

有源滤波器近似无死区 PWM 控制方法

毛晓红

(广州有色金属研究院, 广州 510651)

摘要: 逆变器在工作中都存在死区的情况, 而 PWM 脉冲信号是控制有源滤波器的最终有效信号, 也是影响有源滤波器补偿性能的重要因素。通过分析其机理, 提出了近似无死区 PWM 控制的改进方法。

关键词: 逆变器; 死区; PWM; 有源滤波器

1 PWM 控制技术

PWM 控制就是对逆变电路开关器件的通断进行控制, 使输出端得到一系列幅值相等而宽度不相等的脉冲, 用这些脉冲来代替正弦波或所需要的波形, 按一定的规则对各脉冲的宽度进行调制, 既可改变逆变电路输出电压的大小, 也可以改变输出频率。

在采样控制理论中有这样一个结论: 冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时, 其效果基本相同。冲量就是窄脉冲的面积。效果基本相同, 是指环节输出响应波形基本相同。根据这个结论就可以利用一系列等幅而不等宽的脉冲代替一个正弦波形。

把如图 1 所示的正弦半波波形分成 N 等份, 就可把正弦半波看成由 N 个彼此相连的脉冲所组成的波形。这些脉冲宽度相等, 都等于 π/N , 但幅值不等, 且脉冲顶部不是水平直线, 而是曲线, 各脉冲的幅值按正弦规律变化。如果把上述脉冲序列用同样数量的等幅而不等宽的矩形脉冲序列代替, 使矩形脉冲的中点和相对应正弦等分的中点重合, 且使矩形脉冲和相应正弦部分的面积(冲量)相等, 就得到如图 1 所示的脉冲序列。这就是 PWM 波形。可以看出, 各脉冲的宽度按正弦规律变化。根据冲量相等效果相同的原理, PWM 波形和正弦半波是等效的。对于正弦波的负半周, 也可以用同样的方法得到 PWM 波形。像这种脉冲的宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的 PWM 波形, 称为 SPWM(Sinusoidal PWM)波形。

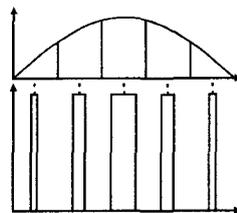


图 1 SPWM 控制原理图

根据 PWM 控制的基本原理, 在给出了正弦波频率、幅值和半个周期内的脉冲数后, PWM 波形各脉冲的宽度和间隔就可以准确计算出来。按照计算结果, 控制电路中各开关器件的通断, 就可以得到所需要的 PWM 波形。但是这种计算是很繁琐的。正弦波的频率、幅值等变化时, 结果都要变化。较为实用的方法是采用调制的方法, 即把所希望的波形作为调制信号, 把接受调制的信号作为载波, 通过对载波的调制得到所希望的 PWM 波形。PWM 波形调制方法包括滞环比较法、三角波调制法和无差拍控制法等多种。每种方法都有各自的优缺点, 工程上应用较多的是三角波调制法。三角波调制法是指采用等腰三角波作为载波, 因为等腰三角波上下宽度与高度成线性关系且左右对称, 符合 PWM 控制的要求。

SVPWM 是在 80 年代中期, 国外学者在交流电机调速中提出了磁通轨迹控制的思想, 进而发展成为电压空间矢量的概念。空间矢量法由于其数字实现简单, 直流电压利用率高等优点受到广泛的应用。它根据三相逆变器的开关动作规律, 将逆变器的开关状态分为 8 种状态。将这 8 种状态下的输出电压进行 park 变换, 即:

$$\vec{U}_r = \frac{2}{3}(u_a + u_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (1)$$

其中, u_a 、 u_b 、 u_c 为有源逆变器的三相交流输出相电压。由此可以得到 SVPWM 的基本电压空间矢

量,如图2。其中包括6个有效矢量 $\vec{U}_1 \sim \vec{U}_6$,它们的模长均为 $2U_d/3$,另外还有2个零矢量 \vec{U}_0 和 \vec{U}_7 ,重合于 $d-q$ 坐标系的原点。

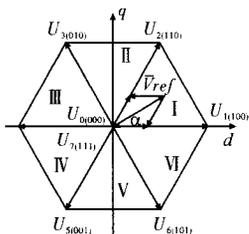


图2 SVPWM电压空间矢量

将任意时刻有源逆变器的三相输出电压变换到 $d-q$ 坐标系下,可以得到任意时刻有源逆变器输出电压对应的电压参考矢量 \vec{V}_{ref} 。即令:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

电压参考矢量 \vec{V}_{ref} 所在扇区位置由表1决定。

表1 电压参考矢量所在的扇区位置

\vec{V}_{ref} 所在的扇区	$u_a、u_b、u_c$ 的关系
Sector 1	$u_a、u_b、u_c$
Sector 2	$u_b、u_a、u_c$
Sector 3	$u_b、u_c、u_a$
Sector 4	$u_c、u_b、u_a$
Sector 5	$u_c、u_a、u_b$
Sector 6	$u_a、u_c、u_b$

假设电压参考矢量 \vec{V}_{ref} 所在的扇区为Sector k , 矢量 $\vec{U}_k、\vec{U}_{k+1}$ 为与 \vec{V}_{ref} 相邻的非零矢量,则 \vec{V}_{ref} 可以用空间电压矢量 $\vec{U}_k、\vec{U}_{k+1}$ 合成。

$$\vec{V}_{ref} = \frac{1}{T_s} (\vec{U}_k T_k + \vec{U}_{k+1} T_{k+1}) \quad (3)$$

式中, $T_k、T_{k+1}$ 分别为矢量 $\vec{U}_k、\vec{U}_{k+1}$ 的作用时间, T_s 为采样周期。零矢量的作用时间 T_0 为:

$$T_0 = T_s - T_k - T_{k+1} \quad (4)$$

常规的SVPWM将零矢量的作用时间 T_0 平均分配给零矢量 \vec{U}_k 和 \vec{U}_7 ,一个采样周期对应6次开关动作。如扇区I内的开关序列如图3所示。图中 $S_a^*、S_b^*、S_c^*$ 分别表示有源逆变器A、B、C三相上桥臂的功率开关管。在矢量空间中对应的开关顺序为:000-100-110-111-110-100-000。

为了降低SVPWM周期内的开关动作次数,降

低有源逆变器的开关损耗,可以采用一种基于分区零矢量的SVPWM调制策略。其办法为将矢量空间分为如图4所示的6个扇区,其中带阴影的扇区插入零矢量 \vec{U}_7 ,其余的扇区插入零矢量 \vec{U}_0 。如在 $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ 区域,给定空间矢量通过 $\vec{U}_1、\vec{U}_2、\vec{U}_7$ 合成,其开关时序如图5所示。可以看出,采用这种分区零矢量的调制方法大大降低了每个周期中开关动作次数,因此大大降低了有源逆变器的开关损耗。

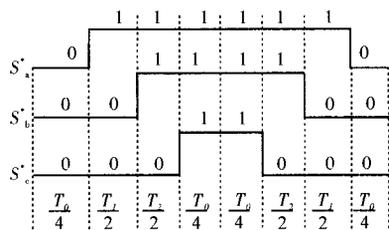


图3 扇区I内的开关时序图

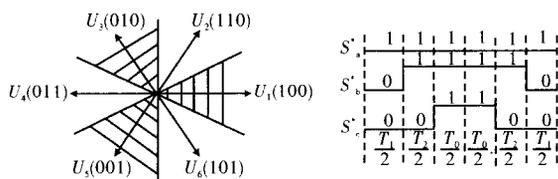


图4 零矢量分区图 图5 $0^\circ < \alpha < 30^\circ$ 区开关时序

2 近似无死区PWM控制改进方法

在SPWM调制法中,有源逆变器的死区就是影响矩形波的面积,如图6所示。但是只要在控制电路中考虑到补偿这个死区,保证输出的矩形波的面积不变的情况下,就能保证PWM仍然能与正弦波等效。

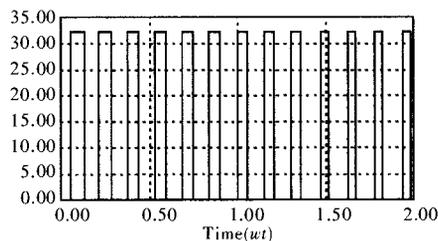


图6 PWM波死区

根据上述SPWM控制原理,可以将PWM波形表示为如下形式:

$$f(t) = K \sum_{i=1}^N [\varepsilon(t-t_{i1}) - \varepsilon(t-t_{i2})] \quad (5)$$

其中, $\varepsilon(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (6)$

对 $f(t)$ 进行拉普拉斯变换:

$$F(s) = K \sum_{i=1}^N \left[\frac{e^{-st_{i1}} - e^{-st_{i2}}}{s} \right] \quad (7)$$

根据SPWM的原理:

$$\frac{F(s)}{T_0 s + 1} = K_s \mathcal{L} \left[\sin(\omega t) \left[\varepsilon(t) - \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \right] \right] = \frac{K_s \omega (1 + e^{-\frac{T}{2}s})}{s^2 + \omega^2} \quad (8)$$

有:

$$K \sum_{i=1}^N \left[\frac{e^{-st_{i1}} - e^{-st_{i2}}}{s(T_0 s + 1)} \right] = \frac{K_s \omega (1 + e^{-\frac{T}{2}s})}{s^2 + \omega^2} \quad (9)$$

假设有源逆变器开关器件的死区为 t_0 , 则有:

$$f_1(t) = K \sum_{i=1}^N \left[\varepsilon(t - t_{i1} - t_0) - \varepsilon(t - t_{i2}) \right] \quad (10)$$

$$F_1(s) = K \sum_{i=1}^N \left[\frac{e^{-s(t_{i1} + t_0)} - e^{-st_{i2}}}{s} \right] \quad (11)$$

$$F(s) - F_1(s) = K \sum_{i=1}^N \left[\frac{e^{-st_{i1}}}{s} (1 - e^{-st_0}) \right] \quad (12)$$

根据图 6 可知, 死区 t_0 的影响就是把 PWM 波中每个矩形波截去了 t_0 的宽度, 由此可知:

$$F(s) - F_1(s) = K \sum_{i=1}^N \left[\frac{e^{-st_{i1}}}{s} (1 - e^{-st_0}) \right] = \mathcal{L} \left[\frac{2Nt_0}{T} \left[\varepsilon(t) - \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \right] \right] = \frac{2Nt_0}{T} (1 - e^{-\frac{T}{2}s}) \quad (13)$$

根据上式可以得到以下结论:

(1) 当 $t_0 < \frac{T/2N}{20} = \frac{T_s}{20} \ll \frac{T}{2N}$ 时, 可以认为 $\frac{2Nt_0}{T} = 0$,

也就是 $F_1(s) = F(s)$, 即死区对 PWM 波形影响并不大。T 表示正弦波周期, T_s 表示 PWM 载波周期。

(2) 当 $t_0 \geq \frac{T/N}{20} = \frac{T_s}{20}$ 时, 就不可以忽略死区对

PWM 波的影响, 而且, 死区 t_0 越大, 对 PWM 波形影响越大。

$$D(t) = F_1(t) - F(t) = \frac{2Nt_0}{T} \left[\varepsilon(t) - \varepsilon\left(t - \frac{T}{2}\right) \right] \quad (14)$$

对于 SVPWM 空间矢量法可采用一种近似于无死区的 SVPWM 方法。不仅仅能够有效降低 PWM 控制有源逆变器的死区效应, 而且硬件实现简单, 计算量小。

对电压型的有源逆变器来说, 当逆变器输出电流流进桥臂时, 上下桥臂的换流在上桥臂的二极管和下桥臂的功率管之间进行, 此时上桥臂的功率管不起作用, 因此可以将其驱动信号封锁, 这样下桥臂就没有必要设置死区了。同理, 在逆变器输出电流流出桥臂时, 上下臂的换流在上桥臂的功率管和下桥臂的二极管之间进行, 可以将下桥臂功率管的驱动信号封锁, 而上桥臂功率管就不用设置死区时间了。这样, 只要检测出逆变器输出电流的方向, 就可以基本上避免上下桥臂之间的死区时间。不过, 在逆变器输出电流改变

方向时, 上下桥臂之间还有一次换流, 必须设置死区时间, 不过这种死区时间在调制波的一个周期内只有两次, 因此其影响基本上可以不考虑。

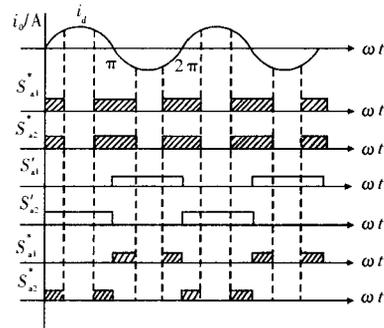


图 7 近似无死区的 SVPWM 调制原理

近似无死区的 SVPWM 调制的控制原理如图 7 所示。图中 S_{a1}^{*} 、 S_{a2}^{*} 为 SVM 调制输出的两路互补驱动信号, 阴影部分为高频脉冲; S'_{a1} 、 S'_{a2} 分别为上下桥臂的封锁信号, 高电平表示选通, 低电平表示封锁。上下桥臂的最后驱动信号 S_{a1}^{*} 、 S_{a2}^{*} 应满足逻辑关系:

$$S_{a1}^{*} = S_{a1}^{*} S'_{a1}, S_{a2}^{*} = S_{a2}^{*} S'_{a2} \quad (15)$$

3 结 论

通过改进的方法, 可有效减少应用 SPWM 调制法和 SVPWM 空间矢量法控制中中存在的死区情况, 提高有源电力滤波器补偿性能。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 陈国呈. 电压型 PWM 逆变器的波形失真及其补偿方法[J]. 冶金自动化, 1990, 14(3): 11-14
- [3] 刘陵顺, 尚安利, 顾文锦. SPWM 逆变器死区效应的研究. 电机与控制学报[J]. 2001, 5(4): 237-241.
- [4] 王建元, 俞红样, 纪延超. 一种新的有源滤波器优化特定消谐 PWM 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 30-33.
- [5] Zeng J, Ni Y, Diao Q, et al. Current Controller for Active Power Filter Based on Optimal Voltage Space Vector[J]. IEE Proceeding of Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(2): 111-116.
- [6] 黄文新, 胡育文, 李磊. 一种新颖的空间电压矢量调制逆变器的死区补偿方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(4): 143-147.
- [7] 王建明, 李永斌, 朱倩影. 随机脉冲位置电压空间矢量调制及其实现[J]. 电力电子技术, 2001, 35(5): 16-19.

作者简介: 毛晓红(1969-), 女, 研究方向为可控制硅弧氩焊机、逆变氩弧焊机等电力电子设备的研制、生产及维修。