

DOI: 10.16652/j.issn.1004-373x.2024.10.002

引用格式: 随阁, 赵博, 王义勇, 等. 永磁辅助磁阻发电机建压过程及短路故障运行[J]. 现代电子技术, 2024, 47(10): 6-12.

永磁辅助磁阻发电机建压过程及短路故障运行

随 阁¹, 赵 博¹, 王义勇², 张红旗², 鲁炳林¹

(1. 山东理工大学 电气与工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 山东山博电机集团有限公司, 山东 淄博 255200)

摘要: 为解决传统永磁发电机短路故障时灭磁困难和开关磁阻类发电机电压波形差的难题, 提出一种永磁辅助同步磁阻发电系统(PMSynRG)。建立该电机的数学模型, 阐述其发电运行机理, 并推导出带载时的稳态电压方程和三相短路时绕组交直轴短路动态电流方程。针对发电机带载时的自激建压过程进行数值仿真计算, 得出自激建压曲线, 验证发电机系统的建压能力。此外, 针对三相短路故障进行数值仿真计算, 验证了故障时三相电流小于额定电流的结论, 同时还验证了三相短路时动态电流方程的正确性, 证明了发电机系统具有较强的自我保护能力。最后, 制作样机并完成了带载建压实验, 实验结果与数值分析结果吻合度较高。

关键词: 永磁辅助同步磁阻发电机; 运行机理; 建压能力; 三相短路故障; 有限元分析; 样机实验

中图分类号: TN712-34; TM352

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X(2024)10-0006-07

Voltage building process and short-circuit fault operation of PM-assisted synchronous reluctance generators

SUI Ge¹, ZHAO Bo¹, WANG Yiyong², ZHANG Hongqi², LU Binglin¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shandong Shanbo Electrical Machine Group Co., Ltd., Zibo 255200, China)

Abstract: A permanent magnet assisted synchronous reluctance power generation system (PMSynRG) is proposed to solve the difficulties of demagnetization during traditional permanent magnet generator short circuit faults and the voltage waveform difference of switched reluctance generators. A mathematical model of the motor is established, its power generation operation mechanism is explained, and the steady-state voltage equation under load and the dynamic current equation for winding AC-DC axis short circuit during three-phase short circuit are derived. The numerical simulation calculation is conducted on the self-excited voltage building process of the generator under load, and the self-excited voltage building curve is obtained to verify the voltage building capacity of the generator system. Numerical simulation calculations were conducted for three-phase short circuit faults, verifying the conclusion that the three-phase current is less than the rated current during the fault. At the same time, the correctness of the dynamic current equation during three-phase short circuit was also verified, proving that the generator system has strong self-protection ability. A prototype was made and a load pressure building experiment was completed. The experimental results are in good agreement with the numerical analysis results.

Keywords: PMSynRG; operating mechanism; power generation performance; three phase short circuit fault; finite element analysis; prototype experiment

0 引言

伴随着科技的飞速发展, 多电飞机、电动汽车快速兴起, 对于发电系统提出了大容量、高性能、高效率等要求。永磁同步发电机凭借其优越的效率、转矩密度和功率密度, 被广泛应用于各个领域^[1-2]。而永磁电机由于永

磁体的存在, 在发生短路故障时无法快速灭磁, 使得定子绕组中产生巨大的短路电流, 从而对电机造成危害, 这限制了永磁电机的使用^[3-4]。开关磁阻发电机具有高容错性、高可靠性等优点, 因此在航空航天等高速发电场合具有独特的应用优势, 但存在效率、功率密度以及发电波形较差等缺点, 限制了磁阻发电机的使用^[5-6]。为

了解决上述问题,永磁辅助式同步磁阻发电机应运而生,该电机同时具备永磁和磁阻电机的优势,能够充分利用磁阻转矩和永磁转矩,有功率密度高、效率高、调速范围宽等显著优点^[7-9]。此外,永磁辅助式磁阻电机永磁体用量可控,发生短路故障时可以确保产生的短路电流在安全范围内。

文献[10]中研究并证明了通过自激电容将感应电机用作独立发电机的可行性。文献[11-13]提出了一种用于单机风力发电系统的自励磁同步磁阻发电机,它具备感应电机所有优点且不需要转子电流的存在,提高了系统可靠性。文献[14]建立了自励磁同步磁阻发电机 dq 参考系下的分析模型,预测电机的稳态性能;并提出了一种快速估算最小电容要求的方法。该模型在发生短路故障时可以迅速切除掉励磁电容,使得永磁辅助同步磁阻发电系统 (PM-assisted Synchronous Reluctances Generators, PMSynRG) 仅由永磁体提供励磁,相当于实现一个等效灭磁的作用。但感应电机和磁阻电机同时存在效率和功率密度低的缺点,因此将永磁辅助式磁阻电机用于自激磁发电系统还有待进一步研究^[15-16]。

本文提出了一种由永磁辅助式同步磁阻发电机与励磁电容共同组成的发电系统,通过运行机理分析、有限元仿真以及实验三者相互验证的方法,证明了 PMSynRG 在负载工况下具有良好的自激建压和稳定发电能力。在发生三相短路故障时,PMSynRG 的三相短路电流小于额定工作时的电流,因此 PMSynRG 具有应对短路故障的能力。

1 永磁辅助同步磁阻发电机运行机理

1.1 PMSynRG 发电系统构成

图1所示为 PMSynRG 的发电系统示意图,发电机由转速可以平稳调节的原动机驱动,在正常工作状态,三相励磁电容器(C)通过保护开关与三相负载(Z_L)一同并联到电机定子绕组。当发生短路故障时保护开关迅速工作,将励磁电容与发电机定子绕组断开,并与泄放电阻相连来释放电容中储存的电能。

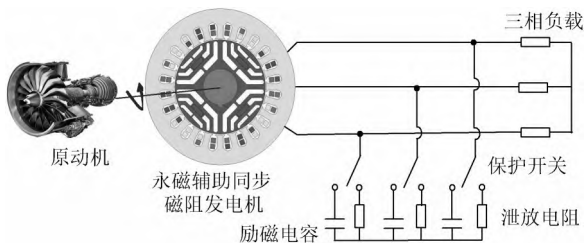


图1 自激永磁辅助同步磁阻发电系统结构

1.2 PMSynRG 数学模型

PMSynRG 转子结构保持圆周对称,其转子 d 、 q 轴分

布如图2所示,永磁体置于 q 轴之上。

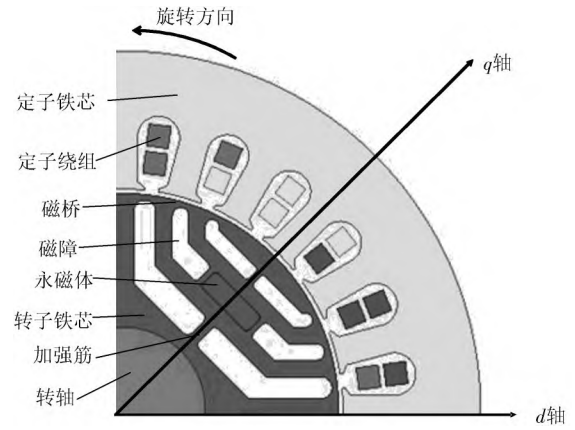


图2 永磁辅助同步磁阻发电机 dq 轴分布

为了简化分析模型,作如下假设:

- 1) 忽略空间谐波和时间谐波;
- 2) 忽略铁损;
- 3) 定子电阻设为常数。

通过 PMSynRG 坐标变换求出在 dq 轴坐标系下的磁链、电压、电磁转矩、电磁功率方程,具体如下。

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d \\ \psi_q = L_q i_q - \psi_{PM} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q 为合成磁链 d 轴和 q 轴分量; L_d 、 L_q 为 d 轴和 q 轴电感分量; ψ_{PM} 为永磁磁链; i_d 、 i_q 为 d 轴和 q 轴电流分量。

电压方程:

$$\begin{cases} L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q + \omega \psi_{PM} = u_d + R_s i_d \\ L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d = u_q + R_s i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 为 d 轴和 q 轴电压分量; R_s 为定子电阻; ω 为电机电角速度。

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_{PM} i_d + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; p 为电机极对数。

电磁功率方程:

$$P_e = \frac{3}{2} p \omega \psi_{PM} i_d + \frac{3}{2} p \omega (L_d - L_q) i_d i_q \quad (4)$$

根据磁链及电压方程,可画出图3所示的永磁辅助同步磁阻电机的空间矢量图,其中: u 为电机端电压矢量; i_s 为定子电流; ψ 为合成磁链。

PMSynRG 的发电原理为:原动机拖动永磁辅助磁阻电机转子旋转,由于磁阻电机转子中永磁体的存在,会产生一个旋转的永磁磁场,旋转磁场切割定子槽中的

绕组产生感应电势,感应电势向励磁电容以及负载供电。在励磁电容会产生励磁电流 i_c ,产生的 i_c 流入定子绕组给电机提供一个励磁,此时,发电机由永磁体和励磁电容共同提供励磁,产生的感应电动势不断增大,输出的电压不断增大,产生的励磁电流 i_c 也不断增加,直到永磁辅助同步磁阻发电系统产生稳定的励磁磁场,发电机完成自激建压的过程,进而可以实现稳定发电。

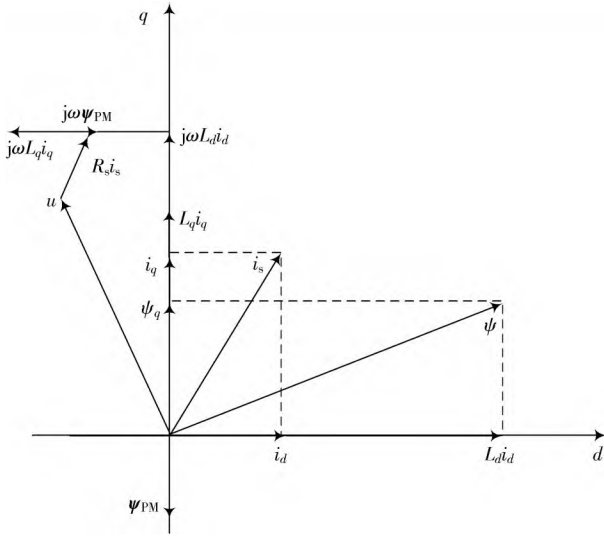


图3 自激磁永磁辅助磁阻发电机空间矢量图

1.3 负载工况下稳态发电性能

PMSynRG 所接的励磁电容 C 和三相交流负载 Z_L 并联于定子绕组上,此时电容和负载的阻抗 Z 为:

$$Z = \frac{-jX_C Z_L}{Z_L - jX_C} = \frac{X_C^2 Z_L}{Z_L^2 + X_C^2} - \frac{jX_C Z_L^2}{Z_L^2 + X_C^2} \quad (5)$$

式中: $X_C = 1/(\omega C)$ 为电容容抗; Z_L 为负载阻抗。

假设:

$$A = \frac{X_C Z_L}{Z_L^2 + X_C^2} \quad (6)$$

根据电压方程,可以得到:

$$U = (AX_C - jAZ_L)(I_d + jI_q) \quad (7)$$

此时 dq 坐标系下的稳态电压方程可表示为:

$$\begin{cases} U_d = -R_s I_d - X_q I_q + \omega \psi_{PM} = A(X_C I_d + Z_L I_q) \\ U_q = -R_s I_q + X_d I_d = A(X_C I_q - Z_L I_d) \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_d 、 U_q 为负载条件下 d 轴和 q 轴电压分量; $X_d = \omega L_d$, $X_q = \omega L_q$, 分别为 d 轴和 q 轴感性电抗。

因此,电机稳态输出电压方程可表示为:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \\ &= \sqrt{(-R_s I_d - X_q I_q + \omega \psi_{PM})^2 + (-R_s I_q + X_d I_d)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

1.4 三相短路故障下的短路电流

当发电系统发生三相短路故障时,如图1所示,保

护开关立刻将励磁电容从发电机定子绕组端断开,并连接到泄放电阻上。此时电机失去了励磁电流 i_c ,仅由永磁体进行励磁,本文分析这种故障下的短路电流。

发电机发生三相短路故障时,为了维持短路前后瞬间总磁链矢量不变,短路电流会产生一个磁链矢量^[4]。短路电流产生的磁链矢量 $\Delta\psi$ 与永磁磁链矢量 ψ_{PM} 之和为总磁链矢量 ψ_0 ,公式如下:

$$\psi_0 = \Delta\psi + \psi_{PM} \quad (10)$$

考虑定子电阻的存在会产生电压降与损耗,短路发生后总磁链矢量会随着时间逐渐衰减,直到总磁链中仅存在永磁磁链,因此短路电流表达式为:

$$\begin{cases} i_d(t) = i_{dt} e^{-\frac{t}{\tau}} + i_{ds} \\ i_q(t) = i_{qt} e^{-\frac{t}{\tau}} + i_{qs} \end{cases} \quad (11)$$

式中: i_{dt} 、 i_{qt} 分别为 d 、 q 轴电流暂态分量; i_{ds} 、 i_{qs} 分别为 d 、 q 轴电流稳态分量。 d 、 q 轴短路电流稳态分量为永磁磁链在绕组中感应出的电流。

根据三相短路电压方程:

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q + \omega \psi_{PM} - R_s i_d = 0 \\ u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d - R_s i_q = 0 \end{cases} \quad (12)$$

可求得短路电流稳态分量为:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{R_s \omega \psi_{PM}}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q} \\ i_{qs} = \frac{L_d \omega^2 \psi_{PM}}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q} \end{cases} \quad (13)$$

当电机转速足够高时,可近似认为短路时刻的总磁链矢量在衰减期间仅幅值发生减小,位置角保持不变。则短路电流暂态分量可表示为:

$$\begin{cases} i_{dt} = \frac{\psi_{0d}}{L_d} \\ i_{qt} = \frac{\psi_{0q}}{L_q} \end{cases} \quad (14)$$

根据前述分析,短路后总磁链由于定子电阻的存在将会衰减,对应于式中短路电流衰减分量,其时间常数为:

$$\tau = \frac{2L_d L_q}{R(L_d + L_q)} \quad (15)$$

因此,电机三相短路电流表达式为:

$$\begin{cases} i_d(t) = \frac{\psi_{0d}}{L_d} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{R_s \omega \psi_{PM}}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q} \\ i_q(t) = \frac{\psi_{0q}}{L_q} e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{L_d \omega^2 \psi_{PM}}{R_s^2 + \omega^2 L_d L_q} \end{cases} \quad (16)$$

式中: ψ_{0d} 、 ψ_{0q} 分别为总磁链矢量 ψ_0 的 d 、 q 轴分量。

2 PMSynRG 有限元仿真分析

2.1 电机有限元模型建立

第 1 节介绍 PMSynRG 的运行机理,为了验证理论解析的正确性,需要设计一台样机进行有限元仿真分析。样机的一些基本信息如表 1 所示。

表 1 永磁辅助同步磁阻发电机基本信息

名称	内容	名称	内容
额定转速/(r/min)	18 000	磁障形状	U/I 形
额定功率/kW	10.8	磁障数	3
额定电压(幅值)/V	310	永磁体	N35SH
额定电流(幅值)/A	86	定子外半径/mm	65
自激电容/ μF	70	转子外半径/mm	39.2
极对数	2	铁芯长度/mm	105
定子槽数	24	气隙厚度/mm	0.8

解析结果需要用到 dq 轴磁通与 dq 轴电流关系、 dq 轴电感与 dq 轴电流关系的插值进行求解。通过改变励磁电流的大小,可以得到如图 4 所示的电机 dq 轴磁通与 dq 轴电流的关系, dq 轴电感与 dq 轴电流的关系如图 5 所示。

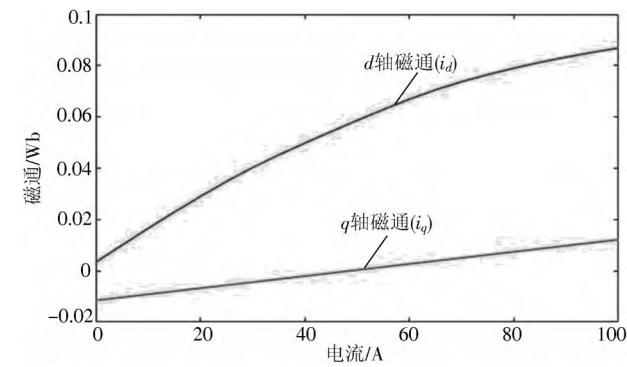


图 4 dq 轴磁通与 dq 轴电流关系

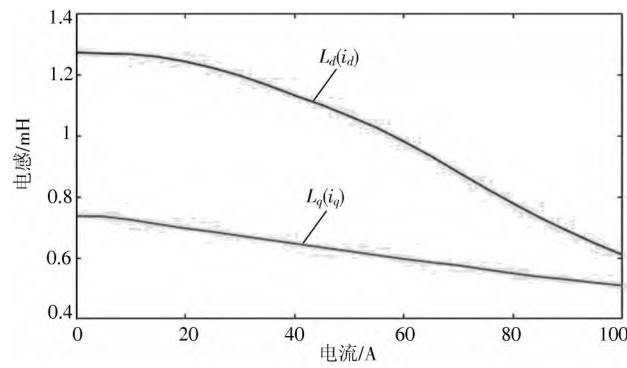


图 5 dq 轴电感与 dq 轴电流关系

从图 4 中可以看出,当 $i_q=0$ 时,由于 ψ_{PM} 沿着 q 轴负方向, ψ_q 为负数。由图 5 可知:由于磁通屏障中存在永磁体,因此 L_q 总是很小; L_d 在低电流下是恒定的,而电流高于 2 A 时逐渐减小。

表 2 所示为发电机绕组及永磁参数。

表 2 发电机绕组及永磁参数

参数	值
绕组匝数	3
定子电阻/ Ω	0.14
永磁体宽度/mm	6.5
永磁体厚度/mm	4
永磁轴向长度/mm	105
永磁磁通量/Wb	0.011 5

将图 4、图 5 的有限元仿真结果以及表 2 中的参数,代入发电机负载工况下的稳态发电方程式(9)中,可以求出解析结果,再将其与有限元仿真结果进行对比。

图 6 所示为 $C=70\ \mu\text{F}$ 、 $R_L=5\ \Omega$ 条件下,不同转速时发电机输出相电压幅值的解析结果和有限元仿真结果的对比。由图中可以看出,解析结果略高于有限元结果,但差异可以接受。综上,通过有限元分析验证了稳态发电方程的正确性。

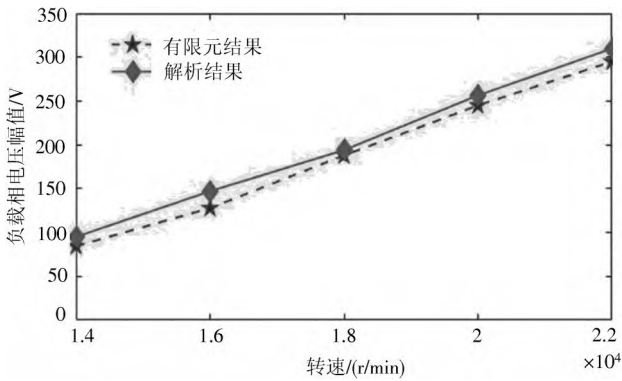


图 6 有限元结果与解析结果的对比($C=70\ \mu\text{F}$ 、 $R_L=5\ \Omega$)

2.2 负载工况性能分析

利用有限元仿真软件,根据图 1 搭建 PMSynRG 发电系统外电路,将样机模型和外电路联合仿真,验证发电机在负载工况下的建压以及发电能力。本文所用的三相交流负载均为阻性负载。

图 7 为 PMSynRG 在 18 000 r/min 转速下, $C=70\ \mu\text{F}$ 、 $R_L=5\ \Omega$ 发电机 ABC 三相电压的建压启动过程。可以看出,PMSynRG 的输出电压随着时间迅速升高并逐渐保持稳定,证明在励磁电容的作用下,PMSynRG 能够实现自激建压,并且最终稳定发电。

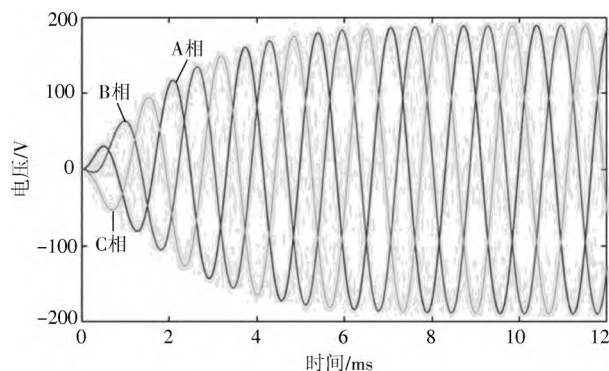


图7 PMSynRG的启动过程

图8所示为额定工况下电机的输出功率,可以看出在电机自激建压过程中,电机输出功率持续上升,直到电机完成自激建压开始稳定发电,电机达到额定的输出功率。

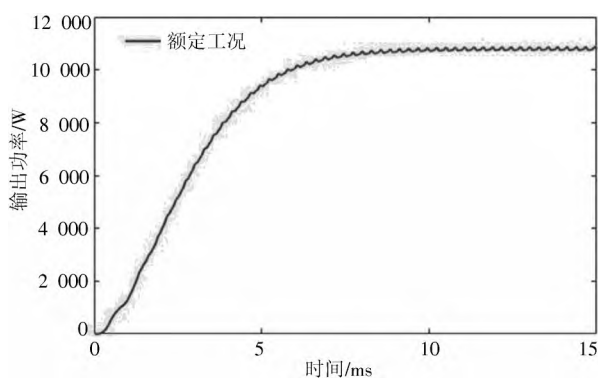


图8 PMSynRG的输出功率

电机额定负载工况完成建压过程后,电机的磁力线以及磁密云图如图9所示。

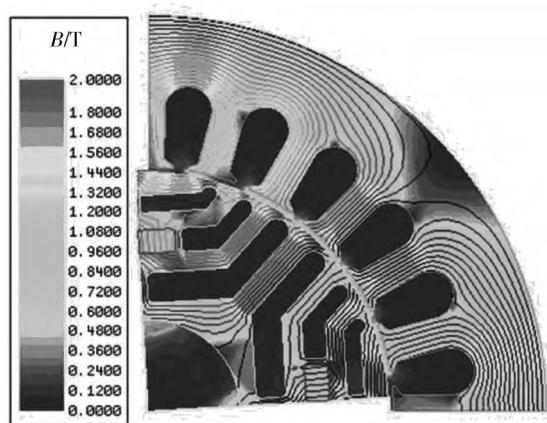


图9 额定工况下PMSynRG磁力线及磁密云图

2.3 短路工况仿真分析

为验证在发生三相短路故障时,PMSynRG能否安全运行,通过仿真软件模拟PMSynRG处于正常发电状态下,在3 ms时突然发生三相短路故障,电机输出ABC三相短路电流波形如图10所示。

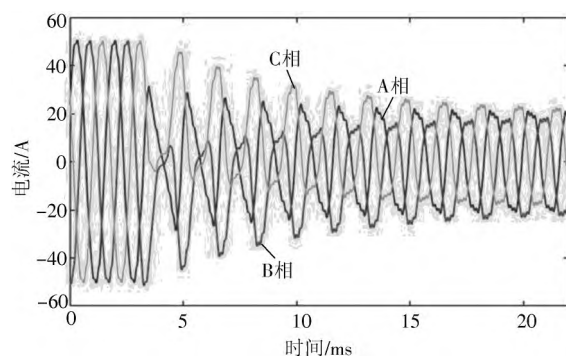


图10 PMSynRG三相短路故障电流波形

从图10中可以看出,发生短路故障后,电机输出的短路电流随着时间逐渐衰减到一个稳定值,且短路电流恒小于正常工作时的额定电流。这是由于正常发电机工作时,电机由永磁体和励磁电容共同参与励磁,产生的电动势 E 较大;但当发生短路故障时,由于保护开关动作励磁电容立刻停止工作,电机仅由永磁体产生励磁,产生的电动势 E 迅速减小,产生的短路电流也迅速减小,相当于在发生短路故障时电机实现了一个等效灭磁的过程。因此,在发生三相短路故障时,PMSynRG能够保证发电系统其他设备以及电机本身的安全,解决了永磁发电机发生短路故障时无法快速灭磁的问题。

电机 dq 轴短路电流波形如图11所示,可以清晰地看出,短路电流的暂态分量衰减过程和稳态分量符合根据式(16)中短路电流的变化规律。

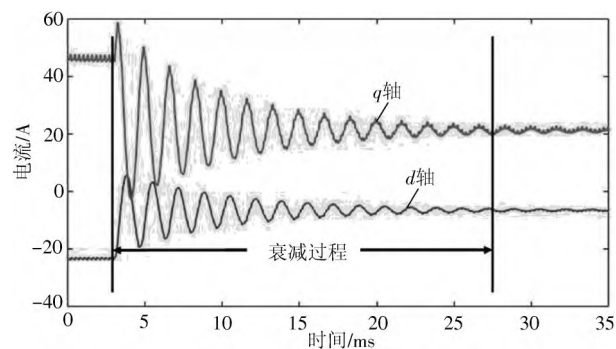
图11 PMSynRG短路故障 dq 轴电流波形

图12所示为电机短路故障达到电流稳态时电机的磁力线以及磁密云图。与额定工况下电机的磁力线及磁密云图相比,发生短路故障时电机的磁密远小于额定工况,产生的铁耗也小于额定工况,进一步说明了发电系统在发生短路故障时具有较强的自我保护能力。

3 PMSynRG样机实验

有限元仿真结果表明,PMSynRG在励磁电容的作用下可以实现自激建压并且稳定发电。为了验证PMSynRG有限元仿真的正确性,基于第2节所述有限元

仿真的电机模型,试制了一台 PMSynRG 样机进行实验研究。

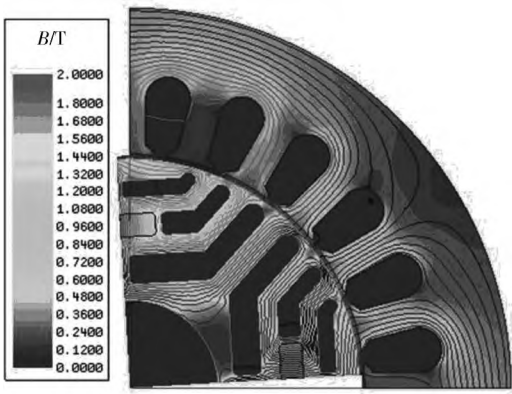


图 12 短路故障时 PMSynRG 磁力线及磁密云图

3.1 样机实验

定转子结构冲片、样机以及搭建的实验平台如图 13 所示。实验利用变频器控制原动机旋转,原动机通过联轴器与发电机相联,并带动发电机同轴旋转,励磁电容器和负载并联到发机定子绕组端,示波器通过高压探头接到发电机定子绕组,可以测得发电机输出线电压波形。

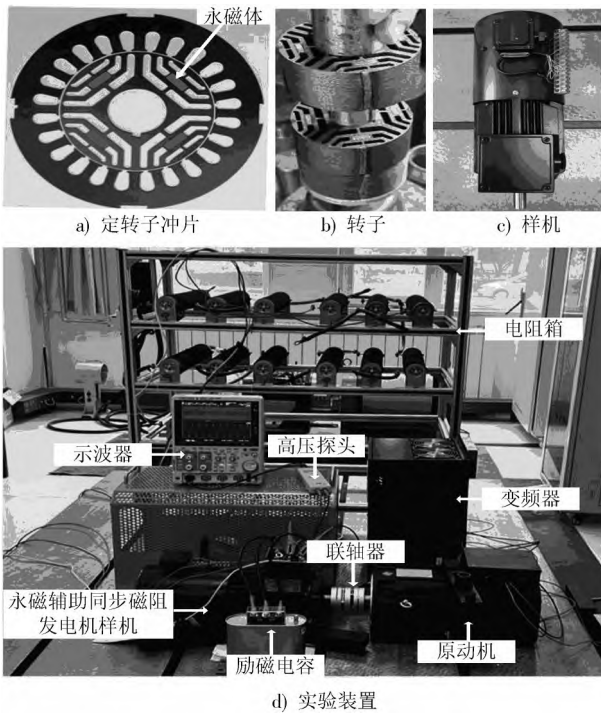


图 13 PMSynRG 样机及实验装置

在转速为 6 000 r/min,负载 $R_L=5\ \Omega$ 的条件下进行 PMSynRG 的样机实验测试。图 14a)所示为不接入励磁电容条件下,发电机稳态输出线电压波形,其有效值仅为 16.4 V。在相同转速及负载情况下,接入 $C=397\ \mu\text{F}$ 的励磁电容,发电机的稳态输出线电压波形如

图 14b)所示,其线电压有效值为 35.1 V,相较于未接入励磁电容的输出电压显著增大,证明了励磁电容的接入能够提升发电系统的稳态发电性能。

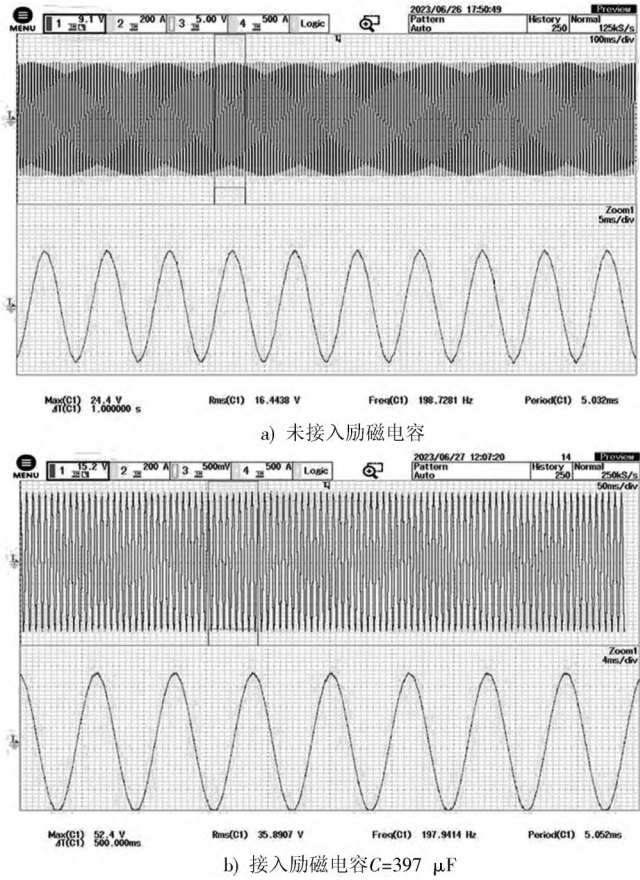


图 14 6 000 r/min 转速下样机稳态输出线电压波形 ($R_L=5\ \Omega$)

3.2 有限元仿真结果与实验结果对比分析

图 15 所示为转速 6 000 r/min、负载 $R_L=5\ \Omega$ 条件下,接入励磁电容前后有限元仿真与实际测试所得电机的稳态输出线电压波形对比结果。

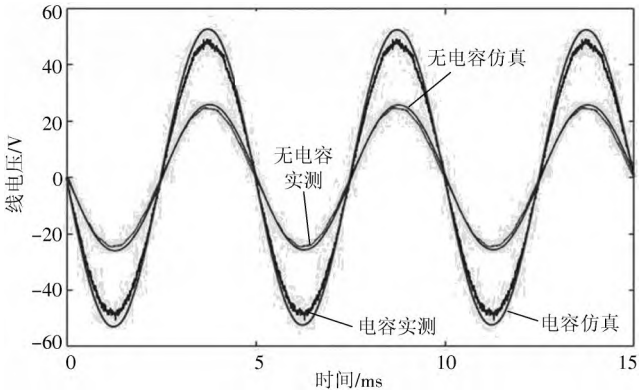


图 15 6 000 r/min 转速下实验与有限元稳态输出线电压对比 ($R_L=5\ \Omega$)

由图 15 可以看出,仿真所得波形与实测基本一致,验证了有限元仿真分析的正确性。此外,由于忽略了电

机端部效应等因素的影响,二维有限元法计算所得稳态线电压幅值比实测值略大。

4 结 论

本文提出一种永磁辅助同步磁阻发电系统(PMSynRG),通过理论分析、有限元仿真以及样机实验相互验证,推导出PMSynRG负载工况下的稳态电压方程和三相短路故障时绕组交直轴的短路动态电流方程,并通过有限元仿真验证了方程的正确性。其次,证明了PMSynRG在带载启动时具有良好的建压和稳定发电能力,并且励磁电容的接入会提升发电系统的稳态发电性能。在发生三相短路故障时,PMSynRG会产生一个不断衰减的短路电流,且短路电流小于额定工作电流,能够保证发电系统在发生短路故障时具有很强的自我保护能力。

注:本文通讯作者为赵博。

参 考 文 献

- [1] 李祥林,程明,邹国棠.聚磁式场调制永磁风力发电机输出特性改善的研究[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4198-4206.
- [2] 王继强,王凤翔,孔晓光.高速永磁发电机的设计与电磁性能分析[J].中国电机工程学报,2008,28(20):105-110.
- [3] 罗利祥.匝间短路故障对永磁同步电机失磁的影响[J].微电机,2017,50(5):6.
- [4] 徐海.混合永磁体变磁通电机设计与短路故障研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [5] 周云红,孙玉坤,嵇小辅,等.一种新型的磁悬浮开关磁阻发电机[J].中国电机工程学报,2012,32(15):107-113.
- [6] 周云红,孙玉坤.一种双定子型磁悬浮开关磁阻起动/发电机的运行原理与实现[J].中国电机工程学报,2014,34(36):6458-6466.
- [7] 卞玉康,史立伟,刘楷文.磁极偏转永磁辅助同步磁阻电机优化设计[J].机床与液压,2022,50(20):90-95.
- [8] 曹恒佩,艾萌萌,王延波.永磁辅助同步磁阻电机研究现状及发展趋势[J].电工技术学报,2022,37(18):4575-4592.
- [9] 孙毅,蔡顺,林迎前,等.永磁辅助同步磁阻电机顶层优化设计[J].电工技术学报,2022,37(9):2306-2318.
- [10] BANSAL R C. Three-phase self-excited induction generators: an overview [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2005, 20(2): 292-299.
- [11] OGUNJUYIGBE A S O, AYODELE T R, ADETOKUN B B, et al. Dynamic performance of wind - driven self - excited reluctance generator under varying wind speed and load [C]// 5th International Conference on Renewable and Energy Research and Application. Birmingham, UK: IEEE, 2016: 506-511.
- [12] IBRAHIM M, PILLAY P. The loss of self-excitation capability in stand - alone synchronous reluctance generators [C]// IEEE Energy Conversion Congress & Exposition. [S.l.]: IEEE, 2017: 1857-1863.
- [13] WANG Y W, BIANCHI N. Investigation of self-excitation in reluctance generators [C]// International Electric Machines and Drives Conference. Miami, FL, USA: IEEE, 2017: 1-8.
- [14] RAHIM Y H A, MOHAMADIEN A L, AL KHALAF A S. Comparison between the steady - state performance of self - excited reluctance and induction generators [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2002, 5(3): 519-525.
- [15] ZHAO X, NIU S, FU W. Sensitivity analysis and design optimization of a new hybrid-excited dual-PM generator with relieving-DC-saturation structure for stand-alone wind power generation [J]. IEEE transactions on magnetics, 2020, 56(1): 1-5.
- [16] BIANCHI N, FORNASIERO E, FERRARI M, et al. Experimental comparison of PM - assisted synchronous reluctance motors [J]. IEEE transactions on industry applications, 2014, 52(1): 163-171.

作者简介:随 阁(1999—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机控制技术及其应用。

赵 博(1979—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为军用特种电机及控制系统。

王义勇(1967—),男,工程师,研究方向为特种电机关键工艺。

张红旗(1968—),男,工程师,研究方向为特种电机数字分析。

鲁炳林(1988—),男,博士,讲师,研究方向为永磁电机及特种电机设计和控制。