

基于 dSPACE 的永磁同步电机低振动噪声控制策略*

李晓华, 雷 轶, 刘成健
(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090)

摘 要: 为降低变频器供电引起的永磁同步电机(PMSM)电磁振动噪声,首先理论分析了变频器引入的PMSM 振动噪声源,然后利用 MATLAB/Simulink 建立仿真模型,通过 dSPACE 进行编译并控制一台 PMSM,比较了随机开关频率调制技术和死区补偿技术降低振动噪声的优缺点,提出一种混合随机开关频率-死区补偿技术。试验结果表明,此方法综合随机开关频率调制技术和死区补偿技术的优点,能降低逆变器引入电流谐波引起的中低频振动噪声和逆变器开关频率与电流谐波相互作用引起的高频振动噪声。

关键词: 永磁同步电机; 振动噪声; 随机开关频率; 死区补偿

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)12-0047-07

Control Strategy of Low Vibration and Noise of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on dSPACE *

LI Xiaohua, LEI Yi, LIU Chengjian
(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to reduce the vibration and acoustic noise of permanent magnet synchronous motor (PMSM) caused by inverter, first, the vibration and noise sources of PMSM caused by inverter were analyzed, and the simulation model build by MATLAB/Simulink was compiled by dSPACE to control a PMSM. Then, the advantages and disadvantages of random switching frequency modulation technique and dead-time compensation technique in reducing the vibration and acoustic noise were compared, and a method that mixed random switching frequency and dead-time compensation was proposed. Finally, the experimental results indicated that the proposed method could integrate the advantages of random switching frequency modulation and dead-time compensation technology, and reduced both the mid-low frequency noise and vibration that was caused by current harmonics introduced by inverter and the high frequency noise and vibration that was caused by interaction of switching frequency of inverter and harmonic of current.

Key words: permanent magnet synchronous motor; vibration and acoustic noise; random switching frequency; dead-time compensation

0 引 言

永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet

Synchronous Motor, PMSM) 由于功率密度高,已广泛应用于伺服机器人、电动汽车、医疗器械、高档家用电器等领域。这些场合对振动和噪声都有严

* 基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900);“电气工程”上海市Ⅱ类高原学科;上海市电站自动化技术重点实验室

作者简介: 李晓华(1974—),女,博士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动。

雷 轶(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

刘成健(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

格要求。目前,变频器广泛应用于电机驱动,但是由于变频器会引入大量谐波,增加电机振动噪声,因此研究如何降低变频器引起的电机电磁振动噪声,具有重要的科学意义。

诸多国内外学者致力于降低电机振动噪声的研究。日本学者 Akiko Tanabe 等人^[1]提出通过增加 PWM 调制的平滑电压来降低振动与噪声,虽可以降低电机在基频和固有频率下的振动噪声,但与此同时也增加电机铜耗,以致增加成本。文献[2-3]针对内置式 PMSM,提出一种新的无位置传感器的控制方法。其优点是没有采用位置传感器,降低了成本,在低速条件下,噪声分贝降低明显;缺点是在注入电压的同时,又引入了由注入电压频率引起的噪声;不过在高转速条件下噪声分贝基本不变。

文献[4]通过对逆变器开关频率随机化处理,同时保持恒定的采样频率和平均电感电流,削弱了开关器件在开关频率处噪声的最大幅值,从而提出了一种脉冲位置随机化的脉宽调制技术,但却使得功率器件的功率损耗增大。文献[5]提出把开关周期和参考矢量之间的关系运用到传统 SVPWM 中,可以在选定频率处的电压频谱中产生一个噪声消除带,以补偿共振频率在计算或者测量时的误差,使得逆变器各桥臂开关周期相互独立,通过仿真试验得出在 2 kHz 以上噪声有所抑制,但缺点是在 2 kHz 及以下频率处的噪声有所增加。文献[6]提出一种新颖的方法对外转子 PMSM 的异常噪声进行诊断和抑制,但是该方法不适用于诊断和优化外定子 PMSM。文献[7]从改变谐波的频谱分布入手,提出了一种混合随机开关频率调制技术,将周期频率调制和随机开关频率调制有机地结合起来,但是这种方法开关频率过高,增加了开关损耗。文献[8]提出混频-变延时 PWM 技术,但是该方法实现困难。文献[9-15]根据逆变器输出电流的极性对逆变器进行死区补偿来而降低低频电流谐波,以达到降低电机振动噪声的目的,但是这些死区补偿方法扩频效果差,谐波分布不均匀,无法降低开关频率处的谐波幅值。

本文以一台分数槽 PMSM 为研究对象,比较了随机开关频率调制技术和死区补偿技术降低振动噪声的优缺点,提出了一种混合随机开关频率

-死区补偿技术。利用 MATLAB/Simulink 进行建模仿真,并通过 dSPACE 进行编译实现对 PMSM 的控制。试验结果表明,此方法可综合随机开关频率调制技术和死区补偿技术的优点,不仅能降低逆变器引入电流谐波而引起的中低频振动噪声,同时也能降低逆变器开关频率与电流谐波相互作用而引起的高频振动噪声。

1 变频器供电引入振动噪声源

PMSM 在变频器供电时,定子电流中的谐波和转子磁场电枢反应后气隙磁场会产生大量的谐波,导致电磁力波中谐波增加。电磁力波是引起电机电磁振动噪声的主要原因^[16],当电磁力波的频率与电机的固有频率接近时,会因为共振而引起较大的振动噪声甚至造成电机无法正常工作。所以降低定子电流中的谐波可以降低电磁力波,从而可降低电机电磁振动噪声。振动噪声与电流谐波的关系如图 1 所示。

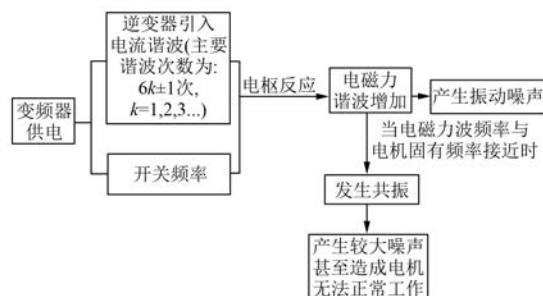


图 1 振动噪声与电流谐波的关系

变频器供电时,会引入两个方面的振动噪声源:(1)逆变器引入电流谐波而引起的中低频振动噪声;(2)逆变器开关频率与电流谐波相互作用引起的高频振动噪声。以下针对两个方面的振动噪声源,分别进行死区补偿策略和随机开关频率调制技术的研究,分析各自优缺点,提出“混合随机开关频率-死区补偿”的新方法,能同时降低逆变器引入电流谐波、逆变器开关频率及其倍频处谐波幅值,减少谐波含量,从而降低电机的振动噪声。最后通过试验验证了结果。

2 死区补偿策略

印度学者 Guha A 等人^[17]提出了一种改进的死区补偿方案。沈阳工业大学的范倩^[10]提出时

间脉冲补偿法来降低电机低频振动噪声,基本原理为在每个载波周期内加入补偿时间,使触发信号的导通时刻与理想给定开通时间相同。死区补偿过程为:首先采用电流矢量法检测出逆变器三相输出电流的极性,然后根据电流的极性对逆变器三相触发信号导通时刻进行补偿,使得与理想导通时间相同。

死区补偿策略的图解法表示为如图 2 所示。

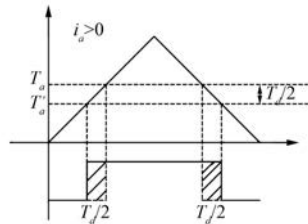


图 2 正电流时脉冲宽度

SVPWM 控制时调制波和三角波相比生成 PWM 波,图 2 为以 A 相为例,电流为正时,一个调制周期内,补偿后的 PWM 脉冲宽度。其补偿方法为式(1):

$$\begin{cases} T'_a = T_a - \frac{T_d}{2}, i_a > 0, \\ T'_a = T_a + \frac{T_d}{2}, i_a < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_a ——管子上桥臂理想触发导通时刻;
 T_d ——死区时间;
 T'_a ——经补偿后的触发导通时刻。

总结起来,在不同电流极性下,SVPWM 三相触发信号导通时刻如表 1 所示。

表 1 SVPWM 三相触发信号导通时刻表

电流极性	A 相触发时刻 T'_a	B 相触发时刻 T'_b	C 相触发时刻 T'_c
+++	$T_a - \frac{T_d}{2}$	$T_b + \frac{T_d}{2}$	$T_c - \frac{T_d}{2}$
++-	$T_a - \frac{T_d}{2}$	$T_b + \frac{T_d}{2}$	$T_c + \frac{T_d}{2}$
+-+	$T_a - \frac{T_d}{2}$	$T_b - \frac{T_d}{2}$	$T_c + \frac{T_d}{2}$
-+-	$T_a + \frac{T_d}{2}$	$T_b - \frac{T_d}{2}$	$T_c + \frac{T_d}{2}$
-++	$T_a + \frac{T_d}{2}$	$T_b - \frac{T_d}{2}$	$T_c - \frac{T_d}{2}$
--+	$T_a + \frac{T_d}{2}$	$T_b + \frac{T_d}{2}$	$T_c - \frac{T_d}{2}$

3 随机开关频率调制技术

Gwangju 大学学者 Kim Ki-Seon 等人^[18]将随机位置和随机开关频率相结合,这种混合调制策略能够更大程度地分散谐波能量,开关频率及其整数倍处的谐波峰值得到了明显的降低。沈阳工业大学的闫圣坤^[19]针对逆变器产生的振动噪声问题采用了随机开关频率调制策略。在随机 PWM 中最为广泛应用的是随机开关频率 PWM,其原理是通过随机改变载波的频率来实现。随机开关频率 PWM 的三角载波频率公式为

$$f_s = f_{c0} + R_i \Delta f. \quad (2)$$

式中: f_{c0} ——固定的中心开关频率;

R_i ——一个在 $[-1, 1]$ 均匀分布的随机数;

Δf ——频带常数。

大部分电磁噪声都取决于开关频率 f_s 。在此频率下的谐波电压公式为

$$U_{fs} = U_m \cos(2\pi f_s t). \quad (3)$$

式中: U_{fs} ——谐波电压;

U_m ——电压幅值。

当 f_s 改变时,频谱也相应地变化。 f_s 的变化范围越大,输出电流中的谐波频谱就能均匀地分布在越宽的范围内。

相比传统的固定开关频率 PWM,随机开关频率 PWM 使得在开关频率及其整数倍附近的谐波分布更加均匀,但是在实际工况下,由于逆变器固有的死区时间而引起的电流畸变问题,仅仅依靠随机开关频率 PWM 无法解决,需考虑死区效应问题。

4 混合随机开关频率-死区补偿策略

由于随机开关频率调制技术和死区补偿策略都有自身的局限性,在单独使用时无法同时降低由变频器引入谐波电流所引起的低频振动噪声,以及由逆变器开关频率与电流高次谐波相互作用引起的高频噪声。综合两种方法的优点提出了一种混合随机开关频率-死区补偿策略。

首先将随机开关频率调制技术运用到 SVPWM 中,在一定范围内可以随机地改变逆变器的开关频率,从而实现随机开关频率的 SVPWM。

然后根据逆变器三相输出电流的极性,对三相触发信号的导通时间进行补偿,即当电流为正

时,则增加该桥臂 PWM 导通 T_d 时间;当电流为负时,则减少该桥臂 PWM 导通 T_d 时间。

在试验控制模型中,随机开关频率根据式(2),随机数由 Simulink 中伪随机数发生器模块产生一均匀分布的随机序列,中心频率设为 10 kHz,带宽 Δf 取 2 kHz,实现逆变器的开关频率随机化,以下 T_s 为开关频率的倒数。死区补偿方法在试验中以补偿 SVPWM 计算所得三相占空比的形式实现,因为在试验中通过 dSPACE 只能对逆变器的三相上桥臂开关管给定占空比,因此,当电流为正时,将上管导通时间延长 T_d ,即使得占空比增加 T_d/T_s ;当电流为负时,将上管导通时间缩短 T_d ,即使得占空比减少 T_d/T_s 。

5 试验验证

电机参数如表 2 所示。试验平台如图 3 所示。电流波形数据是由 YOKOGAWA DL9140 示波器和 Hantek CC-65 电流钳测得,测量精度是 1 mV/10 mA。试验中电机运行于 1 500 r/min,随机开关频率中心频率为 10 kHz,传统固定开关频率则只需将带宽 Δf 设为 0 即可切换,死区时间设为 5 μ s。

表 2 试验电机参数

参数名称	参数值
相电阻/ Ω	0.31
相电感/H	$2e-3$
额定电压/V	24
额定功率/W	70
额定转速/ $(r \cdot \min^{-1})$	3 000
额定电流/A	4.2
额定转矩/ $(N \cdot m)$	0.22
极数	$2p=4$
转动惯量 $J/(kg \cdot cm^2)$	4.808
转子磁链 ψ_f/Wb	0.014 28

5.1 死区补偿技术

通过 MATLAB/Simulink 和 dSPACE 的无缝连接,对死区补偿技术前后进行试验分析。

如图 4 所示为死区补偿前后电流谐波频谱比较,低频段选取 50~2 000 Hz,基波为 50 Hz。

死区补偿前后在关键频率处的谐波幅值比较如表 3 所示,其中 $f_{sw} = 10\text{ kHz}$, $f_e = \frac{n \times p}{60} = \frac{1\,500 \times 2}{60} = 50\text{ Hz}$ 。

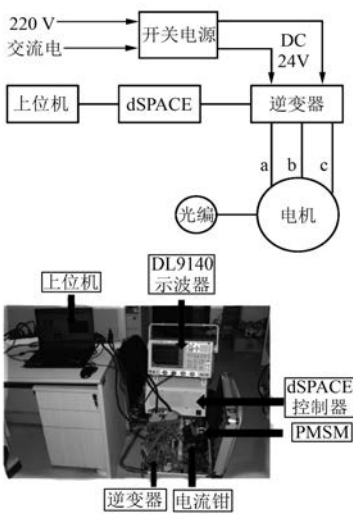


图 3 试验平台

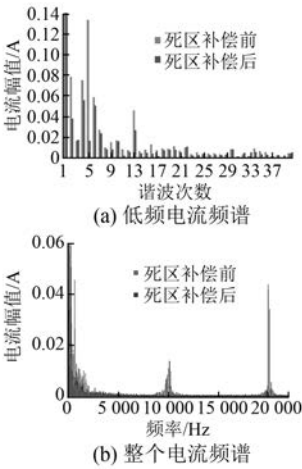


图 4 死区补偿前后电流频谱

表 3 死区补偿前后电流频谱谐波幅值比较

频段	频率/Hz	死区补偿前/A	死区补偿后/A	降低率/%
低频段	f_e	0.630	0.672	-6.66
	$5f_e$	0.132	2.01×10^{-2}	84.83
	$7f_e$	2.71×10^{-2}	2.35×10^{-2}	13.46
	$11f_e$	8.18×10^{-3}	2.09×10^{-3}	74.46
	$13f_e$	4.57×10^{-2}	2.64×10^{-2}	42.10
高频段	$f_{sw} - f_e$	2.2×10^{-3}	3.91×10^{-3}	-77.73
	$f_{sw} + f_e$	1.56×10^{-3}	3.68×10^{-3}	-135.9
	$2f_{sw} - 2f_e$	3.19×10^{-3}	4.1×10^{-3}	-28.53
	$2f_{sw} + 2f_e$	4.6×10^{-3}	1.21×10^{-2}	-163.1

由图 4(a)和表 3 低频段数据可得,在传统固定开关频率补偿前后电流谐波幅值有所降低,THD 从 32.237% 降为 17.336%,5 次、7 次谐波电流幅值分别从原来的 0.132、0.027 1 A 减为 0.020 1、0.023 5 A,有效削弱了 5、7、11、13 次等谐波。由此可见,所提出的死区补偿策略可有效削弱低频电流谐波,降低谐波畸变率。由图 4(b)和表 3 高频段数据可以看出,开关频率及二倍频处的电流谐波幅值在死区补偿前后没有较大变化,即电机的高频噪声没有得到削弱。因此,死区补偿方法优点是对低频电流谐波有削弱作用,但其缺点是对开关频率及其倍频处高频电流谐波基本无作用。

死区补偿策略对逆变器引入 $6k \pm 1$ 次电流谐波有明显削弱作用。

5.2 随机开关频率调制技术

通过试验对随机开关频率调制技术和固定开关频率调制技术进行了试验比较。

如图 5 所示为固定开关频率和随机开关频率的试验结果比较。

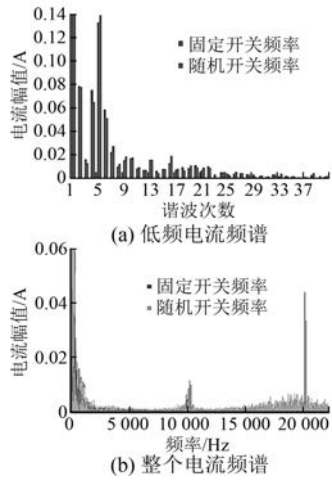


图 5 随机开关频率调制技术和固定开关频率调制技术电流频谱

随机开关频率调制技术和固定开关频率调制技术谐波幅值比较如表 4 所述。

由图 5(a)和表 4 低频段数据可以看出,在低频处随机开关频率输出电流谐波频谱和固定开关频率相比较,并没有降低。由图 5(b)和表 4 高频段数据可得,在开关频率 10 kHz 和 20 kHz 处,传统 PWM 调制方法所得电流频谱的谐波幅值为一个尖峰,谐波能量聚集于此,表现为电机发出刺耳

的啸叫声;相反地,随机开关频率调制所得电流谐波幅值明显降低,且频谱分布也更加均匀,有效地将谐波能量分散,此时电机的啸叫声也明显降低。因此,随机开关频率调制的优点是对开关频率处的谐波有削弱和均匀分布的作用,但是对低频电流谐波作用甚小。

表 4 随机开关频率调制技术和固定开关频率调制技术电流频谱谐波幅值比较

频段	频率/Hz	固定开关频率/A	随机开关频率/A	降低率/%
低频段	f_e	0.630	0.662	-4.98
	$5f_e$	0.132	0.142	-7.36
	$7f_e$	2.71×10^{-2}	2.81×10^{-2}	3.76
	$11f_e$	8.18×10^{-3}	9.22×10^{-3}	-12.71
	$13f_e$	4.57×10^{-2}	6.57×10^{-2}	-43.76
高频段	$f_{sw} - f_e$	2.2×10^{-3}	1.77×10^{-3}	19.55
	$f_{sw} + f_e$	1.56×10^{-3}	1.23×10^{-3}	21.15
	$2f_{sw} - 2f_e$	3.19×10^{-3}	1.19×10^{-3}	62.70
	$2f_{sw} + 2f_e$	4.6×10^{-3}	2.53×10^{-3}	45.00

随机开关频率调制技术对逆变器开关频率引入的高频电流谐波有明显抑制作用。

5.3 混合随机开关频率-死区补偿策略

通过试验对混合随机开关频率-死区补偿策略进行试验分析。

混合随机开关频率-死区补偿策略试验结果如图 6 所示,谐波幅值比较如表 5 所示。

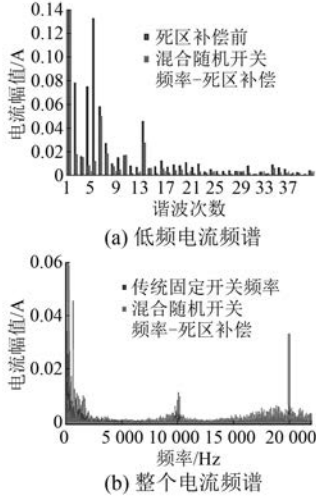


图 6 混合随机开关频率-死区补偿和传统固定开关频率电流频谱

表 5 混合随机开关频率-死区补偿与传统固定开关频率死区补偿前电流频谱谐波幅值比较

	频率/ Hz	固定开 关频率/A	混合随机 开关频率-死区 补偿/A	降低率/%
低频段	f_e	0.630	0.692	-9.78
	$5f_e$	0.132	1.18×10^{-2}	91.10
	$7f_e$	2.71×10^{-2}	1.18×10^{-2}	31.07
	$11f_e$	8.18×10^{-3}	1.59×10^{-3}	80.61
	$13f_e$	4.57×10^{-2}	2.76×10^{-2}	39.47
高频段	$f_{sw}-f_e$	2.2×10^{-3}	1.79×10^{-3}	18.64
	$f_{sw}+f_e$	1.56×10^{-3}	5.51×10^{-4}	64.68
	$2f_{sw}-2f_e$	3.19×10^{-3}	8.64×10^{-4}	72.92
	$2f_{sw}+2f_e$	4.6×10^{-3}	1.39×10^{-3}	69.78

由图 6(a) 和表 5 低频段数据可以得出,在低频处混合随机开关频率-死区补偿与传统固定开关频率相比较,输出电流谐波幅值明显降低,5 次、7 次谐波电流幅值分别从原来的 $0.132、2.71 \times 10^{-2}$ A 减为 $1.18 \times 10^{-2}、1.18 \times 10^{-2}$ A,且 THD 从 32.237% 降为 12.71%。由图 6(b) 和表 5 高频段数据可以看出,混合随机开关频率-死区补偿策略在开关频率 10 kHz 及倍频处谐波幅值也明显降低,且谐波分布更加均匀。

5.4 宽调速范围下试验测试

前文定量分析了样机在 1 500 r/min 时混合随机开关频率-死区补偿的控制方法能在整个频段范围内降低逆变器电流谐波,从而可以降低电机的振动噪声。下面分析在整个调速范围内此方法的试验结果。

图 7 和图 8 所示分别为定子电流中低频段和高频段的频谱图单位为安。

由图 7 可以得出:整个调速范围内,5 000 Hz 以下的中低频段,混合随机开关频率-死区补偿控制技术降低了电流的谐波幅值。

从图 8 可以看出,在整个调速范围内,混合随机开关频率-死区补偿技术可以降低开关频率 10 kHz 及其倍数次谐波附近的电流谐波。

综上所述,混合随机开关频率-死区补偿技术在整个调速范围内既可通过死区补偿有效改善低频电流死区效应,亦可通过随机开关频率使得

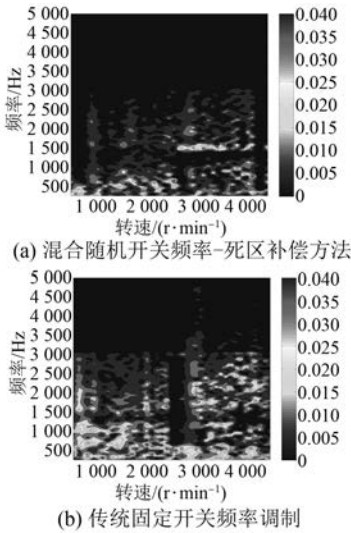


图 7 混合随机开关频率-死区补偿与传统固定开关频率电流频谱(中低频段)

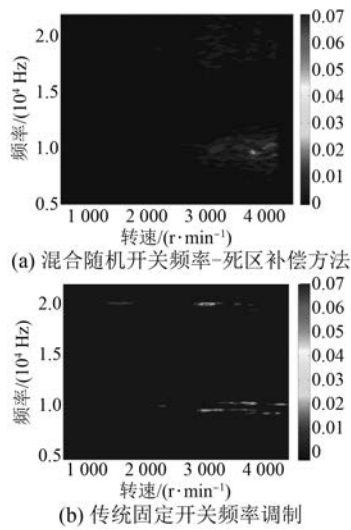


图 8 混合随机开关频率-死区补偿与传统固定开关频率电流频谱(高频段)

在开关频率及其倍频处谐波分布均匀,有效抑制高频噪声。

6 结 语

本文通过对逆变器引入电流谐波引起的中低频振动噪声和逆变器开关频率与电流谐波相互作用引入的高频振动噪声进行分析,提出了混合随机开关频率-死区补偿策略。试验分析得到以下结论:

- (1) 死区补偿策略对变频器引入的 5、7、11、

13 次等低频谐波电流有明显削弱作用,但是对于开关频率处的高频谐波作用极小。

(2) 随机开关频率调制技术可显著降低开关频率处谐波电流幅值,展宽谐波频谱。由逆变器开关频率与电流谐波相互作用引入的高频振动噪声明显降低,但是对于逆变器引入电流谐波而引起中低频振动噪声作用甚小。

(3) 混合随机开关频率-死区补偿策略综合随机开关频率调制技术和死区补偿技术的优点,既可降低开关频率处高频振动噪声,亦可削弱由变频器引入的谐波电流而引起的中低频振动噪声。

【参考文献】

- [1] TANABE A, AKATSU K. Vibration reduction method in SRM with a smoothing voltage commutation by PWM [C] // Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015 9th International Conference on, IEEE, 2015: 600-604.
- [2] YOKOYAMA T, KUBOTA H. Acoustic noise characteristics in position sensorless control for IPMSM based on EEMF and voltage injection synchronized with PWM carrier [C] // Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on, IEEE, 2015: 604-609.
- [3] TANIGUCHI S, YASUI K, YUKI K. Noise reduction method by injected frequency control for position sensorless control of permanent magnet synchronous motor [C] // Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA), 2014 International, IEEE, 2014: 2465-2469.
- [4] CHANG Y T, CHEN B Y, LAI Y S. Novel random switching PWM technique with constant sampling frequency and constant inductor average current for digital-controlled converter [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, IEEE, 2011: 2936-2943.
- [5] 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.
- [6] MA C, LIU Q, WANG D, et al. A novel black and white box method for diagnosis and reduction of abnormal noise of hub permanent magnet synchronous motors for electric vehicles [J]. 2016 IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE, 2016, 63(2): 1153-1167.
- [7] 王兴. 永磁同步电机低噪声脉宽调制策略的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [8] 顾立天. 永磁同步电机变频调速系统低噪声 PWM 技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [9] 王文韬. 基于死区补偿的永磁同步电动机矢量控制系统研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2010.
- [10] 范倩. 低速永磁电机振动抑制控制策略研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [11] HARUNA J, IKEGAMI S, HOSHI N. A dead-time compensation method on a PWM control scheme for a 6 switches two PMSMs drive inverter [C] // Future Energy Electronics Conference (IFEEEC), 2013 1st International, IEEE, 2013: 143-148.
- [12] 杨立永, 陈智刚, 陈为奇, 等. 逆变器输出电压模型及新型死区补偿方法 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 182-187.
- [13] 周华伟, 温旭辉, 赵峰, 等. 一种新颖的电压源逆变器自适应死区补偿策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 26-32.
- [14] QIU T, WEN X, ZHAO F. Adaptive-linear-neuron-based dead-time effects compensation scheme for PMSM drives [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2016, 31(3): 2530-2538.
- [15] ZHAO Y, QIAO W, WU L. Dead-time effect analysis and compensation for a sliding-mode position observer-based sensorless IPMSM control system [J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2015, 51(3): 2528-2535.
- [16] GIERAS J F, WANG C, LAI J C. Noise of polyphase electric motors [M]. CRC press, 2005.
- [17] GUHA A, NARAYANAN G. An Improved Dead-Time Compensation Scheme for Voltage Source Inverters Considering the Device Switching Transition Times [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014.
- [18] KIM K S, YOUNG G J, YOUNG C L. A new hybrid random PWM scheme [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(1): 192-200.
- [19] 闫圣坤. 永磁同步电动机随机 PWM 技术的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.

收稿日期: 2017-01-20