference on Part: 50000, 1993: 503-508.

收稿日期: 2002-04-28.

作者简介:

唐 净 (1977-), 女, 硕士研究生, 从事电力电子, 有源滤波器方面的研究工作;

黄明聪, 男, 博士研究生, 澳门大学科技学院讲师, 从事电能质量, DC-Unicon 的研究工作;

韩英铎 (1938-), 男, 教授, 中国工程院院士, 从事电力系统及其自动化专业的教学与科研工作, 以及 FACTS 及电力电子技术在电力系统中的应用, 智能控制和区域稳定控制, 基于 GPS 的动态安全监测与控制系统的研究工作。

(编辑 查仁柏)

(上接第 35 页 continued from page 35)

5 结束语

利用本文提出的伪并行遗传算法对无功优化进行了研究, 并对 2 个简单的系统进行了测试。测试结果表明, 利用该方法进行无功优化可使经济性和安全性都有所提高, 这说明本文的方法是可行的, 且具有实用性。伪并行遗传算法用于无功优化的优点是:

(1) 能适应电力系统无功优化的实际情况, 较好地解决了其它算法在整数离散变量、局部收敛及初值难选取等问题。

(2) 在一定程度上避免了常规遗传算法容易出现的“早熟”现象, 收敛速度也有一定的提高。

(3) 由于遗传算法是一种随机搜索方法, 搜索空间很大, 故寻优时间较其他算法长, 但是遗传算法求解规模几乎与系统规模成比例, 当系统规模很大时, 不会出现“维数灾”问题, 并且随着计算机性能的提高和遗传算法本身的发展 (如采用变化的变异率、交叉率, 开发能识别好的染色体模式的高级遗传算子等), 其进化代数和计算时间将会减少。因此本文提出的伪并行遗传算法不失为电力系统中一种具有应用前景的无功优化算法。

参考文献

- [1] Ding Qia, Li Naihu, Wang Xiaodong *et al.* Implementation of interior

point method based voltage/reactive power optimization[A]. Power Engineering Society Winter Meeting[C], 2000, 2: 1197-1201.

- [2] 刘明波, 陈学军 (Lin Mingbo, Chen Xuejun). 电力系统无功优化的改进内点算法 (Improved interior point method for reactive power optimization in power systems) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1998, 22(5): 33-36.
- [3] Grudin N. Reactive power optimization using successive Quadratic programming method[J]. IEEE Trans on PWRs, 1998, 13(4): 1219-1225.
- [4] Kenji Iba. Reactive power optimization by genetic algorithm[J]. IEEE Trans on PWRs, 1994, 9(2): 685-692.
- [5] 冯治鸿, 刘取, 倪以信, 等 (Feng Zhihong, Liu Qu, Ni Yixin *et al.*). 多机电力系统电压静态稳定性分析——奇异值分解法 (Analysis steady-state voltage stability in multimachine power systems by singular value decomposition method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1992, 12(3): 10-18.
- [6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [7] 方述诚. 线性优化及扩展——理论与算法[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [8] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.

收稿日期: 2003-01-13.

作者简介:

王志华 (1972-), 男, 博士研究生, 从事电力系统运行与控制等方面的研究工作;

尹项根 (1954-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护和综合自动化的教学与科研工作;

李光熹 (1939-), 男, 教授, 从事电力系统运行与控制等方面的教学与科研工作。

(编辑 查仁柏)

作者: 唐净, 黄明聪, 韩英铎
作者单位: 唐净(澳门大学科技学院电机与电子工程系, 澳门特区), 黄明聪, 韩英铎(澳门大学科技学院电机与电子工程系, 澳门特区;清华大学电机系, 北京, 100084)
刊名: 电网技术 **ISTIC** **PKU**
英文刊名: POWER SYSTEM TECHNOLOGY
年, 卷(期): 2003, 27(8)
被引用次数: 4次

参考文献(8条)

1. [Kazmierkowski M P;Sulkowski W Novel space vector based current controllers for PWM inverter](#) 1989
2. [Akagi H New trends in active power filters](#) 1995
3. [Matsuse K;Sugita K;Kitahata T A control method of a three phase five-level PWM converter](#)[外文会议] 1998
4. [Takeshita T;Matsui N PWM control and input characteristics of three-phase multi-level AC/DC converter](#)[外文会议] 1992
5. [Suh Jae-Hyeong;Choi Chang-Ho;Hyun Dong-Seok A new simplified space-vector PWM method for three-level inverters](#)[外文会议] 1999
6. [Wong Man-Chung;Zhao Zheng-yi;Han Ying-duo Three-dimensional pulse-width modulation technique in three-level power inverters for three-phase four-wired system](#)[外文期刊] 2001(03)
7. [Veenstra M;Rufer A PWM-control of multi-level voltage-source inverters](#)[外文会议] 2000
8. [Kim Young-Seek;Seo Beom-Seok;Hyun Dong-Seok A novel structure of multi-level high voltage source inverter](#)[外文会议] 1993

本文读者也读过(10条)

1. [陈斌发, 孙孝瑞, 李严平, 陈刚, CHEN Binfa, Sun Xiaorui, Li Yanping, Chen Gang 用于有源电力滤波器的两种新型电流控制器](#)[期刊论文]-[电网技术](#)1998, 22(5)
2. [尹忠刚, 钟彦儒, 刘静, 孙向东, YIN Zhong-gang, ZHONG Yan-ru, LIU Jing, SUN Xiang-dong 一种新型三电平PWM整流器的仿真研究](#)[期刊论文]-[西安理工大学学报](#)2006, 22(4)
3. [陶生桂, 崔俊国 用于五电平逆变器的复式控制方法及其仿真研究](#)[期刊论文]-[电工技术学报](#)2002, 17(2)
4. [崔俊国, 陶生桂 一种五电平逆变器SPWM控制方法的分析与仿真](#)[期刊论文]-[电气传动](#)2002, 32(5)
5. [刘昊, 肖湘宁, 刘宝志, 孔圣立 一种非正交坐标系下N电平逆变器SVPWM的研究](#)[期刊论文]-[华北电力大学学报](#)2004, 31(4)
6. [唐朝阳, 黄石生, 王振民, 陈意庭, TANG Zhao-yang, HUANG Shi-sheng, WANG Zhen-min, CHEN Yi-ting 基于自适应滑模控制的燃料电池电站输出波形控制策略](#)[期刊论文]-[电网技术](#)2008, 32(12)
7. [严干贵, 刘文华, 陈远华, 韩英铎 基于直接PWM方法的悬浮电容逆变器实验研究](#)[会议论文]-2003
8. [洪春梅, HONG Chun-mei 二极管箝位式五电平变换器直流侧电容电压的控制](#)[期刊论文]-[辽宁工学院学报\(自然科学版\)](#) 2005, 25(4)
9. [洪春梅, 王广柱 五电平逆变器直流侧电容电压的平衡与控制](#)[期刊论文]-[电机与控制学报](#)2003, 7(3)
10. [丛望, 张爱民, Cong Wang, Zhang Aimin 五电平逆变器仿真及控制研究](#)[期刊论文]-[船电技术](#)2009, 29(5)

引证文献(4条)

1. [陈增禄, 伊瀨敏史, 任记达, 毛惠丰, 王兆安 PWM变换器跟踪控制的双重 \$\Delta\$ 调制新方法](#)[期刊论文]-[中国电机工程学报](#) 2006(14)
2. [叶满园, 李宋, 官二勇 九电平高压级联逆变器及其电压移位脉宽调制技术](#)[期刊论文]-[电网技术](#) 2006(21)
3. [叶满园, 李宋, 官二勇 九电平高压级联逆变器及其电压移位脉宽调制技术](#)[期刊论文]-[电网技术](#) 2006(21)
4. [伏祥运, 王建勋, 张小聪, 曾繁鹏, 纪延超 三相电压源型逆变器级联的静止同步补偿器](#)[期刊论文]-[电网技术](#) 2006(22)

引用本文格式: 唐净, 黄明聪, 韩英铎 新型五电平逆变器三维PWM控制[期刊论文]-[电网技术](#) 2003(8)