

PWM 技术实现方法综述

李旭, 谢运祥

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:总结了 PWM 技术问世至今各种主要的实现方法,叙述了它们的基本工作原理,并分析了它们各自的优缺点。

关键词:PWM;空间矢量;直接转矩控制;非线性

Summarization of Methods to Realize PWM Technology

LI Xu, XIE Yun-xiang

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: The major methods to realize pulse width modulation (PWM) are summarized, their basic principles are described and their advantages and disadvantages are analyzed.

Keywords: PWM; space vector; direct torque control; nonlinear

中图分类号: TM46 文献标识码: B 文章编号: 0219-2713(2005)02-0051-05

0 引言

采样控制理论中有一个重要结论: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。PWM 控制技术就是以该结论为理论基础,对半导体开关器件的导通和关断进行控制,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其他所需要的波形。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,也可改变输出频率。

PWM 控制的基本原理很早就已经提出,但是受电力电子器件发展水平的制约,在上世纪 80 年代以前一直未能实现。直到进入上世纪 80 年代,随着全控型电力电子器件的出现和迅速发展, PWM 控制技术才真正得到应用。随着电力电子技术、微电子技术和自动控制技术的发展以及各种新的理论方法,如现代控制理论、非线性系统控制思想的应用, PWM 控制技术获得了空前的发展。到目前为止,已出现了多种 PWM 控制技术,根据

PWM 控制技术的特点,到目前为止主要有以下 8 类方法。

1 相电压控制 PWM

1.1 等脉宽 PWM 法^[1]

VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)装置在早期是采用 PAM(Pulse Amplitude Modulation)控制技术来实现的,其逆变器部分只能输出频率可调的方波电压而不能调压。等脉宽 PWM 法正是为了克服 PAM 法的这个缺点发展而来的,是 PWM 法中最为简单的一种。它是把每一脉冲的宽度均相等的脉冲列作为 PWM 波,通过改变脉冲列的周期可以调频,改变脉冲的宽度或占空比可以调压,采用适当控制方法即可使电压与频率协调变化。相对于 PAM 法,该方法的优点是简化了电路结构,提高了输入端的功率因数,但同时也存在输出电压中除基波外,还包含较大的谐波分量。

1.2 随机 PWM

在上世纪 70 年代开始至上世纪 80 年代初,由于当时大功率晶体管主要为双极性达林顿三极管,载波频率一般不超过 5 kHz,电机绕组的电磁

噪音及谐波造成的振动引起了人们的关注。为求得改善,随机 PWM 方法应运而生。其原理是随机改变开关频率使电机电磁噪音近似为限带白噪声(在线性频率坐标系中,各频率能量分布是均匀的),尽管噪音的总分贝数未变,但以固定开关频率为特征的有色噪音强度大大削弱。正因为如此,即使在 IGBT 已被广泛应用的今天,对于载波频率必须限制在较低频率的场合,随机 PWM 仍然有其特殊的价值;另一方面则说明了消除机械和电磁噪音的最佳方法不是盲目地提高工作频率,随机 PWM 技术正是提供了一个分析、解决这种问题的全新思路。

1.3 SPWM 法

SPWM(Sinusoidal PWM)法是一种比较成熟的、目前使用较广泛的 PWM 法。前面提到的采样控制理论中的一个重要结论: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。SPWM 法就是以该结论为理论基础,用脉冲宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的 PWM 波形即 SPWM 波形控制逆变电路中开关器件的通断,使其输出的脉冲电压的面积与所希望输出的正弦波在相应区间内的面积相等,通过改变调制波的频率和幅值则可调节逆变电路输出电压的频率和幅值。该方法的实现有以下几种方案。

1.3.1 等面积法

该方案实际上就是 SPWM 法原理的直接阐释,用同样数量的等幅而不等宽的矩形脉冲序列代替正弦波,然后计算各脉冲的宽度和间隔,并把这些数据存于微机中,通过查表的方式生成 PWM 信号控制开关器件的通断,以达到预期的目的。由于此方法是以 SPWM 控制的基本原理为出发点,可以准确地计算出各开关器件的通断时刻,其所得的波形很接近正弦波,但其存在计算繁琐,数据占用内存大,不能实时控制的缺点。

1.3.2 硬件调制法

硬件调制法是为解决等面积法计算繁琐的缺点而提出的,其原理就是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期望的 PWM 波形。通常采用等腰三角波作为载波,当调制信号波为正弦波时,所得到的就是 SPWM 波形。其实现方法简单,可以用模拟电路构成三角波载波和正弦调制波发生电路,用比较器来确定它们的交点,在交点时刻对开关器

件的通断进行控制,就可以生成 SPWM 波。但是,这种模拟电路结构复杂,难以实现精确的控制。

1.3.3 软件生成法

由于微机技术的发展使得用软件生成 SPWM 波形变得比较容易,因此,软件生成法也就应运而生。软件生成法其实就是用软件来实现调制的方法,其有两种基本算法,即自然采样法和规则采样法。

1.3.3.1 自然采样法^[2]

以正弦波为调制波,等腰三角波为载波进行比较,在两个波形的自然交点时刻控制开关器件的通断,这就是自然采样法。其优点是所得 SPWM 波形最接近正弦波,但由于三角波与正弦波交点有任意性,脉冲中心在一个周期内不等距,从而脉宽表达式是一个超越方程,计算繁琐,难以实时控制。

1.3.3.2 规则采样法^[3]

规则采样法是一种应用较广的工程实用方法,一般采用三角波作为载波。其原理就是用三角波对正弦波进行采样得到阶梯波,再以阶梯波与三角波的交点时刻控制开关器件的通断,从而实现 SPWM 法。当三角波只在其顶点(或底点)位置对正弦波进行采样时,由阶梯波与三角波的交点所确定的脉宽,在一个载波周期(即采样周期)内的位置是对称的,这种方法称为对称规则采样。当三角波既在其顶点又在底点时刻对正弦波进行采样时,由阶梯波与三角波的交点所确定的脉宽,在一个载波周期(此时为采样周期的两倍)内的位置一般并不对称,这种方法称为非对称规则采样。

规则采样法是对自然采样法的改进,其主要优点就是是计算简单,便于在线实时运算,其中非对称规则采样法因阶数多而更接近正弦。其缺点是直流电压利用率较低,线性控制范围较小。

以上两种方法均只适用于同步调制方式中。

1.3.4 低次谐波消去法^[2]

低次谐波消去法是以消去 PWM 波形中某些主要的低次谐波为目的的方法。其原理是对输出电压波形按傅氏级数展开,表示为 $u(\omega t) =$

$$\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} a_n \sin n\omega t, \text{ 首先确定基波分量 } a_1 \text{ 的值,再令}$$

两个不同的 $a_n = 0$, 就可以建立三个方程,联立求解得 a_1, a_2 及 a_3 , 这样就可以消去两个频率的谐波。

该方法虽然可以很好地消除所指定的低次谐波,但是,剩余未消去的较低次谐波的幅值可能会相当大,而且同样存在计算复杂的缺点。该方法同样只适用于同步调制方式中。

1.4 梯形波与三角波比较法^[2]

前面所介绍的各种方法主要是以输出波形尽量接近正弦波为目的,从而忽视了直流电压的利用率,如 SPWM 法,其直流电压利用率仅为 86.6%。因此,为了提高直流电压利用率,提出了一种新的方法——梯形波与三角波比较法。该方法是采用梯形波作为调制信号,三角波为载波,且使两波幅值相等,以两波的交点时刻控制开关器件的通断实现 PWM 控制。

由于当梯形波幅值和三角波幅值相等时,其所含的基波分量幅值已超过了三角波幅值,从而可以有效地提高直流电压利用率。但由于梯形波本身含有低次谐波,所以输出波形中含有 5 次、7 次等低次谐波。

2 线电压控制 PWM

前面所介绍的各种 PWM 控制方法用于三相逆变电路时,都是对三相输出相电压分别进行控制的,使其输出接近正弦波,但是,对于像三相异步电动机这样的三相无中线对称负载,逆变器输出不必追求相电压接近正弦,而可着眼于使线电压趋于正弦。因此,提出了线电压控制 PWM,主要有以下两种方法。

2.1 马鞍形波与三角波比较法

马鞍形波与三角波比较法也就是谐波注入 PWM 方式(HIPWM),其原理是在正弦波中加入一定比例的三次谐波,调制信号便呈现出马鞍形,而且幅值明显降低,于是在调制信号的幅值不超过载波幅值的情况下,可以使基波幅值超过三角波幅值,提高了直流电压利用率。在三相无中线系统中,由于三次谐波电流无通路,所以三个线电压和线电流中均不含三次谐波^[4]。

除了可以注入三次谐波以外,还可以注入其他 3 倍频于正弦波信号的其他波形,这些信号都不会影响线电压。这是因为,经过 PWM 调制后逆变电路输出的相电压也必然包含相应的 3 倍频于正弦波信号的谐波,但在合成线电压时,各相电压中的这些谐波将互相抵消,从而使线电压仍为正

弦波。

2.2 单元脉宽调制法^[5]

因为,三相对称线电压有 $U_{uv} + U_{vw} + U_{wu} = 0$ 的关系,所以,某一线电压任何时刻都等于另外两个线电压负值之和。现在把一个周期等分为 6 个区间,每区间 60° ,对于某一线电压例如 U_{uv} ,半个周期两边 60° 区间用 U_{uv} 本身表示,中间 60° 区间用 $-(U_{vw} + U_{wu})$ 表示,当将 U_{vw} 和 U_{wu} 作同样处理时,就可以得到三相线电压波形只有半周内两边 60° 区间的两种波形形状,并且有正有负。把这样的电压波形作为脉宽调制的参考信号,载波仍用三角波,并把各区间的曲线用直线近似(实践表明,这样做引起的误差不大,完全可行),就可以得到线电压的脉冲波形,该波形是完全对称,且规律性很强,负半周是正半周相应脉冲列的反相,因此,只要半个周期两边 60° 区间的脉冲列一经确定,线电压的调制脉冲波形就唯一地确定了。这个脉冲并不是开关器件的驱动脉冲信号,但由于已知三相线电压的脉冲工作模式,就可以确定开关器件的驱动脉冲信号了。

该方法不仅能抑制较多的低次谐波,还可减小开关损耗和加宽线性控制区,同时还能带来用微机控制的方便,但该方法只适用于异步电动机,应用范围较小。

3 电流控制 PWM

电流控制 PWM 的基本思想是把希望输出的电流波形作为指令信号,把实际的电流波形作为反馈信号,通过两者瞬时值的比较来决定各开关器件的通断,使实际输出随指令信号的改变而改变。其实现方案主要有以下 3 种。

3.1 滞环比较法^[4]

这是一种带反馈的 PWM 控制方式,即每相电流反馈回来与电流给定值经滞环比较器,得出相应桥臂开关器件的开关状态,使得实际电流跟踪给定电流的变化。该方法的优点是电路简单,动态性能好,输出电压不含特定频率的谐波分量。其缺点是开关频率不固定造成较为严重的噪音,和其他方法相比,在同一开关频率下输出电流中所含的谐波较多。

3.2 三角波比较法^[2]

该方法与 SPWM 法中的三角波比较方式不

同,这里是把指令电流与实际输出电流进行比较,求出偏差电流,通过放大器放大后再和三角波进行比较,产生 PWM 波。此时开关频率一定,因而克服了滞环比较法频率不固定的缺点。但是,这种方式电流响应不如滞环比较法快。

3.3 预测电流控制法^[6]

预测电流控制是在每个调节周期开始时,根据实际电流误差,负载参数及其它负载变量,来预测电流误差矢量趋势,因此,下一个调节周期由 PWM 产生的电压矢量必将减小所预测的误差。该方法的优点是,若给调节器除误差外更多的信息,则可获得比较快速、准确的响应。目前,这类调节器的局限性是响应速度及过程模型系数参数的准确性。

4 空间电压矢量控制 PWM^[7]

空间电压矢量控制 PWM(SVPWM)也叫磁通正弦 PWM 法。它以三相波形整体生成效果为前提,以逼近电机气隙的理想圆形旋转磁场轨迹为目的,用逆变器不同的开关模式所产生的实际磁通去逼近基准圆磁通,由它们的比较结果决定逆变器的开关,形成 PWM 波形。此法从电动机的角度出发,把逆变器和电机看作一个整体,以内切多边形逼近圆的方式进行控制,使电机获得幅值恒定的圆形磁场(正弦磁通)。

具体方法又分为磁通开环式和磁通闭环式。磁通开环法用两个非零矢量和一个零矢量合成一个等效的电压矢量,若采样时间足够小,可合成任意电压矢量。此法输出电压比正弦波调制时提高 15%,谐波电流有效值之和接近最小。磁通闭环式引入磁通反馈,控制磁通的大小和变化的速度。在比较估算磁通和给定磁通后,根据误差决定产生下一个电压矢量,形成 PWM 波形。这种方法克服了磁通开环法的不足,解决了电机低速时,定子电阻影响大的问题,减小了电机的脉动和噪音。但由于未引入转矩的调节,系统性能没有得到根本性的改善。

5 矢量控制 PWM^[8]

矢量控制也称磁场定向控制,其原理是将异步电动机在三相坐标系下的定子电流 I_a , I_b 及 I_c , 通过三相/二相变换,等效成两相静止坐标系下的

交流电流 I_{a1} 及 I_{b1} , 再通过按转子磁场定向旋转变换,等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_{m1} 及 I_{t1} (I_{m1} 相当于直流电动机的励磁电流; I_{t1} 相当于与转矩成正比的电枢电流),然后模仿对直流电动机的控制方法,实现对交流电动机的控制。其实质是将交流电动机等效为直流电动机,分别对速度、磁场两个分量进行独立控制。通过控制转子磁链,然后分解定子电流而获得转矩和磁场两个分量,经坐标变换,实现正交或解耦控制。

但是,由于转子磁链难以准确观测,以及矢量变换的复杂性,使得实际控制效果往往难以达到理论分析的效果,这是矢量控制技术在实践上的不足。此外,它必须直接或间接地得到转子磁链在空间上的位置才能实现定子电流解耦控制,在这种矢量控制系统中需要配置转子位置或速度传感器,这显然给许多应用场合带来不便。

6 直接转矩控制 PWM^[8]

1985 年德国鲁尔大学 Depenbrock 教授首先提出直接转矩控制理论(Direct Torque Control 简称 DTC)。直接转矩控制与矢量控制不同,它不是通过控制电流、磁链等量来间接控制转矩,而是把转矩直接作为被控量来控制,它也不需要解耦电机模型,而是在静止的坐标系中计算电机磁通和转矩的实际值,然后,经磁链和转矩的 Band-Band 控制产生 PWM 信号对逆变器的开关状态进行最佳控制,从而在很大程度上解决了上述矢量控制的不足,能方便地实现无速度传感器化,有很快的转矩响应速度和很高的速度及转矩控制精度,并以新颖的控制思想、简洁明了的系统结构、优良的动静态性能得到了迅速发展。

但直接转矩控制也存在缺点,如逆变器开关频率的提高有限制。

7 非线性控制 PWM

单周控制法^[7]又称积分复位控制(Integration Reset Control,简称 IRC),是一种新型非线性控制技术,其基本思想是控制开关占空比,在每个周期使开关变量的平均值与控制参考电压相等或成一定比例。该技术同时具有调制和控制的双重性,通过复位开关、积分器、触发电路、比较器达到跟踪指令信号的目的。单周控制器由控制器、比较器、

积分器及时钟组成,其中控制器可以是 RS 触发器,其控制原理如图 1 所示。图中 K 可以是任何物理开关,也可是其它可转化为开关变量形式的抽象信号。

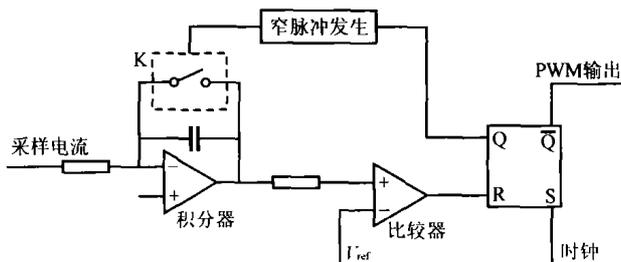


图 1 单周控制原理图

单周控制在控制电路中不需要误差综合,它能在一个周期内自动消除稳态、瞬态误差,使前一周期的误差不会带到下一周期。虽然硬件电路较复杂,但其克服了传统的 PWM 控制方法的不足,适用于各种脉宽调制软开关逆变器,具有反应快、开关频率恒定、鲁棒性强等优点,此外,单周控制还能优化系统响应、减小畸变和抑制电源干扰,是一种很有前途的控制方法。

8 谐振软开关 PWM

传统的 PWM 逆变电路中,电力电子开关器件硬开关的工作方式,大的开关电压电流应力以及高的 du/dt 和 di/dt 限制了开关器件工作频率的提高,而高频化是电力电子主要发展趋势之一,它能使变换器体积减小、重量减轻、成本下降、性能提高,特别当开关频率在 18 kHz 以上时,噪声将已超过人类听觉范围,使无噪声传动系统成为可能。

谐振软开关 PWM 的基本思想是在常规 PWM 变换器拓扑的基础上,附加一个谐振网络,谐振网络一般由谐振电感、谐振电容和功率开关组成。开关转换时,谐振网络工作使电力电子器件在开关点上实现软开关过程,谐振过程极短,基本不影响 PWM 技术的实现。从而既保持了 PWM 技术的特点,又实现了软开关技术。但由于谐振网络在电路中的存在必然会产生谐振损耗,并使电路受固有问题的影响,从而限制了该方法的应用。

9 结语

本文较详细地总结了各种 PWM 控制方法的

原理,并简单说明了各种方法的优缺点。PWM 控制技术以其控制简单、灵活和动态响应好的优点而成为电力电子技术最广泛应用的控制方式,也是人们研究的热点。由于当今科学技术的发展已经没有了学科之间的界限,结合现代控制理论思想或实现无谐振软开关技术将会成为 PWM 控制技术发展的主要方向之一。

参考文献

- [1] 吴守箴,臧英杰. 电气传动的脉宽调制控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 黄俊,王兆安. 电力电子变流技术(第三版)[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] 邵丙衡. 电力电子技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1997.
- [4] 王兆安,杨君. 变频调速技术及应用[J]. 中国能源,1998,(7):45.
- [5] 葛延津,刘玮. 电力电子技术[M]. 沈阳:东北大学出版社,1996.
- [6] 张岳匀,谢运祥,何志伟. 交流传动系统 PWM 技术的近期发展及展望[J]. 微电机,1999,32(1):30.
- [7] 周林,蒋建文,易强,罗眉. PWM 控制器的控制方法[J]. 重庆邮电学院学报(自然科学版),2001,(S1):112-113.
- [8] 周志敏. 变频器的控制方式及应用选型[J]. 电源技术应用,2002,5(9):435.
- [9] 陈国呈. PWM 变频调速及软开关电力变换技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

作者简介

李旭(1979-),男,硕士研究生,专业为电力电子与电力传动。研究方向为变流技术及应用。

Eljintek 的开关电源输出功率 30W

Eljintek 公司的 MPU30 系列开关电源整流输出功率为 30W,输出电压 DC 3~48V,适用于医疗设备。MPU30 系列开关电源采用较低安全接地泄漏和较高绝缘设计,其尺寸为 107.5×67×36mm,典型效率达 65%。

MPU30 系列开关电源有过压、短路、过载和热保护功能,可承受高达 15A (115V) 或 30A (230V) 的电涌。它还有内置 EMI 滤波器,其电压调整量为 ±5%,满足 UL 和 TÜV 要求。