

电能变换领域中随机脉宽调制技术 研究概况及展望^{*}

董雨蔚，许杰，聂子玲，刘洋，朱俊杰

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要：相较于传统的脉宽调制技术，随机脉宽调制具备有效的谐波频谱分散能力，从而实现机电负载噪声的削弱。随机脉宽调制技术包括起步的随机开关调制、后续的随机脉冲位置与随机开关频率等3个基本方法。随着电力电子技术的整体发展，随机脉宽调制已从传统的载波调制逐渐拓展到空间矢量调制之中，应用范围日趋广泛，谐波频谱分散与功率谱峰值抑制的效果不断提升。同时，新的优化方案不断被提出，对谐波频谱及功率谱的分散效果亦在不断提高。梳理了随机脉宽调制的研究历程，总结了数种典型的随机脉宽调制的基本原理，并对未来随机脉宽调制的研究方向作出展望，为随机脉宽调制技术的深入研究提供参考。

关键词：电能变换；随机脉宽调制；频谱分散；噪声削弱；功率谱；峰值抑制

中图分类号：TM 401 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-6540(2021)06-0001-09

doi: 10.12177/emca.2021.037

Summary and Prospect of Random Pulse Width Modulation in the Field of Power Transformation^{*}

DONG Yushi, XU Jie, NIE Ziling, LIU Yang, ZHU Junjie

(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Compared with the conventional pulse width modulation (PWM) technology, random PWM (RPWM) has effective ability of harmonic spectrum dispersion, which can reduce the noise of electromechanical load. The RPWM technology includes three basic methods: initial random switch modulation, and subsequent random pulse position and random switching frequency modulation. With the overall development of power electronics technology, RPWM has been gradually expanded from conventional carrier modulation to space vector modulation, the application prospect is increasingly broad, and the effect of power spectrum peak suppression is continuously improved. At the same time, new optimization schemes are put forward constantly, and the dispersion effect of harmonic and power spectrum is also continuously improved. The research history of RPWM is reviewed, the basic principles of some typical RPWM technologies are introduced, and the future research directions of random PWM are prospected, so as to provide a reference for further research of RPWM technology.

Key words: power transformation; random pulse width modulation (RPWM); harmonic spectrum dispersion; noise reduction; power spectrum; peak suppression

收稿日期：2021-03-03；收到修改稿日期：2021-04-29

*基金项目：国家自然科学基金项目(51807199, 52077219, 52007196)

作者简介：董雨蔚(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动。

朱俊杰(1984—)，男，研究员，博士生导师，研究方向为电力电子与电力传动。(通信作者)

0 引言

在电力牵引与传动领域中,各类机电负载供电电源的输出电能质量关系到整体机电系统运行的安全与稳定^[1-3]。脉宽调制(PWM)技术是现代电力变换系统中最常见的调制方法,然而传统的PWM技术存在一个固有问题:输出电压谐波高度集中在开关频率整数倍附近,过高的谐波峰值会对机电系统的安全稳定运行产生威胁^[4-6]。在现代轨道交通、舰船全电推进等领域,电力变换装置的电压与功率等级不断提高,交流电源输出电压谐波直接影响动力系统运行的安全^[7-10];对机电负载而言,单一频率的谐波功率会引发较大的机械振动与声学噪声,不利于系统稳定与人员健康^[11-12];在目标探测与识别领域,雷达导引头对目标的识别主要依靠目标单位产生的谐波强度、散射系数或频谱分布程度,因此舰船噪声特别是潜艇噪声的频谱分布特性与其隐蔽性能高度相关^[13-14]。

随机脉宽调制(RPWM)技术可以显著削弱频谱上开关频率整数倍次的谐波峰值,同时弱化对应次数谐波的功率谱及频谱特征,避免分布集中的谐波对机电系统安全稳定运行带来的威胁^[15]。本文总结了RPWM技术的工程研究现状,对各类RPWM的基本原理进行介绍,概述了这一技术存在的问题,并基于此对未来的研究方向进行了展望和预测。

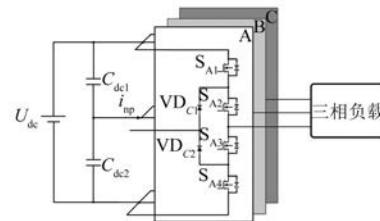
1 经典 PWM 技术概述

正弦脉宽调制(SPWM)是最常见的载波 PWM 技术,其原理简单,易于实现与控制,然而存在直流电压利用率低、对调制比要求较高等显著问题。基于 SPWM 思想的常见改进方法包括载波层叠 PWM、载波移相 PWM 等。载波层叠 PWM 的基本原理为,将单边 SPWM 的三角载波按 γ 轴对称,与正弦参考波双向调制,在一个周期内生成极性相反的脉冲序列^[16]。这一方法继承了 SPWM 的固有缺陷,对逆变器性能有较大限制。载波移相技术^[17]是将多个相位不等的三角载波与同一正弦载波比较,这一方法可以增加等效开关效率,因此在级联多电平拓扑中有较广泛的应用。

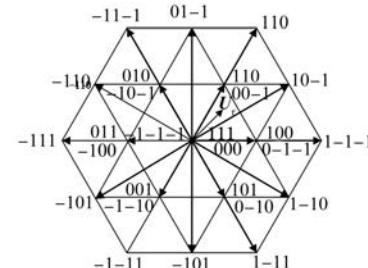
— 2 —

以削弱总谐波畸变(THD)为目的,业界提出了一种基于载波 PWM 的特定谐波消除方法,即控制开关脉冲的边沿位置以完全消除输出电压中特定频率的谐波^[18]。这一方式需要精确控制脉冲起止,且特定谐波的消除需要通过超越方程求解脉冲边缘偏移的相位角,每次计算均基于当前周期内的相位偏移进行,计算量过大,在高频与快速响应的系统中并不适用。

从交流电机驱动所需圆形磁通轨迹的角度,20世纪90年代发展出了空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术,其本质是在短周期内按特定规律切换桥臂各开关通断来改变输出电压的合成矢量,从而使其形成的磁场更趋近圆形。1980年Nabae等^[19]提出一种中性点钳位(NPC)三电平拓扑(Nabae电路)。与传统的H桥两电平逆变拓扑相比,以三电平为代表的多电平结构具有更小的开关应力,且输出电压谐波含量更少,具有更高的直流电压利用率,增大了拓扑容错性能,极大拓展了SVPWM的应用范围。三电平电路的实现方式除中性点钳位外,还可通过飞跨电容与级联形式实现。以NPC三电平为例,其拓扑结构与电压空间矢量如图1所示,相应开关函数与开关状态对应关系如表1所示。



(a) NPC型三电平逆变拓扑



(b) 三电平空间电压矢量

图1 NPC三电平拓扑及其空间矢量

SVPWM技术需要通过大量数值计算实现,而DSP与FPGA等数字处理芯片性能不断提升

为算法的深入研究扫除了障碍。一些 SVPWM 的优化算法不断被提出并应用,如旨在降低计算量的新坐标系计算^[20~22]、消除中性点电位不平衡的虚拟矢量调制^[23]以及降低开关损耗的脉冲跳变^[24]等。

**表 1 开关函数与开关状态的对应关系
(X 为相序, 1 为导通, 0 为关断)**

开关函数	S _{X1}	S _{X2}	S _{X3}	S _{X4}
1	1	1	0	0
0	0	1	1	0
-1	0	0	1	1

2 随机脉宽调制基本类型

2.1 随机脉宽调制的起步

经典 PWM 技术中输出电压谐波高度集中在载波频率的整数倍次,产生的谐波幅值与振动噪声较大。20世纪90年代初,Trzynadlowski 等^[25]为解决潜艇噪声过大的问题,基于单相 H 桥拓扑提出 RPWM 技术,并明确指出:若将开关频率与开关脉冲导通位置随机改变,则输出电压谐波会包含多重的随机频率,从而改变输出谐波的频域分布。该思想随后成为 RPWM 技术研究的基础。

Tanaka 等^[26]于 1991 年提出一种基于 Boost 电路的直接生成间隔随机的脉冲序列方法,如图 2 所示。这一方法的本质是通过某个随机规律 $P(t)$ 直接决定当前与下一个脉冲的间隔宽度,延展了输出电压的谐波频谱。文献[27]以削弱永磁同步电机的机械噪声为目的,设计了一种将随机离散序列作为载波、固定频率三角波作为调制波的简化 RPWM 算法,生成如图 3 所示的宽度与间隔均随机的脉冲序列。这一调制方法下的听觉噪声与振动(ANV)降低约 35%,转矩脉动也得以削弱 40%。

从图 3 可知,随机序列变化范围会对应影响载波 PWM 的调制系数,因此在选取不同随机序列统计参数时应精确设计 PWM 的调制比。当增大序列方差时会产生过调制;方差减小使调制比下降,影响电压利用率,对输出电能质量均会产生较大影响^[28]。此外,以随机序列作为载波的算法实际的开关周期即为随机序列更新周期,实际工

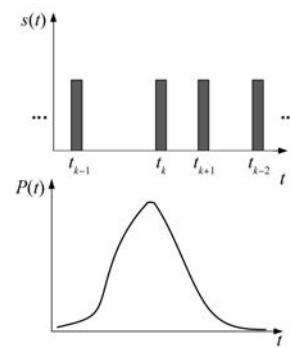


图 2 间隔随机的脉冲序列^[26]

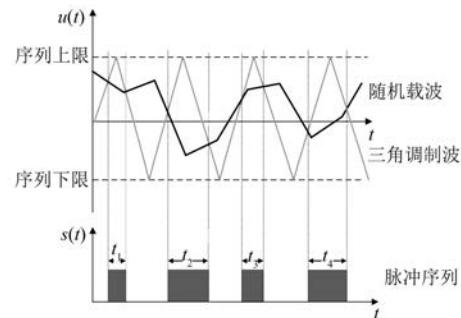


图 3 间隔与宽度均随机的脉冲序列^[27]

作中需要尽可能提高随机数更新速度以满足载波频率远大于工频的基本要求,算法设计较为复杂,实际应用并不广泛。

2.2 基于脉冲位置的 RPWM 技术

围绕载波 PWM 和 SVPWM 特征参数随机化的 RPWM 技术具有更广泛的实用性。其中一种较为直观的方案是在一个固定开关周期内随机改变脉冲的中心偏移程度或宽度,即随机脉冲位置 PWM(RPP-PWM)。文献[29]提出了一种最简单的 RPP-PWM,即将每一次脉冲触发位置均选在固定周期 T_s 的起止处,称为边缘随机脉冲位置 PWM(Leag-lag RPP-PWM),如图 4 所示。

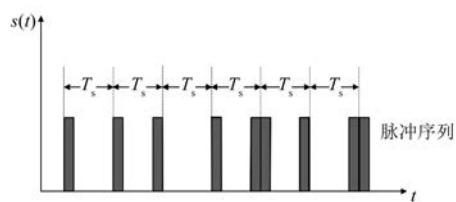


图 4 边缘随机脉冲位置 PWM^[29]

这一调制方法的本质是将脉冲触发位置固

定在每个开关周期的起止处。脉冲位置在周期切换时刻的开始即为前沿调制,在脉冲的下降沿与周期末端对齐则为后沿调制,2种状态可根据0-1分布随机切换。在这一调制方式下,脉冲在前一周期末尾与后一周期开始处背靠背合并的概率仅为25%,且平均开关频率与固定周期的频率存在正比例关系,可以通过控制这一比例系数来获取需要的平均开关频率。类似地,文献[30]基于一种双路输出的无线传能装置提出一种随机脉冲触发信号延时的RPP-PWM算法。这一方法本质上仍属于RPWM技术,保证了双路输出的较好均压效果,但并未以谐波频谱分散为主要目的,虽然仍在某种程度上反映了RPWM思想的通用性。

RPP-PWM思想可与SVPWM技术中的分段脉冲生成原理结合,随机改变各段脉冲在每个定长开关周期内的位置。文献[31]提出一种如图5所示的RPP-SVPWM技术,即随机零矢量分配调制。其主要思想是随机分配一个周期内2个零矢量作用时间 t_{zero} 的比例。根据伏秒平衡原理,零矢量并不改变有效矢量的合成效果,因此其总作用时间在一个周期内不变,合成参考电压矢量的幅值与位置就不会受到影响。

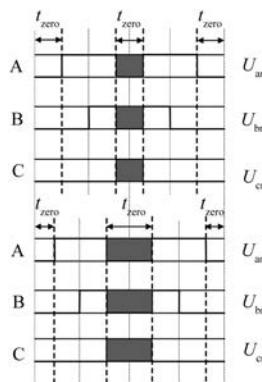


图5 随机零矢量分配 SVPWM^[31]

近年来新的RPP-SVPWM优化算法不断提出。例如文献[32]提出一种脉冲中心随机偏移的调制算法,即在一个开关周期内将三相开关脉冲随机偏移,本质是改变左右边缘2个相同开关函数零矢量的时间权重。然而这一技术同时受到最大占空比的限制:一旦偏移量过大,超出单个脉冲的最大占空比,就会使得一侧零矢量消失^[33],改变有效矢量的作用时间,影响矢量合成效果。

— 4 —

类似地,文献[34]基于2电平逆变电路提出一种基于2种低开关损耗模式随机切换的RPP-SVPWM技术,即将图5所示的2种开关序列各自为一个整体,在此2种低损耗开关模式下随机切换,如图6所示,其本质亦是零矢量作用时序的随机变换。

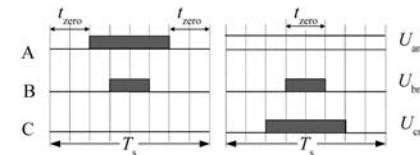


图6 零矢量时序随机切换 SVPWM^[32]

这一方法实现方法较为简单,但缺少类似RPWM技术的谐波峰值及功率谱削弱的比较,且已无法满足日益增长的高速高精度的调制需求。

需要注意的是,由于在正常调制比下三电平电路的矢量合成只有有效矢量参与,因此基于零矢量位置的随机调制技术并不适用于高电平拓扑。文献[35]实现了另一种适用于三电平的非中心对称的RPP-SVPWM算法,如图7所示。其基本原理是将原本对称的开关周期 T_s 按随机系数 R 分配成2个半区,且保证2个半区内相同矢量的占空比相同。

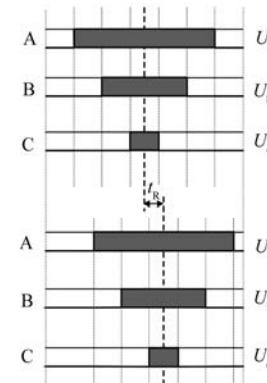


图7 脉冲中心随机偏移 SVPWM

RPP-PWM的技术路线更为便捷直观,随机参数亦有明确的边界条件。然而边界条件同样限制了随机脉冲宽度或位置的允许变化量,进而限制了谐波分散效果。同时,从数学角度同样可以证明:RPP-PWM技术在整体上削弱了集中分布的谐波频谱,但频谱及功率谱仍存在离散成分,对谐波簇的分散效果并不理想^[36]。此

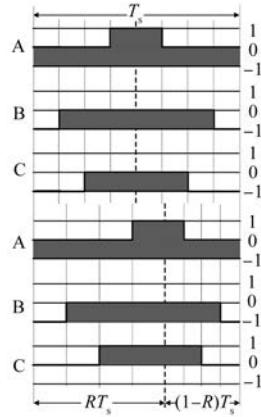
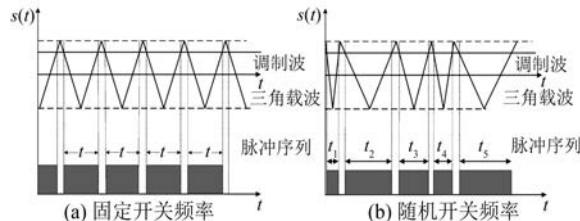


图 8 随机半区分配比例 SVPWM

外,基于零矢量的多种随机 SVPWM 调制并不适用于高电平拓扑,原因在于零矢量参与合成仅在调制比过低或工作在故障状态时才可能在多电平电路中出现。以上原因均制约着 RPP-PWM 的应用前景。

2.3 基于开关频率的 RPWM 技术

相较于上文所述的随机脉冲位置 PWM 技术,另一种以开关频率作为随机参数的 PWM 技术具有更好的频谱分散效果,应用更为广泛,称为随机开关频率 PWM(RSF-PWM)。以常见的正弦调制为例,SPWM 技术中载波频率远高于变换器工频(调制波频率),因此在有限个载波周期内调制波可近似为恒定,如图 9(a)所示。

图 9 固定与随机载波频率的 PWM^[28]

固定载波频率的 PWM(FCF-PWM)中,其输出电压可展开成傅里叶级数形式^[28]:

$$u_o(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} [a_n \sin(n\omega_1 t) + b_n \cos(n\omega_1 t)] \quad (1)$$

式中: ω_1 为三角载波的固定角频率; u_o 为输出电压; n 为正整数倍次。

计算傅里叶系数 a_n 和 b_n :

$$\begin{cases} a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_o \cos(n\omega_1 t) d(\omega_1 t) \\ b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_o \sin(n\omega_1 t) d(\omega_1 t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_0 = 2a \\ a_n = \frac{4}{\pi} \cos\left[\frac{(a+1)n-1}{2}\pi\right] \\ b_n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

代入式(1)中的傅里叶展开式,化简可得:

$$u_o(t) = \frac{a_0}{2} - \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \left\{ \frac{4}{n\pi} \cos\left[\frac{(a+1)n-1}{2}\pi\right] \right\} \cos(n\omega_1 t) \right\} \quad (4)$$

将输出电压视为直流分量(第一项)与谐波含量(累加项)的叠加,设余弦分量对应的谐波系数为 $f(n)$,则式(4)可化简为

$$u_o(t) = \frac{a_0}{2} - \sum_{n=1}^{+\infty} f(n) \cos(n\omega_1 t) \quad (5)$$

余弦函数的单边傅里叶变换对是位于 $\omega = n\omega_1$ 处的冲激函数(n 为正整数,系数为 π),因此由式(5)可推导出:FCF-PWM 技术中输出电压谐波会集中出现在载波频率及其整数倍处。将载波频率随机化,谐波无法按照上述固定倍频叠加的规律集中,从而起到分散谐波频谱的作用,此即为 RSF-PWM 技术的基本原理。文献[37]对 RPP-PWM 与 RSF-PWM 进行了对比分析,求解出随机脉冲位置与随机开关频率的功率谱密度(PSD)的数学解析式,指出随机开关频率调制下输出电压不含离散频率谱,比随机位置的 PWM 技术效果更好。

基于载波的 RPWM 技术较为简便,研究起步较早。一种经典的采用模拟电路实现的 RPWM 技术通过随机选取并联电容数量以改变充电速度(即三角载波斜率)的方式实现整流电源电流谐波的分散化^[38]。然而由于模拟控制器抗干扰能力与运算速度较差,该技术已不适应如今电能变换装置的高速与高精度控制要求。SPWM 与 SVPWM 具有数学上的统一性^[39-40]。随着多电平技术的不断发展,基于随机开关频率的 SVPWM 算法也得到了更广泛的研究与应用。RSF-SVPWM 技术的核心在于每个随机宽度的周期内

按比例生成多段脉冲。以三电平为例说明其基本原理,如图 10 所示,图中 T_s 、 T_{s1}/T_{s2} 分别表示固定与变化的调制周期。

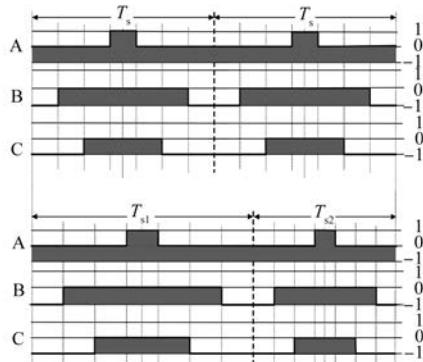


图 10 随机开关频率 SVPWM

文献[41]对 RPP 与 RSF 2 种随机 SVPWM 技术分别验证,认为随机位置 SVPWM 削弱噪声的能力有限,而随机开关频率能更有效地分散集中在开关频率及其整数倍次的谐波含量。RPWM 具有较强的通用性,除常见的逆变电路亦可用于整流拓扑中。将 RSF-SVPWM 应用在高频 Vienna 整流电路,在二阶滤波器的共同作用下可显著削弱输出电流的峰值噪声^[42]。

3 随机调制的优化研究与问题

RPWM 技术旨在获得分布更均匀的输出电压谐波频谱。多年来国内外研究人员从不同角度对此进行了深入探索。

一方面是随机数生成质量与分布规律对 RPWM 效果的影响。文献[43]列举并详细介绍了多种随机数生成算法,如移位法、乘积取中、迭代取中、无理数变换、斐波那契数列、组合随机数与线性同余等。在此类算法基础上,文献[44]提出一种基于 FPGA 生成高质量高斯分布随机数的高速算法;文献[45]基于二极管整流-Boost 级联 DC-DC 拓扑建立一种八位线性移位寄存器作为随机数生成模型,验证了 RSF-PWM 在谐波频谱分散方面的卓越性能。

文献[46]指出了根据开关损耗与机电系统振动情况设计随机开关频率上下限的取值依据。文献[47]针对服从不同分布的随机函数进行了 PWM 效果研究,提出了一种基于相对偏差的统计

方法,从统计学角度证明了在同一均值与偏差情况下,改变随机数服从的分布律对谐波功率噪声峰值影响不大,仅在特定次谐波处的幅值有些许差异。以图 11 所示的仿真结果为例。其中随机调制周期分别受高斯分布与均匀分布的随机序列控制,均值为 0,方差为 $1/3$,仿真采样频率为 10^7 Hz。进一步地,文献[48]从数学上证明了特定次谐波峰值的分散程度仅受中心频率与随机序列方差控制。在保证随机数组均值与方差一致时,高斯分布序列数值范围明显高于均匀分布,因此实际应用中,特别是中低开关频率工况下采用均匀分布序列更为便捷合理。需要注意的是,文献[28]已经指出:随机序列本身不满足 Dirichlet 条件中的绝对可积要求,不能直接求解随机序列本身的频谱分布,因此往往需要通过 Wiener-Khinchin 定理构建自相关函数以求解随机函数与输出谐波频谱的联系。

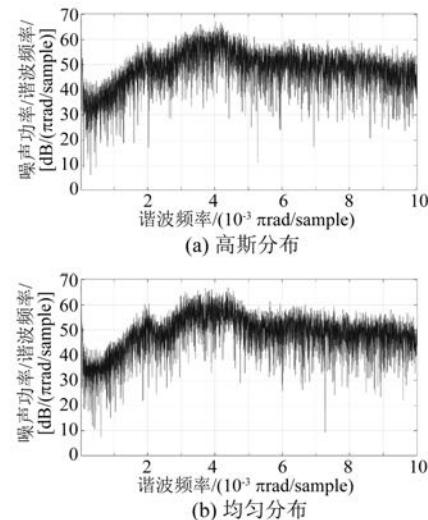


图 11 不同随机参数分布律下 NPC 三电平拓扑 RSF-SVPWM 相电压 PSD

一些研究人员注意到 Markov 链的无后效性,即下一状态仅由当前状态决定^[49],如图 12 所示,其中 P_i 表示当前状态切换的概率。将 Markov 链引入随机数生成算法中可以显著提高随机数生成质量,如文献[50]在 Buck 变换器中采用双 Markov 链生成随机数,用 RPP 与 RSF 的双随机调制显著减小了输出电压脉动;文献[51]提出了一种双 Markov 链与伪随机二进制序列结合的双随机 PWM 算法,应用在六相逆变器驱动永磁同

步电机的牵引系统中。这一 RPWM 技术对逆变器输出电流的高频谐波噪声的抑制作用较为明显,但在较低频带的谐波分散效果欠佳,仍有优化改进的空间。

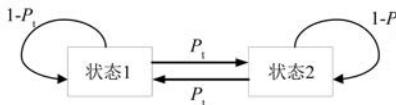


图 12 Markov 链基本原理^[49]

另一方面,具有更好谐波分散效果的优化 RPWM 算法也不断被提出。RPWM 技术的提出者 Trzynadlowski 等^[52]于 2010 年介绍了 GE 公司研发的一种具有工程意义的车载 RSF-PWM 技术,比较了固定采样频率与变采样频率对输出电流噪声与转矩脉动的影响,并指出随机开关频率与固定采样频率结合,具有更好的电磁噪声抑制效果。基于 RPP 或 RSF 组合的双随机调制应用研究愈发深入:基于随机零矢量宽度与脉冲延时的双随机调制算法可用于异步电机驱动并起到减振降噪作用^[53]。文献[54]基于 Boost 变换器提出一种双随机脉冲位置的 PWM 技术,认为不同开关频率对应的最优采样频率不同,但这一技术的有效性缺乏定量描述,且双脉冲位移应用在多电平拓扑中计算量过大,少有研究验证其可行性。双随机 SVPWM 技术亦可用于模糊 PI 控制的静止无功发生器(SVG)调制,从而优化并网电流的波形,试验结果证明双随机调制策略可以大幅削减 SVG 输出电压电流的谐波幅值^[55]。但双随机变量使算法的时间复杂度明显增加,实现高速控制相对成本较高^[56]。

业界对 RPWM 技术研究逐渐深入,一些问题同时开始显现。

RPWM 技术作为一种优化调制算法具有较广泛的通用性,但包含 RPWM 的综合性应用研究当前少有提及。目前研究人员对 RPWM 的优化研究仍然基于谐波频谱分散化这一单一目的,如上文提及的 RPP、RSF 的双随机、双脉冲位移技术以及针对随机数生成质量的优化,均以输出电压或电流波形作为算法是否可行的衡量标准,但往往忽略由其他因素产生的谐波对系统安全稳定运行的影响。随机思想具有相当程度的通用性,理论上 RPWM 可以与其他优化算法相结合,从多个

角度实现对电能质量的优化。

另外,RPWM 技术可显著削弱输出谐波在载波频率及其整数倍的含量,但同时谐波能量会分散至较宽频带内。目前尚无对固定与随机调制下系统电磁干扰(EMI)的对比分析,无法定量判断 RPWM 对系统电磁环境的影响。同时,由于随机调制使谐波频谱呈现更均匀的分布,对滤波器效果会产生一定削弱。在 PWM 变换器中开关频率远大于工频,实际产生的谐波次数相对基波较高,通常增加 LC 环节作为低通滤波器实现对高次谐波的消除。而 RPWM 技术会将集中于开关频率及其整数倍次的谐波分摊至整个频带,势必会产生一部分位于导通频带内的低次谐波,从而增大滤波后电压的 THD。

4 结语

RPWM 相较于传统 PWM 技术可以有效分散谐波频谱,降低谐波整体幅值,并弱化噪声频谱特征的效果。从随机参数的角度,常见的随机调制技术可通过随机开关位置与随机开关频率来实现,一般认为随机开关频率的方式具有更好的随机效果。同时随着多电平技术的广泛应用,结合随机算法的多电平空间矢量调制正得到业界越来越高的重视。

当下高速数字处理芯片的性能不断提升,生成随机序列的可靠性不断提高,某些高性能但相对复杂的 RPWM 算法的可行性亦不断增加。业界对随机调制的基础理论研究也日趋深入,设计随机序列的概率统计参数控制特定次谐波幅值及功率的削弱已成为可能。另一方面,针对随机调制本身的新的技术路线研究亦在进行中,并有着向更高电平、更多类型拓扑及更广应用场合发展的趋势。

目前针对 RPWM 技术的研究仍有一些问题亟待解决,主要包括:

(1) 随机调制目前往往只作为一种独立的谐波处理方式应用,而作为基本 PWM 的改进技术,其具有较强的通用性,适用于各类电力变换装置,理论上也可与其他调制和控制算法结合应用。目前针对 RPWM 的综合应用研究仍然较少。

(2) RPWM 技术的固有缺陷在于随着谐波频谱的分散化,对机电系统整体 EMI 的影响。对

此尚未有定量分析,无法准确评估算法与电磁兼容性能的相关性,且具有特定导通带宽的滤波装置效果会有所下降,因此在对 THD 等电能质量参数敏感的高精度电子电路中,应重新考虑滤波环节的设计以增大阻塞频带,保证最终输出谐波含量的稳定。

【参考文献】

- [1] 许杭蓬,陈权,李国丽,等. 基于改进 SVPWM 的三电平 NPC 逆变器中点电压平衡的研究[J]. 现代电子技术,2019,42(4): 129.
- [2] FAN S, YU Y, ZHANG Y, et al. Multi-mode synchronized PWM schemes for three-level NPC Inverter[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems, 2019.
- [3] 徐帅,张建忠. 多电平电压源型逆变器的容错技术综述[J]. 电工技术学报,2015,30(21): 39.
- [4] XU J, NIE Z, ZHU J. Characterization and selection of probability statistical parameters in random slope PWM based on uniform distribution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36 (1): 1184.
- [5] 王庆义. 交流变频驱动系统关键技术及应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [6] LIANG W, WANG J, LUK C K, et al. Analytical modeling of current harmonic components in PMSM drive with voltage-source inverter by SVPWM technique [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(3): 673.
- [7] 崔恒斌,冯晓云,林轩,等. 牵引网与交直交列车耦合系统谐波谐振特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16): 2736.
- [8] 宋依桐,胡海涛,肖冬华,等. 牵引供电系统注入式谐波阻抗测量的扰动限值选定方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15): 4770.
- [9] 范啸平. 现代电力推进船舶电网谐波分析及抑制方法研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [10] ZHU J, SUN X, NIE Z, et al. Synchronous control strategy of dual five-level converters based on the improved SVPWM[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(14): 2311.
- [11] SIVARANI T S, JOSEPH J S, AGEES K C. Intensive random carrier pulse width modulation for induction motor drives based on hopping between discrete carrier frequencies [J]. IET Power Electronics, 2016, 9(3): 417.
- [12] LIM Y C, JUNG Y G, OH S Y, et al. A two-phase separately randomized pulse position PWM (SRP-PWM) scheme with low switching noise characteristics over the entire modulation index[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (1): 362.
- [13] 何昌见,孟秀云. 基于极化不变量的谐波雷达导引头目标识别算法[J]. 北京理工大学学报,2017,37 (6): 607.
- [14] 史广智,胡均川. 基于舰船噪声仿真模型的目标识别研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(5): 1398.
- [15] LIAW C M, LIN Y M. Random slope PWM inverter using existing system background noise: analysis, design and implementation [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2000, 147(1): 45.
- [16] 林城美,汪光森,王公宝,等. 二极管钳位型级联多电平逆变器新型 SPWM 研究[J]. 电机与控制学报,2016,53(13): 37.
- [17] 刘阳,杜少武,黄海宏,等. 基于载波移相的级联多电平并网逆变器研究[J]. 电力电子技术,2012,46 (5): 39.
- [18] 陈坚,康勇. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2011.
- [19] NABAE A, TAKAHASHI I, AKAGI H. A new neutral-point-clamped PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1981, 17(5): 518.
- [20] 陈晓鸥. 基于 60°坐标系下三电平逆变器 SVPWM 控制策略研究[D]. 太原:太原理工大学,2017.
- [21] 苟斌,冯晓云. 60°坐标系下三电平逆变器 SVPWM 的实现[J]. 电力电子技术,2011,45(5): 65.
- [22] 孙鹤旭,荆锴,董砚,等. 基于 120°坐标系的 SVPWM 算法研究[J]. 电工技术学报,2016,31 (5): 52.
- [23] 余彬,宋文胜,冯加旭,等. 基于虚拟电压矢量的五相电压源逆变器空间矢量调制算法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1): 212.
- [24] 林城美,王公宝,汪光森,等. 基于脉冲跳变的空间矢量脉冲宽度调制策略[J]. 电机与控制学报,2016,20(1): 43.
- [25] TRZYNADLOWSKI A M, LEGOWSKI S, KIRLIN R L. Random pulse-width modulation technique for voltage-controlled power inverters [J]. IEEE International Journal of Electronics, 1990, 68 (6): 1027.

- [26] TANAKA T, KAMEDA H, NINOMIYA T. Noise analysis of DC-to-DC converter with random-switching control [C] // 13th International Telecommunications Energy Conference, 1991.
- [27] PINDORIYA R M, RAJPUROHIT B S, KUMAR R. A novel application of harmonics spread spectrum technique for acoustic noise and vibration reduction of PMSM drive [J]. IEEE Access, 2020(8) : 103273.
- [28] 许杰, 聂子玲, 朱俊杰, 等. 随机脉宽调制技术的再认识 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(6) : 45.
- [29] KIRLIN R L, KWOK S, LEGOWSKI S, et al. Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(5) : 463.
- [30] HASEGAWA Y, TOMITA K, ISHIHARA S, et al. Single-inductor-dual-output wireless power receiver with synchronous pseudo-random-sequence PWM switched rectifiers [C] // IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, 2013.
- [31] 王庆义, 邓歆, 刘洋, 等. 一种零矢量-变延时随机 PWM 方法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(12) : 132.
- [32] THOGERSEN P, PEDERSEN J K. Stator flux oriented asynchronous vector modulation for AC-drives [C] // 21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists, 2002.
- [33] BECH M M, BLAABJERG F, PEDERSEN J K. Random modulation techniques with fixed switching frequency for three-phase power converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4) : 753.
- [34] 王建民, 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.
- [35] 范必双, 谭冠政, 樊绍胜. 三电平矢量控制变频器随机 SVPWM 技术 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(4) : 6.
- [36] 王颢雄, 马伟明, 肖飞, 等. 随机 SVPWM 技术在背靠背变流系统中的研究与应用 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(12) : 92.
- [37] 王颢雄, 王斌, 周丹, 等. 两种随机 PWM 调制技术的比较研究 [J]. 电气传动, 2006, 36(11) : 23.
- [38] MIHALIC F, MILANOVIC M. Power density spectrum estimation of the random controlled PWM single-phase boost rectifier [C] // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999.
- [39] 陈娟, 何英杰, 王新宇, 等. 三电平空间矢量与载波调制策略统一理论的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 33(9) : 71.
- [40] 李洪亮, 姜建国, 乔树通. 三电平 SVPWM 与 SPWM 本质联系及对输出电压谐波的分析 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12) : 130.
- [41] 胡仙. 随机 SVPWM 的算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [42] JIANG D, LAI R, WANG F, et al. Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12) : 3823.
- [43] 何玮. 基于随机信号的 PWM 技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [44] LI Y, ZHANG M. A FPGA based parallel multivariate gaussian random number generation framework [C] // 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 2019.
- [45] KABOLI S, MAHDAVI J, AGAH A. Application of random PWM technique for reducing the conducted electromagnetic emissions in active filters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4) : 2333.
- [46] 马丰民, 吴正国, 李玉梅. 随机频率 PWM 逆变器的分析设计 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15) : 67.
- [47] DRISSI K E K, LUK P C K, WANG B, et al. Effects of symmetric distribution laws on spectral power density in randomized PWM [J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 1(2) : 41.
- [48] XU J, NIE Z, ZHU J, et al. Random carrier modulation technique for dispersing harmonics [C] // IEEE International Congress on Image & Signal Processing, 2016.
- [49] 史海熙. 基于 Markov 链的三电平逆变器随机 SVPWM 控制策略研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [50] 王斌, 李兴源, 王颢雄, 等. 基于马尔可夫链的双随机 PWM 技术研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(6) : 16.
- [51] LIU J, ZHAO B, WANG X W, et al. Noise suppression technology for DTP-PMSM based on dual random modulation strategy [C] // 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.

(下转第 23 页)