

一种具有抑制匝间短路失磁能力的 永磁同步发电机*

赵 鑫, 王淑红, 白崙儒

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 绕组匝间短路故障是永磁同步发电机(PMSG)最为常见的故障之一, 容易造成永磁体的不可逆失磁。为了解决失磁问题, 提出了一种具有抑制匝间短路下不可逆失磁能力的特种 PMSG。首先介绍了发电机的特殊结构, 紧接着通过数学模型推导出抑制失磁的原理。利用 Flux 软件建立发电机的模型, 对发电机在运行过程中突然发生的匝间短路故障进行仿真。以永磁体各点在短路过程中出现的最小磁密值是否低于相应温度下退磁曲线的膝点磁密值为判断依据, 分析得到发电机在不同短路故障下永磁体的失磁情况, 从而验证了抑制失磁的可行性。

关键词: 永磁同步发电机; 匝间短路故障; 抑制失磁; 磁密

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)03-0038-07

doi: 10.12177/emca.2019.165

A Permanent Magnet Synchronous Generator with the Ability to Suppress the Interturn Short Circuit Demagnetization*

ZHAO Xin, WANG Shuhong, BAI Yinru

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Winding interturn short circuit fault is one of the most common faults of permanent magnet synchronous generator (PMSG), which usually causes irreversible demagnetization of permanent magnet. In order to solve the problem, a special PMSG with the ability to suppress irreversible demagnetization of the interturn short circuit is established. The special structure of the generator is introduced, and then the theory of suppressing demagnetization is explained through mathematic deduction. The model of the generator is established by Flux software and sudden interturn short circuit fault of the generator during the operation is simulated. The minimum magnetic flux density value at each point of the permanent magnet in the short circuit process is compared with the inflexion magnetic flux density of the demagnetization curve at the corresponding temperature. According to this, the demagnetization of permanent magnet under different short circuit faults is analyzed and the feasibility of suppressing demagnetization is verified.

Key words: permanent magnet synchronous generator (PMSG); interturn short circuit fault; suppression of demagnetization; magnetic flux density

收稿日期: 2019-11-18; 收到修改稿日期: 2019-12-31

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477110); 山西省应用基础研究项目面上青年基金项目(201701D221145)

作者简介: 赵 鑫(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

王淑红(1965—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

白崙儒(1983—), 男, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

0 引言

匝间短路产生的去磁磁场会造成永磁体的不可逆失磁,是永磁同步电机(PMSM)在应用中的难点之一。目前,关于PMSM的退磁分析成果颇丰,但针对退磁问题的解决尚未有实质性突破,普通电机无法解决这一问题。为此,本文提出了一种具有抑制匝间短路下不可逆失磁能力的特种永磁同步发电机(PMSG)。

关于PMSM在不同工况下的退磁情况的研究成果相对丰富,大多分析不同的PMSM在发生单相、多相短路或匝间短路时,冲击电流对永磁体造成的退磁影响,包括退磁区域的大小和最大退磁工作点^[1-5]。文献[6]利用有限元分析(FEA)软件计算三相短路后的磁密值,通过工作点是否在退磁曲线的线性部分来判断是否发生了不可逆失磁。文献[7]运用有限元仿真软件获取短路后的磁密图,可以直观得出退磁、失磁范围的大小。文献[4]利用FEA软件计算平均去磁工作点,判断是否发生不可逆失磁,并用短路电流的合成磁动势(MMF)来验证,但是忽略了磁密变化的动态性,没有计及瞬态变化过程中磁密的变化,若永磁体在任一时刻的磁密值低于退磁曲线的不可逆拐点,则永磁体将永久性失磁。文献[8]进行永磁直流电机的空载试验,转速异常升高越多,失磁越严重,该方法成本高,导致电机受损严重,不可取。文献[9]通过放大磁密矢量的局部图,与正常情况对比,根据密度是否变小来判断发生退磁,所得到的结果不够精准。文献[10]提取永磁体上每个工作点的磁密值,组成一个范围,低于退磁曲线膝点的部分即失磁。但该方法忽略了不同温度下的剩磁不同,计算出的磁密结果不准确。

针对以上问题,设计了一种具有抑制匝间短路下不可逆失磁能力的特种PMSG,对1匝短路、9匝(53%线圈)短路和17匝(100%线圈)短路故障进行了研究,验证该容错电机可以避免不可逆失磁,同时自动实现匝间短路容错。首先,进行了抑制失磁的理论推导;然后,运用Flux软件建立了电机的模型;接着,导入宏文件,提取不同计算步(时刻)的永磁体的磁密Mod(B),作对比,保留最小值,生成磁密云图;最后,根据最小磁密值是否低于永磁体材料的不可逆失磁的拐点来确定永

磁体在不同短路故障下是否发生退磁。

1 电机模型及退磁理论

图1为具有抑制匝间短路下不可逆失磁能力的背绕式PMSG实体图。该电机6极27槽,内转子,定子内外径两侧同时开槽;绕组背绕式缠绕,所有线圈的缠绕方向相同,包含三相绕组,每相绕组含有9个串联线圈,短路匝比为100%表示故障相中的其中一个线圈整体短路。由于特殊的结构和绕线方式,使得该容错电机的参数满足:(1)三相对称绕组;(2)相间互感数值为正值;(3)相自感与相互感近似相等且数值较大。

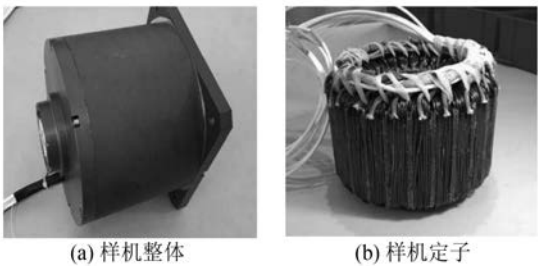


图1 样机实体图

图2所示为具有抑制匝间短路失磁能力的PMSG有限元模型。电机主要设计参数如表1所示。

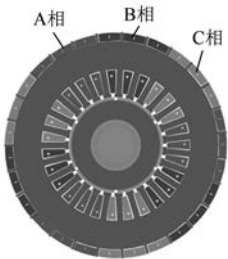


图2 具有抑制匝间短路失磁能力PMSG有限元模型

表1 电机主要设计参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定输出功率/kW	1	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
额定整流电压/V	50	定子内径/mm	67
气隙长度/mm	1	定子铁心轴向长度/mm	80
极数	6	每相绕组串联匝数	153
定子铁轭高度/mm	20	定子铁心质量/kg	6.38
转子质量/kg	1.8	轴质量/kg	1.62
总质量/kg	16.98		

在实际应用中,绝大多数情况下PMSG并不直接与负载相连,而是连接整流器,将交流转换为

直流后再进行变换。正常工况下的电路图如图3所示。

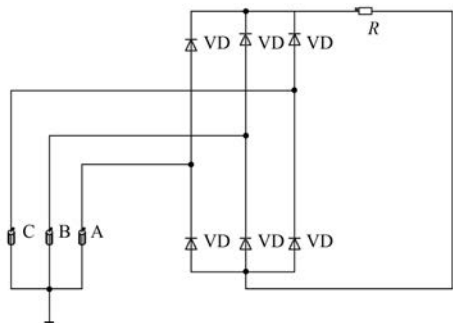


图3 正常工况下的电路图

该PMSG采用型号为N42的永磁体材料,可在80℃的最高温度下运行,但通常在40℃下进行退磁。图4为永磁体材料在3个温度下的退磁曲线。从图4可以看出,当永磁体工作在20℃时,退磁曲线几乎是一条直线,永磁体工作在正常状态;但当永磁体工作在约40℃时,退磁曲线开始出现拐点,当退磁磁场强度超过拐点对应值之后,退磁曲线迅速降为零,永磁体发生不可逆退磁。由永磁体工作特性可知,其工作温度越高,发生失磁的可能性也就越大。工作温度为20、40℃时,永磁材料发生不可逆失磁的膝点磁密为0.04、0.42 T,剩磁分别为1.32、1.29 T。本文中,若永磁体出现低于拐点磁密值的区域,则判断该部分产生退磁现象。

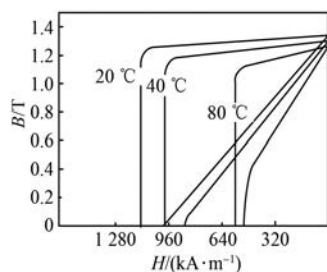


图4 N42材料的退磁曲线

抑制失磁原理如下:对于所有电机, $L=L_m+L_\sigma$, $M=M_m+M_\sigma$ 。其中, L_m 是与通过气隙的主通量相对应的分量,为主自感; L_σ 是对应于通过轭部的漏磁通的分量,称为漏自感; M_m 称为主互感, M_σ 称为漏互感。普通永磁电机只计及主自感、主互感,漏自感、漏互感因太小而被忽略。该电机由

于并联磁路的设计,漏自感、漏互感的值大于主自感、主互感。

图5所示为只有A相绕组通电时轭部环形漏磁通(为了简明,图中未画主磁通),可见轭部环形漏磁与B相、C相完全匝链。

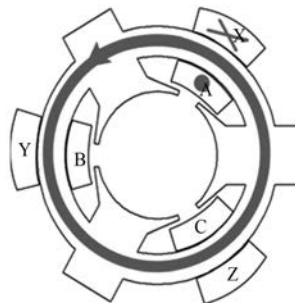


图5 只有A相绕组通电时轭部环形漏磁通

漏自感、漏互感计算式如下:

$$L_\sigma = N^2 \Lambda_\sigma \quad (1)$$

$$L_m = N^2 \Lambda_m \quad (2)$$

式中: N 为线圈匝数; Λ_σ 为轭部磁导; Λ_m 为过气隙的磁导。

由图5及式(1)、式(2)可知, $L_\sigma \gg L_m$,即轭部磁导远远大于通过气隙的磁导,轭部环形漏磁通量远远多于主磁通量。同理, $M_\sigma \gg M_m$ 。发电机的每相自感 L 和相间互感 M 较大,并且二者近似相等。因此, $L=L_m+L_\sigma \approx L_\sigma$, $M=M_m+M_\sigma \approx M_\sigma$ 。综合以上得知: $L \approx M$ 。

短路电路图如图6所示。

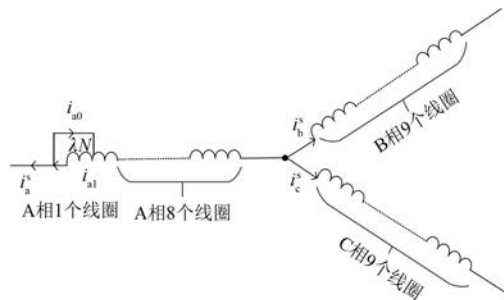


图6 短路电路图

图6中, λ 为短路匝数比,即短路匝数/每相总匝数; N 为一相的总匝数。

由图6可知,该电机由 i_{a0} 产生的磁通对永磁体产生退磁效应。可推导出A相 λN ($0 < \lambda \leq 1/9$)匝短路时的电压方程(r 值相对于 L 较小,故忽略

内阻)如下:

$$\begin{aligned} 0 &= \lambda e_a - \lambda^2 L \frac{di_{a1}}{dt} - \lambda M \frac{di_b^s}{dt} - \lambda M \frac{di_c^s}{dt} - \\ &\lambda(1-\lambda)L \frac{di_a^s}{dt} = \\ &\lambda \left[e_a - (L-M) \frac{di_a^s}{dt} - \lambda L \frac{di_{a0}}{dt} \right] = \\ &e_a - (L-M) \frac{di_a^s}{dt} - \lambda L \frac{di_{a0}}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_a^s &= (1-\lambda)e_a - (1-\lambda)^2 L \frac{di_a^s}{dt} - \\ &(1-\lambda)M \left(\frac{di_b^s}{dt} + \frac{di_c^s}{dt} \right) - \lambda(1-\lambda)L \frac{di_{a1}}{dt} = \\ &(1-\lambda) \left[e_a - (L-M) \frac{di_a^s}{dt} - \lambda L \frac{di_{a0}}{dt} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_b^s &= e_b - L \frac{di_b^s}{dt} - r i_b^s - M \frac{di_c^s}{dt} - \lambda M \frac{di_{a1}}{dt} - \\ &(1-\lambda)M \frac{di_a^s}{dt} = \\ &e_b - (L-M) \frac{di_b^s}{dt} - \lambda M \frac{di_{a0}}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} u_c^s &= e_c - L \frac{di_c^s}{dt} - r i_c^s - M \frac{di_b^s}{dt} - \lambda M \frac{di_{a1}}{dt} - \\ &(1-\lambda)M \frac{di_a^s}{dt} = \\ &e_c - (L-M) \frac{di_c^s}{dt} - \lambda M \frac{di_{a0}}{dt} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: e_a 、 e_b 、 e_c 为 A、B、C 三相反电动势; u_a^s 、 u_b^s 、 u_c^s 为 A、B、C 三相短路后的相电压; i_a^s 、 i_b^s 、 i_c^s 为 A、B、C 三相短路之前的电流; i_a^s 、 i_b^s 、 i_c^s 为 A、B、C 三相短路后的电流; i_{a0} 为短路电流; i_{a1} 为流经短路绕组电流。

式(3)~式(6)是 A 相匝间短路后的数学模型,可得短路线圈的电压方程简化过程如下:

$$e_a = (L-M) \frac{di_a^s}{dt} - \lambda L \frac{di_{a0}}{dt} \approx -\lambda L \frac{di_{a0}}{dt} \quad (7)$$

并且,

$$e_a = \lambda N \frac{d\Phi_{i_{a0}}}{dt} \quad (8)$$

式中: $\Phi_{i_{a0}}$ 包括过气隙的磁通和只流经轭部的磁

通。因此有:

$$\Phi_m = \Phi_{i_{a0}} - \Phi_\sigma \quad (9)$$

式中: $\Phi_{i_{a0}}$ 为电流 i_{a0} 产生的磁通; Φ_m 为过气隙的磁通; Φ_σ 为只流经轭部的磁通。

由式(8)可知, e_a 主要是由 $\Phi_{i_{a0}}$ 决定,且由于轭部磁阻小,该电机的磁通绝大部分流经轭部,而非通过气隙交链永磁体,故 Φ_m 非常小。

$$F_m^s = \Phi_m R_m \quad (10)$$

式中: R_m 为过气隙磁阻总和; F_m^s 为过气隙磁动势,即去磁磁动势。

由式(10)可知,去磁磁动势非常小。为了验证去磁磁通非常小,利用有限元计算匝间短路前后通过短路线圈所在极下的气隙磁通量,如表 2 所示。

表 2 短路线圈所在极下的气隙磁通

匝数	Φ/Wb (短路前)	Φ/Wb (短路后)
1 匝	5.18×10^{-3}	4.7897×10^{-3}
9 匝	5.18×10^{-3}	4.7900×10^{-3}
17 匝	5.18×10^{-3}	4.7960×10^{-3}

由表 2 可知,各种匝间短路前后气隙磁通变化非常小,最大只变化了 7.5%,即去磁磁通 Φ_m 非常小,因此去磁磁动势很小,不会造成失磁。

传统 PMSG 引起的磁通主要是流经气隙的磁通,即 Φ_m 非常大,则 $F = \Phi_m R_m$ 很大。因此,本文提出的特种 PMSG 只产生了微弱的退磁作用,不会导致永磁体发生不可逆失磁。

2 不同匝间短路情况下的退磁分析

为了实现具有匝间短路容错能力的 PMSG 匝间短路故障,需要先在 Flux 软件中建立该电机的 2D 全模型,再进行修改建立其短路匝绕组模型。图 7 为 1 匝、9 匝短路模型的局部放大图。该电机每相 153 匝,每相绕组有 9 个线圈,每个线圈 17 匝,故建立了一个 17 匝短路的模型,即一个线圈发生短路,局部放大图如图 8 所示。在 circuit editor context 里搭建单线圈短路的外部电路,如图 9 所示。其中, A_{down} 代表短路绕组。由于该电机绕组的端部漏感值和相电阻值非常小,故忽略不计。

基于电机短路电流小的特性,永磁体的工作温度一般不会超过 40 °C,因此只考虑永磁体工作

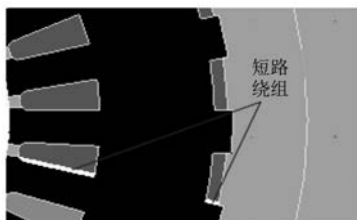


图7 电机1匝、9匝短路故障模型



图8 电机17匝短路故障模型

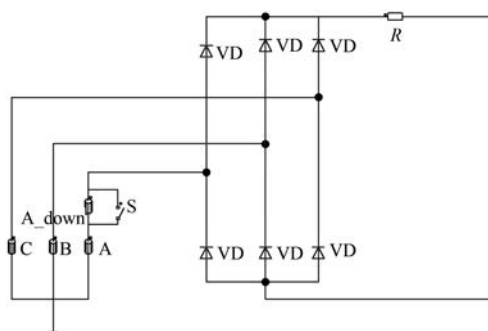
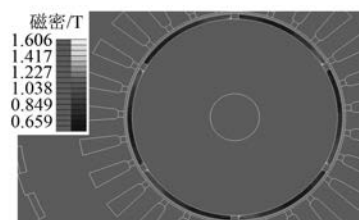


图9 短路故障外电路

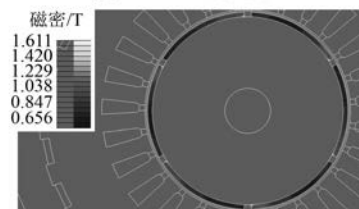
在 20 ℃ 和 40 ℃ 时的退磁。计算之后,添加 CheckDemagnetizationFace.PFM 文件获取永磁体每一点的最低磁密值,磁密云图如图 10~图 13 所示。由图 10~图 13 可知,与 A 相正常工作时相比,一个线圈的 1 匝、9 匝、17 匝短路时的磁密云图变化较小。即当永磁体的工作温度为 20~40 ℃ 时,永磁体各工作点的最小磁密值虽低于正常工作时磁密值,即发生了不同程度的退磁,但均大于不可逆失磁点,因此不存在磁损失风险。此外,在相同的短路匝数下,温度越高,最小磁密度越小,发生失磁的可能性也就越大。

3 不同匝间短路情况下的电流分析

电机按额定负荷运行,在 0.012 s 时,开关关闭,电机发生匝间短路故障。图 14~图 16 分别为

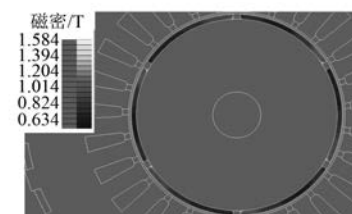


(a) 20 ℃ 磁密分布图

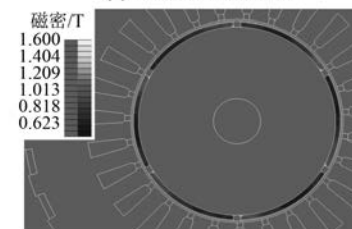


(b) 40 ℃ 磁密分布图

图 10 A 相正常工作时永磁体磁密分布图

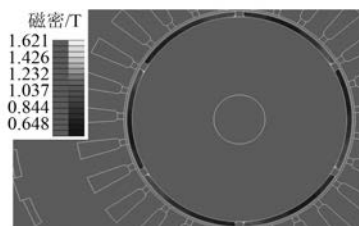


(a) 20 ℃ 磁密分布图

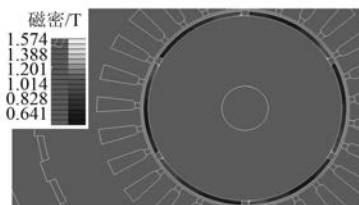


(b) 40 ℃ 磁密分布图

图 11 A 相 1 匝短路故障时永磁体磁密分布图



(a) 20 ℃ 磁密分布图



(b) 40 ℃ 磁密分布图

图 12 A 相 9 匝短路故障时永磁体磁密分布图

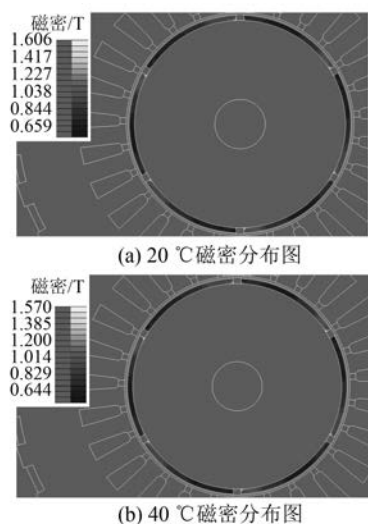


图 13 A 相 17 匝短路故障时永磁体磁密分布图

A 相 1 匝、9 匝短路和 A 相 17 匝短路故障时的三相电流波形、短路电流和直流侧输出电流波形。

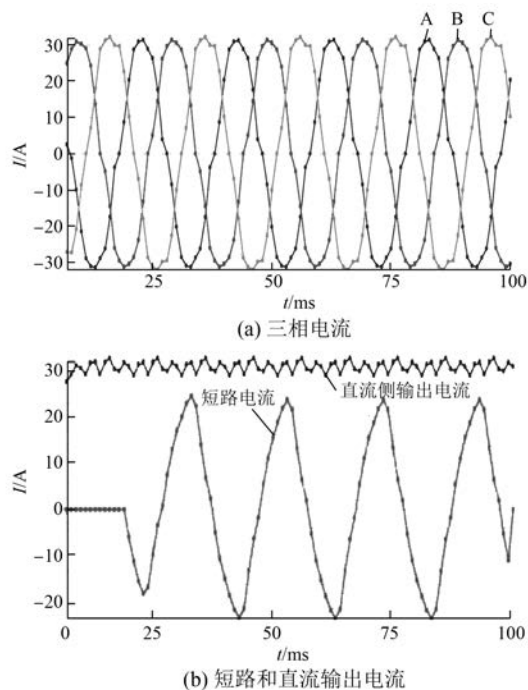


图 14 A 相 1 匝短路时电流波形

由图 14~图 16 可知,A 相发生 1 匝、9 匝和 17 匝短路故障时,交流侧故障相的相电流分别保持不变,短路电流的最大值分别为 24、3、2 A,直流侧输出电流(即负载上的电流)几乎相等。还可以看出,不同程度短路故障条件下的短路电流均小于额定电流,说明该发电机样机可以有效地

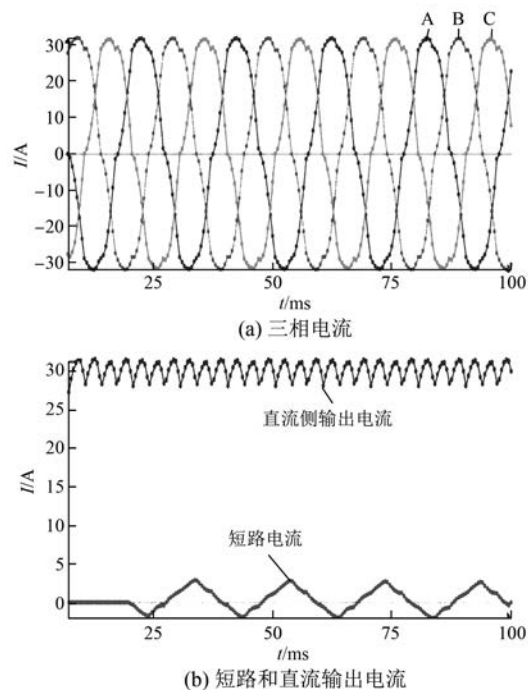


图 15 A 相 9 匝短路时电流波形

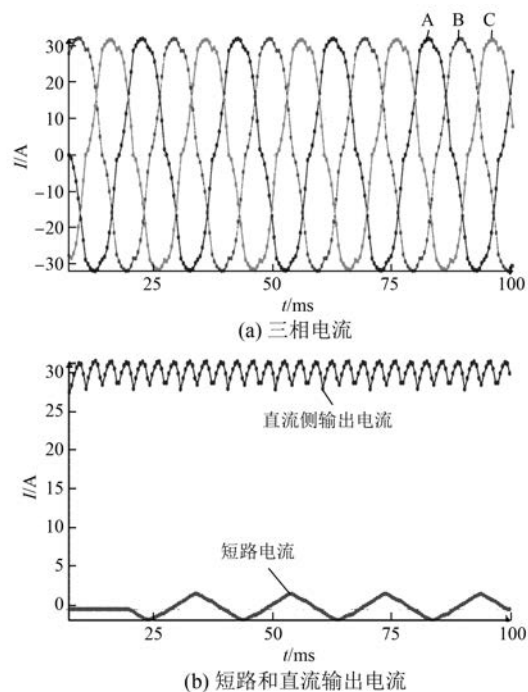


图 16 A 相 17 匝短路时电流波形

抑制匝间短路电流。

4 结 语

本文从具有抑制匝间短路下不可逆失磁能力

的特种 PMSG 的结构入手,通过理论推导验证了对永磁体产生退磁影响的磁通非常小。采用有限元法研究了该容错电机在不同短路故障下永磁体的失磁情况,由短路过程中永磁体各点的最小磁密值是否低于退磁曲线膝点的磁密值来判断是否发生退磁。结果表明:由于该 PMSG 特殊的结构及绕线方式,不仅可以避免发生不可逆退磁,同时可以实现匝间短路容错。

【参考文献】

- [1] ARUMUGAM P. Design optimization on conductor placement in the slot of permanent magnet machines to restrict turn-turn short-circuit fault current [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52 (5): 2516504.
- [2] 陈吉,严欣平,黄嵩,等.表贴式永磁电机三相对称短路失磁研究[J].微电机,2012,45(1): 7.
- [3] 陈吉,严欣平,周浩,等.两种不对称短路故障对永磁电机失磁影响的研究[J].微电机,2012,45(2): 5.
- [4] ZHAO G, TIAN L, SHEN Q, et al. Demagnetization analysis of permanent magnet synchronous machines under short circuit fault [C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010.
- [5] URRESTY J, RIBA J, ROMERAL L, et al. Analysis of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous with inter-turns and phase-to-ground short-circuits [C]//International Conference on Electrical Machines, 2012.
- [6] HOSOI T, WATANABE H, SHIMA K, et al. Demagnetization analysis of additional permanent magnets in salient-pole synchronous machines with damper bars under sudden short circuits [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (6): 2448.
- [7] BAHADOR N, DARABI A, HASANABADI H. Demagnetization analysis of axial flux permanent magnet motor under three phase short circuit fault [C]//4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 2013.
- [8] 刘荣林.永磁电动机失磁分析[J].中国民航学院学报,2004,22(增刊1): 18.
- [9] 张昌凡,罗利祥,何静,等.匝间短路故障对永磁同步电机失磁影响的分析与研究[J].包装工程, 2015, 36 (15): 124.
- [10] 李霞,王淑红.内嵌式异步起动永磁同步电动机短路故障下失磁状况分析[J].煤炭学报, 2017, 42 (增刊 2): 626.

《电机与控制应用》新网站启用

为了更好地服务于作者和读者,《电机与控制应用》建设了新的网站。服务升级,内容丰富,域名不变,仍为 www.motor-abc.cn。

新网站设有网刊系统。2018 年至今《电机与控制应用》发表的所有论文均可通过该系统检索、阅读、下载。

在新网站的投稿系统中,作者可以在线投稿、查询审稿进度、察看修改意见并修改稿件,专家无需下载论文即可在线审稿。作者和专家可在相应的登录界面注册后进入系统。如果您的邮箱已被注册,则请使用"忘记密码"按钮重置密码。进入系统后可进行完善个人信息、修改密码、处理稿件等操作。

新网站同时开通了移动版。关注《电机与控制应用》微信公众号(djykyzy),即可在移动端阅读最新论文、查询稿件处理状态,并可登录投稿系统进行其他操作。

请扫码关注《电机与控制应用》微信公众号:

