

一相开路时双三相永磁同步电机简化容错控制策略

王海兵^{1,2}, 赵荣祥¹, 汤胜清¹, 杨欢¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 台州学院 物理与电子工程学院, 浙江 台州 317000)

摘要: 一相开路时多相电机容错控制策略主要采用基于磁势不变的铜损和转矩优化, 降低了系统的动态性能; 而基于动态解耦的矢量控制, 则增加了系统的复杂度, 降低了切换过程的可靠性。从故障前后系统数学模型一致性和软硬件切换简洁性出发, 提出了一种中性点隔离的一相开路时双三相永磁同步电机容错控制系统; 将剩余有效绕组的作用等效为三相永磁同步电机和单相永磁同步电机的合成; 在旋转 dq 坐标系和静止坐标系融合系统中建立其动态数学模型。通过实验平台验证了该容错控制策略能够实现故障前后的软硬件兼容, 改善切换过程可靠性, 有效提升了系统的转矩输出能力。

关键词: 双三相永磁同步电机; 容错控制; 开路故障; 单相永磁同步电机; 故障分析; 可靠性

中图分类号: TM 761; TM 341

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.010

0 引言

与传统三相电机相比, 多相永磁同步电机最突出的优点在于其容错能力的提高, 随着相数的增加, 当发生一相开路或短路故障时, 对剩余相通过控制策略调整, 可实现容错控制, 系统的可靠性和可控性大幅提高。多相永磁同步电机在航空航天、风力发电、电动汽车、舰船推进系统及核电等大功率和高可靠性场合具有非常好的竞争力, 已经成为国内外学者的研究热点^[1-8]。

容错控制是指系统具有能够自动适应部件失效, 同时保证系统在故障后具有可接受的系统性能并保持系统稳定性的能力^[9]。双三相永磁同步电机驱动系统最常见的故障有电机的绕组开路和匝间短路故障、功率器件的开路和短路故障。通过硬件电路电气隔离的方式, 这些故障最终都可转化为开路故障, 等效为电机的缺相运行^[10]。

国内外学者对于一相开路时的多相电机容错控制策略进行了深入的研究, 最直观简便的方法就是将故障相所对应的整套绕组全部切出, 将故障后的电机等效为一传统的三相电机进行容错控制。文献^[11]对系统将故障相所对应的整套绕组全部切出时的综合性能进行了分析, 由于 PI 控制器参数的适应性较差, 对此相比于 2 套绕组正常运行, 故障后系统的动态性能较差, 对此提出了通过采用 TSKFNN-AMF 控制策略来优化提升故障后三相永磁同步电机的系统速度的动态跟踪能力。文献^[12]通过优化双三相永磁同步电机的设计, 提升每一套绕组的转矩过载能力,

从而提高故障后剩余三相永磁电机转矩的输出能力。该容错控制策略软硬件方案简单, 但代价是系统的功率和转矩输出能力将降低 50%。

为了提高多相电机一相开路容错运行时的功率和转矩输出能力, 需要充分利用所有剩余绕组。从电机稳态运行的角度, 要保证电机故障前后运行性能的不变, 只要保证总的磁势恒定不变。根据这一假设, 文献^[13]对中性点相连的多相电机在一相开路时维持总磁势不变进行了分析和计算, 并给出了参考解, 由于满足这一条件的各相电流解有无穷多个, 需要进一步的优化。文献^[14]将容错后电机的铜损最小作为优化目标, 而文献^[15]则将电流幅值最小、转矩最优作为系统的优化目标。基于总磁势不变的容错方法由于没有建立缺相运行时电机的动态数学模型, 其本质上是一种采用电流跟踪的策略, 追求系统的稳态性能的同时降低了系统的动态性能。

为了提高缺相运行时多相电机的系统运行性能, 需要建立精确的动态数学模型并进行解耦控制。文献^[16]通过坐标变换获得了一相开路时六相感应电机的动态解耦数学模型, 实现矢量控制。文献^[17]提出一种基于解析法的容错电流优化控制策略, 利用缺相状态下的扩展派克变换矩阵, 分别推导了基波和 3 次谐波同步旋转坐标系下一相开路时五相永磁同步电机的动态数学模型。文献^[18]从矢量空间解耦的角度, 推导缺相故障状态下的坐标变换矩阵, 建立了五相永磁同步电机在发生一相绕组开路故障时的解耦数学模型。文献^[10]根据定子磁势不变的原则, 以铜耗最小为目标, 建立缺一相的六相永磁同步电机在旋转坐标系下的数学模型, 提出缺相后的解耦矢量控制方法, 并且分析漏感和空间谐波对该容错控制下转矩脉动的影响, 提出相应的抑制方法。文献^[19]根据扩展六相静止变换矩阵和旋转坐标变换阵

收稿日期: 2017-01-13; 修回日期: 2017-10-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013-CB035600); 浙江省自然科学基金资助项目(LY15E070003)
Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB035600) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province(LY15E070003)

建立了缺一相的六相永磁同步发电机的电压和转矩数学模型,并且分析了经过扩展变换阵变换后的电压方程中 dq 子空间的耦合关系,提出了消除解耦后 d, q 轴电压耦合的 2 次旋转坐标变换矩阵。相比于磁势恒定的容错方法,上述建立在精确动态数学模型基础上的容错控制系统的复杂度大幅增加。

本文对一相开路时中性点隔离的双三相永磁同步电机进行了研究,提出了一种简化的控制策略。当发生一相绕组开路时,将剩余 5 相有效绕组等效为三相永磁同步电机和单相永磁同步电机的合成;并在同步旋转 dq 坐标系和静止坐标系融合系统中建立其动态数学模型;最后通过样机实验的方法验证了该控制策略的有效性。

1 双三相永磁同步电机的数学模型

如图 1 所示,本文所述的双三相永磁同步电机的 2 套三相绕组(A-B-C 和 a-b-c)之间电角度相移 30° ,2 个中性点间存在电气隔离。

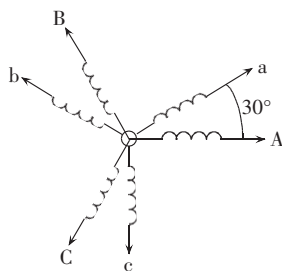


图 1 移相 30° 双三相永磁同步电机绕组结构

Fig.1 Winding structure of dual three-phase PMSM with phase-shift 30°

双三相永磁同步电机在同步旋转 dq 坐标系下的电压方程为^[20]:

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{d1} \\ \psi_{q1} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\psi_{q1} \\ \psi_{d1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{d2} \\ \psi_{q2} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\psi_{q2} \\ \psi_{d2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_{d1} \\ \psi_{q1} \\ \psi_{d2} \\ \psi_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{dd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & L_{qq} \\ L_{dd} & 0 & L_d & 0 \\ 0 & L_{qq} & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \\ \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $u_{d1}, u_{q1}, u_{d2}, u_{q2}$ 和 $i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}$ 分别为定子绕组在 dq 坐标系下的电压和电流; $\psi_{d1}, \psi_{q1}, \psi_{d2}, \psi_{q2}$ 为定子绕组在 dq 坐标系下的磁链; ψ_f 为永磁体磁链; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感; L_{dd}, L_{qq} 为 2 套绕组间互感; ω_e 为电角速度。

转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \{ [\psi_f i_{q1} + (L_d - L_q) i_{d1} i_{q1}] + [\psi_f i_{q2} + (L_d - L_q) i_{d2} i_{q2}] + (L_d - L_q) (i_{d1} i_{q2} + i_{d2} i_{q1}) \} \quad (4)$$

其中, n_p 为电机的极对数。

当控制 d 轴电流为 0 时,转矩方程可简化为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f (i_{q1} + i_{q2}) \quad (5)$$

由式(5)可知此时双三相永磁同步电机的 2 套绕组可近似等效为 2 台三相永磁同步电机。

机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - B\omega_r \quad (6)$$

其中, J 为转动惯量; ω_r 为机械速度; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数。

2 一相开路时双三相永磁同步电机的动态数学模型

一相开路时双三相永磁同步电机绕组结构如图 2 所示(假设 c 相发生开路故障)。在剩余有效绕组中,无故障的 A-B-C 绕组可如前述被等效为一台三相永磁同步电机,而故障绕组中剩余 a-b 绕组可被等效为一台单相永磁同步电机。为简化分析,忽略 2 套绕组间的互感作用。

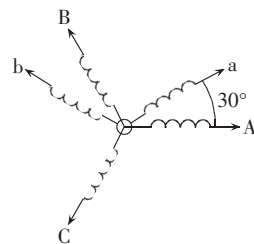


图 2 c 相绕组开路时双三相永磁同步电机绕组结构

Fig.2 Winding structure of dual three-phase PMSM under phase-c open-circuited condition

忽略正常三相 A-B-C 绕组与 a-b 绕组互感, A-B-C 绕组在旋转同步 dq 坐标系下的数学模型如下。

电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u'_{d1} \\ u'_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{d1} \\ i'_{q1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi'_{d1} \\ \psi'_{q1} \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\psi'_{q1} \\ \psi'_{d1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi'_{d1} \\ \psi'_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{d1} \\ i'_{q1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

转矩方程为:

$$T_{e1} = \frac{3}{2} n_p [\psi_f i'_{q1} + (L_d - L_q) i'_{d1} i'_{q1}] \quad (9)$$

一相开路时剩余 a-b 绕组被等效为一单相永磁同步电机,忽略其与 A-B-C 绕组互感后,其在静止坐标系下的数学模型如下。

电压方程为:

$$u_{ab} = R_{ab} i_{ab} + d\psi_{ab}/dt \quad (10)$$

磁链方程为:

$$\psi_{ab} = L_{ab} i_{ab} + \psi_f \cos \theta_s \quad (11)$$

转矩方程为:

$$T_{e2}=n_p\psi_f i_{ab}\sin\theta_s \tag{12}$$

$$\theta_s=\theta_e+\Delta\theta \tag{13}$$

其中, u_{ab} 、 R_{ab} 、 i_{ab} 、 L_{ab} 、 ψ_{ab} 分别为单相永磁同步电机的相电压、电阻、电流、电感以及磁链; θ_s 为剩余 a-b 绕组与转子间的相对位置; $\Delta\theta$ 为六相绕组中一相出现开路故障时的补偿值, 该值如表 1 所示。

表 1 一相开路时剩余相绕组电角度补偿值

Table 1 Electrical degree compensation value of remaining winding under one phase open-circuited condition

故障相	单相绕组电流	$\Delta\theta/(\circ)$	
		正转时	反转时
A	i_{BC}	90	270
B	i_{CA}	30	210
C	i_{AB}	-30	150
a	i_{bc}	120	300
b	i_{ca}	60	240
c	i_{ab}	0	180

为了优化转矩和电流控制, 剩余的单相永磁同步电机的相电流可控制为正弦波形, 即:

$$i_{ab}=I_{ab}\sin\theta_s \tag{14}$$

$$T_{e2}=n_p\psi_f I_{ab}\sin^2\theta_s \tag{15}$$

由式(15)可知 T_{e2} 为一个脉动的电磁转矩, 其脉动频率为给定相电流的 2 倍频, 则一相开路时双三相永磁同步电机在该容错控制策略下的电磁转矩为:

$$T_e=T_{e1}+T_{e2} \tag{16}$$

3 控制策略实现

3.1 主电路硬件实现

具有故障隔离功能的双三相永磁同步电机主电路硬件控制系统如图 3 所示。该硬件系统由 6 个桥臂组成, 以 A 相桥臂为例, 每一个桥臂由快速熔断器 FTF_A、全控型功率开关器件 V_{T1} 、 V_{T2} 和常闭继电器 KA 组成。

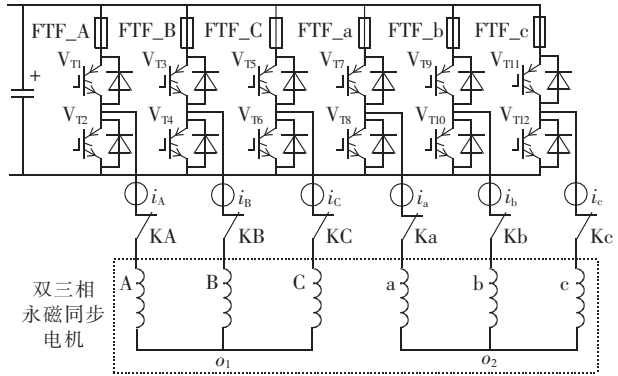


图 3 具有故障隔离的双三相永磁同步电机主电路
Fig.3 Main circuit of dual three-phase PMSM drive system with fault winding isolation

对于电气传动控制系统, 故障的类型主要有功率

开关器件的短路和开路以及电机相绕组的匝间短路和开路 4 种情况。如图 3 所示, 以 c 相为例, 当系统检测到故障时, FTF_c 快速熔断作为主动保护, 保护功率器件, 封锁 V_{T11} 和 V_{T12} 开关管的驱动信号, 打开常闭继电器 Kc 隔离故障相 c 相, 从而保证了系统发生故障时能够隔离故障, 进行容错控制, 防止故障的传递。从电机容错控制的角度而言, 这 4 种故障最终都等效为一相绕组的开路故障。

3.2 双三相永磁同步电机正常运行时控制策略

在双 dq 模型下正常运行时双三相永磁同步电机的控制系统如图 4 所示。如前文数学模型推导所示, 该系统可以近似等效为 2 套三相永磁同步电机控制器, 包含 1 个速度环 PI 控制器和 4 个电流环 PI 控制器, 2 套 Clark-Park 变换角度相差 30° 。

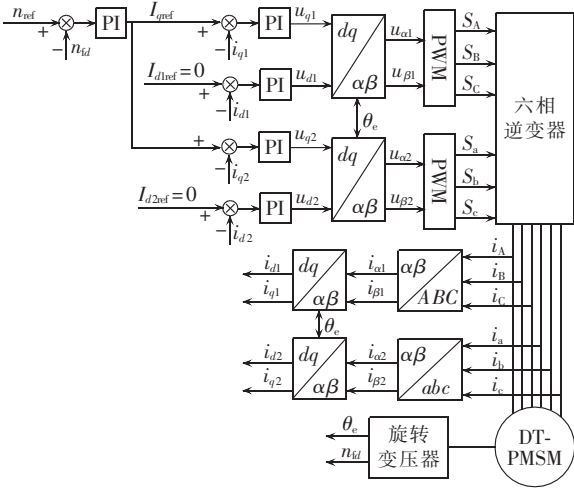


图 4 正常运行时双三相永磁同步电机的控制系统框图
Fig.4 Diagram of dual three-phase PMSM drive system under healthy condition

速度环给定值与反馈值经速度环 PI 控制器得到 q 轴电流的给定值, 该给定值将同时作为 2 个 q 轴电流的参考值, 2 个 d 轴参考值设为 0, 这样就可以保证 2 套绕组具有相等的电流幅值和功率输出。最终通过 2 套传统的三相 SVPWM 实现双 dq 坐标系下双三相永磁同步电机调速控制系统。

3.3 一相开路时双三相永磁同步电机容错运行控制策略

c 相开路时双三相永磁同步电机容错控制系统如图 5 所示。对于正常的三相 A-B-C 绕组, 采用 3.2 节的传统矢量控制策略来实现; 而对于发生 c 相开路故障的 a-b-c 绕组, 对于故障相 c 相采用前述的方法进行电气隔离, 对剩余的 a-b 相绕组采用等效单相绕组方式进行控制。

速度给定值与速度反馈值经速度 PI 控制器后得到转矩电流给定值, 该给定值将作为正常三相 A-B-C 绕组在 dq 坐标系下 q 轴电流的给定值, 同时也

相比于三相的 12.5 r/min 略有增加。

图 8(a)为双三相永磁同步电机正常运行时的定子磁链轨迹,该磁链轨迹为一个圆,可以产生恒定的电磁转矩。当发生一相开路故障时,如果将故障相切除,对剩余 A-B-C 绕组采用传统的矢量控制策略时,也可以产生如图 8 所示的圆形旋转磁链,但是输出最大的幅值减少一半。图 8(b)为本文所采用的一相开路时将剩余 a-b 相等效为单相电机时的定子旋转磁链轨迹,该定子旋转磁链轨迹为一椭圆形,其中的长轴约为短轴的 2 倍。这意味着电机的电磁转矩为一含有脉动分量的转矩,与前面转矩公式所述一致,该转矩的脉动频率为电流频率的 2 倍。假设电机运行于额定转速 900 r/min,则转矩的脉动频率为 150 Hz。由于电机系统本身是一个具有较大机械惯量的系统,对转矩的高频脉动分量具有很好的滤波作用。如图 8(b)转速波形所示,切换前后速度没有发生较大的脉动,基本保持一致。

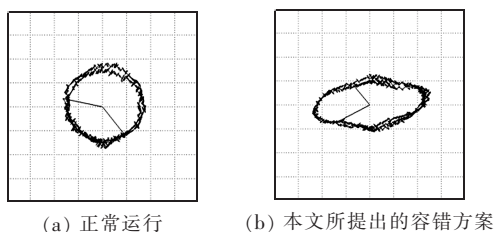


图 8 定子磁链轨迹
Fig.8 Stator flux trajectory

5 结论

本文以中性点隔离、相移 30° 的双三相永磁同步电机为研究对象,从故障前后系统数学模型和软硬件切换简洁性出发,对一相开路时双三相永磁同步电机容错控制策略进行了研究,主要结论如下:

a. 将一相开路时双三相永磁同步电机等效为三相永磁同步电机和单相永磁同步电机的合成,充分利用了非故障相的剩余绕组,提高了功率和转矩输出能力,虽然存在一定的转矩脉动,但是通过转子机械惯量能够得到较好的抑制,满足容错运行的要求;

b. 在旋转 dq 坐标系和静止坐标系融合系统中建立一相开路后双三相永磁同步电机的简化动态数学模型,并通过实验验证了该策略的有效性和简洁性;

c. 该容错控制策略硬件电路简单可靠,故障前后数学模型一致性较高,软件实现简便,切换操作简便,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] LEVI E. Multiphase electric machines for variable-speed applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1893-1909.
[2] HU Y, ZHU Z Q, LIU K. Current control for dual three-phase PM

synchronous motors accounting for current unbalance and harmonics[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 272-284.

- [3] 于飞, 张晓锋, 李槐树. 一种多相永磁同步电动机的最佳转矩控制[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 19-22.
YU Fei, ZHANG Xiaofeng, LI Huaishu. Optimum torque control of poly-phase permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7): 19-22.
[4] 魏自聪, 章国宝. 直驱式六相永磁同步风力发电机最佳风能追踪控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 97-101.
WEI Zicong, ZHANG Guobao. Optimal wind energy tracking control of directly-driven six-phase PMSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 97-101.
[5] DIAB M S, ELSEROUGI A A, ABDEL-KHALIK A S, et al. A nine switch converter-based integrated motor drive and battery charger system for EVs using symmetrical six-phase machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5326-5335.
[6] 郑萍, 王勃, 吴帆, 等. 电动汽车用双三相永磁同步电机饱和和电感特性分析及计算方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 19-25.
ZHENG Ping, WANG Bo, WU Fan, et al. Analysis and calculation method of saturated inductance of a dual-three phase permanent-magnet synchronous machine for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 19-25.
[7] 郭思源, 周理兵, 齐歌. 双三相永磁同步电机电磁性能解析计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 17-28.
GUO Siyuan, ZHOU Libing, QI Ge. Analytical calculation of electromagnetic performance in dual three-phase permanent magnet brushless AC machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 17-28.
[8] 周长攀, 苏健勇, 杨贵杰. 双三相永磁同步电机全调制比范围空间矢量脉宽调制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 90-100.
ZHOU Changpan, SU Jianyong, YANG Guijie. The SVPWM strategy in full modulation region for dual three-phase PMSM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 90-100.
[9] ZHANG Y, JIANG J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(2): 229-252.
[10] 王永兴, 温旭辉, 赵峰. 六相永磁同步电机缺相容错控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 49-58.
WANG Yongxing, WEN Xuhui, ZHAO Feng. The fault-tolerant control for six-phase permanent magnet synchronous machine with one phase failure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 49-58.
[11] LIN F J, HUNG Y C, HWANG J C, et al. Fault-tolerant control of a six-phase motor drive system using a Takagi-Sugeno-Kang type fuzzy neural network with asymmetric membership function[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3557-3572.
[12] JIANG Xuefeng, HUANG Wenxin, CAO Ruiwu, et al. Electric drive system of dual-winding fault-tolerant permanent-magnet motor for aerospace applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7322-7330.
[13] FU J R, LIPO T A. Disturbance-free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(5): 1267-1274.
[14] SHAMS-NEJAD M A, NAHID-MOBARAKEH B, PIERFEDERICI S, et al. Fault tolerant and minimum loss control of double-star

- synchronous machines under open phase conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(5):1956-1965.
- [15] 白洪芬,朱景伟,孙军浩,等. 双绕组永磁容错电机不同故障容错控制策略的比较研究[J]. 电工技术学报,2016,31(13):189-199.
- BAI Hongfen,ZHU Jingwei,SUN Junhao,et al. Comparative study of different fault tolerant control strategies for dual-winding fault tolerant permanent magnet motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(13):189-199.
- [16] ZHAO Y,LIPO T A. Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural unbalance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1996,11(3):578-584.
- [17] 赵品志,杨贵杰,李勇. 五相永磁同步电动机单相开路故障的容错控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(24):68-76.
- ZHAO Pinzhi,YANG Guijie,LI Yong. Fault-tolerant control strategy for five-phase permanent magnetic synchronous motor under single phase open-circuit fault condition[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(24):68-76.
- [18] 高宏伟,杨贵杰,刘剑. 五相永磁同步电机容错控制策略[J]. 电机与控制学报,2014,18(6):61-65.
- GAO Hongwei,YANG Guijie,LIU Jian. Fault-tolerant control strategy for five-phase permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control,2014,18(8):61-65.
- [19] 刘剑,苏健勇,杨贵杰,等. 六相永磁同步发电机容错控制的谐波补偿研究[J]. 电机与控制学报,2014,18(1):1-10.

- LIU Jian,SU Jianyong,YANG Guijie,et al. Study of harmonic compensation for six-phase PMSG in fault tolerant control[J]. Electric Machines and Control,2014,18(1):1-10.
- [20] 杨金波,杨贵杰,李铁才. 双三相永磁同步电机的建模与矢量控制[J]. 电机与控制学报,2010,14(6):1-7.
- YANG Jinbo,YANG Guijie,LI Tiecai. Modeling and vector control for dual three-phase PMSM[J]. Electric Machines and Control,2010,14(6):1-7.

作者简介:



王海兵

王海兵(1982—),男,浙江台州人,博士研究生,主要研究方向为多相电机及其驱动技术(E-mail:gmwhb@126.com);

赵荣祥(1962—),男,浙江金华人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为交流调速系统、分布式发电与微电网、储能系统及其应用等;

汤胜清(1977—),男,湖南株洲人,博士研究生,主要研究方向为分布式发电与微电网、储能系统及应用;

杨欢(1981—),男,江苏南通人,副教授,博士,主要研究方向为微电网与并网变换控制、电机及控制(E-mail:yanghuan@zju.edu.cn)。

Simple fault tolerant control of dual three-phase PMSM under one phase open-circuited condition

WANG Haibing^{1,2},ZHAO Rongxiang¹,TANG Shengqing¹,YANG Huan¹

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University,Hangzhou 310027,China;

2. College of Physical and Electronic Engineering,Taizhou College,Taizhou 317000,China)

Abstract: The fault tolerant control strategy of the multi-phase motor under one phase open-circuited condition focus on copper loss minimization and torque optimization based on the constant magnetic motive force,which decreases the dynamic performance of the system,and the dynamic decoupling vector control increases the system complexity and reduces the reliability of switching process. In order to achieve the consistency of the mathematical model and the simplicity of the hardware and software design before and after the fault,a fault-tolerant control method of dual three-phase PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) under one phase open-circuited fault is proposed,which makes the remaining active windings equivalent to the combination of three-phase PMSM and single-phase PMSM. The mathematical model of dual three-phase PMSM is established in the combined rotating dq and stationary reference frame. Experimental results prove that the proposed fault-tolerant control method can realize the effective compatibility of the software and hardware,improve the reliability of the switching process,and enhance the magnetic torque of the system.

Key words: dual three-phase PMSM; fault-tolerant control; open-circuited fault; single-phase PMSM; failure analysis; reliability