

三相逆变器无死区最优矢量控制研究

袁佳歆, 薛钢, 赵震, 周俊卫, 余长厅, 费雯丽

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 目前死区时间补偿、减少死区时间和无死区控制是关于三相逆变器中死区影响的主要研究方向。在分析了多种死区控制策略局限性的基础上, 提出了一种新型基于免疫算法的逆变器无死区优化算法。该方法的创新之处是采用的 SVPWM 划分扇区和优化无死区控制方案, 不需要精确的电流极性检测装置。对新控制策略进行大量仿真研究, 仿真结果证明该算法所产生最优 SVPWM 控制序列与常规控制策略相比不仅无需设置死区时间, 还能明显减小逆变器输出波形的总谐波畸变率和提高输出电压基波幅值。

关键词: 免疫算法; 无死区; SVPWM; 谐波畸变率; 三相逆变器

New optimal dead-time elimination for three-phase voltage source inverters

YUAN Jia-xin, XUE Gang, ZHAO Zhen, ZHOU Jun-wei, YU Chang-ting, FEI Wen-li

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Considerable studies have been discussed to compensate or minimize or eliminate the dead-time effect of three phase inverter. First, this paper analyzes the limitations of the previous strategies. Then, SVPWM sequence calculated by Immune Algorithm (IA) for dead-time elimination and compensation is proposed for the three-phase bridge inverter. The proposed scheme implements the dead-time elimination in most of the reference current fundamental period but switches to the novel dead-time compensation around the zero crossing point. Furthermore, the simulation results are given to verify that the THD of output waveform generated by SVPWM is significantly reduced and the amplitude of output voltage is improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807041).

Key words: immune algorithm (IA); dead-time elimination; SVPWM; THD; three phase inverter

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0018-07

0 引言

三相电压型逆变器在电机驱动和新能源接入等领域已得到广泛应用。由于电力电子器件的特性, 为防止桥臂直通, 必须设置一定的死区时间。但死区的存在将使得输出电压和电流发生非线性畸变^[1], 且低次谐波增加, 电机转矩产生脉动, 增加谐波损耗等, 尤其是在电压低、开关频率高时影响更为严重^[2]。

文献[3-5]对如何补偿逆变器的死区效应进行了研究。文献[6]采用混合式 PWM 调制方法, 提出常规区域不设置死区的控制策略, 在过零区域进行死

区补偿, 是一个新颖的想法, 但过零区的死区有可能导致波形产生畸变。文献[7]中提出了不需要为检测电路提供单独的独立电路电源, 但是引入检测回路, 同时也将会产生经济性和可靠性等方面的缺点。文献[8]提出了一种基于三电平逆变器无死区 PWM 控制策略, 该方法在不需精确的电流极性检测条件下即采用对参考电流进行区域划分原则, 可以实现在电流过零点附近、各区域以及各区域之间无缝过渡的无死区控制。但以上的无死区方法和补偿死区时间、死区时间最小化大多只考虑了单相的情况, 对于三相逆变器无死区并没有深入研究。

本文提出一种基于免疫算法^[9]的 SVPWM 控制策略, 该方法不仅可以实现消除死区影响, 还能通过免疫算法优化 SVPWM 控制序列使输出波形达到最优。更重要的是该方法不需外加精确的电流极性检测电路。

基金项目: 国家自然科学基金(50807041); 武汉市科技攻关计划(2013060501010164); 武汉市青年科技晨光计划资助项目(2013070104010010)

1 三相逆变器无死区控制的原理和新方法

1.1 三相逆变器无死区控制

如图 1 所示为电压型逆变器等效拓扑电路图, $V_1 \sim V_6$ 均为单极性二值逻辑开关, $D_1 \sim D_6$ 为续流二极管。为防止短路, 逆变电路同一桥臂的上下开关器件在任何时刻都不能同时导通, 故三相电压型逆变器中桥臂开关器件的单极性二值逻辑开关函数 S_m ($m=A,B,C$) 满足以下关系:

$$S_m = \begin{cases} 1 & m \text{ 相上桥臂开关导通, } m \text{ 相下桥臂开关关断} \\ 0 & m \text{ 相上桥臂开关关断, } m \text{ 相下桥臂开关导通} \end{cases} \quad (1)$$

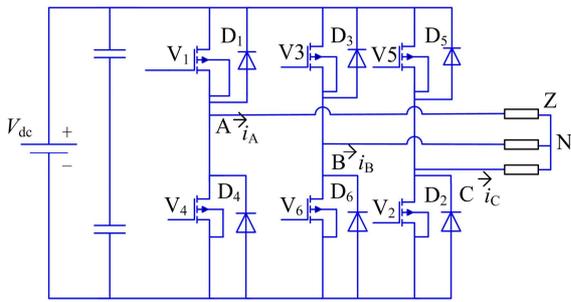


图 1 三相逆变器主电路图

Fig. 1 Three-phase full-bridge inverter

根据三相桥臂的开关状态 ($S_A S_B S_C$) 来体现逆变器的工作状态, 共有八种组合。即 0(0 0 0), 1(0 0 1), 2(0 1 0), 3(0 1 1), 4(1 0 0), 5(1 0 1), 6(1 1 0), 7(1 1 1) 8 种开关状态, 如图 2 所示, 其中矢量 U_0 、 U_7 为零矢量。

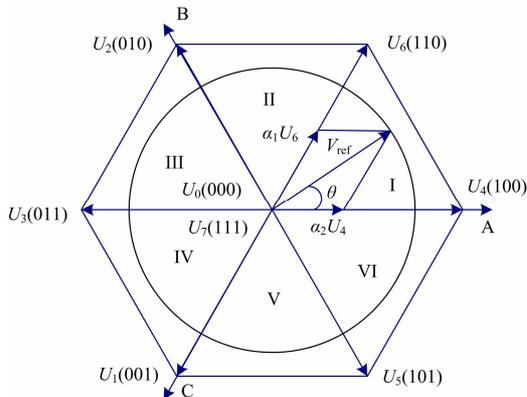


图 2 空间电压矢量的矢量分区

Fig. 2 Diagram of the space vectors

若 V_{ref} 在第 I 扇区时, 如图 2 所示, 则 V_{ref} 可由 U_4 、 U_6 和 $U_{0,7}$ 合成, 运用正弦定理可计算出

$$\begin{cases} T_4 = mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_6 = mT_s \sin \theta \\ T_{0,7} = T_s - T_4 - T_6 \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_4 、 T_6 分别为矢量 U_4 、 U_6 于一个开关周期内的状态作用时间; $T_{0,7}$ 为零矢量 U_0 、 U_7 于一个开关周期内的状态作用时间之和; T_s 为 PWM 开关周期; m 为 SVPWM 调制系数, 且 $m = \sqrt{3}|V_{ref}|/V_{dc}$ 。

图 3 所示为将 A 相桥臂分解为两个相互关联的单元。当 $i_A > 0$ 且 $S_A = 1$ 时, 此时 V_1 导通, 电流 i 经 V_1 流过; 当 $i_A > 0$ 且 $S_A = 0$ 时, 此时 V_1 关断, 电流 i 经续流二极管 D_4 续流; 这两种情况下 V_4 都无需导通。同理, 当 $i_A < 0$ 且 $S_A = 0$ 时, 此时 V_4 导通, 电流 i 经 V_4 流过; 当 $i_A < 0$ 且 $S_A = 1$ 时, 此时 V_4 关断, i 经续流二极管 D_1 续流; 这两种情况下 V_1 都无需导通。B 相、C 相电流流过相应桥臂开关器件情况与 A 相类似, 此处不再赘述。

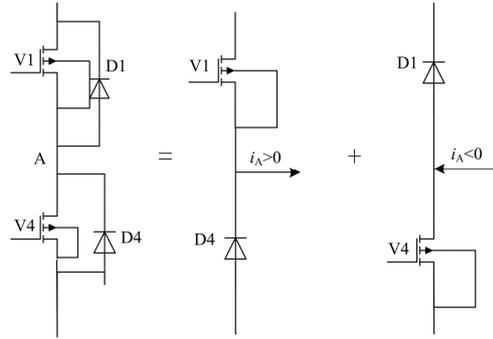


图 3 等效的桥臂分解单元结构

Fig. 3 Decompose of a generic phase-leg into equivalent switch cells

只需要控制该桥臂中一个 IGBT 的开关状态就可以控制整个桥臂的输出电压, 这为无死区控制提供依据。

1.2 运用 SVPWM 消除死区的新方法

本文是基于免疫算法优化 SVPWM 控制序列, 包括三个扇区序列: (1) 过零扇区序列; (2) 常规扇区序列; (3) 过渡扇区序列。该算法的具体操作流程将在第三部分详细展开。

1.2.1 无死区序列区

将三相交流系统的相电压设为

$$\begin{cases} u_{AN}(\omega t) = U_m \cos(\omega t) \\ u_{BN}(\omega t) = U_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{CN}(\omega t) = U_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

式中： U_m 为三相交流系统相电压的基波幅值； ω 为基波角频率，且 $\omega=2\pi f$ ， f 为基波频率 50 Hz。从图 2 中参考矢量 V_{ref} 的合成可知，当 V_{ref} 旋转到 U_4 矢量处，对应的时刻是 $\omega t = 2\pi k$ ， $k=0,1,2,3,\dots$ 。

实际系统中的负载多为阻感性负载，本文考虑负载阻抗角 $(\pi/6 \leq \alpha \leq \pi/2)$ 的情况。A 相电压可表示为如式(4)所示，负载 $Z = R + j\omega L = |Z|\angle\alpha \Omega$ ， $(\pi/6 \leq \alpha \leq \pi/2)$ ，以图 1 中电流方向为参考电流正方向，则 A 相电流可用式(5)表示。

$$U_{AN} = U_m \cos(\omega t) = U_m \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \angle \pi/2 \quad (4)$$

$$i_A = \frac{U_m}{|Z|} \angle(\pi/2 - \alpha) = \frac{U_m}{|Z|} \sin(\omega t + \pi/2 - \alpha) \quad (5)$$

从式(5)可以看出， $-\pi/3 \leq \omega t \leq 0$ ，即 i_A 从负到正的正零点落在第 VI 扇区； $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$ ，即 i_A 从正到负的正零点落在第 III 扇区；同理，也可以分析出 B、C 相电流在各个扇区的流向情况，如表 1 所示为负载阻抗角 $\pi/6 \leq \alpha \leq \pi/2$ 时，三相输出电流在六个扇区的电流极性。

表 1 三相电流极性

Table 1 Output current polarities of a three-phase inverter

扇区	电流方向		
I	$i_A > 0$	$i_B < 0$	正→负
II	$i_A > 0$	负→正	$i_C < 0$
III	正→负	$i_B > 0$	$i_C < 0$
IV	$i_A < 0$	$i_B > 0$	负→正
V	$i_A < 0$	正→负	$i_C > 0$
VI	负→正	$i_B < 0$	$i_C > 0$

依据三相电流在各个扇区的极性状态，如表 2 所示为无死区控制时的三相逆变器正常工作时的各扇区的矢量序列以及对应开关及二极管状态。

表 2 开关序列表

Table 2 Status of the switch in a complete period

扇区	开关序列	A 相	B 相	C 相
I	4(100)	V_1 ON	V_6 ON	V_2 ON
	6(110)	或	或	或
	0(000)	D_4 ON	D_3 ON	D_2 ON
II	6(110)	V_1 ON	V_3 ON	V_2 ON
	2(010)	或	或	或
	7(111)	D_4 ON	D_3 ON	D_5 ON
III	2(010)	V_4 ON	V_3 ON	V_2 ON
	3(011)	或	或	或
	0(000)	D_4 ON	D_6 ON	D_5 ON
IV	3(011)	V_4 ON	V_3 ON	V_5 ON
	1(001)	或	或	或
	7(111)	D_1 ON	D_6 ON	D_5 ON
V	1(001)	V_4 ON	V_6 ON	V_5 ON
	5(101)	或	或	或
	0(000)	D_1 ON	D_6 ON	D_2 ON
VI	4(100)	V_1 ON	V_6 ON	V_5 ON
	5(101)	或	或	或
	7(111)	D_1 ON	D_3 ON	D_2 ON

下面将详细分析在各个扇区的脉冲序列。

1.2.2 过零区域序列

III 扇区，A 相电流从正到负过渡，III 扇区的非零矢量为 $U_2(010)$ 及 $U_3(011)$ 。限制该扇区零矢量为 $U_0(000)$ ，故该区域 A 相的控制序列恒为 0。当 $i_A < 0$ 时，电流经 V_4 导通；当 $i_A > 0$ 时，电流经续流二极管 D_4 导通。在该扇区，仅给 A 相下桥臂 V_4 发脉冲。此时， V_1 没有导通条件，A 相桥臂不会发生直通。

VI 扇区，A 相电流从负到正过渡，VI 扇区的非零矢量为 $U_4(100)$ 及 $U_5(101)$ ，限制该扇区零矢量为 $U_7(111)$ ，故该区域 A 相的控制序列恒为 1。当 $i_A > 0$ 时，电流经 V_1 导通；当 $i_A < 0$ 时，电流经续流二极管 D_1 导通。因而在该扇区，对 A 相桥臂来说，可以根据序列仅给 A 相上桥臂 V_1 发脉冲，此时， V_4 没有导通条件，A 相桥臂不会发生直通。

同理，如表 2 所示。对 B 相，在第 II 扇区，限制该扇区零矢量为 $U_7(111)$ ，根据序列仅给 V_3 发脉冲；在第 V 扇区，限制该扇区零矢量为 $U_0(000)$ ，根据序列仅给 V_6 发脉冲。对 C 相，在第 I 扇区，限制该扇区零矢量为 $U_0(000)$ ，根据序列仅给 V_2 发脉冲；在第 IV 扇区，限制该扇区零矢量为 $U_7(111)$ ，根据序列仅给 V_5 发脉冲。

通过以上序列控制，过零扇区没有发生直通的条件，不用设置死区。

1.2.3 常规扇区序列

I、II 扇区，A 相电流 $i_A > 0$ ，在 A 相控制序列为 1 时， V_1 导通电流；在 A 相控制序列为 0 时，续流二极管 D_4 导通电流。故在该区域内，对 A 相桥臂来说，可以根据序列仅给 A 相上桥臂 V_1 发脉冲，此时， V_4 没有导通条件，A 相桥臂不会发生直通。

IV、V 扇区，A 相电流 $i_A < 0$ ，在 A 相控制序列为 1 时，续流二极管 D_1 导通电流；在 A 相控制序列为 0 时， V_4 导通电流。故在该区域内，对 A 相桥臂来说，可以根据序列仅给 A 相下桥臂 V_4 发脉冲，此时， V_1 没有导通条件，A 相桥臂不会发生直通。

同理，如表 2 所示。对 B 相，在 III、IV 扇区，根据序列仅给 V_3 发脉冲；在 VI、I 扇区，根据序列仅给 V_6 发脉冲。对 C 相，在 I、II 扇区，根据序列仅给 V_2 发脉冲；在 IV、V 扇区，根据序列仅给 V_5 发脉冲。

通过以上序列控制，对于各相在其相应的常规扇区没有发生直通的条件，不用设置死区。

1.2.4 扇区过渡点序列

如表 3 所示, 为 A 相上下桥臂在上述无死区控制策略下, 各个开关序列所对应的脉冲序列。

从表 3 可知, VI、I、II 扇区, A 相下桥臂功率器件 V_4 的脉冲序列恒为 0, 没有发生直通的条件; III、IV、V 扇区, A 相上桥臂功率器件 V_1 的脉冲序列恒为 0, 没有发生直通的条件。因而主要考虑, A 相电流从 II 扇区过渡到 III 扇区, 以及 V 扇区过渡到 VI 扇区的情况。

表 3 A 相脉冲序列

Table 3 Pulse sequence of phase A

扇区	开关序列	V_1	V_4	扇区	开关序列	V_1	V_4
I	4(100)	1		IV	3(011)		1
	6(110)	1	0		1(001)	0	1
	0(000)	0			7(111)		0
II	6(110)	1		V	1(001)		1
	2(010)	0	0		5(101)	0	0
	7(111)	1			0(000)		1
III	2(010)			VI	4(100)		
	3(011)	0	1		5(101)	1	0
	0(000)				7(111)		

电流 i_A 从 II 扇区过渡到 III 扇区时, 限制 II 扇区最后一个矢量序列必须是 $U_2(010)$, 这样就保证了 A 相上桥臂在进入第 III 扇区前已经关断了, 为第 III 扇区中 A 相下桥臂的导通准备了时间。

电流 i_A 从 V 扇区过渡到 VI 扇区时, 限制 V 扇区最后一个矢量序列必须是 $U_5(101)$, 这样就保证了 A 相下桥臂在进入第 VI 扇区前已经关断了, 为第 VI 扇区中 A 相上桥臂的导通准备了时间。

同理, 可以分析 B、C 相在各扇区间过渡时的矢量序列限制, I 扇区最后一个矢量状态必须是 U_6 , II 扇区最后一个矢量状态必须是 U_2 , III 扇区最后一个矢量状态必须是 U_3 , IV 扇区最后一个矢量状态必须是 U_1 , V 扇区最后一个矢量状态必须是 U_5 , VI 扇区最后一个矢量状态必须是 U_4 。

通过以上对矢量序列的控制, 保证各相电流不仅在各个扇区内, 而且在各个扇区过渡时均没有直通的条件, 在整个周期中都不用设置死区。从而实现了三相无死区 SVPWM 控制。同一桥臂对管事实上只有一个功率管与对管的并联二极管导通电流, 所以可以禁止实际不导通电流的功率管驱动信号, 让其一直处于关断状态, 则对管之间不用再设置死区, 实现无死区 SVPWM 调制。

2 基于免疫算法的无死区优化

2.1 免疫算法.

免疫算法^[9-12](IA)是模拟生物界自然选择和遗传机理而开发出的一种自适应全局寻优算法。它是由状态空间中的状态矢量经过一定的编码映射到遗传空间, 构成基因型数据序列, 若干数据序列组成群体, 同时将目标函数值转换为适应度函数, 用来评价数据串的优劣。通过对当前群体施加选择、交叉变异等操作, 产生新一代群体。经过多代进化, 在理论上它能以概率 1 达到局部最优解。其中 IA 有一个重要特征是它能够处理线性与非线性问题, 这也是它能够对电压源逆变器进行优化的依据。

如前所述, 消除死区时间的方法在于与传统的门极驱动控制信号有所不同。在本文中, 免疫算法(IA)被用来优化消除开关死区时间 SVPWM 控制序列。

2.2 目标函数

本文优化目的是消除死区的影响的基础上减少输出波形的 THD。由于直接把输出谐波含量作为目标来量化计算比较困难, 但逆变器输出波形与标准正弦波的拟合程度决定其 THD 的大小, 因此可以把二者误差作为来计算输出波形的质量。

IA 借鉴生物学中免疫系统识别外来物的刺激, 并能对之做出准确的应答, 还能保留记忆功能的独有免疫机制。免疫算法包括八个步骤, 具体操作流程如图 4 所示。

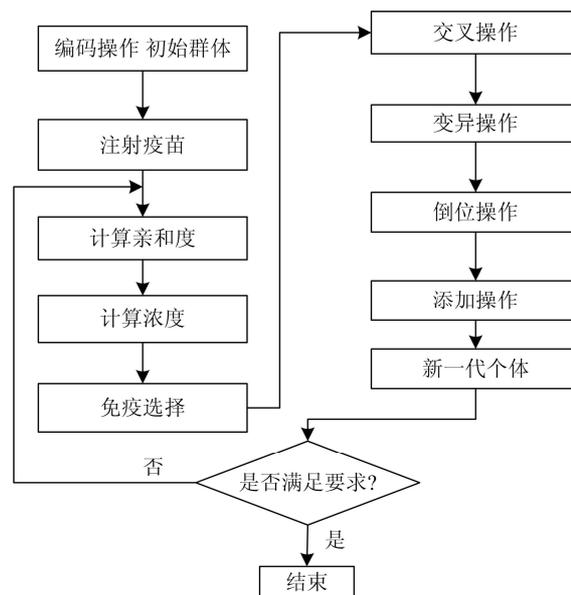


图 4 免疫算法流程图

Fig. 4 Flow chart of immune genetic algorithm

步骤 1) 个体编码和初始种群

编码是 IA 解决实际问题的第一步, 抗体编码结构与文献[9]相似。包括设置每一条抗体含有两条子抗体, 一条子抗体 x 包括 $0\sim 2\pi/3$ 部分的开关状态控制序列的所有合成矢量, 每个合成矢量包括 3 个不同矢量 V_m , 子抗体 x 的每个基因位用矢量 V_m 的相应数值表示, 矢量 V_m 的相应数值为 m , m 的取值范围为 0、1、2、3、4、5、6、7; 另一条子抗体 y 的基因位是与子抗体 x 各基因位的矢量 V_m 分别对应的作用时间 T_m 。

步骤 2) 计算亲和度

在本文中, 亲和度是指两个不同抗体之间的相似程度。其定义为

$$D(x_i, y) = \frac{1}{\int |f(X_i) - y| dt} \quad (6)$$

抗原 y 是实际负载电流值, $f(X_i)$ 是在 X_i 时刻参考电流值, 抗原 y 和 $f(X_i)$ 相似程度越高, 其亲和度函数值也就越大。

步骤 3) 计算浓度

浓度表示的抗体 x_i 和全部抗体空间的距离其定义为

$$E(x_i, x_j) = \int |f(x_i) - f(x_j)| dt \quad (7)$$

被定义为总的多样性和其他抗体的密度。

$$Density(x_i) = \frac{1}{E(x_i)} = \frac{1}{\sum_{j=0}^H E(x_i, x_j)} \quad (8)$$

步骤 4) 免疫选择

免疫选择是指在抗体群中确定性选择一部分亲和力和较高的抗体。其定义为

$$P(x_i) = a \cdot \frac{Fitness(x_i)}{\sum_{j=0}^n Fitness(x_j)} + \frac{b}{Density(x_i)} \quad (9)$$

$$a + b = 1$$

由式(9)可知, 通过改变参数 a , b 可以在算法中获得不同的趋势, 这样在保留高适应度抗体的同时, 也确保个体的多样性。

步骤 5) 交叉操作

从某个作为交叉点的开关周期 T_s 开始, 抗体 A 和抗体 B 以后的部分相互交换, 包括交换 $V_1V_2V_3$ 及之后的矢量和 $V'_1V'_2V'_3$ 及之后的矢量、交换相对应的 $t_1t_2t_3$ 及之后的作用时间和相对应的 $t'_1t'_2t'_3$ 及之后

的作用时间。交换之后抗体 A 进化成了抗体 A', 抗体 B 进化成了抗体 B'。此处 1、2、3 用于标识开关周期 T_s 中第 1、2、3 位矢量, 而不是矢量的数值为 1、2、3。

步骤 6) 变异操作

变异运算是对抗体上的某一位或一些基因座上的基因值按照一定变异概率进行的突变。

步骤 7) 倒位操作

一般负载大部分由电感或是电容等组合而成, 而这些器件都具有储能作用, 所以其不仅跟当前状态有关, 而且也需要考虑先前的状态。通过倒位操作可以产生新的染色体。

步骤 8) 添加操作和新一代个体

添加操作是指算法在每代以某一概率随机添加新个体, 可避免陷入局部最优的陷阱。

经过 IA 的上述操作后, 算法将产生相对较好的最新一代。如果满足终止条件则程序结束, 否则, 算法将重新计算直到优化到最好结果。

3 仿真

本文以图 1 为仿真实验主电路, 采用三种控制方法作对比, 其中 PWM1: 有 $2 \mu s$ 死区的序列; PWM2: 未优化的无死区序列; PWM3: IA 优化后的无死区序列。其中调制比为 0.8, 电流峰值为 3 A, 其参数设置如表 4 所示。

表 4 仿真参数设置

阻抗角	E/V	L/H	R/Ω	Z/Ω
90°	51	0.025	0	7.85
60°	59	0.025	4.5	9.05
30°	102	0.025	13.5	15.62

免疫算法参数设置如下: 种群为 200, 染色体长度 50, 交叉率 $P_c=0.6$, 变异率 $P_m=0.005$, 倒位率 $P_{con}=0.006$, 免疫选择参数 $a=b=0.5$ 。仿真结果如表 5 所示。

表 5 仿真结果

$\phi/(^\circ)$	死区(2 μs)		未优化无死区		IA 优化无死区	
	THD	V_{ab-p}	THD	V_{ab-p}	THD	V_{ab-p}
90	1.15%	0.997	1.57%	0.995	1.06%	1.005
60	1.32%	0.991	1.81%	0.994	1.16%	1.005
30	2.29%	0.976	3.10%	0.994	2.08%	1.004

根据计算的常规与优化的 PWM 控制序列, 通过 Matlab/Simulink 模块仿真, 不同阻抗下的仿真波形、线电压 U_{ab} 及相电流 I_a 如图 5 所示。

由图 5 可知, 当采用三相无死区控制策略时, 由于开关频率降低, 输出电流波形 THD 增大, 即波形质量下降, 但采用免疫算法优化后 THD 下降, 波形优于设置死区的常规 SVPWM 序列。且通过 IA 优化无死区序列后, 输出电压基波峰值也有所提高。

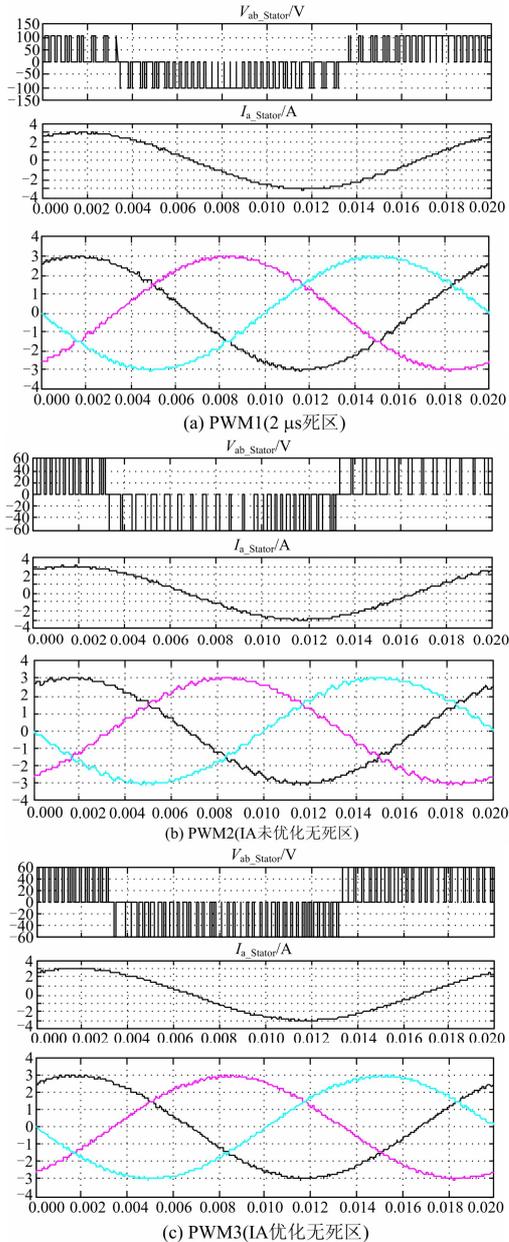


图 5 阻抗角为 30° 时的线电压和相电流

Fig. 5 Line voltage and phase current in angle of 30°

4 结论

本文提出了一种基于免疫算法的新型消除三相

逆变器死区影响方法, 它具有以下优势:

1) 本方法通过 SVPWM 划分扇区确定开关序列, 它可以有效地解决过零点的问题, 且不需要电流极性检测装置。

2) 通过免疫算法(IA)优化开关序列, 它明显减少逆变器输出波形 THD。

参考文献

- [1] MING Z, ZHOU M. Impact of zero-voltage notches on outputs of soft-switching pulse width modulation converters[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2011, 58(6): 2345-2354.
- [2] LAI Y S, SHYU F S. Optimal common-mode voltage reduction PWM technique for inverter control with consideration of the dead-time effects — part I: basic development[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2004, 40(6): 1605-1612.
- [3] 何正义, 季学武, 瞿文龙. 一种新颖的基于死区时间在线调整的 SVPWM 补偿算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 42-46.
HE Zheng-yi, JI Xue-wu, QU Wen-long. A novel SVPWM compensation strategy based on regulating dead time on-line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 42-46.
- [4] 孙向东, 钟彦儒, 任碧莹, 等. 一种新颖的死区补偿时间测量方法[J]. 电工技术学报, 2010, 23(2): 103-107.
SUN Xiang-dong, ZHONG Yan-ru, REN Bi-ying, et al. A Novel compensation strategy based on regulating dead time on-line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 23(2): 103-107.
- [5] BRAHIM L B. On the compensation of dead time and zero-current crossing for a PWM-inverter-controlled AC servo drive[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2004, 40(51): 1113-1118.
- [6] WANG Yong, GAO Qiang, CAI Xu. Mixed PWM for Dead-time elimination and compensation in a grid-tied inverter[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2011, 58(10): 4797-4803.
- [7] RAMACHANDRAN B, SRIVASTAVA S K, EDINGTON C S, et al. An intelligent auction scheme for smart grid market using a hybrid immune algorithm [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2011, 58(10): 4603-4612.

- [8] 袁佳歆, 费雯丽, 魏亮亮, 等. 基于免疫算法的逆变器无死区控制优化[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 248-254.
- YUAN Jia-xin, FEI Wen-li, WEI Liang-liang, et al. Optimal dead-time elimination for voltage source inverters based on immune algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 248-254.
- [9] YUAN J X, PAN J B, FEI W L, et al. An immune algorithm based space-vector PWM control strategy in a three-phase inverter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 2084-2093.
- [10] 郑涛, 潘亚美, 郭坤亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 78-82.
- ZHENG Tao, PAN Ya-mei, GUO Kun-ya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 78-82.
- [11] 韩富春, 高文军, 廉建鑫. 基于免疫优化多分类 SVM 的变压器故障诊断新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 107-109.
- HAN Fu-chun, GAO Wen-jun, LIAN Jian-xin. A novel approach based on multi-class support vector machine of immune optimization for transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 107-109.
- [12] 张思, 黄明祥, 陈丽莉, 等. 基于并行免疫粒子群算法的限流措施优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 16-19, 56.
- ZHANG Si, HUANG Ming-xiang, CHEN Li-li, et al. Short circuit current limiting strategies optimization based on parallel immune particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 16-19, 56.

收稿日期: 2014-01-17; 修回日期: 2014-03-21

作者简介:

袁佳歆(1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术、灵活交流输电技术; E-mail: yjx98571@163.com

薛钢(1992-), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力电子技术。E-mail: 467100814@qq.com