

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.02.004

三相写极同步电机的建模与仿真

曾进辉, 阳文闯, 罗仔翼

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 永磁同步电机在动力系统中占有重要地位, 由于永磁电机的极对数固定不变, 启动和同步运行时受到电压、电流、频率等条件的限制, 很难满足不同工况需求。三相写极同步电机是一种特殊的永磁同步电机, 永磁体可以变极对数运行。根据三相写极同步电机的启动、变极和牵入同步运行特性, 建立了三相写极同步电机 d/q 数学模型。总结运行仿真结果, 并与普通永磁同步电机进行对比, 验证了三相写极同步电机具备启动转矩大、同步运行速度宽及牵入同步运行速度快的特点。

关键词: 三相写极同步电机; 变极运行; 牵入同步; 永磁同步电机

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)02-0017-07

引文格式: 曾进辉, 阳文闯, 罗仔翼. 三相写极同步电机的建模与仿真 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 17-23.

Modeling and Simulation of Three-Phase Written-Pole Synchronous Motors

ZENG Jinhui, YANG Wenchuang, LUO Ziyi

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor occupies an important position in the power system, however, due to its fixed polar logarithm as well as the limitation of its starting and synchronous operation by voltage, current, frequency and other conditions, it is difficult to meet different operating conditions. The three-phase written-pole synchronous motor is a special type of permanent magnet synchronous motor with permanent magnet to operate with variable polar logarithm. Based on the characteristics of three-phase written pole synchronous motor starting, synchronous operation and pole-changing operation, a d/q mathematical model can thus be established. The simulation results are summarized and compared with the common permanent magnet synchronous motor, thus verifying such characteristics of large starting torque, wide synchronous speed and fast pull-in synchronous running speed as embodied by the three-phase written-pole synchronous motor.

Keywords: three-phase written-pole synchronous motor; asynchronous start-up; pull in synchronization; permanent magnet synchronous motor

0 引言

写极电机在 20 世纪 70 年代末由美国的 Precise Power 公司最先提出, 其目前主要的商业化产品有单相写极电动机^[1]、三相写极电动机、由写极电动机 -

发电机组构成的不间断电源和单 - 三电源相数变换器等, 这些产品在美国、加拿大等国家得到了较为广泛的应用, 然而国内有关写极电机的研究尚处于空白阶段^[2]。

收稿日期: 2018-07-01

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2016JJ5038)

作者简介: 曾进辉 (1981-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事交直流电能变换与控制方面的教学与研究, E-mail: zjh@hut.edu.cn

三相写极同步电机 (three-phase written-pole synchronous motor, WPSM), 通过在定子上增加一套集中的励磁绕组和在转子上设置表面涂有铁氧体永磁材料的笼型绕组^[3-4], 可以在实现电机变极控制的同时兼备普通永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 的优势。且由于 WPSM 的特殊结构和控制方式, 具有成本较低、起动电流较小、起动转矩较大、瞬时重复起动能力较强、运行电压范围较宽等优点^[5-6], 是永磁同步牵引电机的发展趋势。因此, 本研究提出三相写极电机的建模与仿真^[7], 并对电机的运行特性进行分析, 为写极电机的研发提供理论参考。

在 WPSM 的控制中, 由于交流电机模型的复杂性, 伴随着解耦以及坐标变换环节, 因此本研究给出 abc/dq 下的坐标变换, 以及在 d/q 坐标系下的数学模型^[8-10], 并且以此数学模型为基础, 搭建 WPSM 的 Matlab/Simulink 仿真模型。通过将 WPSM 与 PMSM 的仿真运行结果进行对比分析, 总结出 WPSM 的优越性, 以期写极电机理论和技术的发展起到一定的推动作用。

1 WPSM 结构和运行原理

三相写极同步电机的结构如图 1 所示, 其与普通永磁同步电机的主要区别如下:

- 1) 定子侧有 3 个充磁绕组, 互相间隔 120° , 分别与三相励磁回路相连接;
- 2) 永磁体材料不同, 普通的永磁同步电机磁铁层采用矫顽力大的材料制成, 磁滞回线所占面积较大, 而三相写极同步电机采用矫顽力较小的铁氧体材料制成, 这样有助于铁氧体层的去磁和增磁, 从而满足三相写极同步电机的运行需求;
- 3) 转子上有鼠笼导条, 当电机异步启动时, 产生启动电磁力矩。

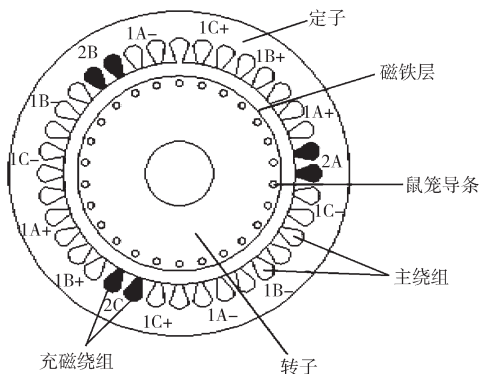


图 1 WPSM 结构图

Fig.1 WPSM structure

WPSM 的运行状态可分为如下 3 个阶段:

1) 异步启动阶段。在 WPSM 启动时, 励磁极开关关断, 鼠笼导条在定子旋转磁场下产生电磁转矩, 拖动转子加速启动。

2) 变极运行阶段。当转子转速增加到同步转速的 70% 时, 励磁极开关打开, 励磁绕组磁场被写入转子铁氧体层。

3) 同步运行阶段。当铁氧体层被写入所需磁极时, 由于永磁体磁场和定子绕组磁场的相互作用, 将转子拖入同步转速。在转速达到同步转速的过程中, 鼠笼导条的电流逐渐减小。

2 WPSM 数学建模

2.1 WPSM 在异步启动阶段的数学建模

当三相写极电机运行在异步启动阶段时, 假设铁氧体层的剩磁密度为 0, 此时电机运行主要靠鼠笼导条感应电流产生的磁场与电枢绕组产生的磁场相互作用产生的电磁力矩, 因此可建立如下三相写极电机的 d/q 数学模型:

定转子电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ds} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{qs} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{dr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{qr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\psi_{qs} \omega_r \\ \psi_{ds} \omega_r \\ -\psi_{qr} (\omega_s - \omega_r) \\ -\psi_{dr} (\omega_s - \omega_r) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

定转子磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ds} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{dr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{qs} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{qr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_m \\ 0 & 0 & L_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = n_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}); \quad (3)$$

机械运动方程为

$$T_e = T_l + \frac{J}{n_p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt}. \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) 中: u_{ds} 、 u_{dr} 分别为定子、转子的 d 轴

电压; u_{qs} 、 u_{qr} 分别为定子、转子的 q 轴电压; i_{ds} 、 i_{dr} 分别为定子、转子的 d 轴电流; i_{qs} 、 i_{qr} 分别为定子、转子的 q 轴电流; ω_s 、 ω_r 分别为写极电机达到同步时的定子转速和转子转速; R_{ds} 、 R_{dr} 分别为定子、转子的 d 轴电阻; R_{qs} 、 R_{qr} 分别为定子、转子的 q 轴电阻; L_{ds} 、 L_{dr} 、 L_{qs} 、 L_{qr} 、 L_m 分别为定子 d 轴电感、转子 d 轴电感、定子 q 轴电感、转子 q 轴电感、定子鼠笼导条等效绕组和电枢绕组的每相互感; T_e 、 T_l 、 J 、 n_p 分别为电磁转矩、负载转矩、转动惯量、极对数; p 为微分算子; ψ_{ds} 、 ψ_{dr} 、 ψ_{qs} 、 ψ_{qr} 分别为定子 d 轴磁链、转子 d 轴磁链、定子 q 轴磁链、转子 q 轴磁链。

2.2 WPSM 的充磁同步运行阶段数学建模

当三相写极电机加速到同步转速的 70% 时, 三相励磁回路开关闭合, 铁氧体层被冲入磁极, 假设忽略鼠笼导条电磁力矩的影响, 可得如下数学模型:

定子电压方程为

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \psi_{qs} \omega_s, \quad (5)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + p\psi_{qs} - \psi_{ds} \omega_s; \quad (6)$$

定转子磁链模型为

$$\psi_{ds} = L_s i_{ds} + \psi_f, \quad (7)$$

$$\psi_{qs} = L_{qs} i_{qs}, \quad (8)$$

$$\psi_{dr} = \psi_f + L_m i_{ds}, \quad (9)$$

$$\psi_{qr} = L_m i_{qs}; \quad (10)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = n_p (\psi_f i_{qs} - (L_{qs} - L_{ds}) i_{qs} i_{ds}); \quad (11)$$

机械运动方程为

$$T_e = T_l + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt}. \quad (12)$$

3 铁氧体层和定子绕组变极分析

3.1 铁氧体磁场分析与计算

假设经过气隙的磁通都经过永磁体, 可以得到如下 1 对极气隙磁场经过的路径磁动势:

$$4Ni = 2(H_{air}L_{air} + H_{PM}L_{PM}), \quad (13)$$

$$H_{PM} = \frac{2Ni}{\mu_r L_{air} + L_{PM}}. \quad (14)$$

式 (13) ~ (14) 中: H_{air} 为气隙磁场强度; H_{PM} 为永磁体磁场强度; N 为充磁绕组在一个槽内的匝数; i 为充磁电流; L_{air} 为气隙长度; L_{PM} 为磁铁层厚度。

取 $\mu_r = 2.4$, $L_{PM} = 5.5$ mm, $L_{air} = 0.5$ mm, 可以得到铁氧体层的励磁滞回线, 如图 2 所示。由图 2 可知, 励磁电流最大值为 300 kA/m 时, 选取铁氧体工作点在漆点附近。

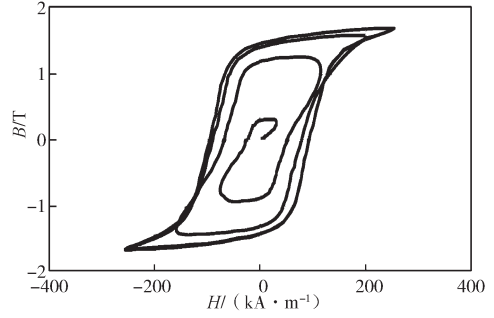


图 2 铁氧体层的励磁滞回线

Fig. 2 Magnetosphere hysteresis loops

3.2 充磁电流脉冲

WPSM 的磁化过程如图 3 所示, 即其 2 对极和 3 对极磁化过程分别由 A/B/C 三相正弦脉冲电流进行充磁。

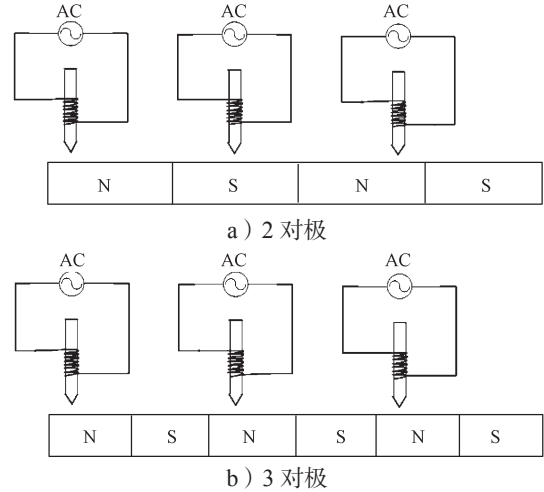
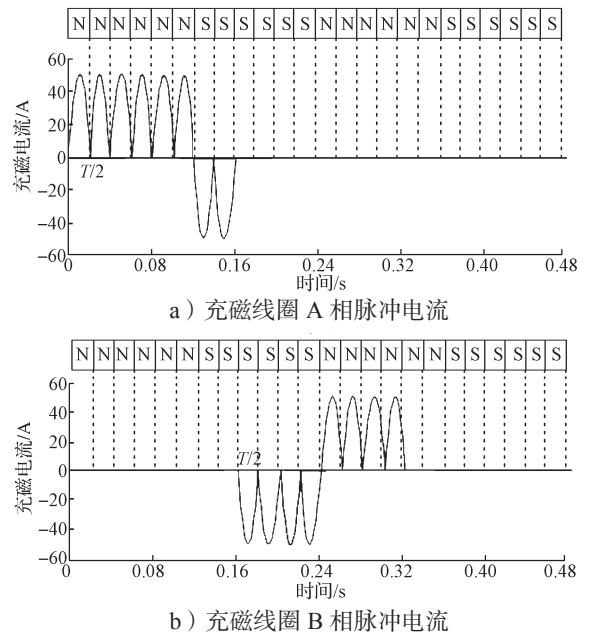


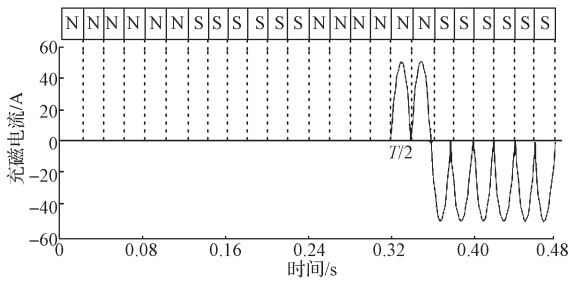
图 3 WPSM 的磁化过程图

Fig. 3 WPSM Magnetization process diagram

当充入磁极为 2 对极时, 充磁线圈的三相电流脉冲如图 4 所示。



b) 充磁线圈 B 相脉冲电流



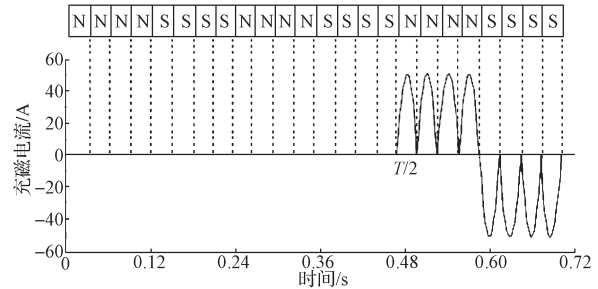
c) 充磁线圈 C 相脉冲电流

图 4 P=2 时充磁线圈的三相电流脉冲

Fig. 4 Three-phase current pulses of magnetic winding coils with P=2

由图 4 所示 2 对极充磁线圈的三相电流脉冲图可以得知，转子圆周覆盖 24 块小的铁氧体^[10-11]，每个磁极占 6 个小铁氧体块，其对应 A/B/C 三相充磁线圈匝数为 200 匝，正弦波脉冲电流幅值为 50 A， $H_{PM}=298 \text{ kA/m}$ ，铁氧体层半径为 48 mm，同步转速为 1 500 r/min，当转子转速达到同步转速的 70% 时，为充磁线圈充磁的初始时刻。则充磁电流半个波峰 $T/2=0.002 \text{ s}$ ，由磁滞回线可知铁氧体层的充入磁场强度为 1.2 T。

当充入磁极为 3 对极时，充磁线圈的三相电流脉冲图如图 5 所示。由图 5 可以得知，每个主磁极占 4 个小铁氧体块，其对应 A/B/C 三相充磁电流正弦波脉冲电流的幅值为 50 A，同步转速为 1 000 r/min，当转子的转速达到同步转速的 70% 时，为充磁线圈充磁的初始时刻，可得知比时充磁电流的半个波峰 $T/2=0.003 \text{ s}$ 。



c) 充磁线圈 C 相脉冲电流

图 5 P=3 时充磁线圈的三相电流脉冲

Fig. 5 Three-phase current pulses of magnetic winding coils with P=3

3.3 定子绕组变极

当定子槽 $Z=36$ 、 $2p_1/2p_2=4/6$ 极时，绕组接线均有较高的绕组系数、低的谐波含量及合理的气隙磁密比值，简化了变极切换开关，但 4 极有 25% 的绕组未利用。 $2p_1/2p_2=4/6$ 极、3Y/3Y+Y 接法定子线圈的变极绕组如图 6 所示。

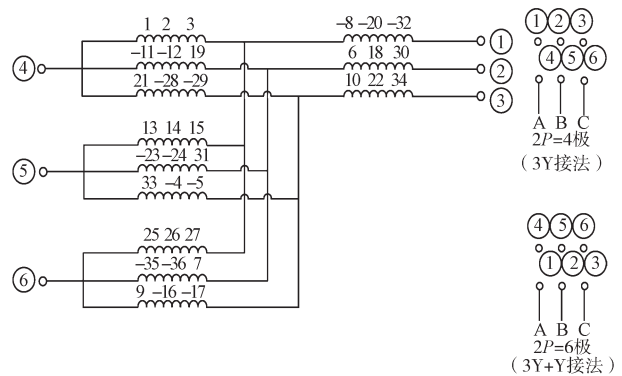


图 6 $2p_1/2p_2=4/6$ 极、3Y/3Y+Y 接法定子线圈变极绕组

Fig. 6 Coil winding pole-changing with $2p_1/2p_2=4/6$ connected to 3Y/3Y+Y

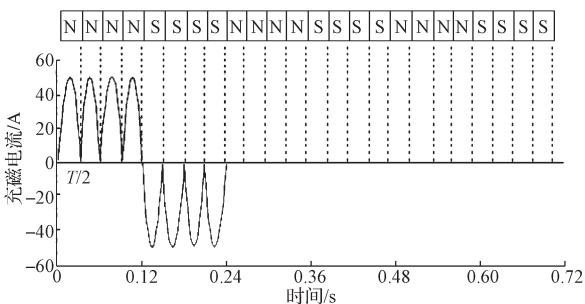
4 WPSM 仿真模型的建立

三相写极电机的运行仿真模型可根据式 (1) ~ (12) 建立，在 Matlab/Simulink 仿真环境下，利用 WPSM 的电压回路方程、磁链方程、转矩方程分别建立相应的仿真模型。WPSM 运行仿真模型如图 7 所示。WPSM 运行仿真模型参数为 $f=50 \text{ Hz}$ 。当其转速达到同步转速的 70% 时，对铁氧体进行充磁，剩余磁密为 $B_r=0.8 \text{ T}$ ，其他参数设置具体见表 1。

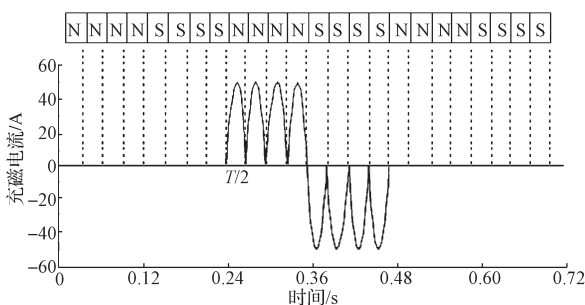
表 1 仿真模型的参数与取值

Table 1 Parameters and values of simulation model

参数	取值	参数	取值
负载 $T_l / (\text{N}\cdot\text{m})$	10	转子电感 L_r / H	0.670
定子电阻 R_s / Ω	0.114	互电感 L_m / H	0.651
转子电阻 R_r / Ω	0.212	转动惯量 $J / (\text{N}\cdot\text{m}^2)$	0.459 3
定子电感 L_s / H	0.666	极对数 n_p	2/3



a) 充磁线圈 A 相脉冲电流



b) 充磁线圈 B 相脉冲电流

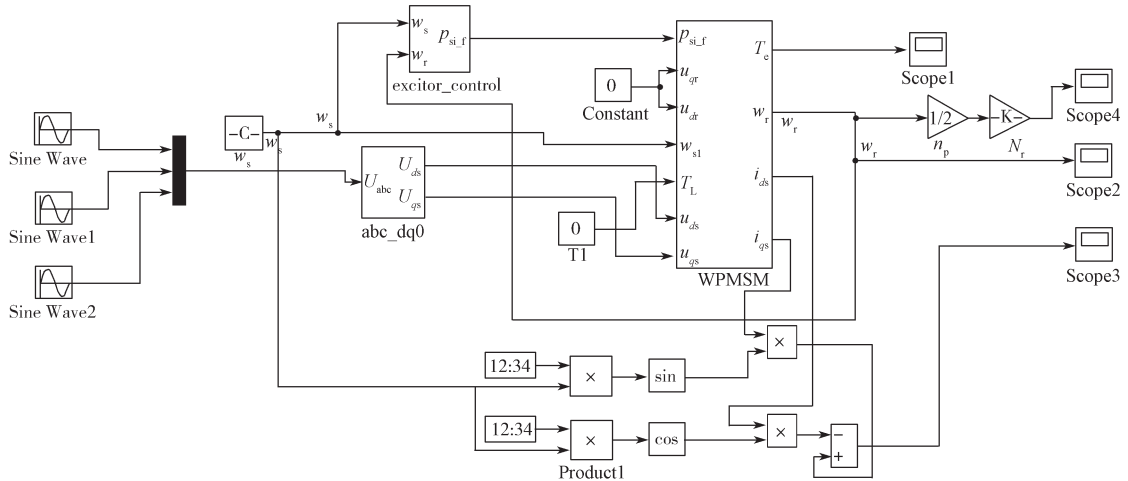


图 7 WPSM 运行仿真模型
Fig. 7 WPSM simulation model

5 仿真结果分析

5.1 空载时 WPSM 和 PMSM 的仿真结果对比分析

当 $n_p=2$ 时, 空载时 WPSM 和 PMSM 的转矩随时间变换的仿真结果如图 8 和图 9 所示。

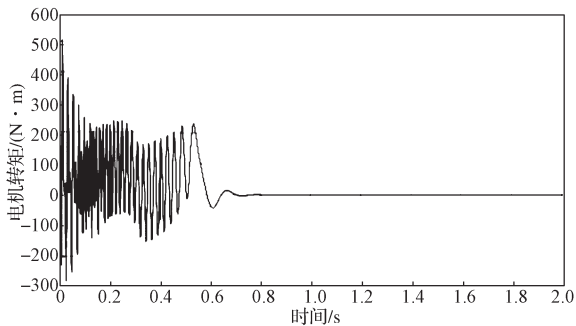


图 8 $n_p=2$ 、空载时 WPSM 电磁转矩随时间变换波形

Fig. 8 When $n_p=2$ and no-Load, the electromagnetic torque of WPSM transforms the waveform over time

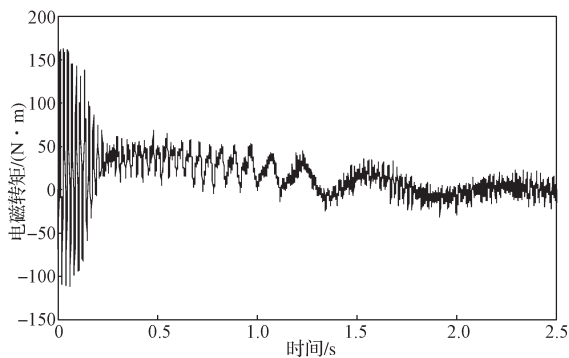


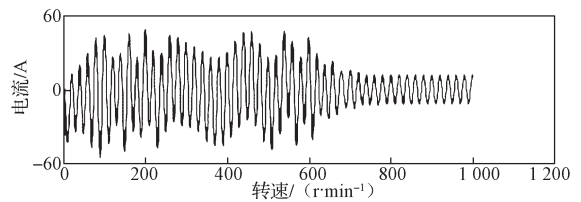
图 9 $n_p=2$ 、空载时 PMSM 电磁转矩随时间变换波形

Fig. 9 Time-dependent wave-forms of electromagnetic torque of idling PMSM with $n_p=2$

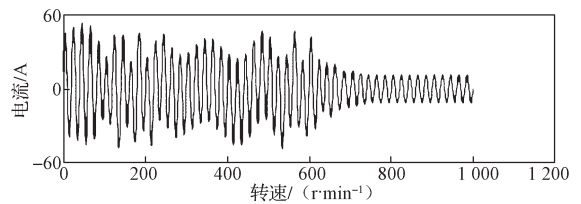
由图 8 和 9 可知, 电机由启动到进入稳定运行状态时, WPSM 的启动电磁转矩为 $500 \text{ N} \cdot \text{m}$, PMSM

的电磁转矩为 $180 \text{ N} \cdot \text{m}$, WPSM 启动电磁转矩大于 PMSM 的电磁转矩; 在 0.38 s 时, 电机铁氧体层写入磁极, 电磁转矩出现明显波动, 0.6 s 后进入稳定状态, PMSM 需要 1.5 s 才能进入稳定状态, 启动时间远大于 WPSM 的启动时间。

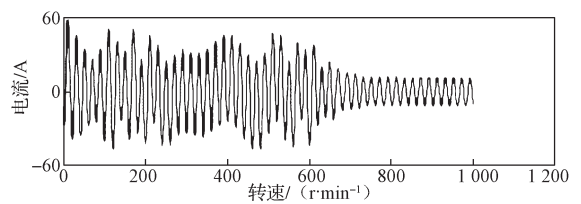
写入磁极对数为 2 时, WPSM 空载定子电流单相随转速变换波形如图 10 所示, PMSM 定子电流 A 相随时间变换波形如图 11 所示。



a) A 相



b) B 相



c) C 相

图 10 $n_p=2$ 、WPSM 空载时定子电流单相随转速变换波形
Fig. 10 Single-phase stator current wave-forms with rotational speed in idling WPSM with $n_p=2$

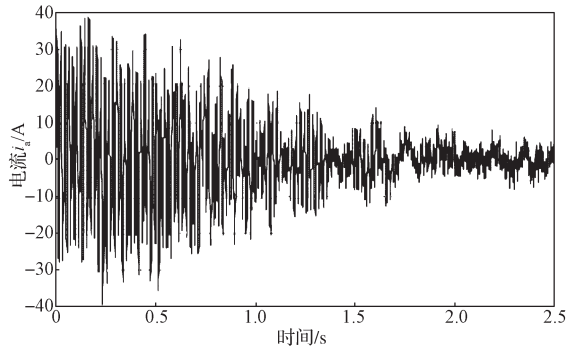


图 11 $n_p=2$ 、空载时 PWSM 定子电流 A 相随时间变换波形

Fig. 11 Phase A wave-forms of idling PWSM stator current converted with time with $n_p=2$

由图 10 和 11 可知, WPSM 电机在异步启动时 A/B/C 三相电流波动明显, 电流峰值最大为 50 A, 与普通永磁同步电机启动电流为 40 A 相比, 相差不大。当转速达到 600 r/min 时, 定子 A/B/C 三相电流趋于稳定, 在转速为 1 000 r/min 写入磁极时, 定子电流变化不大。

写入磁极对数为 2、WPSM 空载时, 转速随时间的变换波形如图 12 所示, PWSM 转速随时间变换的波形如图 13 所示。

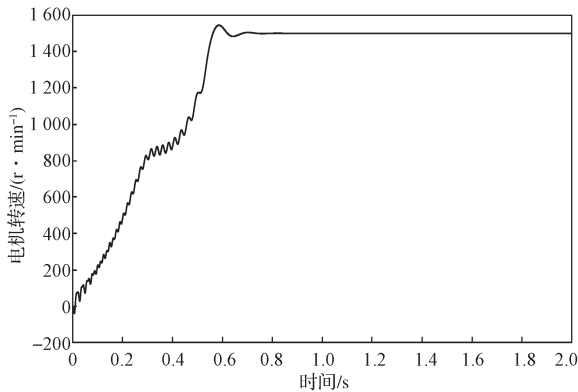


图 12 $n_p=2$ 、空载时 WPSM 转速随时间变换波形

Fig. 12 The number of WPSM poles is 2 and no-load the rotation speed transforms waveforms over time

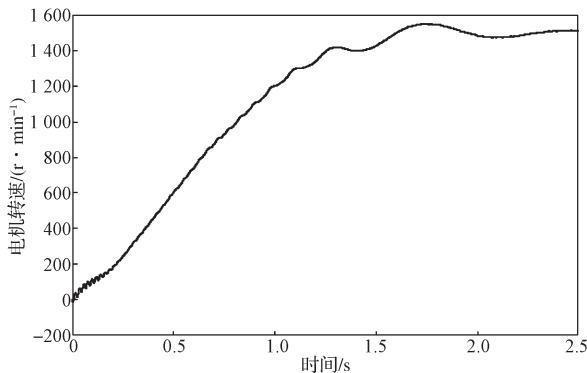


图 13 $n_p=2$ 、空载时 PMSM 转速随时间变换波形

Fig. 13 Idling WPSM speed waveform over time with $n_p=2$

由图 12 和图 13 可以得知, 空载时 WPSM 和 PMSM 的同步转速均为 1 500 r/min, 能满足 2 对极时的转速性能要求; WPSM 启动阶段, 当电机转速上升到 1 000 r/min 时, 写入磁极, 转子转速出现了明显的波动。WPSM 达到稳态的时间为 0.6 s, PMSM 达到稳态的时间为 1.5 s。

5.2 空载时 WPSM 的变极运行仿真结果分析

写入磁极对数为 3、空载时 WPSM 的变极运行仿真结果见图 14~16。

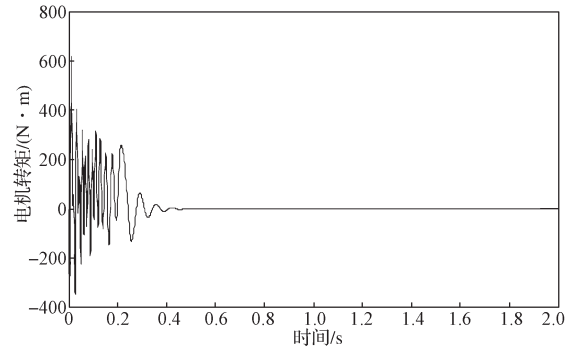
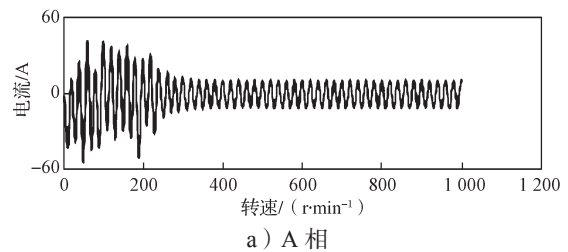


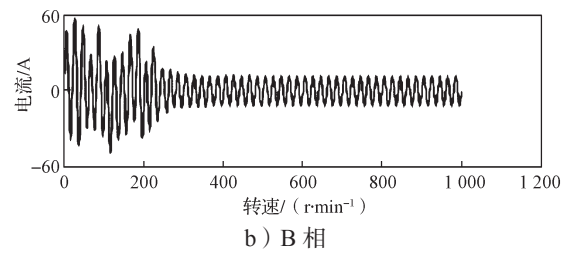
图 14 $n_p=3$ 、空载时 WPSM 电磁转矩随时间变换波形

Fig. 14 Electromagnetic torque conversion wave-forms over time in idling WPSM with $n_p=3$

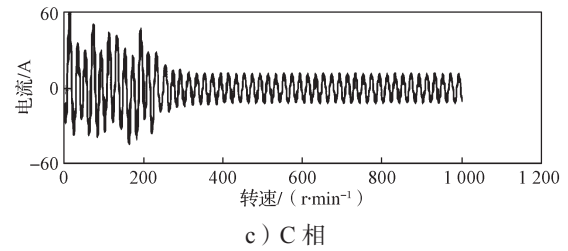
对比图 8 和图 14 可知, 当写入磁极对数为 3 时, 启动电磁转矩达 600 N·m, 比磁极对数为 2 时的电磁转矩增加了 100 N·m, 启动时间变为 0.38 s。



a) A 相



b) B 相



c) C 相

图 15 $n_p=3$ 、空载时 WPSM 电流随时间变换波形

Fig. 15 Current conversion wave-forms over time in idling WPSM with $n_p=3$

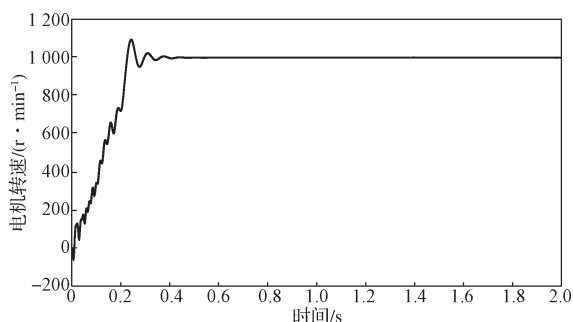


图 16 $n_p=3$ 、空载时 WPSM 转速随时间变换波形

Fig. 16 Idling WPSM speed waveform over time with $n_p=3$

对比图 10 和 15 可知: 极对数为 3 时, 启动电流和极对数为 2 的电流相差不大。对比图 12 和图 16 可知: 写入磁极对数为 2 的转速为 1 500 r/min, 写入磁极对数为 3 的转速为 1 000 r/min, 并在转速为 700 r/min 时写入磁极, 电机转速在 0.16 s 时出现明显波动。

6 结论

综合对比分析三相写极同步电机的仿真和运行结果可知, WPSM 是一种特殊的永磁同步电机, 同时也具备一些异步电机的特性。WPSM 与同等参数的普通电机相比, 具有以下优点:

1) 启动转矩大。在同样的电压下, 带负荷的能力增加。

2) 调速范围宽。普通的永磁同步电机磁极是固定不变的, 而写极电机可以改变转子永磁体的磁极, 能满足不同负载的需求。

3) 投入同步运行时间短, 可频繁启动。

因此, 对三相写极电机运行研究能更好地推进写极电机的发展, 同时其仿真结果可充实和完善写极电机的运行理论, 开创写极电机在我国的应用市场, 尤其是家用电器中的应用市场, 扩大单相交流电动机的应用范围, 符合当前电机学科的发展趋势。期望研究结果能对写极电机理论和技术的发展起到积极的推动作用。

参考文献:

- [1] PARK S C, KIM D K, KIM B T. A Study on a Pole-Changing Operation of a Single Phase Written-Pole Motor[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010(33): 299-306.
- [2] ROESEL J F J. Introduction and Overview of "Written-Pole" Technology[C]//Northcon 95 IEEE Technical Applications Conference & Workshops Northcon. [S. l.]: IEEE, 1995: 130-132. Doi: 10.1109/NORTHCON.1995.485026.
- [3] KIM B T, KIM D K, RHU S H, et al. A Study on the Ferromagnetic Layer of a Single-Phase Written-Pole Motor in Consideration of Demagnetizing Field Intensity[C]//International Conference on Electrical Machines & Systems. Seoul: [s. n.], 2007: 1003-1008.
- [4] KIM B T, KIM D K, RHYU S H. Exciter Design and Characteristic Analysis of a Written-Pole Motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1768-1771.
- [5] CHOI J H, LEE S H. The Rewritable Effects of Bonded Magnet for Large Starting Torque and High Efficiency in the Small Power Single-Phase Written Pole Motor[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(7): 1901.
- [6] PARK S C, SONG J H, KIM B T. Optimization of a Squirrel Cage Rotor of a Written Pole Motor For Improvement of Magnetization Characteristics[C]//Electromagnetic Field Computation. [S. l.]: IEEE, 2010: 1-2.
- [7] 张红生, 吴炳娇. 永磁同步电机电机本体数学模型在 MATLAB 下的仿真 [J]. 自动化与仪器仪表, 2012(2): 134-135, 138.
ZHANG Hongsheng, WU Bingjiao. Simulation of Mathematical Model of Permanent Magnet Synchronous Motor Body Based on MATLAB[J]. Automation and Instrumentation, 2012(2): 134-135, 138.
- [8] 王秀和. 永磁电机 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 313-314.
WANG Xiuhe. Permanent Magnet Motor[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 313-314.
- [9] 廖雄志, 文定都, 湛政, 等. 基于模糊 PID 的永磁同步电机调速系统 [J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(2): 26-30.
LIAO Xiongzhi, WEN Dingdu, ZHAN Zheng, et al. A Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(2): 26-30.
- [10] 杨德良, 王心坚. 基于 Halbach 阵列可控磁通电机的安全控制研究 [J]. 微特电机, 2018, 46(5): 1-5, 13.
YANG Deliang, WANG Xinjian. Research on Safety Control Based on Halbach Array Controllable-Flux Motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2018, 46(5): 1-5, 13.

(责任编辑: 廖友媛)