

Electromagnetic Design and Performance Analysis of a Six-phase Permanent Magnet Synchronous Generator

Ke Chen Yan Wang Wengming Chen Zhiqin Li

Hunan Electrical College of Technology, Xiangtan, Hunan, 411101, China

Abstract

Six-phase permanent magnet synchronous generator (PMSG) has received wide attention for its high efficiency, high power density and good dynamic performance. This paper focuses on the electromagnetic design of six-phase permanent magnet synchronous generator (PMSG) and its performance optimization, introduces the basic structure and working principle of six-phase PMSG, discusses the key points of electromagnetic design in detail, and evaluates the performance of the generator in actual operation by simulating the electromagnetic field distribution and torque characteristics under different load conditions through finite element analysis (FEA). The results show that the optimized six-phase PMSG has a significant improvement in efficiency, output power, and dynamic response.

Keywords

six-phase PMSG; electromagnetic design; performance optimization; finite element analysis

六相永磁同步发电机的电磁设计与性能分析

陈可 王艳 陈文明 李治琴

湖南电气职业技术学院, 中国·湖南湘潭 411101

摘要

六相永磁同步发电机(PMSG)凭借其高效率、高功率密度、良好的动态性能受到广泛关注。论文主要研究六相永磁同步发电机的电磁设计及其性能优化,介绍了六相PMSG的基本结构和工作原理,详细探讨电磁设计要点,通过有限元分析(FEA)模拟不同负载条件下的电磁场分布和转矩特性,评估发电机在实际运行中的性能表现。结果表明,优化后的六相PMSG在效率、输出功率、动态响应方面均有显著提升。

关键词

六相永磁同步发电机; 电磁设计; 性能优化; 有限元分析

1 引言

随着全球能源需求不断增长,环境保护意识持续提升,可再生能源开发与利用已成为全球关注的焦点。在各种可再生能源技术中,风力发电因其技术相对成熟、绿色清洁、可持续特点受到各行业的高度重视。而六相永磁同步发电机(Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator, SP-PMSG)作为一种高效、可靠的发电设备,在风力发电系统中扮演着重要角色,能有效提高系统的功率密度,增强系统运行的稳定性。电磁设计是六相永磁同步发电机研发的核心

环节,和发电机使用性能有直接关联,传统三相发电机设计虽然在市场上占主导地位,但其存在各种固有问题,如电磁干扰、转矩脉动等,严重限制其在某些特定应用中的性能表现。而六相永磁同步发电机通过增加相数,科学分散电流和磁通,减少电磁干扰和转矩脉动,提高发电机的运行平稳性,提高电能输出质量。

2 六相永磁同步发电机的运行原理

与传统三相发电机相比,六相永磁同步发电机具有高功率密度、强动态性能、低电磁干扰等特征。六相永磁同步发电机主要由定子、转子、永磁体组成,定子上有六个独立的绕组,这些绕组在空间上均匀分布,相邻绕组之间的电角度为60度,转子上安装有永磁体,这些永磁体产生恒定的磁场。当转子旋转时,永磁体产生磁场也随之旋转,该旋转磁场会切割定子绕组,在定子的六个绕组中感应出电动势。由于六个绕组在空间上均匀分布,因此每个绕组感应出的电动势在时间上相位差为60度。当转子以同步速度旋转时,定子绕组

【基金项目】2023年度湖南省教育厅科学研究一般项目《高功率密度六相永磁同步发电机研究》(项目编号:23C0538)。

【作者简介】陈可(1990-),男,中国湖南湘潭人,硕士,讲师,从事风力发电、新型电机设计等研究。

中的电动势频率与转子转速成正比,且受到该六个绕组影响,六相永磁同步发电机产生六个相位不同的交流电,并利用适当的接线方式连接到外部负载。同时,在六相永磁同步发电

机运行过程中,需要利用精确的控制策略,采用矢量控制或直接转矩控制技术,合理控制转子转速和定子绕组电流,确保发电机在各种工况下都能稳定运行(如图1所示)。

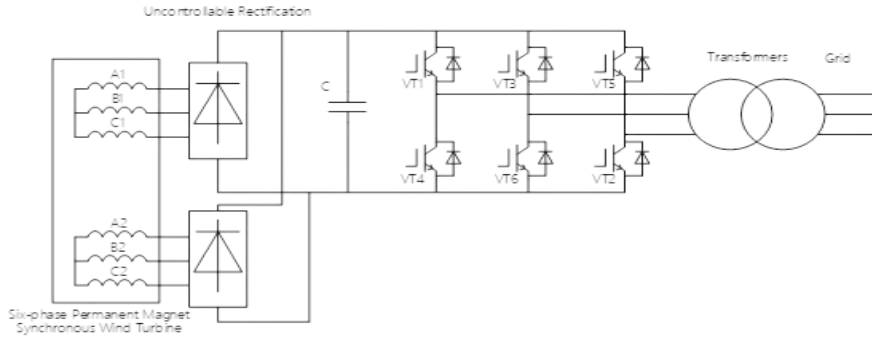


图1 运行原理

3 六相永磁同步发电机的电磁设计

3.1 结构设计

3.1.1 主要尺寸计算

根据电机额定数据和主要性能指标,结合以往三相永磁同步电机设计方法,选择相关尺寸。永磁同步电机最高电磁转矩指标为 $T_{em\ max}$, 最大电磁转矩和电磁负荷、电机尺寸关系如下:

$$T_{em\ max} = \frac{\sqrt{2}\pi}{4} B_{\delta 1} L_{ef} D_{i1}^2 A \quad (1)$$

其中, D_{i1} 为定子内径; $B_{\delta 1}$ 为气隙磁密基波分量的幅值; L_{ef} 为电机轴向有效长度; A 为定子绕组的电负荷。可利用公式(2)进行计算:

$$A = \frac{2mN I K_{dp1}}{\pi D_{i1}} \quad (2)$$

结合上述两个公式,电动机主要尺寸表示为:

$$D_{i1}^2 L_{ef} = \frac{4T_{em\ max}}{\sqrt{2}\pi B_{\delta 1} A} \quad (3)$$

3.1.2 转子设计

转子是 PMSG 的核心部件,其结构设计直接影响到电机的性能。转子结构设计有表面贴装式(SPM)和内置式(IPM),SPM 结构简单,但永磁体易受外界磁场影响;IPM 结构复杂,但具有更好的磁阻转矩和抗去磁能力。而在永磁体选择与尺寸设计方面,永磁体材料选择钕铁硼(NdFeB)、钐钴(SmCo)和铝镍钴(AlNiCo)等,NdFeB 具有最高的磁能积,但温度稳定性较差;SmCo 具有良好的温度稳定性,但成本较高。永磁体尺寸设计要考虑磁通密度、磁场分布、机械强度等因素,利用有限元分析(FEA),科学优化永磁体的尺寸,从而达到最佳的电磁性能和机械性能。转子材料需要具有良好的磁性能和机械强度,常用材料包括硅钢片和非晶合金等。为了提高电机的功率密度,转子通常要设计冷却系统,如轴向通风道或内置冷却水道。

3.1.3 极槽配合

在极槽配合设计方面,其要符合槽距电角度能整除相

带电角度要求。

$$\alpha = (360^\circ \times p) / Z \quad (4)$$

其中, α 为槽距电角度; Z 为槽数; p 为极对数。

电机的相数和极对数确定了之后,电机定子槽数取决于每极每相槽数 q , $q = Z / 2pm$, m 为电机相数。

分析同步构成六相和三相绕组 8 极电机的极槽配合方案如表 1 所示。

表 1 不同极槽配合方案

方案	极数 2p	槽数 Z	六相 q	三相 q
1	8	48	1	2
2	8	96	2	4
3	8	144	3	6

在 8 极 48 槽方案中,六相 $q = 1$ 配置意味着每个极下有一个六相绕组,这种设计简单,适用于对成本和复杂性要求较低的应用。三相 $q = 2$ 每个极下有两个三相绕组,提供较好的绕组利用率和性能平衡。在 8 极 96 槽方案,六相 $q = 2$ 时每个极下有两个六相绕组,增加绕组的复杂性,但可能提供更高的性能和效率。三相 $q = 4$ 的每个极下有四个三相绕组,这种设计适用于需要高功率密度和效率的应用。在 8 极 144 槽方案中,六相 $q = 3$ 每个极下有三个六相绕组,这种设计进一步增加绕组成本,但可能提供最佳的性能。三相 $q = 6$ 每个极下有六个三相绕组,这种设计适用于极端的高性能需求,如高速或高扭矩应用。选择合适的极槽配合方案需要综合考虑电机的应用场景、成本、性能需求和制造复杂性。方案 1 适用于对成本敏感且性能要求不高的应用;方案 2 和方案 3 则适用于需要更高性能和效率的场合,但相应地增加设计和制造成本。在实际应用中,应根据具体需求和预算选择最合适的方案^[1]。

3.2 有限元建模

在电磁设计中,是有限元方法(FEM)因其高精度和灵活性成为电磁场分析的首选工具。论文介绍如何利用

Ansoft Maxwell 软件进行六相永磁同步发电机的电磁设计,包括电机几何模型建立、网格剖分、材料定义及条件设置、求解及后处理等步骤。

①电机几何模型建立。在 Ansoft Maxwell 中创建电机的几何模型,包括定子、转子、永磁体、绕组等部件的精确

几何形状和相对位置,模型准确性直接影响到后续分析的可靠性。在建立模型时,应考虑到实际电机的结构特点,如槽型、极数、绕组分布等。因此,论文采用 1/8 模型进行仿真研究,有效降低数据储存量和计算量,提高计算效率(如图 2 所示)。

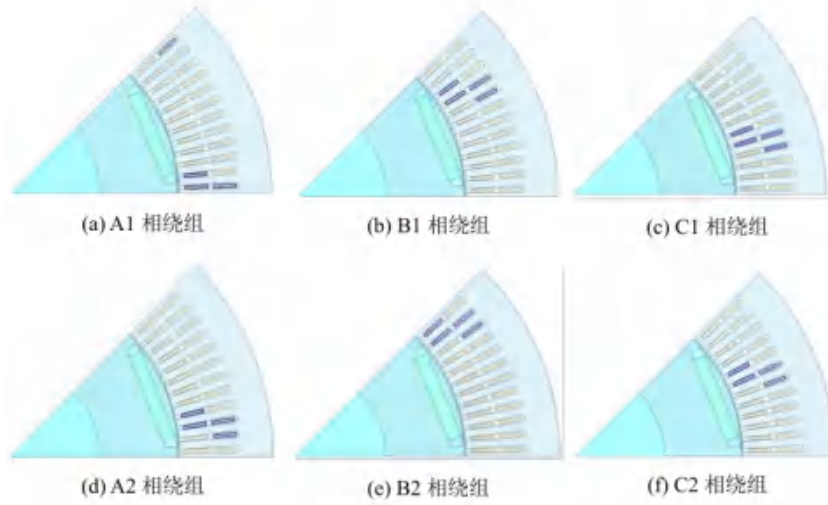


图 2 六相电机的绕组分布

②网格剖分将连续的物理域离散化为有限个单元,在 Ansoft Maxwell 中使用自动网格生成工具,根据模型的复杂程度和分析需求,设置合适的网格密度,精细的网格可提高计算精度,但也会增加计算时间。因此,需要在精度和计算效率之间找到平衡点。

③材料定义及条件设置。定义材料属性是模拟电机电磁行为的基础,在 Ansoft Maxwell 中要为每个部件指定相应的材料,如硅钢片的磁导率、永磁体剩磁、矫顽力等。还要设置边界条件和激励源,如绕组的电流、转子的转速等,真实模拟实际工作状态。

④求解及后处理。设置好所有参数后,启动求解器进行电磁场的计算,Ansoft Maxwell 提供多种求解器,根据问题的特点选择最合适的求解方法。求解完成后,利用后处理功能分析结果,如磁力线分布、电磁力、转矩、损耗等,这些结果对于评估电机性能和优化设计至关重要。

3.3 空载仿真分析

在内置式永磁电机的电磁设计中,要求在空载状态下隔磁桥处要尽可能达到饱和,而想要实现该设计目标,可增强电机的磁通路径,提高磁通的利用效率。同时,为了保护电机材料不受过高的磁密影响,气隙及齿部磁密需要控制在 1.65T 以下。这样设计的目的在于,确保主磁通从气隙进入铁芯后,能够几乎全部从齿部通过,从而优化磁通的分布和利用。通过对六相电机进行空载状态下的电磁仿真分析,直观地观察到电机内部的磁密分布情况(如图 3 所示)。

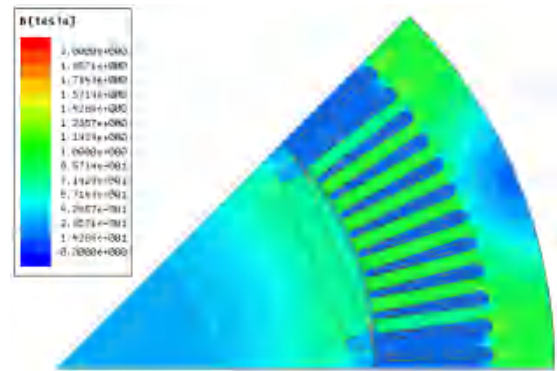


图 3 电机空载时的磁密云图

通过分析上述磁密云图,隔磁桥处磁密已经超过 1.65T,达到了饱和状态,表明设计中的隔磁桥部分已经有效地实现磁通的集中和利用。定子齿部出现的最大磁密约为 1.0T,而气隙处的最大磁密约为 0.8T,这些数值均低于 1.65T 的设计上限,说明在空载状态下,电机的气隙和齿部磁密得到良好的控制,保证磁通的有效传递,避免因磁密过高,从而出现材料损耗和性能下降问题。

3.4 负载仿真分析

为了验证设计的有效性,进行负载仿真分析。仿真模型包括电机本体、控制系统和负载模型,基于电磁设计参数,建立电机的数学模型,包括电压方程、磁链方程和转矩方程。控制系统采用矢量控制策略,确保电机在不同负载条件下的稳定运行。真实模拟不同负载条件,包括恒定负载、变负载和动态负载,以评估电机在各种工况下的性能。通过仿真结果分析电流波形,特别是关注 3 及其整倍次谐波电流的消除

效果^[2]。结果显示，双 Y 型连接方式有效地消除了这些谐波电流，显著提高了电机的电能质量。其转速为 3000rpm，输出功率 350kW 时，计算出六相电机和三相电机仿真结果如表 2 所示。

表 2 电机仿真结果

参数	六相电机	三相电机
线电压 (V)	529.0	548.1
线电流 (A)	215.2	407.6
基波电流幅值 (A)	296.0A	578.2
端部电阻 (Ω)	0.0113	0.0065
输出平均转矩 (Nm)	1114.7	1114.4
转矩脉动系数	6.56%	7.46%
绕组电流密度 (A/mm ²)	5.36	5.63
输入平均功率 (kW)	355.99	356.36
铜耗 (kW)	3.14	3.30
铁耗 (kW)	2.31	2.56
效率	98.32%	98.21%

六相电机的线电压略低于三相电机，而线电流则显著低于三相电机，表明六相电机在相同功率输出下，电流需求较小，有助于减少线路损耗。六相电机的基波电流幅值也低于三相电机，这意味着六相电机在电流谐波分量上可能更为优越，有助于提高电机的运行效率和减少电磁干扰。两种电机的输出平均转矩几乎相同，表明在提供相同机械功率的情况下，两种电机的设计都达到了预期的性能。六相电机的转矩脉动系数低于三相电机，说明六相电机在运行时产生的转

矩波动更小，有助于提高机械系统的稳定性和寿命。六相电机的铜耗和铁耗均低于三相电机，效率略高于三相电机，虽然差距不大，但在长期运行和大功率应用中，这种微小的效率提升可能会带来显著的机电能量转换效益。

通过上述仿真结果的对比分析，我们可以看出，在相同的工作条件下，六相电机在多个关键性能指标上表现优于三相电机。特别是在效率、转矩脉动等方面，六相电机显示出明显的优势。因此，对于追求高效率、低损耗和稳定运行的应用场景，六相电机是更优的选择。而具体选择还需根据实际应用需求、成本预算、系统集成等因素综合考虑^[3]。

4 结语

综上所述，论文旨在探讨六相永磁同步发电机的电磁设计原理及其对性能的影响，介绍六相永磁同步发电机的基本结构和工作原理，分析其相较于传统三相发电机的优势，详细讨论电磁设计中的关键技术，通过仿真和试验结合方法，评估六相永磁同步发电机在实际应用中的性能表现，为未来工程应用提供技术参考。

参考文献

- [1] 邢军强,孔莹莹,汪明武.10MW多相分瓣永磁直驱风力发电机设计研究[J].大电机技术,2021(2):25-31.
- [2] 刘洪文,才庆龙.六相双Y移30°绕组结构及其应用优势[J].防爆电机,2010,45(4):19-22.
- [3] 沈阳工程学院,沈阳工业大学.一种基于模型预测的多绕组永磁风力发电机效率优化方法:CN201911161994.4[P]. 2020-03-13.