

文章编号: 2095-2163(2020)02-0184-05

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

永磁同步电机匝间短路故障建模及仿真分析

杨胜明, 吴钦木

(贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 永磁同步电机(PMSM)由于体积小、性能好、结构简单、输出转矩大的优点,在生活中大量应用,特别是在电动车中。电机可靠安全的运行,不但影响到产品的质量,而且还关系到人们的生命安全,对PMSM定子匝间短路故障建模及仿真分析是对故障诊断的第一步。本文在abc坐标系下建立了面装式永磁同步电机(SPMSM)定子匝间短路故障的详细数学模型,根据故障所建立的数学模型在Matlab/Simulink下搭建仿真模型以可视化故障特征,并从时频域进行了分析,为SPMSM的故障诊断提供可靠的依据。

关键词: 永磁同步电机; abc坐标系; 仿真分析; 时频域; 故障诊断

Modeling and simulation analysis of

Permanent Magnet Synchronous Motors with interturn short circuit fault

YANG Shengming, WU Qinmu

(The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

[Abstract] Permanent Magnet Synchronous Motor is widely used in life, especially in electric vehicles, because of its small size, good performance, simple structure and large output torque. The reliable and safe operation of motors not only affects the quality of products, but also affects the safety of people's lives. Modeling and simulation analysis of PMSM stator interturn short circuit fault (SISCF) is the first step of fault diagnosis. In this paper, a detailed mathematical model of SISCF of surface mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) is established in abc coordinate system. According to the mathematical model established by the fault, a simulation model is built under Matlab/Simulink to visualize the fault characteristics, and analyses are made in time-frequency domain to provide reliable basis for SPMSM fault diagnosis.

[Key words] Permanent Magnet Synchronous Motor; abc coordinate system; simulation analysis; time-frequency domain; fault diagnosis

0 引言

永磁同步电机(PMSM)由于其高功率密度和高可靠性等优点,成为工业机械的重要组成部分,在机器人、运动控制、电动汽车等应用中起着举足轻重的作用^[1]。虽然有许多新技术的出现,比如,新的交流变频驱动器,直接转矩控制,已被广泛使用^[2-3],然而,永磁同步电机由于各方面因素的应力作用于定子,导致定子发生故障^[4-6]。在电机的各种故障中,已有调查研究表明定子故障占有电机故障的30%~40%^[7]左右,而定子故障中绕组匝间短路故障是最多的。当电机发生短路故障时,产生的电流比正常情况下的电流要高,这会使得绕组温度升高,从而导致绝缘失效。由于人们普遍认为定子匝间短路故障代表了大多数电机故障的初始阶段,因此,自八十年代初以来,对定子匝间短路故障的检测引起了人们的关注。

在电机故障匝间短路故障诊断中,建立一个合

适的故障数学模型是电机故障诊断的第一步。目前应用最广泛的建模方法有:对称分量法、Park变换法、有限元法、相坐标法等^[8-9]。由于导致电机存在不对称电流还有其它原因,比如电源的不对称、绕组不对称和偏心故障等。并且,在现代电力系统中,不对称元件和非线性元件大量使用,相序分离已变得较为困难^[10]。Park变换法是基于电机参数对称的前提下使用,对于电机参数不对称的情况下使用非常复杂。而电机发生匝间短路故障就是一种导致电机参数不对称的情况,这也就是Park变换法在匝间短路故障建模的一大缺陷^[11]。有限元法虽然是一种分析电磁场非常有效的方法,能够精确地描述电机故障,但由于其理论是以变分原理为基础,通过求解多元方程组求得变值问题的数值解^[12-13],计算量大,仿真时间长,且不利于控制策略设计^[14-16]。相坐标法是建立相坐标系,以每相绕组为基本单元,可以较好地考虑绕组产生的空间谐波作用^[17]。不用

基金项目: 国家自然科学基金(51867006)。

作者简介: 杨胜明(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向:电机故障诊断、电机控制。

收稿日期: 2019-11-13

再经过 Park 变换及对称向量法中的参数变换,同时也克服了有限元法计算量大的问题。本文的永磁同步电机匝间短路故障数学模型就是应用相坐标法,在 abc 坐标系建立了匝间短路故障数学模型,进而在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型,从时域、频域仿真分析了故障特征。

1 SPMSM 匝间短路故障数学模型

在故障诊断中,建立一个合适的故障数学模型是电机故障诊断的第一步。为了更好地研究 SPMSM 匝间短路故障,这里将对 abc 坐标系下 SPMSM 匝间短路故障进行数学建模。

设 A 相发生故障,带有匝间短路故障的 SPMSM 绕组模型见图 1,引入 2 个参数 $u = n_1/n, R_f$; u 是短路匝数 n_1 与该相总匝数 n 的比值, R_f 是短路支路的电阻。SPMSM 匝间短路故障在 abc 坐标系下的数学模型如下所示^[17-18]:

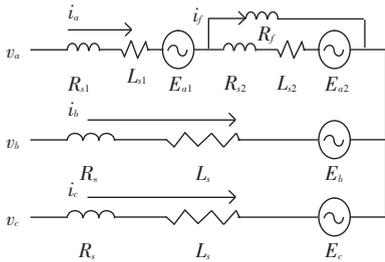


图 1 匝间短路永磁同步电机绕组示意图

Fig. 1 Winding schematic diagram of interturn short circuit permanent magnet synchronous motor

$$v_{[abc]} = R_{[abc]} i_{[abc]} + L_{sf} \frac{di_{[abc]}}{dt} + \frac{d\Psi_{[abc]}}{dt}, \quad (1)$$

$$v_{[abc]} = [v_a \quad v_b \quad v_c \quad 0]$$

$$i_{[abc]} = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_f]$$

$$L_{sf} = \begin{bmatrix} \hat{L}_a & M_{ab} & M_{ac} & -uL \\ \hat{M}_{ba} & L_b & M_{bc} & -uM \\ \hat{M}_{ca} & M_{cb} & L_c & -uM \\ -uL & -uM & -uM & -u^2L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{u} \end{bmatrix},$$

$$R_{[abc]} = \begin{bmatrix} \hat{R}_s & 0 & 0 & -uR_s \\ \hat{0} & R_s & 0 & 0 \\ \hat{0} & 0 & R_s & 0 \\ \hat{u}R_s & 0 & 0 & -uR_s - R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{u} \\ \dot{u} \end{bmatrix},$$

$$\dot{\Psi}_{abc} = \Psi_m [\cos(\theta_e) \cos(\theta_e - 2\pi/3) \cos(\theta_e + 2\pi/3) u \cos(\theta_e)]^T,$$

$$\frac{d\Psi_{abc}}{dt} = -w_e \Psi_m [\sin(\theta_e) \sin(\theta_e - 2\pi/3) \sin(\theta_e + 2\pi/3) u \sin(\theta_e)]^T. \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{dw}_e = \frac{1}{J} n_p (T_e - B \frac{w_e}{n_p} - T_m); \\ \dot{d\theta}_e = w_e. \end{cases} \quad (3)$$

$$T_e = \frac{E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c - E_f i_f}{w_e / n_p} = -n_p i_{[abc]}^T [\sin(\theta_e) \sin(\theta_e - 2\pi/3) \sin(\theta_e + 2\pi/3 - u \sin(\theta_e))]^T, \quad (4)$$

$$E_{a2} = E_f \quad E_{a1} + E_{a2} = E_a.$$

其中, $L_a = L_b = L_c = L; M_{ab} = M_{ac} = M_{bc} = M; n_p, w_e$ 分别是极对数和电角速度。由此可知, u, R_f 这两个参数决定电机是否出现匝间短路故障。

2 有匝间短路故障的 SPMSM 驱动系统仿真建模

仿真的电机参数见表 1。采用 $i_d = 0$ 的滞电流控制^[19],其矢量控制仿真如图 2 所示。

表 1 SPMSM 参数

Tab. 1 SPMSM parameters

电机参数	数值
极对数 n_p	3
相电阻 R_s / Ω	1.5
相电感 L_{sl} / mH	1.725
相互感 L_m / mH	0.028
永磁体磁链 Ψ_m / Wb	0.172 5
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 6

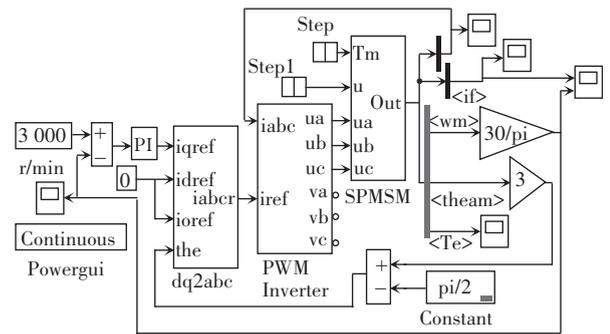


图 2 SPMSM 滞环电流矢量控制图

Fig. 2 SPMSM bang-bang current vector control

其思想是将电流给定信号与检测到的逆变器实际输出电流信号比较,若实际电流大于给定值,则改变逆变器的开关状态使之减小,反之增大。所以电机滞环电流控制系统包括一个转速控制环和一个采用 Bang-Bang 控制(滞环控制)。其中, SPMSM 模块是根据式(1)~式(4)搭建的。

3 仿真试验及分析

3.1 电机无故障情况

为了验证本文在 abc 坐标系下搭建的 SPMSM

定子匝间短路故障模型的正确性,仿真过程中用 Matlab-Simulink 自带的 dq 坐标系下的电机模型进行对比,令 $u = 0$ 。仿真结果如图 3~图 5 所示。由图 3~图 5 可以看出 2 个模型的速度响应、转矩、电流响应完全一致。并且电流高度对称,这正是电机无故障运行的特征。

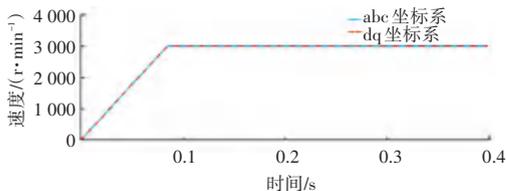


图 3 正常状态下两模型转矩响应对比

Fig. 3 Comparison of torque responses of two models under normal conditions

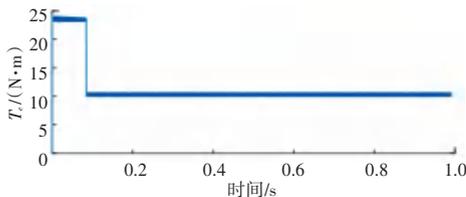


图 4 正常状态下两模型转矩响应对比

Fig. 4 Comparison of torque responses of two models under normal conditions

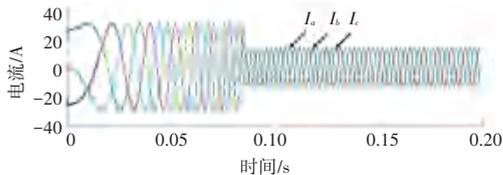


图 5 正常状态下两模型电流响应对比

Fig. 5 Comparison of current responses between two models under normal conditions

3.2 电机存在匝间短路故障情况

当 a 相发生匝间短路故障时,由式(1)~式(4)可知,只要赋予 u, R_f 值,就可以仿真电机匝间故障。

3.2.1 时域分析

令 $u = 0.5, R_f = 5 \Omega$; 0.2 s 时加入故障,进行仿真。仿真结果见图 6~图 9。

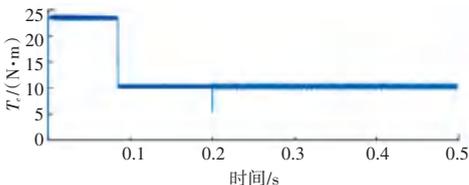


图 6 加入故障转矩响应

Fig. 6 Torque response with fault

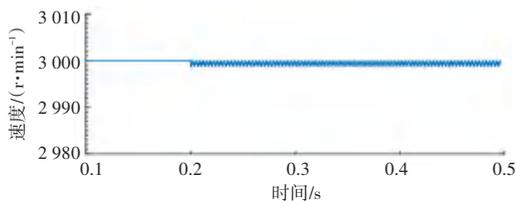


图 7 加入故障速度响应放大图

Fig. 7 Speed response magnification diagram with fault

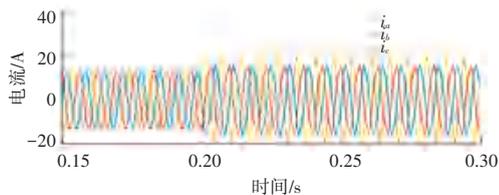


图 8 加入故障三相电流响应

Fig. 8 Three-phase current response with fault

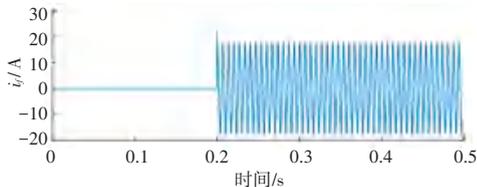


图 9 短路电流 i_f 响应

Fig. 9 Short circuit current i_f response

由式(1)~(4)可以导出短路电流的表达式:

$$i_f R_f = u R_a (i_a - i_f) + u [L_f]^T \frac{di_{[abc]}}{dt} - u^2 L \frac{di_f}{dt} + u \frac{d(\Psi_m \cos \theta_e)}{dt}, \quad (5)$$

$$L_f = [L \quad M \quad M]^T,$$

由于电机的感应特性,式(5)最后一项是最大的影响,因此 i_f 可以近似写成:

$$i_f \approx -\frac{u}{R_f} \omega_e \Psi_m \sin \theta_e. \quad (6)$$

当 u, R_f 一定时候, i_f 的幅值与转速成比例关系,把速度设置成一次函数线性增长得到 i_f 与转速关系如图 10 所示。

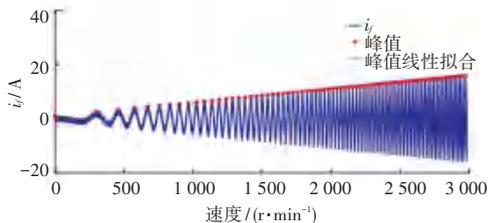


图 10 短路电流 i_f 随速度变化的关系

Fig. 10 Relationship between short circuit current i_f and velocity

由图 10 可见,仿真结果 i_f 的幅值确实与转速成比例关系。

分析图 6 与图 7 转矩响应和速度响应可知,当

故障加入后发生震荡,且速度震荡幅度不超过 3 000 r/min。图 8 中,当故障加入后三相电流增加,故障 a 相幅值大于其它两项,这正是匝间短路引起的特征,并且其大小与转速、转矩等成正比,限于篇幅,略去其余仿真结果。图 9 中当故障加入后短路电流出现,但此故障电流不能够直接测量。

3.2.2 频域分析

在图 6~图 7 中,当在 0.2 s 加入故障,转矩和速度都发生了震荡,说明当电机发生匝间短路故障时,会出现其它谐波,从而导致转矩和速度出现了震荡。接下来的仿真是在 Matlab 中对故障相 i_a 和速度做快速傅里叶变化(FFT)仿真分析,在仿真前做一些规定。基频 $f_1 = n_p n_{speed} / 60$, $\eta = (u / R_f) \cdot 100\%$ 。由于电磁转矩不易测得,所以对速度进行 FFT 分析,分析结果见表 2~表 4。

表 2 速度谐波成分与 η 变化的关系

Tab. 2 The relationship between velocity harmonic component with η

$\eta / \%$	谐波幅值						
	0	1	2	3	4	5	6
10	2 999.43	0.00	0.56	0.00	0.02	0.00	0.00
8	2 999.53	0.00	0.35	0.00	0.01	0.00	0.00
6	2 999.64	0.00	0.35	0.00	0.01	0.00	0.00
4	9 997.50	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2 999.87	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
0	2 999.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注: $n_{speed} = 3\ 000$ (r/min), $f_1 = 150$ Hz, $T_n = 10$ (N·m)

表 3 速度谐波成分与负载变化的关系

Tab. 3 The relationship between velocity harmonic component with load

转矩 /(N·m)	谐波幅值						
	0	1	2	3	4	5	6
10	2 999.43	0.00	0.56	0.00	0.02	0.00	0.00
8	2 999.61	0.00	0.55	0.00	0.02	0.00	0.00
6	2 999.86	0.00	0.53	0.00	0.02	0.00	0.00
4	3 000.18	0.00	0.52	0.00	0.02	0.00	0.00
2	3 000.52	0.00	0.51	0.00	0.02	0.00	0.00
0	3 000.90	0.00	0.50	0.00	0.02	0.00	0.00

注: $n_{speed} = 3\ 000$ (r/min), $f_1 = 150$ Hz, $\eta = 10\%$

表 4 开环、闭环速度谐波成分变关系

Tab. 4 The variable relationship between open-loop, closed-loop and velocity harmonic component

谐波序列	0	1	2	3	4	5	6
开环 正常	599.98	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
开环 故障	600.00	0.01	2.74	0.00	0.00	0.00	0.00
闭环 正常	600.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
闭环 故障	599.94	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00

注: $n_{speed} = 600$ (r/min), $f_1 = 30$ Hz, $T_m = 0$ (N·m), $\eta = 10\%$

表 2 结果表明,速度的二次谐波与 η 成正比。表 3 结果表明,速度二次谐波与负载转矩成正比。表 4 进一步证明了速度的二次谐波的产生是由故障而导致出现的。是否出现二次谐波与开环、闭环基本无关。

接下来对故障相电流 i_a 做 FFT 分析。分析结果如图 11~图 12 所示。

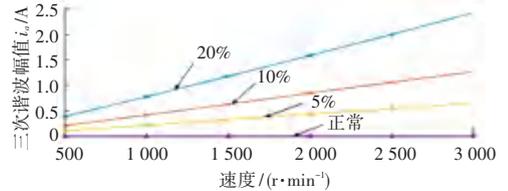


图 11 i_a 三次谐波与速度变化的关系

Fig. 11 Relationship between i_a third harmonic with speed

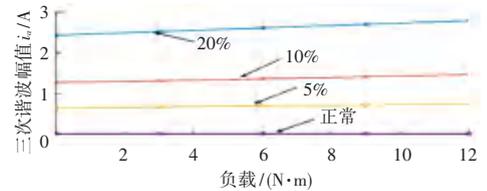


图 12 i_a 三次谐波与负载变化的关系

Fig. 12 The relationship between i_a third harmonic with variation

图 11~图 12 表明故障相电流三次谐波幅值与速度、负载幅值、 η 都成正比关系。但由于 FFT 只适合平稳状态,对于电机速度,负载变化的非平稳过程不适用,进一步在频域提取故障特征是值得研究的。

4 结束语

当电机定子发生匝间短路故障时,在时域上仿真分析得出以下结论:

- (1) 其转矩和速度发生振荡。
- (2) 相电流将增大,而且故障相电流大于非故障相电流。
- (3) 出现短路电流。

从频域上仿真分析得出如下结论:

- (1) 速度信号出现二次谐波,速度的二次谐波幅值与 η 和负载转矩成正比。
- (2) 故障相电流三次谐波幅值与速度、负载幅值、 η 都成正比关系。

由于电机运行在一个非平稳的状态,怎样提取这些故障特征进行故障诊断则亟待进一步去研究。

参考文献

[1] ZHENG Ping, ZHAO Jing, LIU Ranran, et al. Magnetic characteristics investigation of an axial-flux compound-structure PMSM used for HEVs[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 2191.