

文章编号: 2095-2163(2020)11-0056-05

中图分类号: TM921

文献标志码: A

永磁同步电机匝间短路故障电流分析

周光亮, 吴钦木

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对永磁同步电机在不同的控制回路中出现匝间短路时的故障现象, 利用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建了一个带有匝间短路的永磁同步电机模型 (Permanent-magnet synchronous motor, PMSM)。闭环控制状态下采用滞环电流矢量控制方法, 其中包括速度环 PI 控制器、反 Park 变换以及 PWM 调制系统。在搭建的带有故障的永磁同步电机模型中, 可以通过外部参数输入来决定电机是否发生故障, 并对 PMSM 在开环以及闭环控制状态下, 分别对电机正常运行时和发生故障时的输出结果进行对比分析。实验结果与理论计算结果一致, 为今后对永磁同步电机匝间短路故障的研究提供了可靠依据。

关键词: 永磁同步电机; 匝间短路; 矢量控制; PWM 调制; 反 Park 变换

Vector control of PMSM Based on PI regulator

ZHOU Guangliang, WU Qinmu

(College of electrical engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] In order to better study and analyze the fault phenomenon of permanent magnet synchronous motor (PMSM) when inter turn short circuit occurs in different control loops, a permanent magnet synchronous motor model with inter turn short circuit is built by using MATLAB/Simulink simulation platform. Hysteresis current vector control method is adopted in the closed-loop control state, including speed loop PI controller, anti Park transform and PWM modulation system. In the model of permanent magnet synchronous motor with fault, the external parameter input can be used to determine whether the motor has fault, and the output results of PMSM in the open-loop and closed-loop control state are analyzed respectively when the motor is in normal operation and when the fault occurs. The experimental results are consistent with the theoretical calculation results, which provides a reliable basis for the future research on the inter turn short circuit fault of permanent magnet synchronous motor.

[Key words] Permanent magnet synchronous motor; turn to turn short circuit; vector control; PWM modulation; anti-Park transform

0 引言

由于现代燃油汽车的大量使用, 其排放的尾气是导致全球环境受污染的原因之一, 并且消耗了大量的自然资源。为了更好做到节能减排的效果, 电动汽车的投入成为汽车市场的主流方向。永磁同步电机因其尺寸小、效率高、重量轻、噪声小、高功率密度、工作可靠等一系列性能特点, 是电动汽车电机的最优选则^[1-2]。但是, 由于 PMSM 常运行在振动、高低温、湿度、粉尘等环境复杂情况下, 再加上电机频繁起动、加速、减速等因素都可能导致电机发生故障^[3]。永磁同步电机故障大致可分为 3 类: 机械故障、电气故障和永磁体故障。定子匝间短路是 PMSM 电气故障中发生概率最高的故障, 这使得电机绕组温度升高, 从而导致绝缘失效, 严重时则会影响永磁同步电机的安全运行以及使用寿命^[4-5]。自 80 年代以来, 各种新型的故障检测方法不断提出, 目前最为广泛使用的是有限

元分析法和参数辨识法等, 但上述方法存在需要大量的算法以及附加设备等问题^[6]。本文在 abc 坐标系中分别建立了正常的和带有匝间短路故障的永磁同步电机模型, 对比二者的区别, 查找故障发生相, 并在 MATLAB/simulink 仿真平台中, 对电机正常时以及发生故障时进行仿真实验, 对其数据进行对比分析。

1 正常与匝间短路下的 PMSM 数学模型

如图 1 所示, 假设故障发生在 A 相, 故障绕组中含有一个短路回路, 则该相绕组可以分为二部分: 一相是正常部分 a_1 , 一相是故障部分 a_2 , R_f 为短路支路的短路电阻, i_f 为短路电流^[7-8]。

根据图 1 建立的 PMSM 数学模型如下:

$$\begin{cases} i_{abcf} = [i_a & i_b & i_c & i_f]^T, \\ V_{abcf} = [V_a & V_b & V_c & V_f]^T, \\ e_{abcf} = [e_a & e_b & e_c & e_f]^T. \end{cases} \quad (1)$$

$$V_{abcf} = R_{s_{abcf}} \cdot i_{abcf} + L_{abcf} \cdot P i_{abcf} + e_{abcf}. \quad (2)$$

基金项目: 国家自然科学基金(51867006)。

作者简介: 周光亮(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电机故障诊断、控制理论与应用; 吴钦木(1975-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 控制理论与应用、运动控制、电机效率优化控制等。

通讯作者: 吴钦木 Email: wqm-watlei@163.com

收稿日期: 2020-09-07

$$L_{abcf} = \begin{pmatrix} L_{a1} + L_{a2} + 2M_{a1}M_{a2} & M_{a1b} + M_{a2b} & M_{a1c} + M_{a2c} & -(L_{a2} + M_{a1a2}) \\ M_{a1b} + M_{a2b} & L_b & M_{bc} & -M_{a2b} \\ M_{a1c} + M_{a2c} & M_{bc} & L_c & -M_{a2c} \\ -(L_{a2} + M_{a1a2}) & -M_{a2b} & -M_{a2c} & L_{a2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_c \\ \dot{u}_f \end{pmatrix} \quad (3)$$

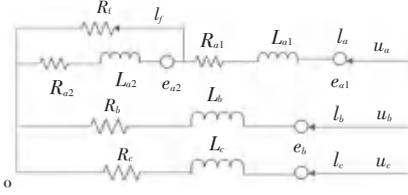


图 1 带有匝间短路的 PMSM 绕组电路图

Fig. 1 Circuit diagram of PMSM winding with inter turn short circuit

$$R_{abcf} = \begin{pmatrix} R_{a1} + R_{a2} & 0 & 0 & -R_{a2} \\ 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 \\ -R_{a2} & 0 & 0 & R_{a2} + R_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_c \\ \dot{u}_f \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_a = \psi_f \cos \theta + \psi_{ih} \cos(i\theta), \\ \psi_b = \psi_f \cos(\theta - 2\pi/3) + \psi_{ih} \cos(i\theta), \\ \psi_c = \psi_f \cos(\theta + 2\pi/3) + \psi_{ih} \cos(i\theta). \end{cases} \quad (5)$$

式中, R_f 为定子相电阻; L 为自感系数; M 为互感系数; P 为微分算子; Ψ_a 、 Ψ_b 、 Ψ_c 、 Ψ_f 分别为电机三项磁链和磁链基波分量幅值; Ψ_{ih} 为磁链 i 次谐波分量幅值 ($i = 0, 1, 2, 3, \dots$); θ 为磁链矢量角^[9]。

电机在正常工作状态时:

$$R_{a1} + R_{a2} = R_b = R_c = R_s, \quad (6)$$

$$L_{a1} + L_{a2} + 2M_{a1}M_{a2} = L_b = L_c, \quad (7)$$

$$M_{a1b} + M_{a2b} = M_{a1c} + M_{a2c} = M_{bc}, \quad (8)$$

$$e_a = e_{a1} + e_{a2} = e_b = e_c, \quad (9)$$

$$e_f = -e_a. \quad (10)$$

将(3)、(4)式带入到(2)式中:

$$\begin{aligned} V_a = & (R_{a1} + R_{a2})i_a - R_{a2} \cdot i_f + \\ & (L_{a1} + L_{a2} + 2M_{a1}M_{a2}) \cdot Pi_a + \\ & (M_{a1b} + M_{a2b}) \cdot Pi_b + (M_{a1c} + M_{a2c}) \cdot \\ & Pi_c - (L_{a2} + M_{a1a2}) \cdot Pi_f + e_a. \end{aligned} \quad (11)$$

在正常情况下, a_1 、 a_2 均通过 i_a 的电流, 当发生故障时, 流过 a_1 的电流为 i_a 。由于 $i_a + i_b + i_c = 0$, 此时流过 a_2 的电流应为 $i_a - i_f$ 。因此, 式(11)中 $(L_{a2} + M_{a1a2}) \times Pi_f$ 项的作用为减去这部分电流所带来的电压。将式(11)化简为:

$$V_a = R_s \cdot i_a + (L_a - M_{ab}) \cdot Pi_a + e_a - [R_{a2} \cdot i_f + (L_{a2} + M_{a1a2}) \cdot Pi_f] \quad (12)$$

$$L_{abcf} = \begin{pmatrix} L_{a1} + L_{a2} + 2M_{a1}M_{a2} & M_{a1b} + M_{a2b} & M_{a1c} + M_{a2c} & -\eta(L_{a2} + M_{a1a2}) \\ M_{a1b} + M_{a2b} & L_b & M_{bc} & -\eta M_{a2b} \\ M_{a1c} + M_{a2c} & M_{bc} & L_c & -\eta M_{a2c} \\ -\eta(L_{a2} + M_{a1a2}) & -\eta M_{a2b} & -\eta M_{a2c} & \eta L_{a2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_c \\ \dot{u}_f \end{pmatrix} \quad (20)$$

式(12)可以拆分为二个部分:

$$R_s \cdot i_a + (L_a - M_{ab}) \cdot Pi_a + e_a, \quad (13)$$

$$- [R_{a2} \cdot i_f + (L_{a2} + M_{a1a2}) \cdot Pi_f]. \quad (14)$$

式(13)为电机正常运行时的部分, 式(14)为电机发生故障时出现的部分。

2 故障相分析

在故障发生之前, 电机参数是对称平衡的, 发生故障之后, 平衡被打破, 为了方便分析, 引入旋转坐标矩阵:

$$T = \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \\ \dot{u}_c \\ \dot{u}_f \end{pmatrix} \quad (15)$$

通过旋转变换, 电机的电压方程为:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_{u_d} \\ \dot{e}_{u_q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + PL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + PL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{e}_{i_d} \\ \dot{e}_{i_q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{e}_{e_{df}} \\ \dot{e}_{e_{qf}} \end{pmatrix} \quad (16)$$

其中:

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_{e_{df}} \\ \dot{e}_{e_{qf}} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \eta \begin{pmatrix} R_s \cos(\theta_i) + L_d P[\cos(\theta_i)] + \omega L_q \sin(\theta_i) \\ -R_s \cos(\theta_i) - L_d P[\sin(\theta_i)] + \omega L_d \cos(\theta_i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中, ω 为基波角频率, e_{df} 、 e_{qf} 为电机发生故障情况下的反电动势额外分量。故式(16)可以拆分为式(18)、(19)两项:

$$\begin{pmatrix} R_s + PL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_s + PL_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{e}_{i_d} \\ \dot{e}_{i_q} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_{e_{df}} \\ \dot{e}_{e_{qf}} \end{pmatrix} \quad (19)$$

对比式(13)、(14)以及式(18)、(19)可得知, 式(14)和式(19)中包含了故障信息。

3 仿真实验及对比分析

为了便于在 MATALB/simulink 仿真平台中搭建故障电机模型, 引入参数 η , $\eta = n/n_1$ 。 η 为短路相总匝数 n 与该相短路匝数 n_1 的比值, 简称短路匝数比。将其带入式(3)、(4) 则为:

$$R_{abcf} = \begin{bmatrix} \hat{e}R_{a1} + R_{a2} & 0 & 0 & -\eta R_s & \dot{u} \\ \hat{e} & 0 & R_b & 0 & 0 \\ \hat{e} & 0 & 0 & R_c & 0 \\ \hat{e} & 0 & 0 & 0 & \dot{u} \\ \hat{e} & -\eta R_s & 0 & 0 & \eta R_s + R_f \end{bmatrix} \dot{u} \quad (21)$$

转矩方程式为:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c - e_f i_f}{\omega_e / n_p} - n_p i_{abcf} \cdot [\sin \theta \cdot \sin(\theta - 2\pi/3) \cdot \sin(\theta + 2\pi/3) - \eta \sin \theta]^T \quad (22)$$

PMSM 参数设定见表 1。

3.1 闭环状态仿真分析

闭环控制采用 $i_d = 0$ 的滞环电流控制方法,其基本思想是:将电流给定信号与检测到逆变器实际输出电流信号作比较。若实际电流值大于给定值,则通过

改变逆变器的开关状态使电流减小,反之增大。因此,实际电流围绕给定电流波形做锯齿形变化,并将偏差限制在一定范围内。为了达到预想结果,采用的滞环电流控制的逆变器系统包括一个转速控制环和一个采用 Bang-Bang 控制(滞环控制)的电流闭环^[10]。滞环电流矢量控制模型如图 2 所示。

表 1 PMSM 参数设定

Tab. 1 PMSM parameter setting

电机参数	数值
极对数 P_n	3
每相电阻 R_s / Ω	1.5
相电感 L / mH	1.745
相互感 M / mH	0.038
永磁铁磁链 Ψ_a / Wb	0.175
摩擦系数 $B_m / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1})$	0.001
转动惯量 $J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.003 5

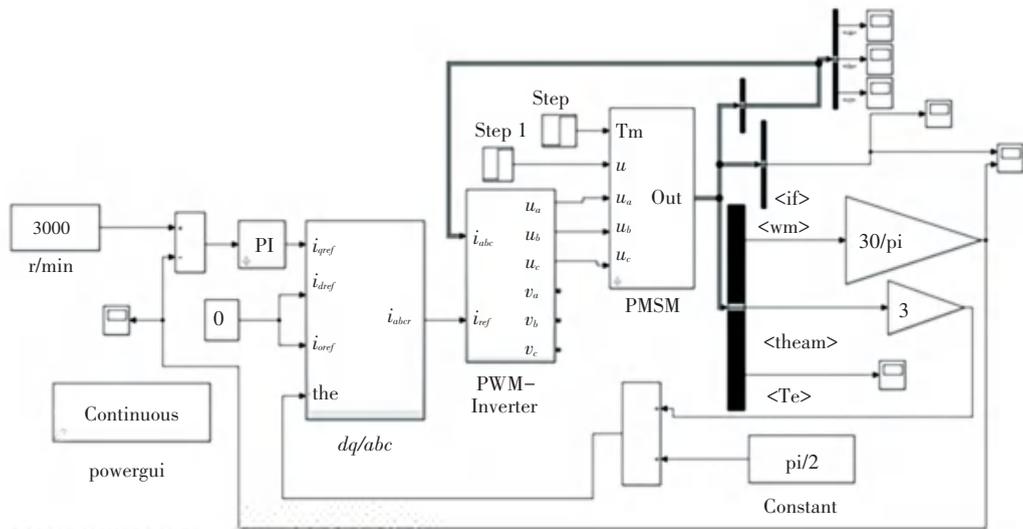


图 2 PMSM 滞环电流矢量控制图

Fig. 2 PMSM hysteresis current vector control diagram

3.1.1 无故障状态 ($\eta = 0$)

通过对有关 PMSM 匝间短路故障文献的研究发现,电机若是发生匝间短路,则会影响到短路相电流的幅值。假设 A 相发生匝间短路,为了便于清晰观测 A 相电流的情况以及后续的分析,将三相电流分别用 3 个示波器显示。设置短路匝数比 $\eta = 0$, 负载转矩 $T_1 = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转速 $n = 3000 \text{ r}$, 在 MATLAB/simulink 仿真平台中进行模拟实验。

从图 3 可以看出,当电机无故障发生时,电机的 A 相电流平稳,没有突变现象,此时故障电流 $i_f = 0$, 如图 5 所示。对 i_a 做快速傅里叶变化(FFT)仿真分析,数据见表 2。

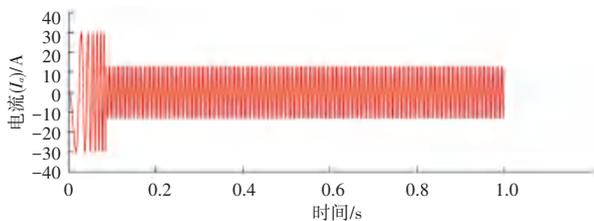


图 3 无故障时的 A 相电流

Fig. 3 Phase a current without fault

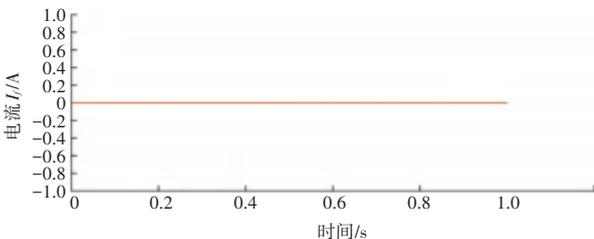


图 4 无故障时电机的故障电流

Fig. 4 Fault current of motor without fault

表 2 闭环无故障时 A 相电流谐波幅值占基波百分比

Tab. 2 Percentage of harmonic amplitude of phase a current to fundamental wave when there is no fault in closed loop

谐波序列	0	1	2	3	4	5	6
%	0.06	0.08	0.05	0.04	0.04	0.07	0.01

3.1.2 有故障状态 ($\eta \neq 0$)

当 A 相发生匝间短路故障时, 只需对电机模型中的 η 和 R_f 赋值, 就可模仿电机匝间短路故障。令 $\eta = 1.3$ 、 $R_f = 5 \Omega$ 、0.2 s 时加入故障信号进行仿真。

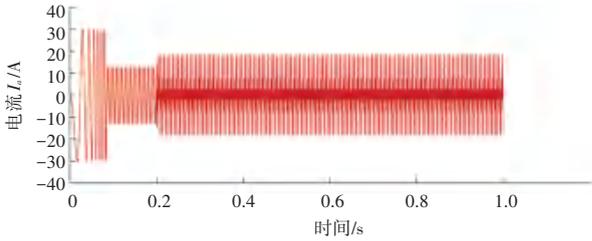


图 5 加入故障时电机的 A 相电流

Fig. 5 A-phase current of motor when adding fault

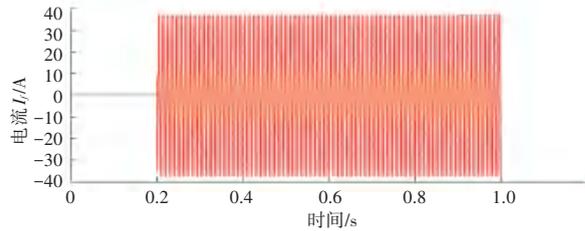


图 6 加入故障时的电机故障电流

Fig. 6 Motor fault current when adding fault

从图 5 和图 6 中可以看出, 当在 0.2 s 加入故障之后, 电机的 A 相电流发生突变并且出现故障电流, 由此判断故障发生。此时对电机的 A 相电流做快速傅里叶变化(FFT)仿真分析, 数据见表 3。

表 3 闭环发生故障时 A 相电流谐波幅值占基波百分比

Tab. 3 Percentage of harmonic amplitude of phase a current to fundamental wave in case of closed loop fault

谐波序列	0	1	2	3	4	5	6
%	0.88	0.24	0.73	0.75	0.54	0.42	0.34

3.2 开环状态仿真分析

当 PMSM 的三相输入端直接加三相对称电压作开环运行, 并稳定在 3 000 r/min, 对得到的电流进行分析, 其结果如下:

3.2.1 无故障情况 ($\eta = 0$)

开环状态下, 设置短路匝数比 $\eta = 0$, 负载转矩 $T_1 = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转速 $n = 3 \text{ 000 r}$, 在 MATLAB/simulink 仿真平台中进行模拟实验, 结果如图 7 所示。

对电机的 A 相电流做快速傅里叶变化(FFT)仿真分析, 数据见表 4。

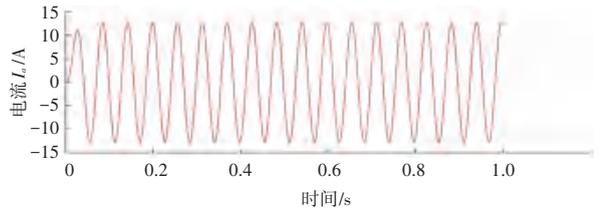


图 7 无故障时的 A 相电流

Fig. 7 Phase a current without fault

表 4 开环无故障时 A 相电流谐波幅值占基波百分比

Tab. 4 Percentage of harmonic amplitude of phase a current to fundamental wave without fault in open loop

谐波序列	0	1	2	3	4	5	6
%	0.83	1.05	0.73	0.49	0.37	0.29	0.25

3.2.2 有故障情况 ($\eta \neq 0$)

设置电机的匝间短路比 $\eta = 1.3$ 、 $R_f = 5 \Omega$ 、0.2 s 时加入故障信号进行仿真。

由图 8、图 9 中可以看出, 当 0.2 s 加入故障时, 伴随着故障电流 i_f 的出现, A 相电流发生突变, 由此可以判断, 故障发生。对电机的 A 相电流做快速傅里叶变化(FFT)仿真分析, 数据见表 5。

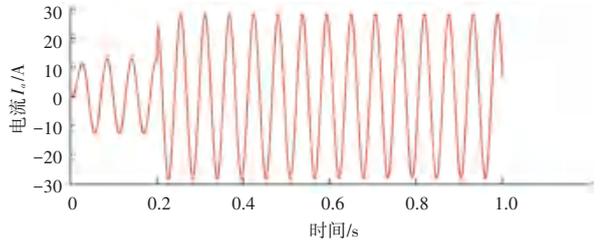


图 8 加入故障时电机的 A 相电流

Fig. 8 A-phase current of motor when adding fault

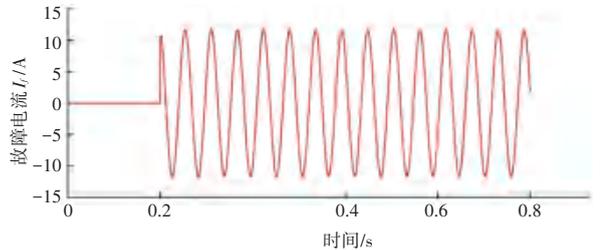


图 9 加入故障时的电机故障电流

Fig. 9 Motor fault current when adding fault

表 5 开环发生故障时 A 相电流谐波幅值占基波百分比

Tab. 5 Percentage of harmonic amplitude of phase a current to fundamental wave when open-loop fault occurs

谐波序列	0	1	2	3	4	5	6
%	1.44	3.43	3.07	3.94	2.15	2.32	1.66

3.3 开、闭环状态时的谐波对比分析

PMSM 处于闭环和开环状态, 将未发生匝间短路故障与发生匝间短路故障时的 A 相电流谐波幅值占基波百分比进行对比, 结果见表 6。

表6 开、闭环时A相电流谐波幅值占基波百分比对比

Tab. 6 Comparison of percentage of harmonic amplitude of phase a current to fundamental wave in open and closed loop

谐波序列		0	1	2	3	4	5	6
开环	正常	0.83	1.05	0.73	0.49	0.37	0.29	0.25
	故障	1.44	3.43	3.07	3.94	2.15	2.32	1.66
闭环	正常	0.06	0.08	0.05	0.04	0.04	0.07	0.01
	故障	0.88	0.24	0.73	0.75	0.54	0.42	0.34

从表6中可见,PMSM无论是处于开环还是闭环状态, $\eta = 1.3$ 时的A相电流谐波幅值占基波百分比总是比0时大。这说明谐波的产生完全是由故障的出现而导致,与电机的控制状态无关。将开环控制下的PMSM与闭环控制时相比,对比观察图3、图7和图11、13可发现,由于开环控制失去了对电流的反馈调节部分,因此无论是在电机正常运行时还是在发生匝间短路故障时,开环控制下的A相电流波动范围一定大于闭环控制。所以,在对比同样的谐波序列时,开环时的A相电流谐波幅值占基波百分比总是大于闭环时。在对永磁同步电机做故障诊断的时候,如果谐波成分越明显,那么越有利于去判别故障的发生相以及故障程度。借助表6中的数据为参考,在对电动汽车的PMSM进行匝间短路故障分析时,选择离线检测方案比在线检测方案更为明显有效。

4 结束语

当永磁同步电机发生匝间短路故障时,通过以上的研究分析可以得到以下结论:

- (1) 发生匝间短路的那一相的相电流会增大;
- (2) 当发生匝间短路故障时,会伴随着较为明

显的短路电流出现;

(3) 故障相电流的谐波会增大,且与电机的控制状态无关;

(4) 对于电动汽车的PMSM匝间短路故障诊断,离线检测方案更为明显有效。

在对PMSM匝间短路故障研究分析中,可以得知电机的故障信息包含在式(14)、(19)中。对于故障信息是如何导致电机出现故障现象以及故障程度,还有待于进一步的研究分析。

参考文献

- [1] 郑长明,张加胜. 基于最小阶扰动估计的永磁同步电机离散比例-积分准滑模控制[J]. 电工技术学报,2018,33(24):5711-5719.
- [2] 寇宝泉,赵晓坤,王梦瑶,等. 反凸极永磁同步电机及其控制技术综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2414-2425.
- [3] SWARNAKAR S, MUKHOPADHYAY S, KASTHA D. Fault detection and remedial strategies for inter-turn short circuit faults in a permanent magnet brushless dc motor[C]//2005 Annual IEEE India Conference-Indicon. IEEE, 2005:492-496.
- [4] 刘毅,郑志国. 基于参数模型永磁同步电机定子绕组匝间短路故障研究[J]. 电机与控制应用,2015,42(10):48-54.
- [5] 汪鑫,王艳,纪志成. 基于改进ELM的永磁同步电机故障诊断算法[J]. 系统仿真学报,2017,29(3):646-653.
- [6] 张明. 基Maxwell 2D的UVU容错推进电机匝间短路故障研究[J]. 微特电机,2014,42(11):29-31.
- [7] ROMERAL L, URRESTY J C, RIBA R J C, et al. Modeling of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn fault [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2011,58(5):1576.
- [8] 王延峰,赵剑锴,黄建波,等. 永磁同步电机定子匝间短路故障阻抗参数分析[J]. 电机与控制应用,2017,44(2):105-109.
- [9] 陈慧丽,李杰永. 磁同步电机匝间短路故障检测技术研究[J]. 微特电机,2017,1004-7018(9)-0041 08.
- [10] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及MATLAB仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016.
- [5] BRAUN M R, ALTAN H, BECK S B M. Using regression analysis to predict the future energy consumption of a supermarket in the UK[J]. Applied Energy, 2014, 130(5):305-313.
- [6] Janelle S. Hygh, Joseph F. DeCarolis, David B. Hill, S. Ranji Ranjithan, Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design, Building and Environment,57(2012), 165-175.
- [7] 孙斌,蒋能飞. 人工神经网络在预测热舒适性指标中的应用[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(S1):130-133.
- [8] 陆焯,朱其新,周敬松,等. 一种基于PSO-RBF网络算法的热舒适性指标预测新方法[J]. 苏州科技大学学报(自然科学版),2020,37(1):73-78.
- [9] 朱婵,张光建. 基于禁忌遗传神经网络的热舒适度预测模型研究[J]. 建筑节能,2019,47(12):41-44,144.
- [10] YAOLIN L, SHIQUAN Z, WEI Y, et al. Design Optimization Considering Variable Thermal Mass, Insulation, Absorptance of Solar Radiation, and Glazing Ratio Using a Prediction Model and Genetic Algorithm[J]. Sustainability, 2018, 10(2):336.
- [11] HÉNON M. The Monte Carlo method[J]. Astrophysics & Space Science, 1971, 14(1):151-167.
- [12] ASADI S, AMIRI S S, MOTTAHEDI M. On the Development of Multi-Linear Regression Analysis to Assess Energy Consumption in the Early Stages of Building Design[J]. Energy & Buildings, 2014, 85:246-255.

(上接第55页)