

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.023

# 基于双分频带的新型随机开关频率 SVPWM 策略

刘琦<sup>1</sup>, 朱劲松<sup>2</sup>, 陈文明<sup>1</sup>, 卜飞飞<sup>1</sup>, 秦海鸿<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106;

2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:**传统固定开关频率空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)技术导致的高次谐波使得电驱动系统电磁干扰问题较为严重,随机开关频率(random switching frequency, RSF)-SVPWM 可用于改善此类现象。文中阐述了 SVPWM 技术与 RSF-SVPWM 技术的原理,探讨了 RSF-SVPWM 策略中扩频范围增大对系统的影响。为在扩频范围较小时仍能达到很好的高次谐波分散效果,提出一种基于双分频带的新型 RSF-SVPWM 策略。该策略以原中心开关频率为 midpoint 划分 2 个局部分频带,设置各自的局部中心频率点与扩频范围;以两相静止坐标系下理想  $\beta$  轴电压分量正负为标准,判断每一开关周期所属具体分频带后,使得开关频率围绕该分频带中的局部中心频率点进行各自的随机化。仿真与实验结果表明,该新型 RSF-SVPWM 策略相比于较大扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略,高次谐波分散效果相当,同时可降低系统电流环脉动,使得输出电磁转矩较为平稳,有助于推进电驱动系统在高端行业领域中的应用。

**关键词:**空间矢量脉宽调制(SVPWM);高次谐波;电磁兼容;输出转矩;随机调制;分频带;随机开关频率空间矢量脉宽调制(RSF-SVPWM)

中图分类号:TM724

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)03-0206-11

## 0 引言

新能源汽车、高速列车和多电飞机等现代交通工具的发展水平是一个国家科技水平和综合国力的重要体现。动力电气化是现代交通工具的重要发展方向,各国都非常重视并致力于动力电气化研发工作<sup>[1-2]</sup>。作为电气系统的核心组成部分,先进电机驱动系统的研究对于加速我国交通电气化发展具有重要意义和价值。

驱动调制技术是电机驱动系统的关键环节之一。在众多调制技术中,空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)具有计算过程简单直观、线性调制范围宽和便于数字化实现等优点,在电机驱动系统中得到了广泛应用<sup>[3-4]</sup>。

近年来,随着新能源汽车、航空航天、船舶推进等领域的快速发展,各种先进电气设备已被大量使用,传统 SVPWM 带来的缺陷突显。特别是电磁兼容性能(electromagnetic compatibility, EMC)已成为电气化交通领域的一个重要考察指标,而在采用传统 SVPWM 时,输出电压会在特定频率处产生大量高次谐波,影响系统 EMC<sup>[5-7]</sup>,因此传统 SVPWM 导致的问题亟待解决。

随机 SVPWM 技术对开关信号周期、脉冲位置等参数进行随机化处理,能在不改变系统拓扑、不

收稿日期:2022-10-12;修回日期:2022-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177050)

增加硬件成本的条件下,实现高次谐波在较宽频率范围内的良好分散,从而有效减少电磁干扰。因此,近年来随机 SVPWM 技术受到了广泛关注和深入研究<sup>[8-15]</sup>。

根据随机化对象的不同,随机调制技术可分为随机脉冲位置调制与随机开关频率(random switching frequency, RSF)调制 2 种。其中随机脉冲位置调制技术在每个开关周期内随机改变驱动信号的脉冲位置进行调制,但该方法在调制比和开关频率较高的情况下高次谐波分散效果不佳<sup>[9]</sup>;而 RSF 调制技术在对每个周期的开关频率进行直接随机化处理,因其良好的谐波分散效果而得到了更为广泛的研究。文献[10]随机选择 2 个不同的开关频率进行调制,并对所有可能的开关频率序列进行分类来有效地优化载波序列,从而达到最优谐波分散效果。

目前,关于 RSF 调制技术的研究多是在较大扩频范围内进行的,但在实际应用中,电机驱动系统的软硬件局限性会在一定程度上限制开关频率变化范围,进而导致随机调制产生的高次谐波分散效果不佳,应用场合也相应受限<sup>[16-20]</sup>;同时,过大的开关频率变化范围也会对系统综合性能产生影响,而关于上述问题的研究目前尚未展开。因此如何在较窄的扩频范围内(如 $\pm 10\%$ 的平均扩频范围)实现高次谐波的更有效分散,更具有理论意义和应用价值,这也是文中研究的重点。

文中提出一种基于双频带的 RSF-SVPWM 策略。将一个完整的扩频范围划成 2 个局部分频带,分别在 2 个独立的分频带范围内各自进行开关频率的随机化处理,进一步分散传统随机调制策略中因扩频范围较小而仍然聚集的高次谐波,达到改善电磁干扰的目的,同时保证对系统其他性能的负面影响较小。文中介绍了传统 SVPWM 高次谐波分布特点;研究了 RSF-SVPWM 策略因扩频范围变化对永磁同步电机(permanent magnet synchronous machine, PMSM)驱动系统性能产生的影响;详细分析了新型 RSF-SVPWM 策略的核心思想、基本原理和实现过程;最后通过仿真和实验验证了该理论的正确性和有效性。

## 1 RSF-SVPWM 技术

SVPWM 技术通过调制逆变器功率器件的不同开关顺序,形成特定脉宽驱动负载电机<sup>[21]</sup>。三相电机逆变器驱动系统的拓扑如图 1 所示。

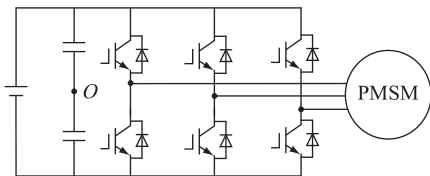


图 1 三相交流电机逆变器驱动系统拓扑  
Fig.1 Topology of three-phase AC motor inverter drive system

三相功率器件的 8 种开关状态形成 8 个基本电压空间矢量(其中  $U_0$  与  $U_7$  的幅值为 0),将空间分为 6 个扇区,如图 2 所示。SVPWM 技术的核心思想是利用 8 个基本电压矢量合成最终的参考电压矢量  $U_{ref}$ 。

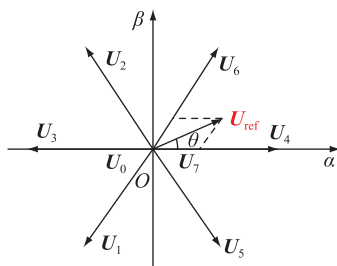


图 2 三相逆变器基本电压空间矢量分布  
Fig.2 Basic voltage space vector distribution of three-phase inverter

对于固定开关频率的 SVPWM,通过已有的文献分析可知,其电压电流的谐波频谱呈离散化分布,可利用双重傅里叶级数解析的方法进行理论证明<sup>[22]</sup>。双重傅里叶级数分析法作为一种频谱分析的传统方法,可以将输出脉冲的频谱特点精确量

化,最终得到开关频率处高次谐波所形成的包络线,如图 3 所示。图中  $f_s$  为总体开关频率均值; $f_0$  为基波频率。

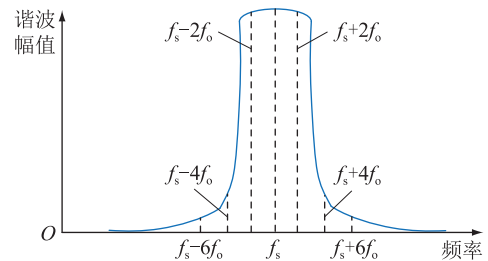


图 3 开关频率处高次谐波幅值包络线  
Fig.3 High order harmonic amplitude envelope at switching frequency

在固定开关频率 SVPWM 下,输出线电压的高次谐波幅值较高,且呈现窄频带的离散分布特点。这种谐波分布特性使得系统产生高频电磁干扰以及电磁噪声,从而对电机运行产生不良影响。

在所有随机 SVPWM 策略中,RSF-SVPWM 直接改变系统的开关频率,是目前随机调制技术中效果较好、应用较为广泛的一种调制方式<sup>[23-26]</sup>。图 4 为 RSF-SVPWM 示意,以 a 相调制为例。其中,随机处理前  $T_s$  代表固定不变的开关周期,随机处理后开关周期发生变化,变为  $T_{s1}$ 、 $T_{s2}$ 、 $T_{s3}$ 、 $T_{s4}$ ,开关频率  $f_r$  的表达式如式(11)所示。

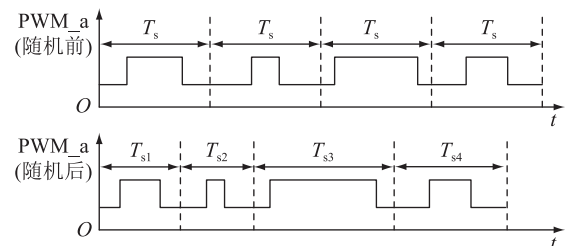


图 4 RSF-SVPWM 示意  
Fig.4 Schematic diagram of RSF-SVPWM

$$f_r = f_s + R_i \Delta f \quad (1)$$

式中:  $R_i$  为  $[-1, 1]$  内的随机数;  $\Delta f$  为开关频率变化范围。

由式(1)可知,最终开关频率分布在区间  $[f_s - \Delta f, f_s + \Delta f]$  内,原先集中在开关频率处的高次谐波也会相应地分散到这一区间内,理论上范围越宽,原本集中的窄带高频谐波会越均匀连续。但在实际电机驱动系统中,变化范围受到很多条件限制,如功率器件开关频率上限影响、开关损耗以及控制器参数调节难度等,一味增大开关频率范围会使系统产生额外损耗,导致系统效率下降以及控制器调节困难等问题<sup>[27]</sup>。

## 2 RSF-SVPWM 策略对 PMSM 伺服驱动系统性能影响

对于固定开关频率 SVPWM 而言,采样动作发生在每个开关周期的中间点,以保证基波电流的精确性。此处对电流采样的分析不考虑 PMSM 非线性情况,如死区时间、饱和度等问题的发生。而 RSF-SVPWM 策略中开关频率一直处于随机变化的状态,便不能保证采样动作发生在每个开关周期的中点,导致了采样误差的产生。

PMSM 伺服驱动系统中,采样对象为定子三相电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ,因此误差首先发生在此处。

式(2)为 Clark 变换矩阵,其中系数  $K=2/3$  时,代表等幅值变换;当系数  $K=\sqrt{2/3}$  时,代表等功率变换。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

abc 坐标系下电流  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  经过 Clark 变换得到的  $\alpha\beta$  坐标系下电流分量  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  也会产生误差。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为  $d$  轴与  $\alpha$  轴之间的夹角。经式(3)所示 Park 变换后,  $i_d$ 、 $i_q$  出现误差。

磁场定向控制(field-oriented control, FOC)算法的核心是对解耦后  $dq$  坐标系下的电流  $i_d$ 、 $i_q$  进行控制,而  $i_d$ 、 $i_q$  可通过电压分量  $U_d$ 、 $U_q$  进行控制。

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega_r \psi_q \\ U_q = R_s i_q + p\psi_q - \omega_r \psi_d \end{cases} \quad (4)$$

其中定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_q = L_q i_q \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_f \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $R_s$  为定子电阻;  $p$  为转子磁对极;  $\psi_d$  为直轴磁链;  $\psi_q$  为交轴磁链;  $\omega_r$  为电角速度;  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $L_d$  为直轴电感;  $L_q$  为交轴电感。

由式(4)、式(5)可知,  $U_d$ 、 $U_q$  因  $i_d$ 、 $i_q$  的误差而产生畸变。

将  $U_d$ 、 $U_q$  进行反 Park 变换,便得到 SVPWM 模块的输入  $U_\alpha$ 、 $U_\beta$ ,其中  $\theta_r$  为转子角度。

$$\begin{cases} U_\alpha = U_d \cos \theta_r - U_q \sin \theta_r \\ U_\beta = U_d \sin \theta_r + U_q \cos \theta_r \end{cases} \quad (6)$$

SVPWM 算法以  $U_\alpha$ 、 $U_\beta$  为合成目标,产生脉冲信号驱动逆变器控制 PMSM,输出  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ ;当  $U_\alpha$ 、 $U_\beta$  存在误差时,输出  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  偏离理想正弦波,而  $i_a$ 、

$i_b$ 、 $i_c$  又会作为下一开关周期的采样对象。在如此周而复始的闭环控制中,误差在每个开关周期内累积,扩大了实际量与理想值的差距,从而造成输出波形的畸变。

图 5 为固定开关频率 SVPWM 与传统 RSF-SVPWM 策略的电流采样对比。对于固定开关频率 SVPWM 策略,其三角载波频率保持 10 kHz 不变,而传统 RSF-SVPWM 策略的三角载波频率根据扩频范围发生相应变化,如当扩频范围为 [6, 14] kHz 时,三角载波频率也属于该区间。

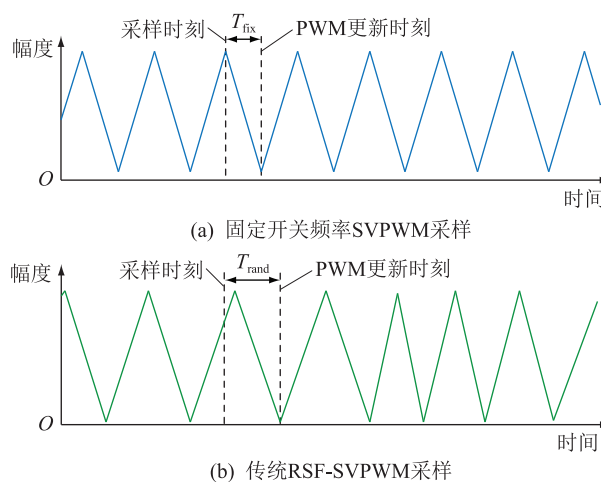


图 5 固定开关频率 SVPWM 与传统 RSF-SVPWM 电流采样对比

Fig.5 Comparison of current sampling between fixed switching frequency SVPWM and traditional RSF-SVPWM

在 PMSM 伺服驱动系统这一类数字控制单元中,其数据更新方式是离散化而非连续性的,导致系统中的数据需要一定的时间才能完成运算。所以对定子三相电流进行采样后,须再经过一段延迟时间方可更新 PWM 比较寄存器的值。定义固定开关频率 SVPWM 策略中电流采样点距下一周期 PWM 更新点的时间为  $T_{fix}$ ,如图 5(a)所示;当传统 RSF-SVPWM 策略的采样频率保持不变时,其采样点与固定开关频率 SVPWM 策略一致,距下一周期 PWM 更新点的时间定义为  $T_{rand}$ ,如图 5(b)所示(在某些采样点处,此值较  $T_{fix}$  变大,则电流采样准确性下降,产生误差累积的现象,导致实际输出波形严重偏离理想轨迹)。

## 3 新型 RSF-SVPWM 策略

Parseval 定理指出,若谐波在时域内能量固定不变,那么其频域中的能量也不会产生变化。因此随着谐波包络线的分解,其峰值一定会得到降低。为了确保开关频率变化时系统电流采样环节的高

精确性,使电机输出电流高次谐波在扩频较小的情况下能被更好地分散,进一步降低谐波峰值,可将原先完整频带进行再分解。高次谐波分散效果会随着分频带数量的增加而得到改善,理论上可以采用更多的分频带,但这会造成算法复杂度上升,系统计算量也会随之增大。文中提出一种基于双分频带的新型 RSF-SVPWM 算法。图 6 为采用该方法后开关频率附近的高次谐波分布。

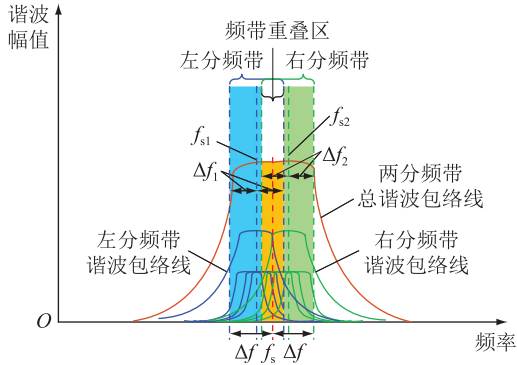


图 6 基于双分频带的 RSF-SVPWM 作用时高次谐波分布

Fig.6 High-order harmonic distribution for RSF-SVPWM based on dual-segregate-frequency-band

由图 6 可知,该新型 RSF-SVPWM 策略将一个完整扩频范围分成 2 个对称分频带,并在其中设置 2 个局部中心点,分别用  $f_{s1}$  和  $f_{s2}$  代表这 2 个局部中心点的开关频率,  $\Delta f_1$  和  $\Delta f_2$  代表 2 个中心点处的开关频率变化值。  $[f_{s1} - \Delta f_1, f_{s1} + \Delta f_1]$  与  $[f_{s2} - \Delta f_2, f_{s2} + \Delta f_2]$  为围绕 2 个新中心点形成的局部分频带区间。判断每个开关周期所在具体分频带的标准为两相静止坐标系下理想  $\beta$  轴分量  $U_\beta$  的值。理想  $U_\beta$  为标准正弦波,当  $U_\beta \geq 0$  时,开关频率以  $f_{s1}$  为变化中心;当  $U_\beta < 0$  时,开关频率以  $f_{s2}$  为变化中心。

图 6 中的开关频率不在  $[f_s - \Delta f, f_s + \Delta f]$  这一连续区间中随机变化,而属于  $[f_{s1} - \Delta f_1, f_{s1} + \Delta f_1]$  和  $[f_{s2} - \Delta f_2, f_{s2} + \Delta f_2]$  这 2 个局部分频带。因此,最初的总高次谐波包络线中心由  $f_s$  处转换至现在的  $f_{s1}$  和  $f_{s2}$  处。由 Parseval 定理可以推知,高次谐波峰值点得到了分散,幅值因此被降低。同样地,对于原先在 2 倍开关频率附近聚集的高次谐波,也会因为双分频带的划分而得到分散。

图 7 为新型 RSF-SVPWM 关键参数选取示意。引入 2 个变量,即中心偏置频率  $\Delta f_b$  和随机频率  $\Delta f_r$ ,以阐述该新型 RSF-SVPWM 策略的原理。

式(7)与式(8)的中心偏置频率代表现有局部中心点  $f_{s1}$  和  $f_{s2}$  偏离全局中心点  $f_s$  的程度。

$$\Delta f_{b1} = f_s - f_{s1} \quad (7)$$

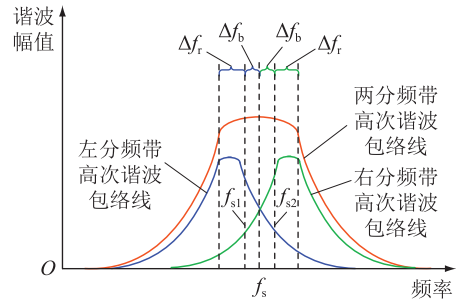


图 7 新型 RSF-SVPWM 关键参数选取示意  
Fig.7 Schematic diagram of key parameters in novel RSF-SVPWM

$$\Delta f_{b2} = f_s - f_{s2} \quad (8)$$

为了确保 2 个局部分频带内谐波分布的对称性,2 个中心偏置频率应满足:

$$\Delta f_{b1} = -\Delta f_{b2} = \Delta f_b \quad (9)$$

式(9)说明局部中心点  $f_{s1}$  和  $f_{s2}$  在  $f_s$  左右两边保持对称。

以左边中心点  $f_{s1}$  为例,随机频率等于每个局部分频带上、下限频率差值的一半:

$$\Delta f_r = \Delta f_1 \quad (10)$$

在传统 RSF-SVPWM 中,  $\Delta f_b = 0$ ,  $\Delta f_r = \Delta f$ 。

同时,为了保证开关损耗及总体开关频率变化范围不变,  $\Delta f_b$  和  $\Delta f_r$  还应满足:

$$\Delta f = \Delta f_b + \Delta f_r \quad (11)$$

经过式(7)一式(11)转换,大大简化了推导参数的过程。

在图 7 中,左边局部分频带产生的高次谐波包络线为蓝线,中心频率满足:

$$f_{s1} = f_s - \Delta f_b \quad (12)$$

因此,  $[f_s - \Delta f_b - \Delta f_r, f_s - \Delta f_b + \Delta f_r]$  为左边局部分频带。右边局部分频带产生的高次谐波包络线为绿线,中心开关频率满足:

$$f_{s2} = f_s + \Delta f_b \quad (13)$$

因此,  $[f_s + \Delta f_b - \Delta f_r, f_s + \Delta f_b + \Delta f_r]$  为右边局部分频带。开关频率分别在这 2 个范围内变化,同时保证全局中心开关频率与变化范围不变。

因为全局扩频范围固定,所以由式(11)可以推断出如果中心偏置频率增大,随机频率就会相应降低,导致谐波分散程度较低;当随机频率增大时,中心偏置频率相应减少,所以在全局中心开关频率附近仍会存在较多的谐波,导致其峰值较高。因此,为了降低原先全局中心开关频率附近的高次谐波峰值,应合理配置  $\Delta f_b$  和  $\Delta f_r$ 。

在传统 RSF-SVPWM 作用时,幅值较高的部分高次电压、电流谐波主要分布在  $f_s \pm 2f_0$  范围内,因此

为降低高次谐波之间的不良影响,中心偏置频率应大于  $2f_0$ 。

同时,在开关频率得到随机化后,2个局部分频带内的高次谐波都得以分散。为减少2个局部分频带中高次谐波之间的影响,应保证:

$$4f_b > \Delta f_r = \Delta f - \Delta f_b \quad (14)$$

即:

$$\Delta f_b > \Delta f/5 \quad (15)$$

中心偏置频率过大会导致每个分频带的随机频率过小,高次谐波分散程度受到限制,使得每个局部分频带的中心开关频率附近存在多个高次谐波尖峰。当采用传统 RSF-SVPWM 策略时,拥有较高峰值的高次谐波主要位于  $f_s \pm 4f_0$  范围内,即谐波的边频带宽度为  $8f_0$ ,所以为了防止在每个局部分频带的中心开关频率附近产生谐波尖峰,中心偏置频率应小于  $8f_0$ 。

同时,由于该新型随机调制策略设置了2个局部分频带使得开关频率在其中分别进行随机化,为获得优于传统 RSF-SVPWM 策略的随机化效果,这2个局部分频带内的开关频率变化值应大于传统 RSF-SVPWM 开关频率变化值的 1/2:

$$\Delta f_r > \Delta f/2 \quad (16)$$

即:

$$\Delta f_b < \Delta f/2 \quad (17)$$

综上,为实现更好的谐波分散效果,更大程度削弱原全局中心开关频率  $f_s$  处的谐波峰值,  $[\max\{2f_0, \Delta f/5\}, \min\{8f_0, \Delta f/2\}]$  为最终中心偏置频率的变化区间。

图8为新型 RSF-SVPWM 策略的实现流程,其开关频率的随机化是开环实现的。在整个 PMSM 矢量控制系统中,SVPWM 这一子模块的内部先根据分频带原理完成开关频率的随机化,后续进行常规 SVPWM 的实现步骤。控制系统中其他模块不产生变化。

#### 4 仿真分析

基于 Matlab/Simulink 平台,文中搭建了一套 PMSM 驱动系统模型对上述理论进行了仿真分析与验证。该仿真模型相关参数设置如下:PMSM 为 2 对极表贴式,直流母线电压为 24 V,额定转速为 3 000 r/min,额定转矩为 0.22 N·m,额定功率为 70 W,转子磁链为 0.014 28 Wb;设置平均开关频率为 10 kHz;设置新型 RSF-SVPWM 算法的中心偏置频率为 450 Hz,随机频率为 550 Hz。对不同扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略进行仿真分析,并

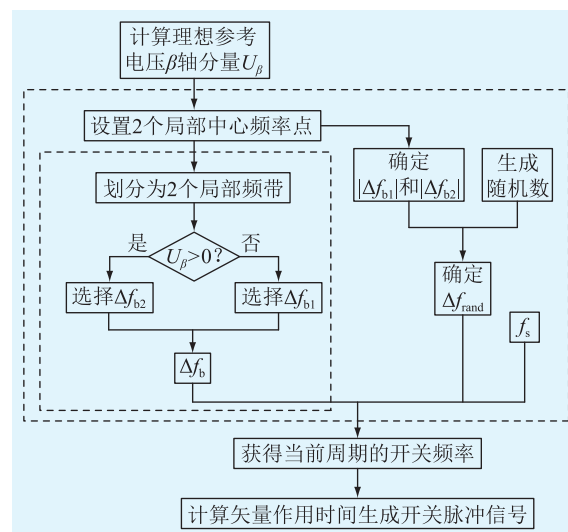


图8 新型 RSF-SVPWM 策略实现流程

Fig.8 Implementation flow chart of novel RSF-SVPWM

与新型 RSF-SVPWM 策略进行对比,观察高次谐波的分散效果、系统综合性能与扩频范围之间的关系。

图9为不同 RSF-SVPWM 策略作用时的输出电流、电压及其频谱分析比较(转速为 3 000 r/min,负载为 0.05 N·m)。由图9可知,在 PMSM 正常运行工况下,新型 RSF-SVPWM 策略能够达到与扩频范围  $\pm 40\%$  的传统策略相当的谐波分散效果;相比于扩频范围  $\pm 10\%$  的传统 RSF-SVPWM 策略,新型策略显著分散了开关频率及其倍频附近的电压和电流高次谐波,降低了原先较高的谐波峰值对 PMSM 伺服驱动系统带来的不良影响,保证了其稳定运行。

由仿真结果可知,文中所提新型 RSF-SVPWM 策略在扩频范围较小时仍拥有与扩频范围  $\pm 40\%$  的传统 RSF-SVPWM 策略相当的高次谐波分散效果。若该新型 RSF-SVPWM 策略作用时,电流环稳态性能及系统稳态输出性能与扩频范围  $\pm 10\%$  的传统策略产生效果几乎一致,而优于扩频范围  $\pm 40\%$  的传统策略,便可证明该新型策略的优越性。

PMSM 驱动系统运行在不同工况下时,几组电流环性能对比仿真结果如图 10、图 11 所示。由图 10、图 11 可知,因扩频范围较小,新型随机 SVPWM 策略对电流环稳态性能的影响较小,与同样为  $\pm 10\%$  扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略产生的影响几乎相当,引起的 dq 轴电流脉动相较于  $\pm 40\%$  扩频范围的传统策略降低了约 25%。可见该新型 RSF-SVPWM 策略因扩频范围较小而使其对电流环稳态性能的负面影响保持在较低的程度。

图 12 为不同扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略与新型策略的输出电磁转矩仿真结果对比。

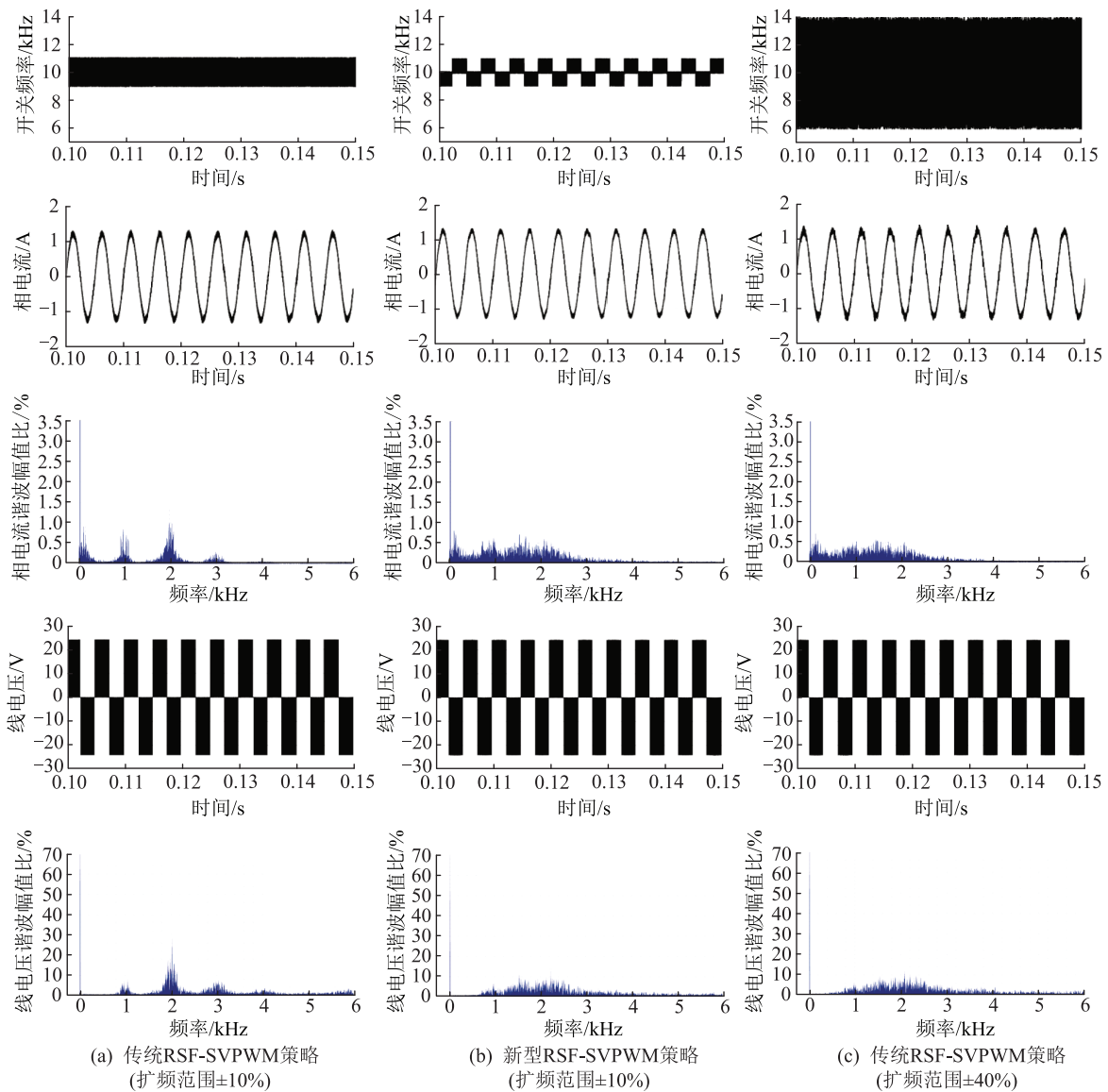


图9 不同 RSF-SVPWM 策略下输出电流与电压波形及其频谱分析(3 000 r/min,0.05 N·m 负载)

Fig.9 Waveforms and spectrum analysis of output current and voltage under different RSF-SVPWM strategies with 3 000 r/min,0.05 N·m

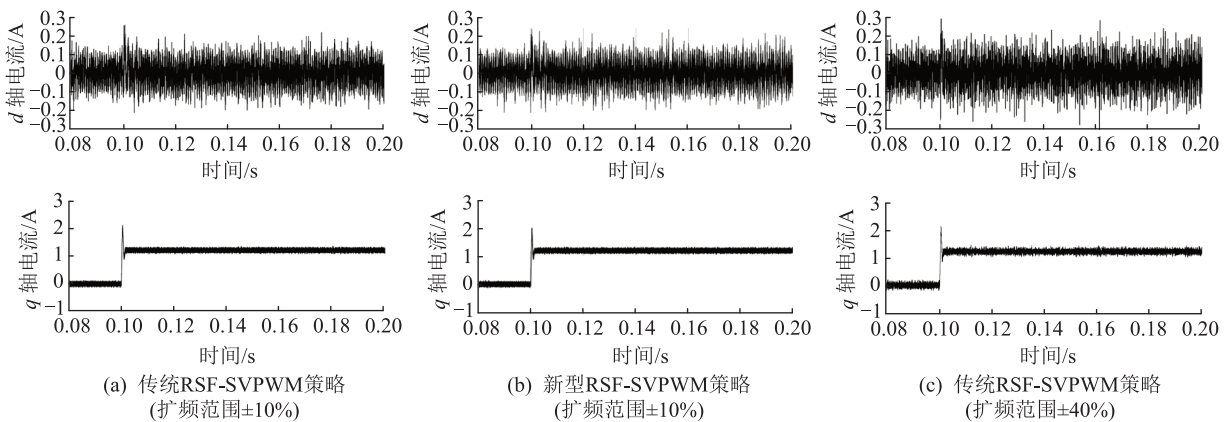


图10 不同 RSF-SVPWM 策略下 dq 轴电流(3 000 r/min,0.05 N·m 负载)

Fig.10 dq current under different RSF-SVPWM strategies with 3 000 r/min,0.05 N·m

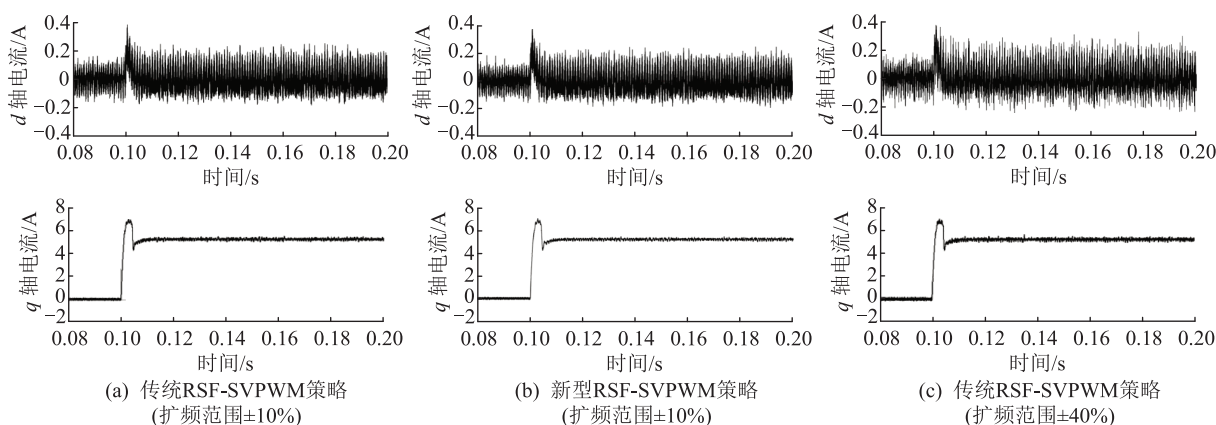


图11 不同 RSF-SVPWM 策略下 dq 轴电流 (3 000 r/min, 0.22 N·m 负载)

Fig.11 dq current under different RSF-SVPWM strategies with 3 000 r/min, 0.22 N·m

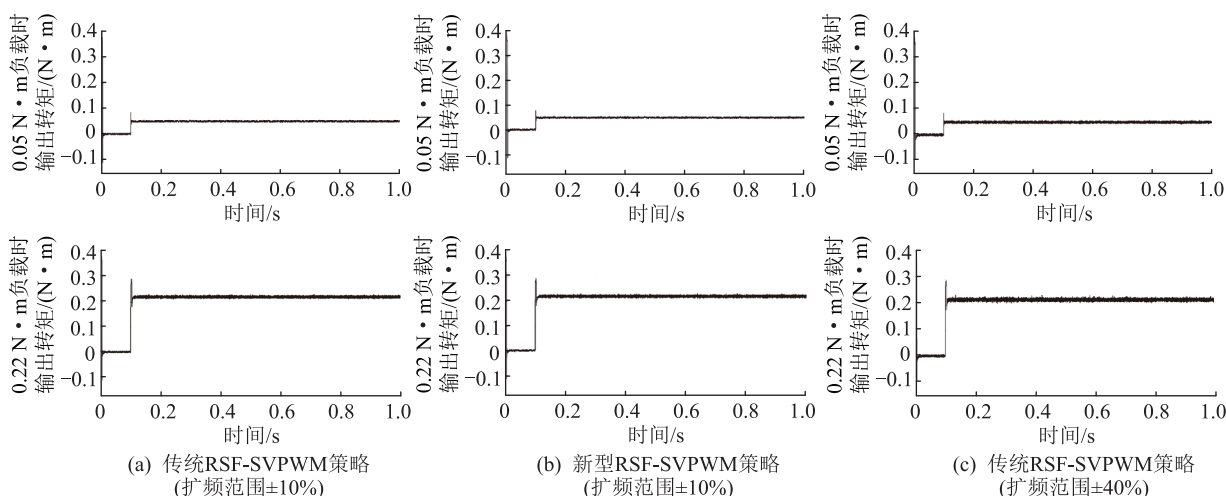


图12 不同负载下不同 RSF-SVPWM 策略作用时输出转矩 (3 000 r/min)

Fig.12 Output torques for different RSF-SVPWM strategies with 3 000 r/min and different loads

由图 12 可知,新型策略使得 PMSM 伺服驱动系统的稳态输出性能得到了提升,其引发的输出转矩脉动大小与  $\pm 10\%$  扩频范围的传统策略相当,相较于  $\pm 40\%$  扩频范围的传统策略降低了约 33%。

由图 9—图 12 可知,当扩频范围为较小的  $\pm 10\%$  时,所提基于双频带的新型 RSF-SVPWM 策略可达到与较大扩频范围传统策略相当的谐波分散效果,更大程度削弱高次谐波幅值;同时对 PMSM 伺服系统电流环及稳态输出性能的不利影响较小,与同样  $\pm 10\%$  扩频范围的传统策略影响相似。该策略提高了 PMSM 伺服驱动系统 EMC,且兼顾了系统其他方面的良好性能,具有一定的优越性。

### 5 实验验证

文中通过搭建的 PMSM 对拖实验平台对理论分析进行了验证,在传统矢量控制方法的基础上,只对其中的 SVPWM 模块进行更新以实现不同的

RSF-SVPWM 策略,计算量较小,易于实现。实验平台见图 13。

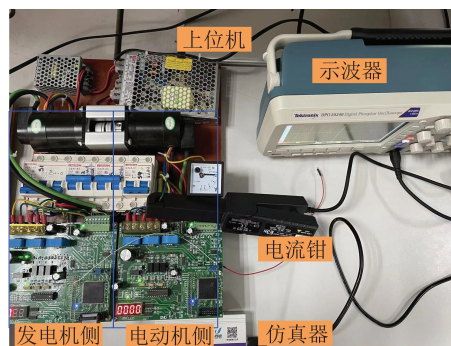


图 13 PMSM 对拖实验平台

Fig.13 PMSM back-to-back drive platform

电机的主要参数包括:额定电压为 24 V, 2 对极;额定功率为 70 W;转子磁链为 0.014 28 Wb;额定转矩为 0.22 N·m;额定速度为 3 000 r/min。设置电机转速为 3 000 r/min 与 900 r/min,负载为

0.05 N·m 与 0.22 N·m, 中心开关频率为 10 kHz, 新型 RSF-SVPWM 策略的扩频范围为  $\pm 10\%$ , 即 [9, 11] kHz, 中心偏置频率为 450 Hz, 随机频率为 550 Hz。

PMSM 驱动系统对拖平台运行在不同工况下时, 将新型 RSF-SVPWM 策略与不同扩频范围的传统策略进行对比实验, 输出定子相电流及其频谱分析波形如图 14、图 15 所示。

由图 14、图 15 可见, 新型 RSF-SVPWM 技术相比于同样  $\pm 10\%$  扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略, 高次谐波分散效果显著提升, 达到了与  $\pm 40\%$  扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略几乎相当的程度, 能够降低高次谐波峰值约 30%。开关频率及其倍频

附近的高次谐波幅值能够被更好地削减, 从而优化系统 EMC, 有利于 PMSM 伺服系统在高精尖领域的大规模应用。

2 种不同工况下各调制策略导致的输出转矩脉动情况如图 16 所示。由图 16 可知:

(1) 新型 RSF-SVPWM 策略作用时产生的输出转矩脉动与同样  $\pm 10\%$  扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略产生脉动情况十分接近, 明显小于  $\pm 40\%$  扩频范围的传统 RSF-SVPWM 策略。

(2) 负载相同的情况下, 电机高速运转产生的电磁转矩脉动比低速时产生的电磁转矩脉动大。

综上可知, 新型 RSF-SVPWM 策略既能减小对 PMSM 伺服驱动系统稳态输出性能与电流环稳态性

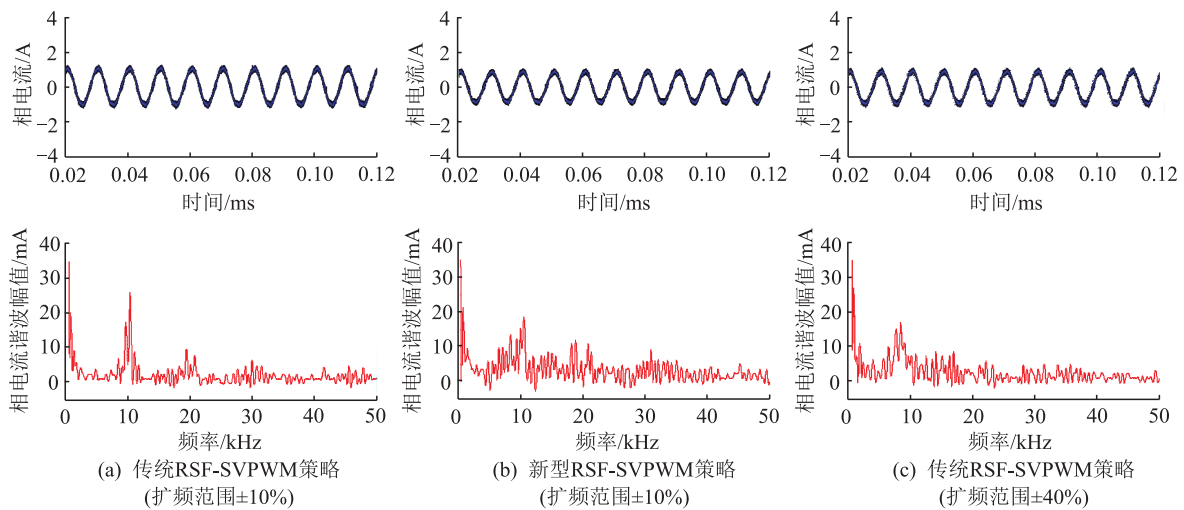


图 14 不同 RSF-SVPWM 策略下输出相电流及其频谱分析 (3 000 r/min, 0.05 N·m 负载)

Fig.14 Waveforms and spectrum analysis of output phase current under different RSF-SVPWM strategies with 3 000 r/min, 0.05 N·m

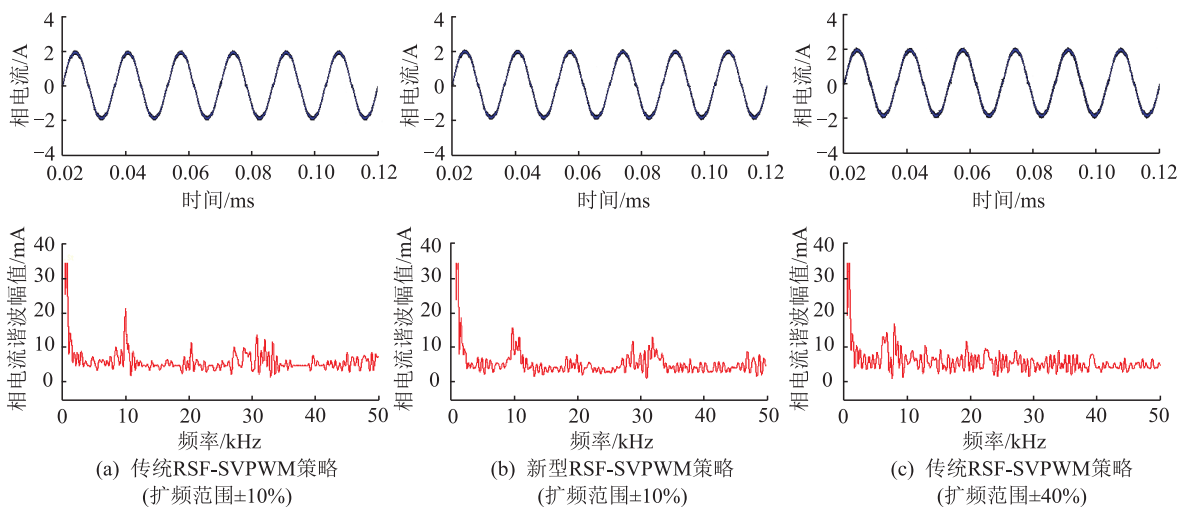


图 15 不同 RSF-SVPWM 策略下输出相电流及其频谱分析 (900 r/min, 0.22 N·m 负载)

Fig.15 Waveforms and spectrum analysis of output phase current under different RSF-SVPWM strategies with 900 r/min, 0.22 N·m



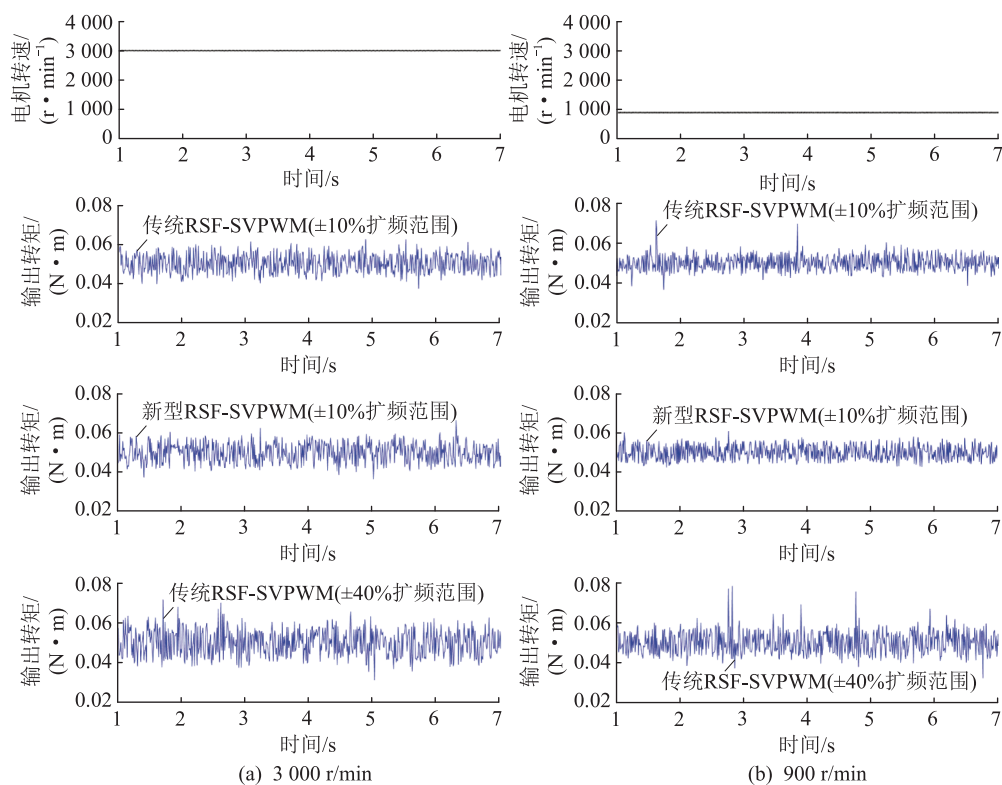


图16 不同 RSF-SVPWM 策略下输出转矩脉动情况 (不同转速, 0.05 N·m 负载)

Fig.16 Output torques under different RSF-SVPWM strategies with various speeds, 0.05 N·m

能的负面影响,又拥有比较优异的分散谐波能力,相比于传统 RSF-SVPWM 策略具备一定的优越性。

## 6 结论

传统 RSF-SVPWM 技术的谐波分散效果与扩频范围密切相关,但开关频率的变化又会使电流环脉动增大,导致系统输出转矩脉动提高。文中提出一种基于双分频带的 RSF-SVPWM 策略,旨在提升系统 EMC 的同时,保证其综合性能良好。通过仿真与实验验证,得出如下结论:

(1) 扩频范围越大,传统 RSF-SVPWM 分散高次谐波的效果越好,但电流环性能及系统稳态输出性能也下降也越明显。

(2) 为了保证系统综合性能的良好,在应用传统 RSF-SVPWM 技术时,不可为了尽可能分散高次谐波而选择较大的扩频范围,应将其限制在一定范围内。

(3) 文中所提基于双分频带的 RSF-SVPWM 策略在扩频范围较小时仍具备优异的高次谐波分散能力,增强了系统的 EMC,降低了电流环与输出转矩脉动,提升了系统综合性能,具有一定的优越性。

### 参考文献:

[1] 肖丽,高峰,侯淑萍,等. 新能源汽车驱动系统速度传感器故障检测与容错控制法[J]. 电工技术学报, 2020, 35 (24):

5075-5086.

XIAO Li,GAO Feng,HOU Shuping,et al. Speed sensor fault detection and tolerant control for new energy vehicle drive system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (24):5075-5086.

[2] 刘自程,李永东,郑泽东. 多相电机控制驱动技术研究综述[J]. 电工技术学报,2017,32(24):17-29.

LIU Zicheng,LI Yongdong,ZHENG Zedong. Control and drive techniques for multiphase machines;a review [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(24):17-29.

[3] 陈庆,葛雪峰,史明明,等. 多台电力电子变压器云-边脉宽调制同步控制策略[J]. 电力工程技术,2022,41(2):128-135.

CHEN Qing,GE Xuefeng,SHI Mingming,et al. The cloud-edge signals based PWM synchronization strategy for multi-power electronic transformer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022,41(2):128-135.

[4] 梅杨,黄伟超,冯帅伟. 一种基于零矢量调节的五桥臂逆变器调制方法[J]. 电工技术学报,2017,32(S2):96-102.

MEI Yang, HUANG Weichao, FENG Shuaiwei. A modulation method for a five-leg-inverter based on the zero vector adjustment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2):96-102.

[5] 刘和平,刘庆,张威,等. 电动汽车用感应电机削弱振动和噪声的随机 PWM 控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(7):1488-1495.

LIU Heping,LIU Qing,ZHANG Wei,et al. Random PWM tech-

- nique for acoustic noise and vibration reduction in induction motors used by electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1488-1495.
- [6] 赵文祥, 李亮, 吉敬华, 等. 双三相 PMSM 锯齿载波双随机 SVPWM 策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3412-3422.  
ZHAO Wenxiang, LI Liang, JI Jinghua, et al. Sawtooth carrier double random SVPWM strategy for dual three-phase PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3412-3422.
- [7] 郑琦琦, 杜明星, 魏克新. 电机驱动系统的电磁干扰抑制方法研究[J]. 电气传动, 2017, 47(7): 3-6, 11.  
ZHENG Qiqi, DU Mingxing, WEI Kexin. Research on electromagnetic interference suppression method of motor drive system [J]. Electric Drive, 2017, 47(7): 3-6, 11.
- [8] 朱琳, 卜飞飞, 黄文新, 等. 五相逆变器非正弦双随机空间矢量脉宽调制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4824-4833.  
ZHU Lin, BU Feifei, HUANG Wenxin, et al. Non-sinusoidal dual random space vector pulse width modulation strategy for five-phase inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4824-4833.
- [9] 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: 103273-103284.
- [10] WANG Z, CHEN J, CHENG M, et al. Field-oriented control and direct torque control for paralleled VSIs fed PMSM drives with variable switching frequencies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2417-2428.
- [11] 韩建民. 基于 SVPWM 算法优化的永磁同步电机振动分析与抑制 [D]. 南京: 东南大学, 2018.  
HAN Jianmin. Vibration analysis and suppression of permanent magnet synchronous motor based on SVPWM algorithm optimization [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [12] LEE K, SHEN G T, YAO W X, et al. Performance characterization of random pulse width modulation algorithms in industrial and commercial adjustable-speed drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 1078-1087.
- [13] PEYGHAMBARI A, DASTFAN A, AHMADYFARD A. Selective voltage noise cancellation in three-phase inverter using random SVPWM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4604-4610.
- [14] 孙正伟. 随机调制技术在高性能交流伺服系统中的应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
SUN Zhengwei. Application of random modulation technology in high performance AC servo system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [15] 董雨蔚, 许杰, 聂子玲, 等. 电能变换领域中随机脉宽调制技术研究概况及展望 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 1-9, 23.  
DONG Yushi, XU Jie, NIE Ziling, et al. Summary and prospect of random pulse width modulation in the field of power transformation [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(6): 1-9, 23.
- [16] LI Q, JIANG D. Variable switching frequency PWM strategy of two-level rectifier for DC-link voltage ripple control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7193-7202.
- [17] 李辉, 吴正国. 采用随机脉宽调制技术降低电力有源滤波器开关谐波 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 105-109, 115.  
LI Hui, WU Zhengguo. Reduction of switching frequency harmonics of active power filter using randomize PWM technique [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 105-109, 115.
- [18] 邢程程. 直线感应牵引电机的参数自整定方法 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
XING Chengcheng. Parameter self-tuning method of linear induction traction motor [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [19] 王丹娜. 无模型自适应控制器参数整定方法及应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
WANG Danna. Parameter tuning of model-free adaptive controller and its application [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [20] 王莉娜, 朱鸿悦, 杨宗军. 永磁同步电动机调速系统 PI 控制器参数整定方法 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 104-117.  
WANG Lina, ZHU Hongyue, YANG Zongjun. Tuning method for PI controllers of PMSM driving system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 104-117.
- [21] 赵辉, 胡仁杰. SVPWM 的基本原理与应用仿真 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 350-353.  
ZHAO Hui, HU Renjie. Space-vector pulse width modulation and its simulation based on simulink [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 350-353.
- [22] 要焰梅. 基于扩频原理的永磁同步电机系统开关噪声抑制策略 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
YAO Yanmei. Noise reduction strategies of pmsm system based on the spread spectrum principle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [23] 张强. 基于随机调制的感应电机减振降噪策略研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.  
ZHANG Qiang. Study on vibration and noise reduction strategy of induction motor based on the random modulation [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [24] 吴元凯, 范菁, 周颖. 基于随机开关频率 SVPWM 的永磁同步电机降噪研究 [J]. 电子设计工程, 2021, 29(19): 13-18.  
WU Yuankai, FAN Jing, ZHOU Ying. Research on noise reduction of PMSM based on RFSVPWM [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(19): 13-18.
- [25] 苑利维, 于洋, 汪远银, 等. RSPWM 技术在船舶推进系统中的应用研究 [J]. 电力电子技术, 2017, 51(3): 84-85, 124.  
YUAN Liwei, YU Yang, WANG Yuanyin, et al. Research on application of RSPWM technology in ship propulsion system [J]. Power Electronics, 2017, 51(3): 84-85, 124.

[26] 高捷. 三电平随机 SVPWM 调制策略研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022.

GAO Jie. Research on three-level random SVPWM modulation strategy[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2022.

[27] 浦天宇. 五相逆变器新型空间矢量脉宽调制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.

PU Tianyu. Research on novel space vector pulse width modulation technology for five phase inverter[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2020.

作者简介:



刘琦

刘琦(1997),女,硕士,助理工程师,从事电力电子与电力传动技术相关工作(E-mail:18118267098@163.com);

朱劲松(1988),男,硕士,工程师,从事电力系统电能变换技术研发工作;

陈文明(1981),男,学士,实验师,研究方向为功率变换技术。

## Novel random switching frequency SVPWM strategy based on dual-segregate-frequency band

LIU Qi<sup>1</sup>, ZHU Jinsong<sup>2</sup>, CHEN Wenming<sup>1</sup>, BU Feifei<sup>1</sup>, QIN Haihong<sup>1</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The high-order harmonics caused by traditional fixed switching frequency space vector pulse width modulation (SVPWM) technology cause serious electromagnetic interference problems in electric drive systems. Random switching frequency (RSF) SVPWM can be used to solve the problem of severe electromagnetic interference. The principles of SVPWM technology and RSF-SVPWM technology are introduced, and the influence of the increase of the spread spectrum range in RSF-SVPWM strategy on the system is discussed. To achieve good dispersion of high order harmonics in a small spread spectrum range, a novel RSF-SVPWM strategy based on dual frequency division is proposed. Taking the original central switching frequency as the midpoint, the initial complete variation range is divided into two local frequency bands, and their local central frequency points and local spread spectrum range are set. Taking the positive and negative of the ideal  $\beta$  axis voltage component in the two-phase static  $\alpha$ - $\beta$  coordinate system as the standard, after judging the specific frequency division band of each switching cycle, the switching frequency is randomized around the local central frequency point in the frequency division band. The simulation and experimental results show that compared to the traditional RSF-SVPWM strategy with a wider spread spectrum range, the new RSF-SVPWM strategy has equivalent high order harmonic dispersion effect. At the same time, the new RSF-SVPWM reduces the pulsation of the system current loop and outputs a relatively stable electromagnetic torque. The new RSF-SVPWM promotes the application of electric drive systems in high-end industry fields.

**Keywords:** space vector pulse width modulation (SVPWM); high-order harmonics; electromagnetic compatibility; output torque; random modulation; segregate-frequency band; random switching frequency space vector pulse width modulation (RSF-SVPWM)

(编辑 方晶 江林)